



Centro de Ciencias Ambientales EULA-Chile
Universidad de Concepción



INFORME FINAL

ESTUDIO DE RIESGOS Y PROTECCIÓN AMBIENTAL DEL ÁREA URBANA DE LA COMUNA DE PUERTO MONTT

Enero 06 del 2016

Índice de Contenido

Índice de Figuras	iv
Índice de Tablas.....	viii
I. Introducción	1
II. Área de estudio	4
III. Etapas del estudio	5
IV. ASPECTOS METODOLOGICOS	5
2.1 Riesgo	5
2.1.1 Análisis de la peligrosidad y catastro de peligros existentes.....	6
A) Zonas inundables.....	6
A.1) Tsunami	6
A.2) Inundación por cursos hídricos superficiales y anegamiento.....	11
B) Remociones en masa.....	14
C) Actividad volcánica	20
D) Actividad o Intervención Humana.....	22
2.1.2 Análisis de vulnerabilidad y exposición.....	26
2.1.3 Análisis del riesgo	29
2.2 Protección ambiental	29
A) Zonas o elementos naturales protegidos por el ordenamiento jurídico vigente	32
V. RESULTADOS.....	33
1. Análisis de riesgo.....	33
1.1 Análisis de peligrosidad y catastro de peligros existentes	33
1.1.1 Zonas inundables.....	33
A.1) Tsunami	33
A.2) Inundación por cursos hídricos superficiales y anegamientos.....	42
1.1.2 Remociones en masa.....	63
1.1.3 Actividad volcánica.....	89
1.1.4 Actividad o intervención humana.....	104
a) Accidentes de tránsito.....	104
b) Incendios forestales	110
c) Emergencias químicas.....	113
1.2 Análisis de vulnerabilidad y exposición	116
a) Caracterización de la vulnerabilidad del medio construido.....	116

b) Análisis de la vulnerabilidad	119
1.3 Análisis de riesgo	121
2. Protección ambiental.....	126
2.1 Áreas o elementos naturales reconocidos por el ordenamiento jurídico vigente.	126
2.2 Áreas de Valor Ambiental basado en la valoración de Servicios Ecosistémicos.....	128
2.2.1 Identificación de Unidades Homogéneas para la valoración de Servicios Ecosistémicos.....	128
2.2.2 Identificación y descripción de Servicios Ecosistémicos	130
2.2.3 Valoración de las áreas homogéneas según SE	132
2.3 Efectos de la urbanización sobre humedales	136
2.4 Efectos de la explotación del bosque nativo	136
2.5 Marco legal asociado a la protección de áreas de valor natural	137
2.6 Patrimonio cultural.....	140
VI. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES	144
1. Medidas de mitigación y propuestas para la zonificación urbana	144
2. Medidas de manejo del riesgo.....	153
3. Lineamientos de futuros estudios	153
4. Conclusiones.....	155
V. BIBLIOGRAFÍA.....	159

Índice de Figuras

Figura N°1. Área de estudio proyecto: a) contexto sudamericano y nacional; b) contexto regional; c) contexto local; d) área específica, línea negra indica límite norte PRC actual, línea roja indica área actual de análisis	4
Figura N°2. Esquema metodológico por etapas estudio de riesgo y protección ambiental comuna de Puerto Montt	5
Figura N°3. Esquema metodológico general del estudio de riesgo y protección ambiental (RPA) comuna de Puerto Montt	6
Figura N°4. Mallas usadas en la modelación numérica. Malla 1 de 120" (~3.7km) de resolución. Malla 2 de 30" (~925m) de resolución. Malla 3 de 6" (~185m) y malla 4 de 1" (~30m) de resolución.	8
Figura N°5. Parámetros usados en la formulación de Okada (1985) para la generación de la condición inicial.	8
Figura N°6. Deformación inicial de la superficie libre para los modelos homogéneo y no homogéneo.	9
Figura N°7. Variación de la marea en Puerto Montt para el mes de Octubre de 2015 (fuente: http://www.ioc-sealevelmonitoring.org)	10
Figura N°8. Terrazas de inundación con períodos de retorno hipotéticos.	11
Figura N°9. Esquema metodológico para la evaluación de procesos de remoción en masa	15
Figura N°10. Eventos sísmicos en el Sur de Chile ocurridos en la misma zona sísmica del evento de 1960 (Melnik et al 2009).	34
Figura N°11. Esquema muestra la zona de activación sismogénica y consecuente generación de tsunamis.	36
Figura N°12. Deformaciones cosísmicas calculadas con el modelo numérico para el sismo de 1960.	37
Figura N°13. Secuencia de imágenes que representan la propagación del tsunami de 1960 desde el Océano Pacífico hacia el Golfo Corcovado y Golfo de Ancud	38
Figura N°14. Superior: Alturas de inundación para la malla 4. El asterisco indica la ubicación del mareógrafo virtual "M" para obtención de la serie de tiempo. Inferior: Serie de tiempo para 10 horas de simulación.	39
Figura N°15. Profundidades de flujo	40
Figura N°16. Peligrosidad por Tsunami	41
Figura N°17. Cantidad de puntos conflictivos de anegamientos por década para la comuna de Puerto Montt.	42
Figura N°18. Distribución mensual de puntos críticos por anegamientos: área urbana de Puerto Montt.	43
Figura N°19. Distribución espacial puntos críticos de anegamientos en la zona urbana de Puerto Montt, décadas 1950-2000.	44
Figura N°20. Puntos críticos por anegamientos área urbana de Puerto Montt, Período 2010-2015	45
Figura N°21. Carta Geológica área urbana de Puerto Montt	47
Figura N°22. Depósitos aluviales, principalmente cantos rodados en matriz arenosa. Estero Pelluco.	48
Figura N°23. Nivel de peligrosidad por anegamiento, según litología.	49
Figura N°24. Histograma de pendientes zona urbana Puerto Montt	50

Figura N°25. Histograma de frecuencias altimétricas para análisis de anegamientos	50
Figura N°26. Nivel de peligrosidad por anegamiento, según factor pendientes	51
Figura N°27. Vista panorámica hacia el sector de Alerce, se observa una topografía plana con suaves lomajes y algunos rellenos antrópicos.	52
Figura N°28. Nivel de peligrosidad por anegamiento, según factor morfológico	53
Figura N°29. Anegamientos Puerto Montt Junio 2014: Sector Angelmó	54
Figura N° 30. Peligrosidad por anegamientos, área urbana de Puerto Montt	55
Figura N°31. Microbasurales al interior del cauce del río Negro, sector de Alerce.	58
Figura 32. Trabajo de terreno para topobatimetría, río Negro (Alerce).	60
Figura N° 33. Río Arenas agua arriba de la ruta a Alerce, se observa la diferencia topográfica a la Izquierda (viviendas) y la llanura inundable a la derecha.	61
Figura N°34. Zonas susceptibles al peligro de inundación por desbordes de cauces	62
Figura N°35. Laderas urbanizadas, planicie fluvio-glaciario, Población Modelo.	65
Figura N°36. Laderas urbanizadas, fotografía desde sector Angelmó	65
Figura N°37. Geomorfología del área urbana de la comuna de Puerto Montt.	66
Figura N°38. Terraza fluvio-glaciario (materiales constituyentes).	67
Figura N°39. Nivel de peligrosidad a remoción en masa según geomorfología.	68
Figura N°40. Laderas con pendiente escarpada y peligro Muy Alto, Quebrada Angelmó.	69
Figura N°41. Nivel de peligrosidad a remoción en masa según el grado de pendiente.	70
Figura N°42. Laderas con cubierta vegetal matorral y herbácea.	71
Figura N°43. Nivel de peligrosidad a remoción en masa según el grado de cubierta vegetal.	72
Figura N° 44. Ladera con orientación E – S – SE – SW, Sector quebrada Angelmó.	73
Figura N°45. Nivel de peligrosidad a remoción en masa según el grado de orientación de la ladera.	74
Figura N°46. Volumen deslizamiento rotacional, Isla Tenglo.	76
Figura N°47. Volumen deslizamiento rotacional con desprendimiento, Población Modelo.	77
Figura N° 48. Deslizamiento rotacional, ladera Mac Iver, Población Modelo.	78
Figura N° 49. Deslizamiento rotacional con desprendimiento, población Ebensperger.	79
Figura N°50. Distribución de procesos de mayor magnitud.	80
Figura N°51. Niveles de peligrosidad por remoción en masa según factores desencadenantes	82
Figura N°52. Laderas intervenidas por ocupación humana, Población Modelo.	83
Figura N°53. Laderas intervenidas con peligro Muy Alto, Población Modelo.	83
Figura N°54. Precipitaciones máximas en 24 horas del periodo 1958 – 2011. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.	84
Figura N°55. Probabilidad de excedencia del registro de precipitación mensual máxima del periodo 1958 – 2011. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.	85
Figura N°56. Periodo de retorno del registro de precipitación mensual máxima del periodo 1958 – 2011. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.	86
Figura N°57. Curvas I-DF del registro de precipitación mensual máxima del periodo 1958 – 2011. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.	87
Figura N°58. Curvas I-D mayor a 3 horas del registro de precipitación mensual máxima del periodo 1958 – 2011. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.	87
Figura N°59. Intensidad de precipitación y umbrales de precipitación. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.	88
Figura N°60. Alcance teórico de corrientes de densidad piroclástica (CDP) que presenten una pérdida energética relacionada a un coeficiente de Heim de 0.1,	96

liberadas a 2.5km de altura. La línea de contorno roja delimita el alcance máximo. Los colores de azul a rojo indican áreas con un aumento en el volumen de material que sería depositado, y las áreas con mayor probabilidad de ser afectadas. Las zonas que serían efectivamente afectadas por la ocurrencia de un CDP dependerán de la dirección que tome el flujo. La imagen de fondo fue tomada de Google Earth. Esta simulación tiene como propósito mostrar que aún con un CDP de gran movilidad la zona urbana de Puerto Montt sería difícilmente afectada. Aunque no se puede descartar por completo la ocurrencia de una CDP de estas características, se estima que su ocurrencia posee una muy baja probabilidad.

Figura N°61. Estadísticas de vientos para las alturas 5, 10, 15, 20 y 25 km. Las direcciones indican hacia donde el viento se dirige y las velocidades (cuadro inferior derecho) se expresan en m/s. Se utilizó la base de datos NCEP Reanalysis II, y considera 32140 perfiles entre 1990 y 2011, en el nodo de la grilla ubicado en -42.5 lat., -72.5 lon., a 130 km al sur del volcán Calbuco.	97
Figura N°62. Probabilidades de excedencia de acumulación de ceniza en diferentes localidades del área urbana de Puerto Montt (ver Tabla 6 con las coordenadas). Se incluye el caso de Ensenada para su comparación. Para realizar este análisis se consideró un escenario similar al ocurrido en la madrugada del 23 de abril de 2015. Este escenario corresponde a una de las erupciones individuales más explosivas ocurridas en la historia del volcán Calbuco.	100
Figura N°63. Distribución espacial de la probabilidad de excedencia (en porcentaje) para una acumulación de 1 kg/m ² . El triángulo muestra la ubicación del volcán Calbuco. Notar que los mayores valores de probabilidad se encuentran hacia el E del volcán, mientras que en el área urbana de Puerto Montt la probabilidad de alcanzar o exceder una acumulación de ceniza de 1 kg/m ² es de 0.5%.	102
Figura N°64. Distribución de caída de tefra en kg/m ² considerando el peor escenario de vientos encontrado en la base de datos utilizada. La erupción simulada tiene características similares a la ocurrida en la madrugada del 23 de abril de 2015 (Ver Tabla 5). En este escenario Puerto Montt puede recibir sobre 100 kg/m ² , lo cual puede provocar daños en techos de material ligero, además de otras consecuencias en el sistema eléctrico y alcantarillado; la salud de las personas también podría verse fuertemente afectada. Notar que la probabilidad de ocurrencia de una erupción con estas características, al mismo tiempo de presentarse un perfil de vientos, tiene una muy baja probabilidad.	103
Figura N°65. Tipos de accidentes, periodo 2010 - 2014 (porcentaje).	105
Figura N°66. Causas de accidentes, periodo 2010 - 2014 (porcentaje).	106
Figura N°67. Caminos principales en área urbana de Puerto Montt	109
Figura N°68. Paisaje resultado de la acción de incendios forestales en el sector de Alerce, principalmente la quema de Ulex europaeus.	111
Figura N°69. Distribución espacial de incendios por temporada, periodo 2009-2015	112
Figura N°70. Incendio en Laboratorio AquaGestión Febrero 2014)	113
Figura N°71. Incendio en sector de Planta AquaChile (Abril 2014)	113
Figura N°72. Peligro y Validación del modelo de peligrosidad por Incendios forestales.	115
Figura N°73. Vulnerabilidad por materialidad de la vivienda	117
Figura N°74. Vulnerabilidad por materialidad del Techo	118
Figura N°75. Carta de síntesis de Vulnerabilidad	120
Figura N°76. Carta de Riesgo por Tsunami	122
Figura N°77. Carta de Riesgo por Anegamiento	123
Figura N°78. Carta de Riesgo por Remociones	124

Figura N°79. Carta de Riesgo por Incendio	125
Figura N°80. Los elementos naturales del actual sistema de espacios públicos.	127
Figura N°81. Distribución geográfica de las coberturas de suelo usadas para la valoración de Servicios Ecosistémicos.	130
Figura N°82. Mapa de valoración cuantitativa de Servicios Ecosistémicos según cobertura de suelo.	134
Figura N°83. Mapa de valoración cualitativo de Servicios Ecosistémicos según cobertura de suelo	135
Figura N° 84. Inmuebles de Conservación Histórica y Zonas de Conservación Histórica	143

Índice de Tablas

Tabla N°1. Profesionales responsables estudios específicos	3
Tabla N°2. Parámetros sísmicos de las subfallas del evento principal de 1960	9
Tabla N°3. Causas o factores detonantes de inundaciones fluviales en Chile	12
Tabla N°4. Ejemplo de factores físico-naturales utilizando técnicas de EMC para evaluar anegamientos en SIG para el área urbana de Puerto Montt.	14
Tabla N°5. Factores condicionantes (Geomorfología, pendientes, cobertura vegetal y laderas) para la evaluación de peligrosidad de PRM.	16
Tabla N°6. Factores condicionantes (Granulometría y permeabilidad) para la evaluación de peligrosidad de PRM.	16
Tabla N°7. Escala de Importancia del proceso de Jerarquía Analítica	17
Tabla N°8. Matriz de Jerarquías Analíticas (MJA)	17
Tabla N°9. Evaluación de factores condicionantes mediante (EMC)	18
Tabla N°10. Riesgos antrópicos.	23
Tabla N°11. Eventos considerados para análisis de recurrencia histórica	24
Tabla N°12. Reclasificación de los criterios físico-ambientales según nivel de peligro.	26
Tabla N° 13. Elementos para considerar en la vulnerabilidad del medio construido.	27
Tabla N°14. Factores y variables para el análisis de vulnerabilidad	28
Tabla N°15. Matriz de multicriterio para el riesgo	29
Tabla N°16. Alturas de inundación en el sur de Chile producto del tsunami de 1960 (Takahashi, 1961).	35
Tabla N°17. Valores de Precipitaciones Máx. Anuales 24 hrs, por período de retorno, estación El Tepual.	56
Tabla N°18. Metodología de análisis de zonas inundables en los principales cauces.	59
Tabla N°19. Caudales Máximos para distintos periodos de retorno para las cuencas estudio.	60
Tabla N°20. Distribución de geoformas y nivel de peligrosidad (km ²).	67
Tabla N° 21. Distribución de rangos de pendiente y nivel de peligrosidad (km ²).	69
Tabla N°22. Distribución de rangos de cubierta vegetal de las laderas y nivel de peligrosidad (km ²).	71
Tabla N°23. Distribución de rangos de orientación de las laderas y nivel de peligrosidad (km ²).	73
Tabla N°24. Volumen de deslizamiento de procesos de mayor magnitud.	76
Tabla N°25. Niveles de peligrosidad por remoción masa (km ²).	81
Tabla N°26. Ubicación de algunos centros volcánicos principales y su distancia a la ciudad de Puerto Montt (centro cívico).	89
Tabla N°27. Evaluación de la posibilidad de alcance con impacto de consideración en la zona urbana de Puerto Montt, de los principales fenómenos volcánicos que podrían desarrollarse durante una erupción volcánica. La ubicación de los centros volcánicos considerados se entrega en la Tabla 26.	90
Tabla N°28. Resumen de la cronología eruptiva histórica del volcán Calbuco. IEV se refiere al Índice de Explosividad Volcánica, el cual se relaciona con la magnitud de la erupción.	93
Tabla N°29. Estadística de vientos por ángulo de avance y velocidad, a una altura de 10 km. De 32140 muestras, los vientos que se dirigen hacia el área urbana de	99

Puerto Montt (ángulos 210-270) son 237 en total, lo cual significa una probabilidad de 0.7% de que una erupción ocurrida en el volcán Calbuco, en cualquier día del año, provoque la caída de ceniza en Puerto Montt. En el caso de una erupción del volcán Chaitén, los vientos en los ángulos 315-0 suman 1533, lo cual entrega un 4.8% de probabilidad de que la ceniza se dirija hacia Puerto Montt.	
Tabla N°30. Parámetros de entrada ocupados en el modelo Tephra2, representando una erupción de similares características a la ocurrida en la madrugada del 23 de Abril de 2015.	100
Tabla N°31. Coordenadas de los lugares utilizados en el análisis de caída de ceniza. Las coordenadas corresponden a la Proyección Universal de Mercator (UTM), Zona 18S.	101
Tabla N°32. Número total de accidentes comuna de Puerto Montt, según área urbana o rural, años 2010 a 2014	104
Tabla N°33. Tipo de accidente por año, 2010 a 2014.	105
Tabla N°34. Causa de accidentes por año, 2010 a 2014.	106
Tabla N°35. Accidentes según estado de calzada, años 2010 a 2014.	107
Tabla N°36. Afectados por accidentes según año y gravedad.	107
Tabla N°37. Número de accidentes según ruta y año, comuna de Puerto Montt	108
Tabla N° 38. Causas de accidentes por rutas	108
Tabla N°39. Número de incendios por temporada, comuna de Puerto Montt.	110
Tabla N°40. Cobertura vegetal afectada por incendio según temporada.	110
Tabla N°41. Resumen de la caracterización de la vulnerabilidad del medio construido, según variables relevantes.	116
Tabla N°42. Población expuesta por tipo de peligro	119
Tabla N°43. Vivienda expuesta por tipo de peligro	119
Tabla N°44. Superficie de Riesgo para los diferentes peligros en ha	121
Tabla N°45. Coberturas de suelo usadas para la valoración de Servicios Ecosistémicos	129
Tabla N°46. Descripción de Servicios Ecosistémicos seleccionados (basado Esse et al. 2014)	131
Tabla N°47. Matriz de valoración de Servicios Ecosistémicos según Unidades Homogéneas	133
Tabla N°48. Listado de especies con problemas de conservación potencialmente presente en el área de estudio	140
Tabla N°49. Inmuebles de Conservación Histórica y Zonas de Conservación Histórica	142
Tabla N°50. Medidas de mitigación y recomendaciones para la zonificación urbana.	149

I. Introducción

La UNDRRO¹, define riesgo natural como el “grado de pérdida previsto debido a un fenómeno natural determinado y en función tanto del peligro natural como de la vulnerabilidad” (Naciones Unidas, 1984, p.80, citado por Aneas, 2000), Wilches-Chaux (en Maskrey, 1993) define el riesgo como “cualquier fenómeno de origen natural o humano que signifique un cambio en el medio ambiente donde se localiza una comunidad determinada, que sea vulnerable a ese fenómeno”. Así el riesgo es la probabilidad de ocurrencia de un fenómeno potencialmente peligroso en un medio donde existan actividades o infraestructura humana. Intervienen una serie de factores denominados “factores del riesgo” (Olcina y Ayala-Carcedo, 2006), que son aquellos que deben darse necesariamente para que exista un daño esperable, en concreto: peligrosidad o amenaza, exposición y vulnerabilidad.

Es necesario hacer la distinción entre fenómeno natural y peligro natural. Los granizos, erupciones de volcanes, tormentas, tsunamis, son sólo fenómenos naturales, se convierten en peligros cuando actúan en las áreas pobladas por humanos (Rojas y Martínez, 2011). Como señala Smith (1992) citado por Aneas (2000): “los peligros naturales resultan de los conflictos de los procesos geofísicos con la gente”, en la misma línea Lavell (2001?, p.2) define amenaza como “la posibilidad de la ocurrencia de un evento físico que puede causar algún tipo de daño a la sociedad”, sin embargo no todo fenómeno natural es peligroso, constituyen un peligro “por su tipo y magnitud así por lo sorpresivo de su ocurrencia” (Romero y Maskrey, en Maskrey 1993).

El factor exposición, se encuentra eliminado de algunos modelos de análisis de riesgos, ya que algunos autores lo consideran dentro del factor vulnerabilidad. Olcina y Ayala-Carcedo (2006, p.65) definen exposición como el “conjunto de bienes a preservar que pueden ser dañados por la acción de un peligro. Puede ser humana, económica, estructural o ecológica. La exposición en un mismo emplazamiento puede variar a lo largo del día o estacionalmente”. En este estudio el factor exposición se evaluará dentro del factor vulnerabilidad, según el modelo de SUBDERE² (2011).

Un análisis de vulnerabilidad, según Cardona (1993), es un proceso por el cual se determina la predisposición a la pérdida de un elemento o grupo de elementos ante un peligro específico. Para Lavell (2001?), la vulnerabilidad corresponde a las características diferenciadas de la sociedad, o sus subconjuntos, predispuestos al sufrimiento de daños frente a un evento físico, dificultando la recuperación posterior, manifestándose por medio de distintos componentes, siendo cada uno de ellos resultado de un proceso social determinado. Sostiene Wilches-Chaux (en Maskrey, 1993) que el concepto de vulnerabilidad es eminentemente social, por la referencia que impide a un sistema humano adaptarse a su medio ambiente.

La materialización del riesgo, generalmente deriva en desastres y catástrofes, que se son producto de la correlación entre un fenómeno natural peligroso y determinadas condiciones socioeconómicas y físicas vulnerables (Romero y Maskrey, en Maskrey 1993). Cardona (1993), clasifica las pérdidas de los desastres en directas e indirectas. Las directas, señala “están relacionadas con el daño físico, expresado en víctimas,

¹ Oficina de Coordinación para el Socorro en caso de Desastres, perteneciente a Naciones Unidas.

² Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo, Gobierno de Chile.

en la infraestructura de servicios públicos, en las edificaciones, el espacio urbano, la industria, el comercio y el deterioro del medio ambiente, es decir, la alteración física del hábitat”. Mientras que las pérdidas indirectas se pueden subdividir en sociales y económicas. Entre las sociales están la “interrupción del transporte, de los servicios públicos, de los medios de información y la desfavorable imagen que puede tomar una región con respecto a otras; y en efectos económicos la alteración del comercio y la industria como consecuencia de la baja en la producción, la desmotivación de la inversión y la generación de gastos de rehabilitación y reconstrucción”.

La diferencia entre los conceptos radica en la dicotomía entre probabilidad y ocurrencia, así el riesgo es la probabilidad, mientras la catástrofe y el desastre corresponden a la materialización del riesgo (Lavell, 2001), pero con distintos niveles de daños. Sin ir más lejos Pagney (1994) citado por Olcina (2006, p.13), habla del riesgo como “la espera de la catástrofe”, en clara alusión a la materialización de este. Pero esa denominación de catástrofe y/o desastre se adquiere cuando “el hombre y/o sus actividades se encuentran involucrados” (Whittow, 1984), dependiendo del grado de daño sufrido por los mismos.

Cada tipo de riesgo tiene diferentes características que afectan la capacidad predicción y alerta adecuada y efectiva a la población. El seguimiento y la predicción de los riesgos son en función del lugar y del tiempo específicos. Las técnicas de teledetección y el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) facilitan el manejo y análisis de la información para la estimación de la probabilidad de que un fenómeno peligroso se dé en un lugar y en un momento determinado.

Aun cuando algunos riesgos pueden ser considerados exclusivamente de origen natural cada día aumentan más los riesgos debidos a la intervención humana en relación con el medio natural. Todas estas actuaciones del hombre, ya sea a escala local o global, pueden ser detectadas desde plataformas aerotransportadas y desde satélites de observación de la Tierra y, posteriormente, analizadas a través del uso de SIG. Otro aspecto considerable cuando se trata de reconocer un determinado riesgo en un territorio específico es la posibilidad de que se dé un enmascaramiento entre diversos tipos de riesgos, producto que la intervención humana puede modificar las características de un determinado riesgo, su distribución espacial, su intensidad y frecuencia, llegando incluso a poder originar uno nuevo. Sofisticadas técnicas de teledetección y herramientas de análisis SIG pueden ayudar a resolver eficientemente este tipo de problemáticas y apoyar, adecuadamente, la toma de decisiones en ámbito de la planificación territorial. En efecto, para preparar y reducir los impactos de los desastres naturales, cada día se hace más frecuente el uso de la teledetección espacial y herramientas SIG. De una forma amplia, el nombre de Teledetección o percepción remota, comprende el conjunto de procesos, técnicas y aplicaciones que intervienen en la configuración o análisis de las imágenes y otros datos registrados desde el espacio.

El territorio visto desde el espacio mediante los sensores multiespectrales de los satélites constituye una información con características que permite obtener información adicional a las obtenidas con métodos tradicionales. Las técnicas de teledetección facilitan la recolección y seguimiento de datos sobre las condiciones atmosféricas y las características de la superficie terrestre que reflejan riesgos inminentes, a la vez que permiten evaluar los desastres provocados por ellos. Esta información incluye dos categorías de datos:

- valores numéricos de los parámetros geofísicos detectados o medidas relativas (por ejemplo, modelos de elevación digital).

- imágenes captadas en varias bandas del espectro electromagnético.

El tratamiento de los datos permite obtener una aproximación integrada y multidisciplinar del conocimiento de grandes extensiones. En el contexto del proyecto, se utilizarán imágenes satelitales de alta resolución (sensor SPOT 7, con fecha de 2 de mayo de 2015, y resolución espacial de 1,5 metros en el canal pancromático y 6 metros en los canales multiespectrales), para el levantamiento de información actualizada relacionada con la ocupación del territorio y geofomas asociadas a riesgos naturales y antrópicos. Los resultados obtenidos serán evaluados y validados a través del trabajo en terreno. En este contexto, los estudios de cada tipo de riesgo y protección ambiental para la zona urbana de Puerto Montt, se encuentran a cargo de profesionales con experiencia en la evaluación de cada peligro específico ya sea en diversas consultorías o mediante investigaciones publicadas en revistas de especialidad (Tabla 1).

Tabla N° 1. Profesionales responsables estudios específicos

Estudio específico	Profesional(es) responsable(s)
Director del estudio	Dr. Octavio Rojas
Subdirector del estudio	Dr. Mauricio Aguayo
Tsunami	Dr. Rafael Aránguiz
Inundaciones-Anegamiento	Dr. Octavio Rojas - Dr. Oscar Link- Luis Flores Flores
Remociones en masa	Dra. Carolina Martínez
Actividad volcánica	Dr. José Palma
Intervención humana	Mg. Marcelo Araya - Mg. Paulina Flores - Dr. Octavio Rojas
Protección Ambiental	Dr. Mauricio Aguayo - MSc. Jorge Féliz
Vulnerabilidad	Dr. Octavio Rojas - Mg. Paulina Flores
Cartografía	MSc. Jorge Féliz

Fuente: Elaboración propia

El estudio de riesgo y protección ambiental del área urbana de la comuna de Puerto Montt, destinado a evaluar la pertinencia de los asentamientos poblaciones en el territorio y asegurar la protección de los recursos de valor natural, se realizará en conformidad a la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, O.G.C.U, artículo 2.1.10 (relativo al Plan Regulador Comunal) y 2.1.17 (relativo a zonas no edificables o áreas de riesgo) y 2.1.18 (relativo a zonas de protección de recursos de valor natural o patrimonial cultural). Así entonces, los objetivos generales del presente estudio son:

a) Definir riesgos naturales reales o potenciales para el emplazamiento o consolidación de asentamientos humanos dentro del área urbana de Puerto Montt, a través de una zonificación de riesgos, señalando las condiciones o prevenciones que se deben adoptar para subsanar o mitigar los efectos de estos peligros.

b) Resguardar el patrimonio ambiental del área urbana de Puerto Montt, reconociendo todas las zonas o elemento naturales protegidos por el ordenamiento jurídico vigente, tales como: borde costeros y marítimos, lacustres o fluviales, parque nacionales, reservas nacionales y monumentos naturales.

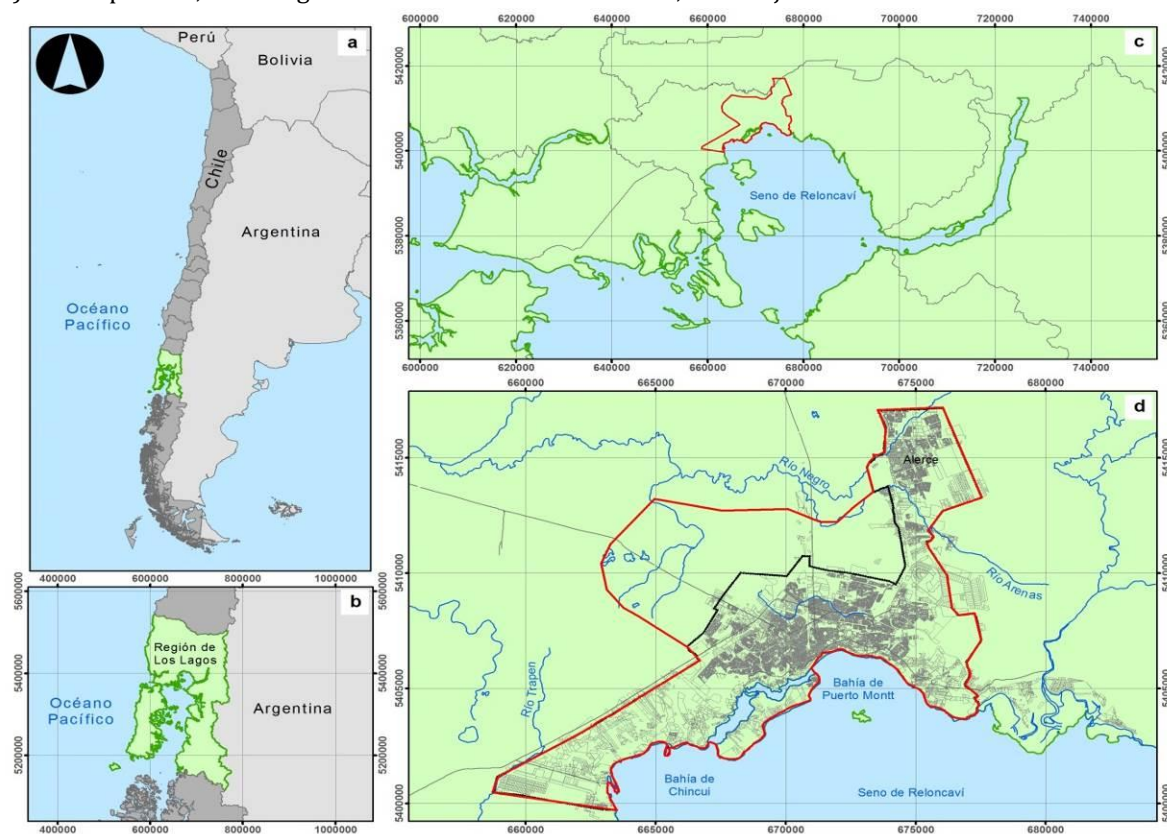
En este contexto, el presente informe entrega los resultados finales del estudio de **“Riesgos y Protección Ambiental del área urbana de la comuna de Puerto Montt”**.

II. Área de estudio

La ciudad de Puerto Montt se localiza en la provincia de Llanquihue, Región de Los Lagos (41°28'S-72°57'W). Posee una superficie comunal de 1.673 km² y según el último Censo de 2012, la población es de 238.455 habitantes, incluyendo la Isla Tenglo (INE, 2012). La ciudad se desarrolló en sus inicios a través del proceso de colonización hacia 1850 y es designada capital regional en 1974 (Figura N°1). A partir de los años '80 la ciudad registra un explosivo crecimiento urbano gracias a las actividades económicas forestal y acuicultura, la integración ferroviaria al centro del país y la atracción de migración rural, generando problemas de expansión urbana dispersa y forma caótica de su trama urbana, característico de las denominadas ciudades intermedias (Saavedra, 2007; Rojas et al., 2015).

El área de estudio, corresponde a la zona urbana de la comuna de puerto Montt, definida en el Plan Regulador Comunal del año 2009, Título I, Art. 1. Cuya superficie comprende un total aproximado de 9.127 hectáreas (ha). El mayor nivel de detalle corresponderá al área urbana de Puerto Montt y la localidad de Alerce; adicionalmente se contempla una ampliación del análisis hacia el sector norte de la comuna (Figura 1), considerando una superficie total final de 13.330 ha.

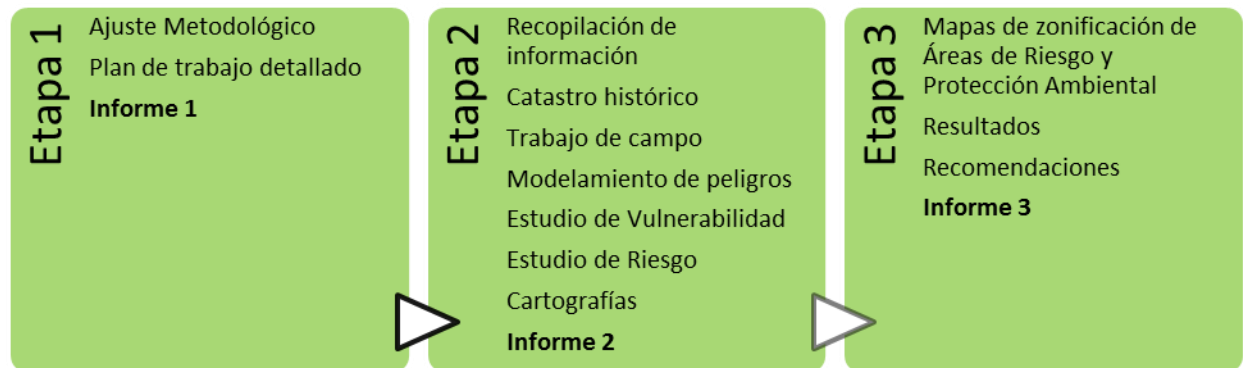
Figura N°1. Área de estudio proyecto: a) contexto sudamericano y nacional; b) contexto regional; c) contexto local; d) área específica, línea negra indica límite norte PRC actual, línea roja indica área actual de análisis.



III. Etapas del estudio

El "ESTUDIO DE RIESGOS Y PROTECCIÓN AMBIENTAL DEL ÁREA URBANA DE LA COMUNA DE PUERTO MONTT", se estructura en 3 etapas según los términos técnicos de referencia, cuyos principales hitos se detallan en la Figura 2. El presente informe corresponde a la ETAPA N° 3.

Figura N°2. Esquema metodológico por etapas estudio de riesgo y protección ambiental comuna de Puerto Montt.



Fuente: Elaboración propia, según términos técnicos de referencia.

IV. ASPECTOS METODOLOGICOS

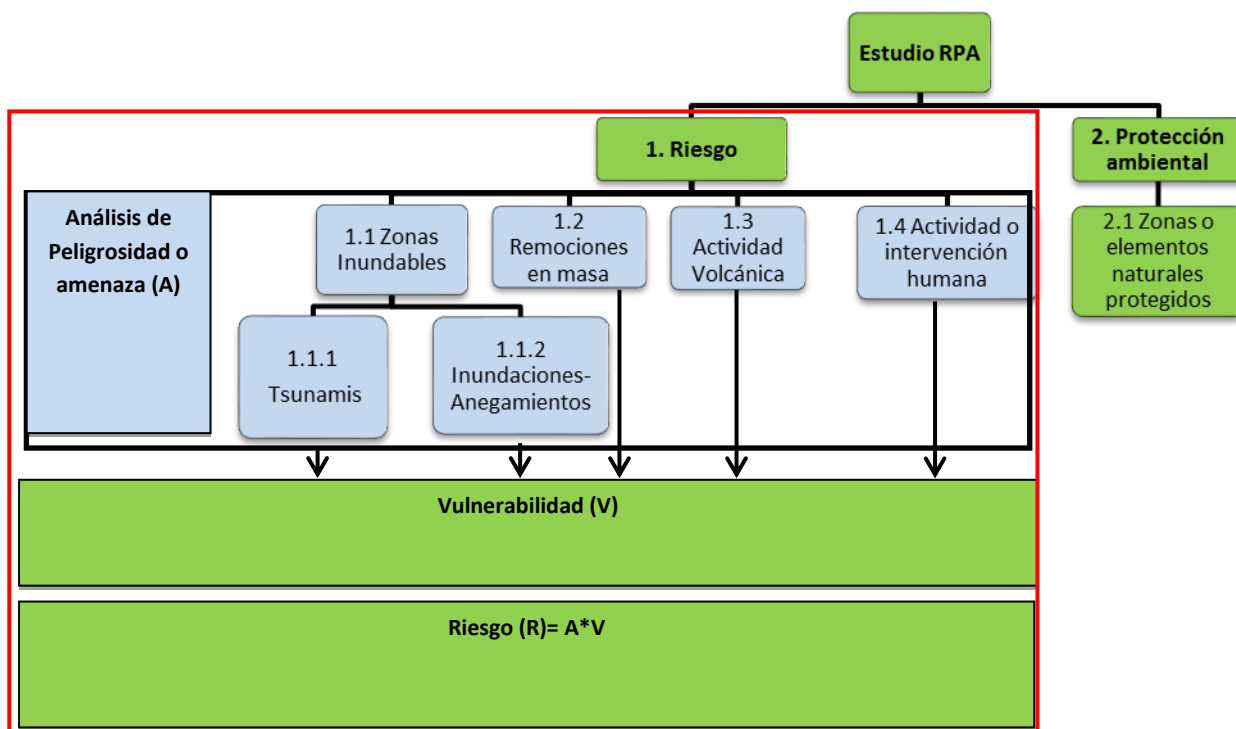
2.1 Riesgo

Para el análisis de riesgo se utilizará el modelo conceptual $R=A*V$, que considera la interacción de los factores de **(A)** peligrosidad (amenaza) y **(V)** vulnerabilidad. La evaluación de la peligrosidad se realizará para: A) Zonas inundables debido tsunamis e inundación por cursos hídricos superficiales y anegamientos; B) Remociones en masa, C) Actividad volcánica y D) Actividad o intervención humana (Figura N°3).

La cartografía elaborada en formato shape mediante el uso de SIG, estará asociada al datum WGS 84/UTM Huso 18. A escala 1:10.000

Los estudios de inundaciones-anegamientos y remociones en masa e serán complementados con una **carta geomorfológica** de detalle a escala 1:10000 según datos de terreno y bibliográficos. Adicionalmente se realizará una **caracterización geológica** del área según información existente.

Figura N°3. Esquema metodológico general del estudio de riesgo y protección ambiental (RPA) comuna de Puerto Montt



Fuente: Elaboración propia, según términos técnicos de la propuesta. Línea Negra indica la fase de análisis de peligrosidad. Línea Roja, indica la fase general de análisis de riesgo.

2.1.1 Análisis de la peligrosidad y catastro de peligros existentes

A) Zonas inundables

A.1) Tsunami

Es sabido que el principal generador de tsunamis está vinculado a dislocaciones en el fondo del mar. Este fenómeno provoca, en el caso de zonas de subducción, súbitos cambios de posición a lo largo del contacto sismogénico inter-placa y por consiguiente, en ambos bloques, el continental y oceánico. Este último genera un desplazamiento del suelo oceánico, y por tanto, de la columna de agua que, en su expresión máxima, se ubica por arriba de la zona que comprende la fosa oceánica (4-6 km de profundidad). Entonces, dado que Chile se ubica sobre la zona de subducción de la Placa de Nazca bajo la Sudamericana dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico, la costa del país se encuentra permanentemente expuesta a la amenaza de tsunamis. La recurrencia histórica de sismos tsunamigénicos es alta, destacando los eventos de 1868, 1877 en el norte de Chile y los terremotos recientes de 2014 y 2010. Aún más reciente es el evento de septiembre de 2015 de magnitud 8.3 que afectó la Región de Coquimbo, el cual ocasionó daños en Coquimbo, Tongoy, Los Vilos y varias instalaciones portuarias y de pesca artesanal.

De particular interés es el evento de 1960, el cual corresponde al evento de mayor magnitud registrado en la historia con una magnitud de momento 9.5. Este tsunami generó alturas de inundación de hasta 10 m en Chile con un run-up máximo de 25m en Isla Mocha. Este tsunami también arribó a las costas de Japón con amplitudes máximas de hasta 6m en los puertos de Kamaishi y Ofunato.

El objetivo general del presente estudio de peligro de tsunamis es analizar el comportamiento de tsunamis y estimar alturas máximas de inundación en el área urbana de Puerto Montt.

De acuerdo al objetivo general, es posible definir los siguientes objetivos específicos:

- ✚ Definir un evento sísmico máximo creíble que generaría tsunami;
- ✚ Estimar las alturas de inundación asociadas a los escenarios seleccionados;
- ✚ Construir mapas de inundación y profundidad de flujo.

Metodología de trabajo

Se considera la caracterización de las fuentes sísmicas que pudieren generar tsunamis que afectarían la zona en estudio. Posteriormente, se utiliza un modelo numérico (anexo Digital I-0; 1) para la generación y propagación de tsunamis y la cuantificación de la inundación de la zona de estudio considerando el nivel de marea en sicigia. Finalmente, se analizan los resultados y se plantean algunas recomendaciones.

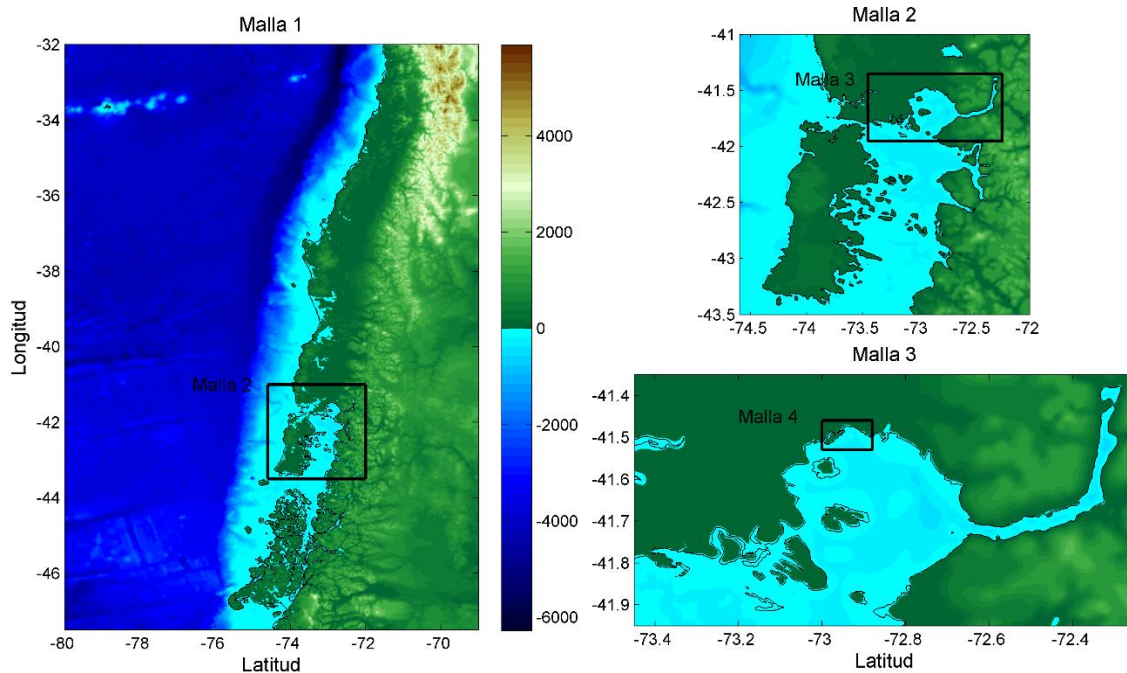
✚ Peligro de inundación por tsunami

El presente capítulo describe la metodología utilizada para la estimación del peligro de inundación por tsunami mediante modelación numérica. Para ello se utiliza un modelo de diferencias finitas basado en las ecuaciones lineales y no lineales de aguas someras (NSWE). En primer lugar, se define las mallas utilizadas en las simulaciones, luego se representan las deformaciones iniciales de los tsunamis analizados. Se analiza además, la variación de la marea y se definen los niveles de marea utilizados en las simulaciones. Posteriormente, se muestran los resultados de las simulaciones mediante series de tiempo que representan la variación de la superficie del mar en los lugares seleccionados para cada uno de los eventos analizados, áreas de inundación y profundidad de inundación.

✚ Condiciones de contorno: mallas de propagación

Se utilizaron 4 mallas anidadas de diferente resolución espacial, esto es 120", 30", 6" y 1" de arco. Estas mallas se construyeron a partir de información proveniente de distintas fuentes tales como: GEBCO, Cartas Náutica y topobatimetrías de detalle. La Figura 4 muestra las mallas 1, 2 y 3 usadas en las modelaciones. Al interior de la malla 3 se indica también la región incluida en la malla 4.

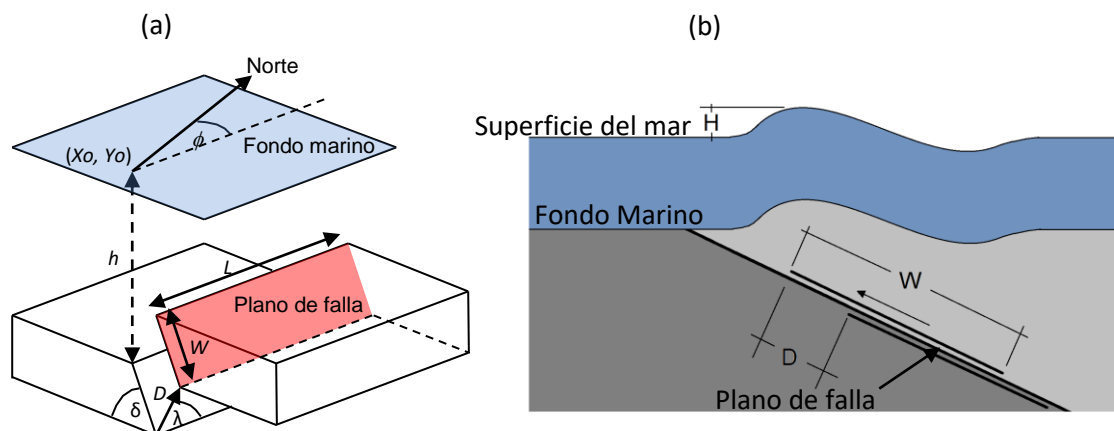
Figura N°4. Mallas usadas en la modelación numérica. Malla 1 de 120" (~3.7km) de resolución. Malla 2 de 30" (~925m) de resolución. Malla 3 de 6" (~185m) y malla 4 de 1" (~30m) de resolución.



✚ Condición inicial: Fuentes tsunamigénicas

Las condiciones iniciales de cada evento se determinaron mediante la formulación de Okada (1985). Esta formulación entrega una solución analítica para la deformación del lecho marino a partir de los parámetros de la zona de ruptura, esto es, longitud (L), ancho (W), profundidad (h), rumbo (ϕ), manteo (δ), ángulo de desplazamiento (λ) y desplazamiento de la falla (D). La Figura 5-a muestra la definición de los parámetros requeridos en la formulación de Okada, y la Figura 5-b muestra un corte transversal a una falla de ancho W que experimenta un desplazamiento interplaca, D . La deformación inicial de la superficie de mar se asume igual a la deformación del fondo oceánico.

Figura N°5. Parámetros usados en la formulación de Okada (1985) para la generación de la condición inicial.

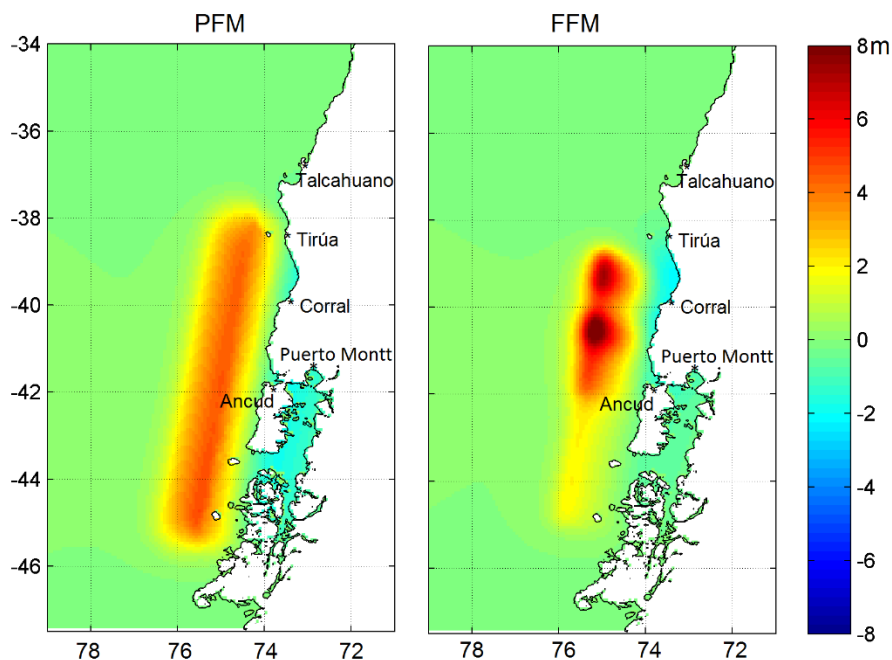


Dada las características del evento, se analizó sólo el tsunami de 1960. Para ello se estudiaron ambos modelos sísmicos propuestos por Barrientos y Ward (1990), estos es, un modelo homogéneo de falla plana (PFM) y otro de fallas finitas (FFM). El modelo de falla plana consideró una longitud de ruptura $L=850\text{km}$, un ancho $W=130\text{km}$, un slip $D=17\text{m}$ y una profundidad focal de 30km . Los ángulos de rumbo, buzamientos y desplazamiento fueron $\phi=7^\circ$, $\lambda=20^\circ$, $\delta=105^\circ$, respectivamente. Para el caso del modelo FFM, se usó el modelo propuesto por Aránguiz (2013) de 5 subfallas solamente basado en el modelo propuesto por Barrientos y Ward (1990), tal que se consideraron sólo los eventos principales del 22 de mayo de las 15:10 y las 15:11 (Duda, 1963), dejando fuera las deformaciones generadas por los eventos del 21 de mayo y del 22 de mayo a las 14:55hrs. La Tabla 2 muestra los parámetros usados en la generación de la condición inicial para el modelo no homogéneo de 5 subfallas. La perturbación inicial de la superficie libre para cada escenario considerado se muestra en la Figura 6.

Tabla N°2. Parámetros sísmicos de las subfallas del evento principal de 1960.

Parámetro	S1	S2	S3	S4	S5
X0 (Lon)	75.154	75.246	75.337	75.521	76.014
Y0 (Lat)	39.60	40.20	40.80	42.00	45.00
Focal Depth (km)	30	30	30	30	30
L (km)	95	67	67	133	335
W (km)	130	130	130	130	130
D (m)	20	10	25	12	5

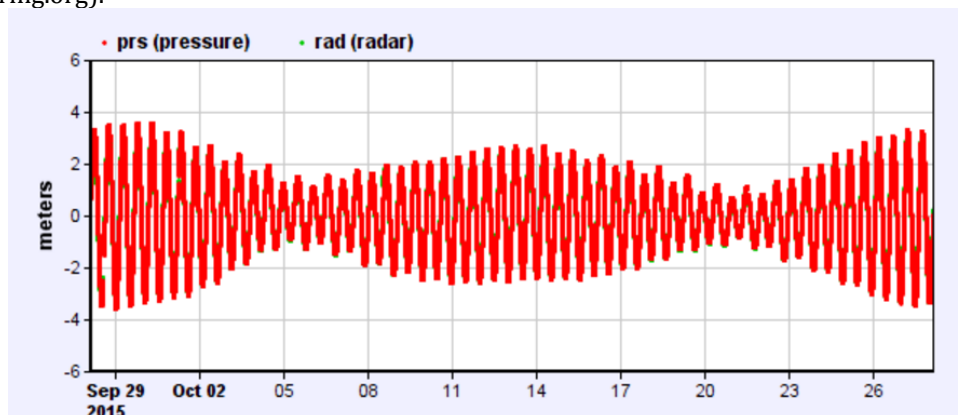
Figura N°6. Deformación inicial de la superficie libre para los modelos homogéneo y no homogéneo.



✚ Efecto de la marea

La variación de marea en la zona de estudio puede alcanzar rangos de hasta 7.0m en sicigia, y una marea alta en sicigia de 3.5m sobre el nivel medio del mar, tal como se observa en la Figura 7. Por lo tanto, se analizará un caso incorporando el nivel de marea en pleamar de 3.5m sobre el nivel medio del mar.

Figura 7. Variación de la marea en Puerto Montt para el mes de Octubre de 2015 (fuente: <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>).



El efecto de la marea se incorpora manualmente en las mallas de simulación. Esto es, se modifica la topobatemetría mediante la suma o resta del nivel de marea deseado, tal que el nivel del mar coincide siempre con el nivel cero del modelo numérico. Posteriormente, los resultados de altura de inundación y series de tiempo son corregidos por el nivel de marea agregado a la topobatemetría.

✚ Validación del modelo numérico

El análisis de resultados considerará, en estricto rigor, una validación del modelo usado, cualquiera sea este. Para ello, es necesario destinar algunas horas a evaluar los resultados del modelo para un evento conocido y ya ocurrido. De esta forma, sería posible reconocer si los resultados propuestos para el presente objetivo son válidos y/o reconocer el nivel de variación (error) a tener en cuenta. Estas variaciones pueden tener su origen en la fuente sismogénica, el modelo de propagación en sí mismo, la batimetría y/o topografía. Para efectos de validación se utilizará el evento de 1960 y las mediciones realizadas en Ancud, Corral.

Productos

A continuación se indican los productos esperados identificados en las bases:

- ✚ Definición del input de generación, que podrá ser el evento más probable del sector, el evento más extremo registrado, o bien un evento tipo con características extremas;
- ✚ Alturas de inundación en el sector de estudio;
Sin embargo, también se entregarán otros productos que han sido identificados a partir de los objetivos. Estos productos son:
- ✚ Mapa de inundación con profundidades máximas de inundación (columna de agua) en la zona del proyecto considerando topografía de detalle y distintos niveles de marea, indicando también las potenciales zonas seguras.
- ✚ Figuras con distribución de velocidades de flujo máximas en la zona de estudio.

A.2) Inundación por cursos hídricos superficiales y anegamiento

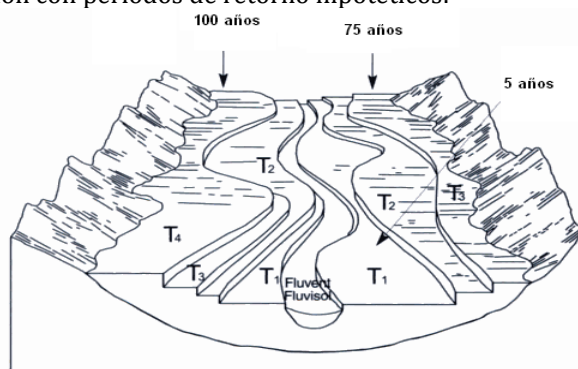
Inundaciones por cursos hídricos superficiales

Las inundaciones por cursos hídricos superficiales corresponden a un fenómeno de origen natural y recurrente para un cauce. "Estadísticamente, los cauces igualarán o excederán la inundación media anual, cada 2,33 años" (Leopold et al., 1964). Keller y Blodgett (2007), definen inundación como un proceso natural por el cual el flujo rebosa el cauce, relacionan el proceso con la cantidad y distribución de las precipitaciones en una cuenca. Para estos autores, el fenómeno puede ser caracterizado por el caudal como por la altura de la lámina de agua. Este proceso deviene peligroso cuando el hombre ocupa zonas inundables, transformando el fenómeno en una amenaza para los asentamientos humanos (Keller y Blodgett, 2007). Al materializarse la amenaza, produce catástrofes o desastres, iniciándose el conflicto entre los sistemas natural y social (Rojas y Martínez, 2011).

Cuando se produce la superación de la capacidad de evacuación del cauce, el agua pasa a ocupar la llanura de inundación o lecho mayor, la definición de esta zona depende de la perspectiva del estudio, "como categoría topográfica es muy plana y se encuentra al lado de un río; geomorfológicamente, es una forma de terreno compuesto primariamente de material depositado no consolidado, derivado de sedimentos transportados por el río en cuestión; hidrológicamente, está mejor definida como una forma de terreno sujeta a inundaciones periódicas por un río padre" (Schmudde, 1968, en Rojas, 2010), en síntesis corresponde a una zona relativamente plana ubicada en una zona adyacente al cauce que sufre inundaciones periódicas.

Para determinar los alcances de una posible inundación se utiliza el concepto de intervalo de recurrencia o tasa de retorno, entendido como el tiempo promedio entre eventos que igualan o exceden una magnitud determinada, se acostumbra a denotarlo con T (Aparicio, 1989; Chow *et al.* 1994; Keller & Blodgett, 2007), generalmente y si las metodologías y datos disponibles lo permiten, cada terraza de inundación puede ser asociada con un período de retorno (Figura 8).

Figura N°8. Terrazas de inundación con períodos de retorno hipotéticos.



Fuente: Modificado de Porta & López-Acevedo, 2005. En Rojas (2010).

Rojas et al., (2014) identifican para Chile 5 factores detonantes que pueden originar inundaciones fluviales: las más frecuentes se relacionan con eventos de precipitación intensa o persistente. De menor asiduidad son aquellas originadas por procesos volcánicos, deslizamientos e intervenciones antrópicas. En las inundaciones derivadas de procesos nivo-glaciares se establecen asociaciones entre factores meteorológicos y no meteorológicos (Tabla 3). En el sur de Chile (38°-43° S), localizado en el dominio

climático templado húmedo, se registran precipitaciones durante todos los meses del año con un máximo invernal, las que ocasionan inundaciones fluviales y lacustres (Rojas y Mardones, 2003; ONEMI, 2011).

Tabla N°3. Causas o factores detonantes de inundaciones fluviales en Chile

Factores detonantes	Proceso	Otra especificación
(1) Precipitación (intensidad o persistencia)	Precipitación convectiva y orográfica	
	Precipitación Frontal	a) Frente cálido b) Frente frío
(2) Procesos Volcánicos (explosión, flujos, depósitos)	Obstrucción del cauce y posterior descarga	
	Fusión de nieve/hielo	a) Flujo Lahárico b) Jökulhlaup
(3) Procesos Nivo-glaciares	Crecidas Nivales (estacionales)	
	GLOFs – IDLOFs (episódicos)	
(4) Deslizamientos	Procesos cosísmicos	Obstrucción de cauce y posterior descarga
	Otros deslizamientos	
(5) Intervención antrópica	Rotura de estructuras hidráulicas	

Fuente: Rojas et al., 2014

El objetivo general del presente apartado de peligro de inundación por cursos hídricos superficiales y anegamiento es analizar y definir áreas máximas de inundación/anegamiento en el área urbana de la ciudad de Puerto Montt.

De acuerdo al objetivo general, es posible definir los siguientes objetivos específicos:

- ✚ Analizar la recurrencia histórica de eventos (inventario)
- ✚ Análisis de series pluviométricas y de eventos hidro-climáticos extraordinarios
- ✚ Estimar caudales con sus respectivos períodos de retorno
- ✚ Analizar la peligrosidad por inundación derivada de cursos hídricos superficiales y anegamientos.

Metodología de trabajo

Con el fin de lograr los objetivos propuestos, la metodología a utilizar se puede separar en las siguientes etapas:

✚ Recurrencia histórica de eventos

Revisión de eventos hidroclimáticos históricos del área con el fin de determinar aspectos relevantes para la evaluación y validación de los datos obtenidos a partir de los métodos geomorfológico e hidráulico en el análisis de inundaciones. Se contempla la revisión de estudios previos, prensa electrónica y catastro vecinal.

✚ Análisis de precipitación y caudal

a) Análisis de las series pluviométricas y de eventos hidro-climáticos extraordinarios

Se realizará un análisis de frecuencia para obtener períodos de retorno de las precipitaciones sobre la base de la estadística de precipitación en estaciones meteorológicas administradas por la Dirección General de Aguas (DGA) y la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) que cuenten con registro adecuado.

La información puntual, se interpolará hacia los sitios de interés mediante técnicas como polígonos de Thiessen, o co-Krigging cuando se trate de zonas con altos gradientes altitudinales.

b) Estimación de caudales

Los caudales se determinarán mediante análisis del registro histórico en los casos en que se cuente con información fluviométrica. La Dirección General de Aguas administra varias estaciones fluviométricas en los diferentes cauces del país. En los casos de interés que no cuenten con registro fluviométrico disponible o de duración adecuada, los caudales se estimarán mediante métodos indirectos, a partir de la estadística de las precipitaciones. En estos casos se aplicarán métodos como los sugeridos por la DGA (1995) en el “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Pluviométrica”. Entre ellos, destacan por su simplicidad el método racional y el DGA-AC. Debido a que en el trabajo DGA (1995), los métodos Racional, DGA-AC y Verni-King modificado no se calibraron para la X Región, su aplicación se realizará tomando en cuenta las condiciones de tipo y uso de suelo locales, y las características de las precipitaciones medidas que se encuentren disponibles.

Análisis de peligrosidad por inundación de cursos hídricos superficiales

Para obtener las cartografías de peligrosidad de inundación fluvial existen diversas metodologías, las que dependen del interés particular del estudio y de los datos disponibles al momento de realizarlo, en general se reconocen cuatro métodos: Botánico, Histórico, Hidrológico y Geomorfológico (Díez, et al. 2008), los que pueden ser utilizados de forma combinada y complementaria. El análisis de peligrosidad por cursos hídricos superficiales en la comuna de Puerto Montt se abordará mediante la integración de los métodos históricos-geomorfológicos-hidráulicos, en función de la disponibilidad de información para ríos, esteros y quebradas.

Para estimar el peligro de inundación (esteros y quebradas) se aplicará la metodología de susceptibilidad, que consiste en definir zonas geomorfológicamente expuestas (áreas de consolidación hidráulica, barras, terrazas, etc.) a sufrir inundaciones episódicas y extraordinarias. Esta información se valida con datos topográficos y entrevistas realizadas a la población (carta de recurrencia histórica).

Anegamientos

Según Mardones y Vidal (2001), un anegamiento corresponde a la acumulación de un volumen de agua/lluvia sobre la superficie del suelo. Este proceso obedece a una serie de factores naturales y antrópicos entre los que destacan: características pluviométricas (intensidad de lluvia diaria), características físicas del suelo y subsuelo (presencia de sedimentos impermeables que limitan la capacidad del suelo para infiltrar con la debida velocidad el agua de la lluvia y sectores morfológicamente deprimidos con pendientes débiles o nulas). Gran importancia se atribuye también a las intervenciones antrópicas tales como: rellenos artificiales y construcciones que obstruyan el drenaje natural o artificial.

El peligro de anegamiento se evaluará mediante un modelo de susceptibilidad aplicado en SIG en formato ráster, tomando como factores de evaluación los sugeridos por Mardones y Vidal (2001): litología, pendiente y morfología (Tabla 4). Los resultados obtenidos serán validados mediante los datos recurrencia histórica obtenidos.

Tabla N° 4. Ejemplo de factores físico-naturales utilizando técnicas de EMC para evaluar anegamientos en SIG para el área urbana de Puerto Montt.

Litología	Nivel de peligrosidad	Peso
Principalmente depósitos de gravas y arenas, mal clasificados en depósitos de morrenas.	Bajo	1
Principalmente gravas arenosas en depósitos fluviales y glaciofluviales.	Medio	2
Limos, arcillas, roca o suelo impermeable, principalmente en depósitos volcánicos.	Alto	3
Pendiente	Nivel de peligrosidad	Peso
≥4.1°	Factor de exclusión	0
1-4°	Bajo	1
1°-0.1°	Medio	2
<0.1°	Alto	3
Morfología	Nivel de peligrosidad	Peso
Laderas	Factor de exclusión	0
Terreno irregular	Medio	2
Llanuras fluvio-glaciares	Alto	3

Fuente: Modificado de Mardones y Vidal (2001)

Productos

A continuación se indican los productos esperados identificados en las bases:

- ✚ Catastro histórico de eventos.
- ✚ Análisis hidrológico de precipitaciones y caudales con períodos de retorno.
- ✚ Mapa de peligro derivado de los procesos de inundación por cursos hídricos superficiales y anegamientos.

B) Remociones en masa

La presente propuesta de estudio tiene por objetivo general identificar a través de una zonificación, aquellas áreas que favorecen la ocurrencia de diversas tipologías de remoción en masa, tales como deslizamientos, caídas y flujos, con el propósito de determinar mediante un mapa de peligrosidad, una Zonificación de Áreas de Riesgo y Protección Ambiental para el área urbana de la comuna de Puerto Montt.

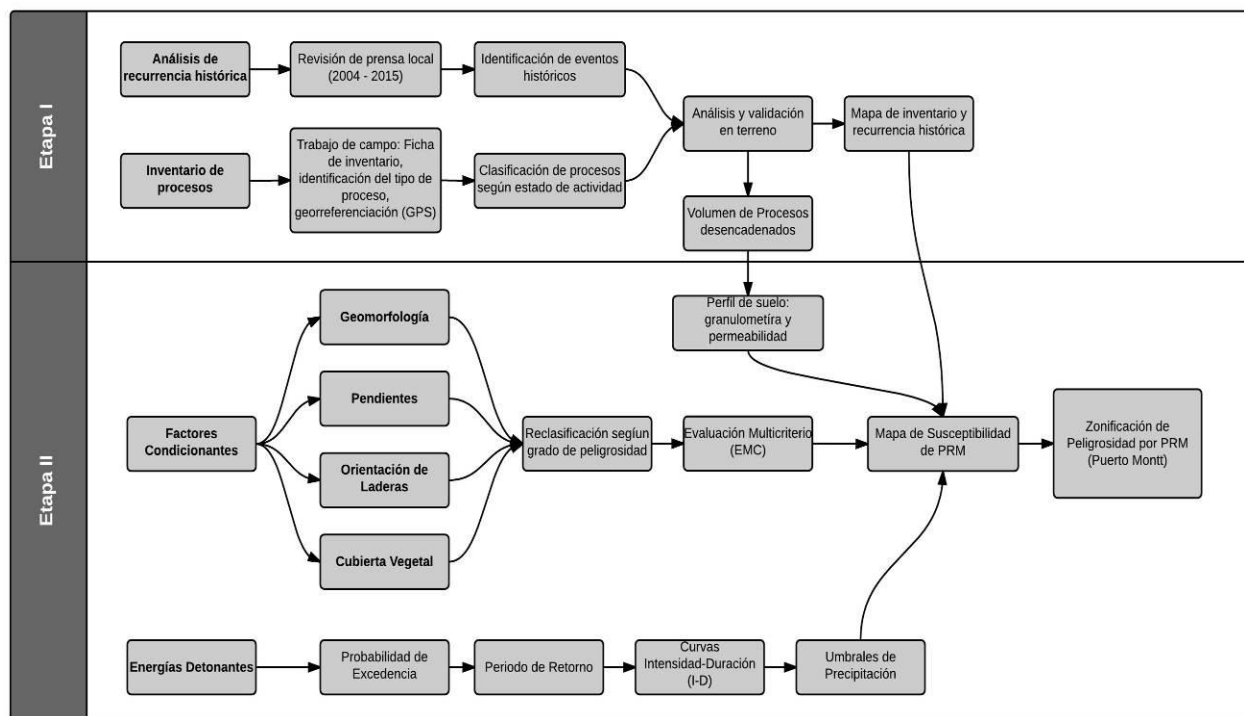
De acuerdo al objetivo general, es posible definir los siguientes objetivos específicos

- ✚ Analizar la recurrencia histórica e inventario de procesos de remoción en masa
- ✚ Análisis de peligrosidad mediante factores condicionantes y energías detonantes

Metodología de trabajo

Con el fin de lograr los objetivos propuestos, la metodología a utilizar se puede separar en dos etapas, estas son las Etapas I y II (Figura 9), los procesos metodológicos correspondientes a cada etapa se describen a continuación.

Figura N°9. Esquema metodológico para la evaluación de procesos de remoción en masa.



ETAPA I: Análisis de recurrencia histórica e inventario de procesos de remoción en masa

Se analizará la recurrencia histórica de procesos de remoción en masa para la ciudad de Puerto Montt mediante la identificación de eventos desencadenados en al menos los últimos 5 años. Lo anterior, se realizará a través de la revisión de prensa local e informes técnicos y académicos, con el propósito de identificar la localización de las áreas de mayor concentración e inestabilidad ante estos procesos. Además, se realizará un inventario de procesos de remoción en masa en estado activo, donde se identificará la magnitud, tipo de movimiento y efectos de estos procesos sobre la población. Los procesos serán identificados y georreferenciados en terreno y representados en un plano base a escala 1:10.000, los cuales se validarán con la información histórica.

ETAPA II: Análisis de peligrosidad

El análisis de peligrosidad se realizará aplicando los criterios de zonificación de Flores y Alcántara (2002) y López (2013). Se considera el modelo de susceptibilidad como la propensión o tendencia de una zona a ser afectada físicamente por un peligro, la cual es determinada a través de un análisis comparativo de factores condicionantes y energías detonantes, en las áreas que han sido afectadas en por procesos de remoción en masa en el pasado (Olcina y Ayala-Caredo, 2002). En este caso, el inventario se utilizará para validar el mapa de peligrosidad y determinar aquellas zonas con mayor predisposición a generar procesos de remoción en masa. Los factores condicionantes y energías detonantes consideran las siguientes características:

a) Factores condicionantes: se definirán variables físico-naturales para la generación de mapas temáticos tales como geomorfología, pendientes, orientación de laderas y cobertura vegetal (Tabla 5). La geometría de la ladera y otras variables morfométricas serán obtenidas a través de un modelo Digital de Elevación (DEM) y curvas de nivel.

Esto último permitirá obtener topografía de detalle para localizar quebradas y cursos locales que faciliten la movilización de material y por otro lado, realizar cálculos de volúmenes y de *runout* o alcance máximo de masa movilizada.

Tabla N°5. Factores condicionantes (Geomorfología, pendientes, cobertura vegetal y laderas) para la evaluación de peligrosidad de PRM.

Factores	Descripción	Fuente de Información
Geomorfología	Identificación de las principales unidades geomorfológicas que inciden en la generación de procesos de remoción en masa	SERNAGEOMIN (1999); Denton <i>et al.</i> , (1999)
Pendientes	Clasificación de laderas con pendientes con abundante registro de remociones en masa > 10°	Derch (2004)
Cobertura Vegetal	Clasificación de cobertura vegetal de tipo arbórea, matorral y herbácea, matorral disperso y vegetación dispersa	Imagen SPOT7 (2015)
Orientación de Laderas	Laderas cuya orientación concentraron la mayor cantidad de procesos inventariados en terreno	Modelo Digital de Elevación (MDE)

Fuente: López, 2013

Por otro lado, se analizará la composición litológica correspondiente a las áreas de mayor concentración de procesos de remoción en masa en estado activo. Esto, mediante la elaboración de un perfil de suelo donde se identificará la composición granulométrica y el grado de permeabilidad del substrato de suelo (Tabla 6). Además, se calculará el volumen de deslizamiento de los eventos desencadenados de mayor magnitud identificados en terreno, mediante la fórmula propuesta por Suarez (1998), la cual mide en metros cúbicos el volumen aproximado de un desplazamiento después de una falla, la formula se expresa a continuación:

$$Vol_{des} = \left(\frac{1}{6} \pi D_r \times W_r \times L_r\right) F_{ex}$$

Donde, F_{ex} corresponde al factor de expansión del suelo al ser perturbado, el cual varía entre **1,25 y 1,30** y donde W_r Corresponde a al ancho de la superficie de falla de deslizamiento, L_r a longitud de superficie de falla y D_r a la profundidad de la superficie de falla.

Tabla N°6. Factores condicionantes (Granulometría y permeabilidad) para la evaluación de peligrosidad de PRM.

Factores	Descripción	Fuente de Información
Granulometría	Identificación de la composición textural de los diferentes horizontes de suelo	U.S. Dept. Agriculture Handbook Soil Survey Manual (1994)
Permeabilidad	Identificación del nivel de permeabilidad en los diferentes horizontes de suelo	González de Vallejo et al., (2002)

Fuente: López (2013)

Finalmente, mediante el proceso de Técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), se determinarán las áreas de peligrosidad de procesos de remoción en masa para la ciudad de Puerto Montt. Lo anterior, mediante la ponderación de los factores condicionantes que mayor incidencia tienen en la generación de procesos de remoción en masa. Para ello, se utilizará el método de jerarquías analíticas (MJA) (Saaty, 1997 en Barredo & Gómez 2005), el cual asigna pesos mediante la importancia relativa de cada factor de acuerdo a la incidencia que estos tienen en la generación de procesos de remoción en masa. Lo anterior, se basa en la observación en terreno y bibliografía de apoyo.

Para ello, se utilizará el software IDRISI, el cual incluye el método propuesto por Barredo & Gómez (2005), este método requiere la valoración comparativa de importancia entre pares (Tabla 7), es decir indicar cuál es la importancia de un factor respecto a otro, utilizando una escala de nueve posibilidades (9, 7, 5, 3, 0, 1/3, 1/5, 1/7, 1/9), la cual abarca desde la de mayor importancia (9), igual importancia (0), hasta la de menor importancia (1/9), de acuerdo a la siguiente escala:

Tabla N°7. Escala de Importancia del proceso de Jerarquía Analítica

1/9	1/7	1/5	1/3	1	3	5	7	9
Extrema Baja	Muy Baja	Baja Media	Baja	Igual	Media Alta	Alta	Muy Alta	Extrema Alta

Fuente: Barredo & Gómez 2005

Posteriormente, la evaluación de cada factor tendrá como resultado una ponderación de mayor porcentaje de los factores que tienen mayor incidencia en la generación de procesos de remoción en masa y un menor porcentaje de los factores que tienen menor incidencia (Tabla 8).

Tabla N°8. Matriz de Jerarquías Analíticas (MJA)

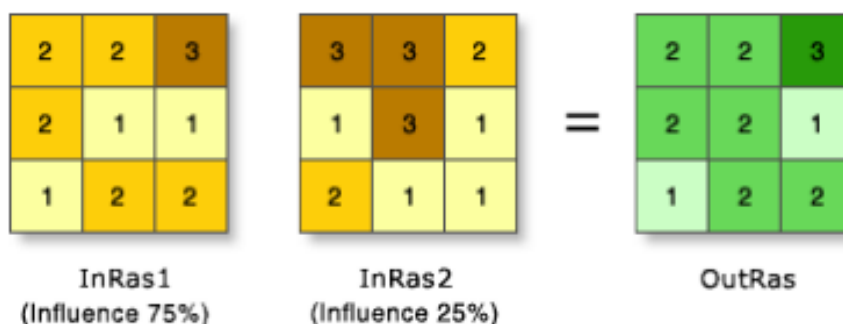
Factores Condicionantes	Geomorfología	Pendientes	Exposición de Laderas	Cubierta Vegetal	Ponderación
Geomorfología	1				%
Pendientes		1			%
Exposición de Laderas			1		%
Cubierta Vegetal				1	%

Fuente: López (2013)

La Evaluación Multicriterio se realizará considerando el método de Sumatoria Lineal Ponderada, la cual corresponde a una operación aritmética, que consiste en multiplicar el peso de cada factor condicionante por su ponderación mediante la siguiente formula:

$$r_i = \sum_{j=1}^n w_j v_{ij}$$

Donde, r_i es la aptitud de la alternativa i , w_j el peso del criterio o factor j y v_{ij} es el valor ponderado de la alternativa i en el criterio o factor j .



La obtención de la ponderación de cada factor condicionante, permitirá la evaluación de las áreas de mayor peligrosidad en la generación de procesos de remoción en masa. Esto, mediante el resultado del método de suma ponderada, donde el nivel de adecuación de cada factor se determinará sumando el resultado de la multiplicación del peso de cada factor por su respectiva ponderación. (Tabla 9).

Tabla N°9. Evaluación de factores condicionantes mediante (EMC)

Factores	Descripción	Nivel de Peligrosidad	Peso
Geomorfología	Planicie fluvio-glaciár	Baja	1
	Terreno irregular (Hummocky terrain) y Cinturones de morrenas	Alta	3
	Ladera vegetada, intermedia y urbanizada	Muy Alta	4
Factores	Descripción	Nivel de Peligrosidad	Peso
Pendientes	0° - 10°	Baja	1
	10° - 25°	Alta	3
	> 25°	Muy Alta	4
Factores	Descripción	Nivel de Peligrosidad	Peso
Orientación de Laderas	Plano	Bajo	1
	W - NW	Media	2
	N - NE	Alta	3
	E - S - SE - SW	Muy Alta	4
Factores	Descripción	Nivel de Peligrosidad	Peso
Cobertura Vegetal	Vegetación con matorral disperso	Baja	1
	Arbórea	Media	2
	Matorral y herbácea	Alta	3
	Edificado con vegetación dispersa	Muy Alta	4

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la ponderación de cada factor genera una cuota importante de subjetividad o incertidumbre, que puede hacer que la importancia de cada factor no sea consistente. Es por esta razón, se calculará el índice de consistencia (IC), el cual indica si los juicios de valor asignados a cada factor condicionante son consistentes con su real importancia. Así, para los valores de $IC \geq 0,10$ los juicios de valor asignados

deben ser revisados, ya que no son suficientemente consistentes para establecer las ponderaciones, en cambio para valores $\leq 0,10$ los juicios de valor asignados se consideran satisfactorios. La fórmula es la siguiente:

$$IC = \frac{(\lambda \max - n)}{n - 1}$$

b) Energías detonantes: se definirá la precipitación como principal energía detonante de procesos de remoción en masa para la ciudad de Puerto Montt. Para ello, se efectuará un análisis de precipitación, a través del cálculo de la probabilidad de excedencia asociada a un periodo de retorno. Lo anterior, mediante la ecuación propuesta por Bedient y Huber (1992 en Bedient, 2004), la cual determinará si las precipitaciones máximas registradas de cada evento de remoción en masa desencadenado en la ciudad de Puerto Montt, podría ser excedido en un periodo de tiempo T , tal como se expresa a continuación:

$$P_{ex} = P(x > X) = \frac{1}{T}$$

En este sentido, dado que la función de distribución de probabilidad $F(X)$, correspondiente a la probabilidad de excedencia toma valores iguales o inferiores a cierto número X , la probabilidad de que en un periodo de tiempo T , el valor de la variable aleatoria de precipitación sea excedida, está dada por la función complementaria de $F(X)$, como se evidencia a continuación:

$$F(X) = \int_{-\infty}^x f(x)dx = P(x \leq X) = 1 - \frac{1}{T} \quad ; \quad P(x > X) = 1 - F(X) = \frac{1}{T}$$

Una vez establecida la probabilidad, se determinará la cantidad de precipitación asociada un periodo de retorno T , para ello se utilizará la Función de Distribución de Gumbel (Gumbel, 1941), distribución que calcula la probabilidad de que se produzca un evento extraordinario de precipitación intensa a partir de una muestra de datos, en este caso datos de precipitación acumuladas para el periodo Mayo, Junio, Julio y Agosto correspondientes a los últimos 20 años, las cuales se obtendrán de la estación meteorológica más representativa del área.

Una vez validado el ajuste de los datos de precipitación a la FDP de Gumbel, se procederá a determinar los montos de precipitación asociados a cada periodo de retorno y probabilidad de excedencia, a través de una nueva ecuación como resultado del despeje de x en la FDP de Gumbel.

$$x = \mu - \frac{\ln(-\ln F(X))}{d}$$

Posteriormente, se determinará la intensidad – duración de la precipitación para periodos de tiempo de 2, 4, 6, 8, 12 y 24 horas, según los registros de precipitación. Lo anterior a través de la propuesta metodológica de Chow *et al.*, (1994), el cual define la intensidad de precipitación como la tasa temporal por unidad de tiempo (mm/hr), donde P es la cantidad de precipitación en mm y Td es la duración dada usualmente en horas.

$$i = \frac{P}{Td}$$

Finalmente, se establecerán umbrales críticos de precipitación según los criterios de Caine (1980), el cual establece la cantidad de precipitación necesaria para desencadenar procesos de remoción en masa, según la relación intensidad – duración de la precipitación, donde I representa la intensidad (mm/hr), y D la duración (hr).

$$I = 14.82 D^{-0.39}$$

Productos

A continuación se indican los productos esperados identificados en las bases:

- ✚ Catastro histórico de eventos e inventario de procesos de remoción en masa.
- ✚ Análisis de factores condicionantes y energías detonantes.
- ✚ Mapa de peligro derivado de los procesos de remociones en masa.

C) Actividad volcánica

El estudio y zonificación del riesgo volcánico es un aporte fundamental en la planificación territorial y protección ambiental de zonas urbanas y áreas protegidas. En particular, la zona urbana de Puerto Montt se encuentra emplazada en una región volcánica.

El principal centro volcánico ubicado en las cercanías de Puerto Montt corresponde al volcán Calbuco, un volcán activo de composición andesítica y cuya última erupción ocurrió en abril de 2015. Otros centros eruptivos mayores que podrían desarrollar peligros para Puerto Montt son los volcanes Osorno, Puntagudo, Chaitén y Michinmahuida. La principal amenaza de estos últimos sería la generación de columnas eruptivas que dispersen material piroclástico hacia Puerto Montt provocando la caída de ceniza en la ciudad. Existen, además, otros centros eruptivos menores cercanos a Puerto Montt que, según sus características, no deberían presentar una amenaza considerable. Entre ellos se encuentran los volcanes Yate y Hornopirén.

Los objetivos generales de este trabajo son determinar la susceptibilidad del área urbana de Puerto Montt a ser afectada por fenómenos volcánicos, y cuantificar la amenaza y riesgo volcánico impuesto a su población e infraestructura. Los objetivos específicos son los siguientes:

- ✚ Compilar un catastro histórico y geológico de actividad volcánica en la zona para determinar las características de las erupciones y estimar su recurrencia.
- ✚ Determinar los tipos y características de los fenómenos volcánicos que pueden afectar a Puerto Montt
- ✚ Creación de un mapa de amenaza volcánica para la zona urbana de la comuna de Puerto Montt, y sus alrededores

Metodología de trabajo

Con el fin de lograr los objetivos propuestos, la metodología a utilizar se puede separar en las siguientes etapas:

Revisión de eventos eruptivos y consideración de la amenaza volcánica

Para todos los volcanes de la región (exceptuando el volcán Calbuco) cuya actividad podría afectar a Puerto Montt, se revisarán los peligros que pueden desarrollarse y se evaluará si efectivamente constituyen una amenaza. Esto se realizará a través de una compilación de estudios previos que describan la actividad (magnitud, duración, fenómenos desarrollados; e.g. Petit-Breuilh, 1999) y características de los volcanes (e.g. tipo de volcán, composición y propiedades físicas de los magmas). También se considerarán descripciones de volcanes similares que no se encuentren en la región, y que puedan complementar el análisis de actividad posible. Aquellos fenómenos que constituyan una amenaza para Puerto Montt serán analizados en detalle en términos de su ocurrencia, características, dispersión/inundación e impacto. Se espera que la caída de ceniza sea uno de estos peligros, debido a la gran dispersión que pueden experimentar las partículas finas en la atmósfera, inicialmente expulsadas en la columna eruptiva. La literatura que se utilizará considera los mapas geológicos e informes de Sernageomin (e.g. Sellés y Moreno, 2011), trabajos de tesis, y artículos de ciencia aplicada como los de López-Escobar et al., (1995), Watt et al., (2011).

El volcán Calbuco es el más cercano a Puerto Montt y el riesgo asociado a su actividad volcánica será necesariamente estudiado en detalle. Entre los principales peligros volcánicos derivados de la actividad del volcán Calbuco se consideran las corrientes de densidad piroclástica (flujos y oleadas), lahares y caída de ceniza. El origen y alcance de estos fenómenos debe estudiarse en detalle. Otros peligros tales como flujos de lavas, caída de bombas, deslizamiento de laderas, emanación de gases en concentraciones dañinas para la salud, y sismos volcánicos, a priori constituyen un menor riesgo por el alcance limitado de éstos y/o su muy baja probabilidad de ocurrencia. En estos casos se evaluará su relevancia como potencial amenaza a la ciudad de Puerto Montt, y si es pertinente realizar estudios de mayor detalle.

Con esta información se determinará la susceptibilidad³ del área urbana de Puerto Montt de ser afectada por un fenómeno volcánico. Además, el registro eruptivo de los volcanes de la región, y en particular del volcán Calbuco, permitirá realizar un estudio probabilístico de la ocurrencia de una erupción volcánica. Este último considerará como punto de partida el análisis de Dzierma y Wehrmann (2010).

Caracterización de fenómenos volcánicos y su modelamiento

Todos los peligros volcánicos que pueden impactar la zona urbana de Puerto Montt se estudiarán en detalle para analizar sus características (mecanismos y probabilidad de ocurrencia, magnitud y propiedades físico-mecánicas). Esto permitirá la zonificación de áreas con diferente nivel de probabilidad de ser afectadas, la cual es información necesaria para determinar el impacto y consecuencias de la actividad volcánica. Debido a la gran variedad de fenómenos que se pueden desarrollar durante una erupción, y al amplio rango de características que cada uno de estos fenómenos puede presentar, muchas veces es necesario relajar el cálculo de probabilidades de ocurrencia de cada fenómeno (con características predefinidas) a una estimación relativa de su posibilidad de desarrollo, y/o a un manejo de escenarios eruptivos que consideran erupciones de diferente magnitud y con características específicas (y esperables). En este trabajo se asociará la ocurrencia de cada peligro volcánico de interés al desarrollo de una erupción volcánica con estilo y magnitud predefinidas. En este contexto se evaluarán, al menos, tres escenarios eruptivos que representen un caso esperado y dos casos extremos.

³ Propensión o tendencia de una zona a ser afectada físicamente por un peligro

La zonificación de la amenaza volcánica se llevará a cabo considerando cada peligro por separado. Para ello se utilizará toda la información recopilada sobre eventos ocurridos en el pasado, incluyendo la geología del volcán Calbuco (e. g. Sellés y Moreno, 2011) y otros centros eruptivos mayores cercanos a Puerto Montt. También se utilizará modelación numérica de estos fenómenos, para así analizar los diferentes niveles de inundación o dispersión de masas volcánicas, al considerar diferentes magnitudes y características. La modelación numérica permitirá, cuando corresponda, evaluar la distribución espacial del impacto o inundación sobre Puerto Montt, asociado a una probabilidad de ocurrencia o escenario eruptivo predefinido. A continuación se presentan ejemplos de esta modelación numérica:

- *Modelación numérica de caída de ceniza:* Se utilizará un modelo de advección-difusión-sedimentación de tefra (partículas volcánicas) acoplado a escenarios de vientos. Con esto se determina la distribución de los espesores de la capa de ceniza que cae. Las estadísticas de vientos se ocuparán para analizar la probabilidad de que la zona urbana sea afectada (y su severidad) por esta caída de tefra.
- *Modelación numérica de corrientes de densidad piroclástica (CDP):* Para esta modelación se ocupará el modelo de Cono de Energía Modificado, el cual entrega la distancia máxima de alcance de los CDP y la distribución espacial de probabilidad y/o espesor de la inundación de estos flujos. Alternativamente, para la modelación de CDP densos (flujos piroclásticos o la base de *block-and-ash*) se podrá ocupar el modelo TITAN2D si se estima necesario para obtener una mayor resolución de las zonas inundadas, o para investigar el comportamiento del flujo en abanicos de baja pendiente. El programa TITAN2D se basa en las ecuaciones de aguas someras en dos dimensiones, y ha sido validado para el modelamiento de este tipo de flujos.
- *Modelación numérica de lahares:* La inundación por lahares se modelará ocupando el software LaharZ o el software FLO-2D. Ambos se han ocupado en investigación aplicada para representar la inundación de lahares recientes, y han mostrado buena coincidencia entre el modelo y la realidad.

Junto con la descripción de la actividad volcánica, se entregará una descripción de los potenciales efectos de cada fenómeno en la población e infraestructura. Además, se realizará un estudio de la morfología del terreno y características topográficas que podrían aumentar o disminuir el impacto de los fenómenos volcánicos estudiados.

Productos

A continuación se indican los productos esperados identificados en las bases:

- ✚ Cuantificación probabilística de la recurrencia de eventos eruptivos en la zona.
- ✚ Caracterización de los fenómenos volcánicos que han ocurrido en el pasado y que pueden ocurrir en el futuro
- ✚ Mapa de susceptibilidad y/o amenaza volcánica enfocado al área urbana de Puerto Montt.

D) Actividad o Intervención Humana

Los riesgos antrópicos, consisten en riesgos derivados de la actividad humana en el territorio, los cuales tienen posibilidades de afectar la calidad de vida de la población. Estos riesgos se asocian con el desarrollo tecnológico, donde la responsabilidad del hombre es prácticamente total. En este sentido,

las áreas de mayor riesgo potencial son las ciudades, por tratarse de zonas en donde se concentra la población y sus diversas actividades.

La comuna de Puerto Montt, situada en la costa del seno de Reloncaví, no es ajena a dicha realidad, dado que la ciudad ofrece una variedad de servicios orientados al turismo, a la actividad pesquera y acuícola, al transporte y telecomunicaciones, a la agricultura y la ganadería, por lo cual la población está sometida a riesgos propios de las grandes ciudades, como la proximidad a infraestructura (presencia de tendidos eléctricos, caminos, vía férrea), y a riesgos inherentes a su localización geográfica (incendios forestales).

Considerando lo anterior, los peligros que preliminarmente se pueden identificar en el área urbana de Puerto Montt se presentan en la Tabla 10. El desarrollo de la consultoría permitirá determinar el o los sectores del área urbana afectados directamente por tales peligros.

Tabla N°10. Riesgos antrópicos.



Categoría de Peligro Antrópico	Peligros Asociados
a) Proximidad a infraestructura	- Accidentes de tránsito - Derrame carga o sustancia peligrosa - Explosión - Descargas eléctricas
b) Incendios forestales	- Propagación viviendas aledañas - Mala calidad del aire - Poca o nula visibilidad en carreteras - Agravamiento enfermedades respiratorias

a) Proximidad a infraestructura: El constante flujo vehicular que se desplaza por la red vial comunal, genera constantes riesgos sobre la población local, expresados en volcamientos, colisiones por alcance y atropellos. En menor medida, la infraestructura de energía y telecomunicaciones también constituye un riesgo para la población, debido a la presencia de los cables del tendido eléctrico y otros servicios, en uso y en desuso, que, principalmente en el sector céntrico de la ciudad, pueden tornarse riesgosos.

b) Incendios forestales: Producto de acciones humanas se concentran en los bosques y plantaciones forestales que ocupan extensas áreas en el entorno urbano, incluso algunas alcanzando áreas residenciales. Se trata de territorio comunal que se encuentra cubierto por plantaciones forestales, vegetación nativa, arbustos altos con distintos grados de combustibilidad, y por tanto vulnerables a la propagación de incendios forestales, especialmente en períodos de verano secos y fuertes vientos. Las quemas constituyen otra actividad que puede acentuar el riesgo de incendio y, además, ser fuentes de contaminación atmosférica.

El objetivo general del presente apartado de actividad o intervención humana es analizar y definir áreas susceptibles a peligros asociados por incendios forestales y proximidad a infraestructura en el área urbana de la ciudad de Puerto Montt.

De acuerdo al objetivo general, es posible definir los siguientes objetivos específicos

-  Analizar la recurrencia histórica de eventos (inventario).
-  Analizar la peligrosidad por derivada de la actividad o intervención humana.

Metodología de trabajo

a) Infraestructura peligrosa

Análisis de recurrencia histórica

Se realiza un levantamiento de información de la infraestructura potencialmente peligrosa (carreteras, zona industrial). Posteriormente, se efectuará un análisis de frecuencia, a partir del número de eventos ocurridos en un período de tiempo (en los últimos cinco años). Los eventos ocurridos (Tabla 11) serán identificados con el apoyo de antecedentes bibliográficos y artículos de prensa.

Tabla N°11. Eventos considerados para análisis de recurrencia histórica

Infraestructura	Evento
Carreteras	Accidentes de tránsito
Zona Industrial	Derrame carga o sustancia peligrosa
Tendido eléctrico	Explosión o descarga eléctrica

b) Incendios forestales

Análisis de recurrencia histórica

El análisis de recurrencia histórica se determina a partir del número de eventos ocurridos en un período de tiempo. En base a los registros de incendios de CONAF de los últimos diez años, se obtendrá un panorama de los incendios forestales ocurridos en el pasado e incluyendo información sobre superficie afectada.

Análisis de peligrosidad

Se utilizó el modelo de peligro de incendios de Abarca y Quiroz (2005), modificado de Chuvieco (1990), considerando los criterios utilizados por este autor. Los criterios serán reclasificados con los siguientes valores asignados, en función del tipo asociado de peligro: bajo (1), moderado (2), alto (3), muy alto (4). Posteriormente, las capas de criterios serán ponderados en SIG para generar el mapa de peligro por incendio.

Se considerarán factores físico-ambientales que inciden en el comportamiento del fuego ya iniciado. Los factores que integran este índice de peligro son: la vegetación, la pendiente, la altitud y la orientación de laderas (Tabla 12).

a. Vegetación (V): Se reclasificarán las formaciones vegetales existentes, de acuerdo a la escala de riesgo y considerando su propensión en la propagación del fuego.

b. Pendiente (P): A partir del MDT se obtendrá el mapa de pendientes, el cual será reclasificado de acuerdo a las categorías de peligro indicadas en la Tabla 12.

c. Pisos altitudinales (PA): Se reclasificará el modelo digital de elevación (MDT) de la zona, en pisos altitudinales, los que a su vez serán categorizados por peligro, de acuerdo a la Tabla 12.

d. Orientación (O): A partir del MDT se generará el mapa de orientación de laderas, el cual se reclasificará en 8 orientaciones, las que serán categorizadas por peligro considerando que en general las laderas solanas están sometidas a una mayor insolación por lo que tienen menor humedad y menos vegetación que las umbrías y, además, en las solanas se forman con más frecuencia corrientes de convección ascendentes, por lo que el fuego avanza más rápidamente.

En este objetivo también se trabajará con dos criterios limitantes que restringen la propagación del fuego: la hidrografía y los cortafuegos (vías).

e. Hidrografía: La red hidrográfica es tomada como un criterio limitante a la propagación dentro del modelo. Se le agregará un área buffer de 20 metros asumiendo que el ambiente se mantiene húmedo a ambos lados del cauce de los ríos en esa distancia. La capa criterio se reclasificará entonces, en esa área, con un peligro de cero (sin peligro).

f. Cortafuegos: Las vías dentro del área de estudio cumplen una función limitante a la propagación del fuego, pues allí el suelo está desnudo. Esta capa se reclasificó también con un peligro de cero.

Para la ponderación de los criterios, sin considerar los criterios limitantes, se utilizará la siguiente fórmula:

$$PP = (V * 0,4393) + (P * 0,1925) + (O * 0,2944) + (PA * 0,0738)$$

Para la ponderación con criterio limitante (D), es decir red hídrica y vías, se aplicará la siguiente fórmula:

$$PP = (V * D) + (P * D) + (O * D) + (PA * D)$$

$$(D) = 0$$

$$PP = (V * 0) + (P * 0) + (O * 0) + (PA * 0)$$

Dónde:

PP	: Peligro propagación de incendio
V	: Vegetación
P	: Pendiente
O	: Orientación
PA	: Pisos altitudinales
D	: Factor limitante

Tabla N°12. Reclasificación de los criterios físico-ambientales según nivel de peligro.

Vegetación	Nivel de Peligro	Peso
Herbazal, Herbazal con Chaparros, Matorral Denso	Muy alto	4
Terreno Descubierto, Matorral Ralo	Alto	3
Bosque Bajo Ralo, Bosque Bajo Denso y Bosque Bajo Medianamente Denso	Moderado	2
Bosque Medio Medianamente Denso, Bosque Medio Denso y Bosque Alto Denso	Bajo	1
Pendiente	Nivel de Peligro	Peso
45° - 90°	Muy alto	4
30° - 45°	Alto	3
10° - 30°	Moderado	2
0 - 10°	Bajo	1
Altitud (msnm)	Nivel de Peligro	Peso
0 - 50	Muy alto	4
50 - 100	Alto	3
150 - 200	Moderado	2
> 200	Bajo	1
Orientación	Nivel de Peligro	Peso
N	Bajo	1
E - NE - W - NW	Moderado	2
S - SE - SW	Alto	3

Productos

Mediante la aplicación de las metodologías descrita se espera obtener

- ✚ Recurrencia histórica de infraestructura peligrosa e incendios forestales.
- ✚ Mapa de susceptibilidad por incendios forestales y carreteras.

2.1.2 Análisis de vulnerabilidad y exposición

Para el análisis de vulnerabilidad se definirá como unidad de análisis la manzana censal utilizando el Censo de 2002 (INE, 2002). Sin embargo, considerando las brechas de información entre el censo 2012 y el año 2015, se procedió a dividir el análisis de vulnerabilidad en dos etapas:

a) Caracterización de la vulnerabilidad del medio construido

En esta etapa se describen los elementos físicos (medio construido) de la vulnerabilidad asociada a los peligros de inundación, remociones en masa y volcánicos (Tabla 13). La descripción incluirá los elementos claves asociados a la construcción de las viviendas y a la realidad del análisis de las amenazas descritas.

Tabla N° 13. Elementos para considerar en la vulnerabilidad del medio construido.

Tipo de vulnerabilidad	Elemento	Descripción	Cuantitativo/valor de vulnerabilidad
Vulnerabilidad por inundación y remociones	Materialidad	Adobe, madera,	3
		albañilería	2
		Hormigón armado, acero	1
Vulnerabilidad por volcanismo	Materialidad del techo	Fibra, fonolita, Paja, desechos	3
		Zinc, Pizarreño	2
		Tejas, tejuela, hormigón	1
Vulnerabilidad por actividad antrópica (incendios)	Materialidad	Adobe, madera, internit	3
		albañilería	2
		Hormigón armado, acero	1

Fuente: Elaboración propia, siguiendo lineamientos de SUBDERE (2011)

El análisis cartográfico de vulnerabilidad para todos los peligros, se efectuó según los factores: a) exposición y b) elementos funcionales (SUBDERE, 2011) (Tabla 14). Para determinar los niveles de vulnerabilidad, se aplicará álgebra de mapas en SIG. En la representación espacial de cada mapa temático se utilizarán cuatro niveles de vulnerabilidad: muy alto, alto, medio y bajo.

Tabla N°14. Factores y variables para el análisis de vulnerabilidad

Factor	Variable	Niveles	Cuantitativo/valor de vulnerabilidad (clasificación)	Método de calculo	Fuente de información
Exposición	N° de habitantes por manzana	0-100	1	Mardones y Vidal (2001)	Estimación según resultados preliminares CENSO (2012)
		101-200	2		
		201-300	3		
		≥300	4		
Exposición	N° de viviendas por manzana	0-75	1	Rojas (2015)/normalización en 4 categorías	STU
		76-155	2		
		156-244	3		
		≥255	4		
Elementos funcionales	Sistema Educación (matricula por manzana)	0-100	1	SUBDERE (2011)	STU
		101-250	2		
		251-500	3		
		501-999	4		
		≥1000	5		
Elementos funcionales	Sistema Salud (tipo de establecimiento)	Consultorio	1	SUBDERE (2011)	STU
		Hospital Tipo IV	2		
		Hospital Tipo III	3		
		Hospital Tipo II	4		
		Hospital Tipo I	5		

Fuente: Elaboración propia. Se seguirán criterios de Rojas (2015) y SUBDERE (2011)

Para la obtención del nivel de vulnerabilidad se aplicó una combinación entre elementos expuestos y elementos funcionales. Los elementos funcionales fueron definidos en función de la presencia/ausencia y el puntaje máximo obtenido en cada manzana.

Elementos expuestos = (clasificación N° de habitantes por manz + clasificación N° de vivienda por manz)

Elementos Funcionales = MAX (Sist educación por manz:Sist Salud por manz)

Vulnerabilidad= Elementos expuestos + Elementos Funcionales

2.1.3 Análisis del riesgo

El análisis de riesgo, se establecerá en función del cruce de las variables de vulnerabilidad y peligro específicos mediante SIG. Se utilizará la ecuación propuesta $R=P*V$. Utilizando plataforma SIG, los factores serán integrados en una matriz y de la multiplicación se obtendrán tres niveles de riesgo: alto, medio y bajo, con puntajes desde 1 a 12 (Eckert et al., 2012; Jalínek et al., 2012 en Martínez et al., 2012) (Tabla 15):

Tabla N°15. Matriz de multicriterio para el riesgo.

Vulnerabilidad		Peligro		
Vulnerabilidad	Nivel	Bajo (1)	Medio (2)	Alto (3)
	Bajo (1)	B 1 X 1 =1	B 1 X 2 =1	M1 X 3 =3
	Medio (2)	B 2 X 1 =2	M 2 X 2 =4	A 2 X 3 =6
	Alto (3)	M 3 X 1 =3	A 3 X 2 =6	A 3 X 3 =9
	Muy Alto (4)	M 4 X 1 = 4	A 4 X 2 = 8	A 4 X 3 = 12

Rango de riesgo: Bajo (1-2), Medio (3-4), Alto (6-12)

Fuente: Modificado de Martínez *et al.*, (2012).

Según los niveles de riesgo específico asociado a cada peligro, se propondrán medidas para la reducción y mitigación de los riesgos (Informe Final N° 3), de tal forma de hacer posible el desarrollo sustentable de la urbanización del área. Adicionalmente se obtendrá el número de habitantes y viviendas afectadas según cada nivel de riesgo asociado a un determinado peligro.

2.2 Protección ambiental

Contexto

Los Servicios Ecosistémicos se definen como toda aquella materia, energía o proceso proveniente de la naturaleza que luego de determinadas transformaciones es convertido en bienes y servicios utilizados por la humanidad. Los Servicios Ecosistémicos, además de alimentos nos proveen de materias primas para la elaboración de una infinidad de productos, son responsables de la regulación climática, de la provisión de agua, recreación, entre muchas otras prestaciones que satisfacen necesidades y otorgan bienestar, mejorando sustancialmente la calidad de vida de las poblaciones beneficiadas. Es decir, de manera más sencilla, se pueden definir como los beneficios que las personas obtienen de los ecosistemas y por lo tanto, debiera ser nuestro deber mantenerlos y protegerlos ya que representan la base de nuestra subsistencia (Millennium Ecosystem Assessment, 2005).

Según el informe Millennium Ecosystem Assessment del 2005, se han clasificado a los Servicios Ecosistémicos en cuatro grupos:

- ✚ **Servicios de aprovisionamiento:** Son los más fáciles de comprender y los más valorados en la actualidad. Se trata de los alimentos, el agua y otro sin fin de materias primas y recursos naturales que satisfacen nuestras necesidades vitales y más.
- ✚ **Servicios de regulación:** filtración y purificación del agua, control de la erosión, captura de carbono, regulación climática, hídrica y atmosférica, polinización, son ejemplos de beneficios obtenidos mediante la regulación de procesos de los ecosistemas.

- ✚ **Servicios culturales:** Son aquellos beneficios no materiales obtenidos de la naturaleza, como, por ejemplo, recreación, turístico, religioso o espiritual, educativo.
- ✚ **Servicios de soporte:** Son necesarios para la producción de todos los demás servicios. En esta categoría se incluyen el ciclo y regulación de los nutrientes, del agua, formación de suelos, fotosíntesis, entre otros.

El acelerado crecimiento económico, el aumento exponencial de la población, y el desarrollo industrial y tecnológico de las últimas cinco décadas han contribuido significativamente en la degradación del ambiente y sus recursos (Barzev, 2002). No solo mediante la contaminación y el uso excesivo hemos contribuido a esta degradación sino que también mediante alteraciones que modifican la oferta y producción de algunos servicios en particular como la agricultura, silvicultura o construcción de presas para aumentar la disponibilidad de verduras, madera y agua respectivamente; éstos esfuerzos destinados a optimizar un solo servicio a menudo conducen a reducciones o pérdidas de otros como lo son la fragmentación de hábitat, pérdida de biodiversidad o degradación de suelos debido al reemplazo de bosque nativo por plantaciones forestales (Rodríguez, et. al, 2006). Afortunadamente, en los últimos 20 años una fuerte conciencia social sobre la gravedad de estos problemas ambientales ha logrado hacer presión ante los gobernantes quienes a través de sus distintas instituciones han promovido la creación de planes, programas, estrategias nacionales y acuerdos multilaterales que abordan temas de interés global como el Convenio sobre Diversidad Biológica (CBD), Cambio Climático (UNFCCC), Humedales (Ramsar), o para la lucha contra la Desertificación (UNCCD). Con el fin de mejorar el acceso y calidad de la información necesaria para adoptar políticas ambientales y con ello fortalecer la base científica a la hora de tomar decisiones; también se están llevando a cabo informes que realizan un catastro del estado actual de diversos sistemas, ejemplo de ellos son la Evaluación Global de la Biodiversidad, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, la Evaluación Global de Aguas Internacionales, entre otros (Montes, 2007).

En año 2001 el entonces Secretario General de las Naciones Unidas, Kofi Annan, convocó a la realización de una reunión a la cual asistieron científicos de diversas áreas y países del mundo con el fin de llevar a cabo la mayor auditoria sobre el estado de conservación de los ecosistemas. La llamada Evaluación de los Ecosistemas del Milenio tuvo como principal objetivo realizar un catastro y evaluar las consecuencias que han sufrido los ecosistemas debido a nuestro acelerado crecimiento y determinar los impactos que ha tenido en nuestro bienestar, entregando además bases científicas que avalen aquellas decisiones adoptadas en pro de su conservación, restauración y uso sostenible. (*Millennium Ecosystem Assessment*, 2005). En el año 2005, producto de este encuentro se generó un informe del estado actual de los ecosistemas, de él destacan cuatro conclusiones:

- ✚ En los últimos 50 años, el hombre ha transformado más rápida y extensamente los ecosistemas que ningún otro período de la historia humana, generando pérdidas aún sin cuantificar y en su mayoría irreversibles de biodiversidad en la Tierra.
- ✚ Estas transformaciones han contribuido en un fuerte desarrollo económico y bienestar social sin embargo, éstos no han sido distribuidos homogéneamente en la población. Además del deterioro de servicios por potenciar unos pocos, se ha acentuado la pobreza de algunos grupos de la población que no poseen el mismo acceso a todos estos recursos, y

peor aún, se ha puesto en riesgo la disponibilidad y calidad de estos beneficios para las futuras generaciones.

- ✚ Si no se toman las medidas adecuadas la situación de los ecosistemas podría empeorar considerablemente e impedir cumplir con el objetivo final de este informe.
- ✚ No es necesario optar por el desarrollo o el medio ambiente, el desafío de revertir la degradación de los ecosistemas a la vez de satisfacer las necesidades humanas a nivel global es posible, siempre y cuando se adopten las medidas requeridas tanto a nivel político, como institucional y práctico.

Lamentablemente, el hecho de que los recursos naturales y los Servicios Ecosistémicos en general no posean un valor comercial o no estén totalmente incorporados en el mercado comercial son difícilmente cuantificables y a menudo tienen muy poco peso a la hora de tomar decisiones políticas o empresariales (Constanza et al., 1997). La valoración económica de estos servicios ambientales ha sido otra de las líneas investigativas adoptadas por las naciones desarrolladas (Daily, 1997). No se trata de elegir entre el desarrollo o el medio ambiente, sino de optar por la mejor alternativa, aquella que en la medida de lo posible genere la mayor factibilidad económica y el menor impacto ambiental (Barzev, 2002).

Servicios Ecosistémicos y Planificación del Territorio

Como se ha mencionado anteriormente, los servicios ecosistémicos son esenciales para la supervivencia humana y para el desarrollo social y económicos. Son pocos los grupos o sectores que no dependen de alguna manera de dichos servicios. Individuos, familias, empresas e industrias dependen de los servicios ecosistémicos para su bienestar y crecimiento, y serán susceptibles de sufrir costos y pérdidas considerables si se los degrada. Los más afectados por estos efectos nocivos de manera desproporcional, son los sectores sociales más pobres, siendo los que menos pueden acceder o costear, alternativas cuando se pierden los servicios ecosistémicos. La degradación de los ecosistemas está contribuyendo con las crecientes desigualdades y disparidades entre los grupos y, a veces, es el principal factor causante de la pobreza y los conflictos sociales (Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Por lo tanto, es de crucial importancia asegurar la inclusión de los servicios ecosistémicos en la planificación para el desarrollo, ya que estos son esenciales para el crecimiento y el desarrollo equitativo y sostenible. Por otra parte, la mayoría de las personas y gobiernos no podrán cargar a largo plazo los costos económicos y sociales relacionados con la degradación y pérdida de los ecosistemas. Uno de los mayores desafíos consiste en que la importancia de los servicios ecosistémicos han sido subvalorados y subestimados en la toma de decisiones. Los beneficios y costos relacionados con la conservación y degradación de los mismos han sido, en gran parte, excluidos de políticas económicas, mercados y precios que determinan la producción y el consumo de la gente, las elecciones de inversión, prácticas de uso de los suelos y de manejo de los recursos naturales. A consecuencia de ello, las oportunidades económicas fueron pasadas por alto y surgieron riesgos significativos para lograr y sostener resultados positivos relacionados al desarrollo. Esta subestimación del valor de los servicios ecosistémicos en términos económicos significa que muchas decisiones han sido tomadas sobre la base de información parcial, amenazando así los objetivos de un desarrollo sostenible y equitativo.

A) Zonas o elementos naturales protegidos por el ordenamiento jurídico vigente

Para la identificación, caracterización y mapeo de las zonas protegidas por el ordenamiento jurídico vigente se realizará un catastro de información existente en diversas fuentes. Esta actividad está orientada a determinar, en forma preliminar, la estructura de ocupación del territorio, utilizando como fuente de información los instrumentos de planificación. Esta información será validada y actualizada a través de técnicas de clasificación de una imagen satelital y actividades de terreno. Adicionalmente, se adquirirá una imagen satelital de archivo del Sensor SPOT 7, cuya resolución es de 1,5m en pancromático y 6m multiespectral. La metodología a utilizar es posible agruparla en 5 etapas:

✚ Procesamiento de imagen satelital

El procesamiento de imágenes satelitales para la obtención de variables de ocupación del territorio y otras variables ambientales se desarrollará a partir de la aplicación de un Índice de Diferencia Normalizada (NDVI), que permitirá categorizar tres grandes tipos de coberturas (vegetación, cuerpos de agua y suelos desnudos/urbanos), para posteriormente interpretar de forma directa las unidades de vegetación.

✚ Validación en terreno

Corresponde al trabajo de campo a través del cual se validará y corregirá la clasificación de las imágenes satelitales.

✚ Diseño e Implementación de una base de datos espacial

Se elaborará una estructura de almacenamiento de datos con una interfaz gráfica vinculada al SIG que proporcione un set de herramientas y de posibles aplicaciones tendientes a optimizar el manejo y procesamiento de la información espacial y temática generada.

✚ Reconocimiento de componentes ambientales relevantes

Se incorporarán zonas naturales relevantes como riberas de cauces naturales, cuerpos de aguas, quebradas, humedales, lagunas, bosque nativo, patrimonios comunales, sitios prioritarios para la conservación de la Biodiversidad, Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (SNASPE) y elementos de valor patrimonial. De ser necesario se propondrán nuevas áreas a las registradas o catastradas en la zona urbana, susceptibles de ser consideradas como áreas de protección ambiental.

Considerando lo anterior el objetivo de este apartado es identificar y caracterizar el patrimonio ambiental del área urbana de la ciudad de Puerto Montt, basado en la valoración de Servicios Ecosistémicos que, potencialmente, proporcionarían diversas unidades naturales. Para tales efectos, en primer lugar se identificaron áreas o elementos naturales reconocidos por el ordenamiento jurídico actual. Posteriormente, se identificaron áreas de importancia ambiental basado en la valoración, no monetaria, de Servicios Ecosistémicos

V. RESULTADOS

1. Análisis de riesgo

1.1 Análisis de peligrosidad y catastro de peligros existentes

1.1.1 Zonas inundables

A.1) Tsunami

Contexto sismotectónico y de tsunamis

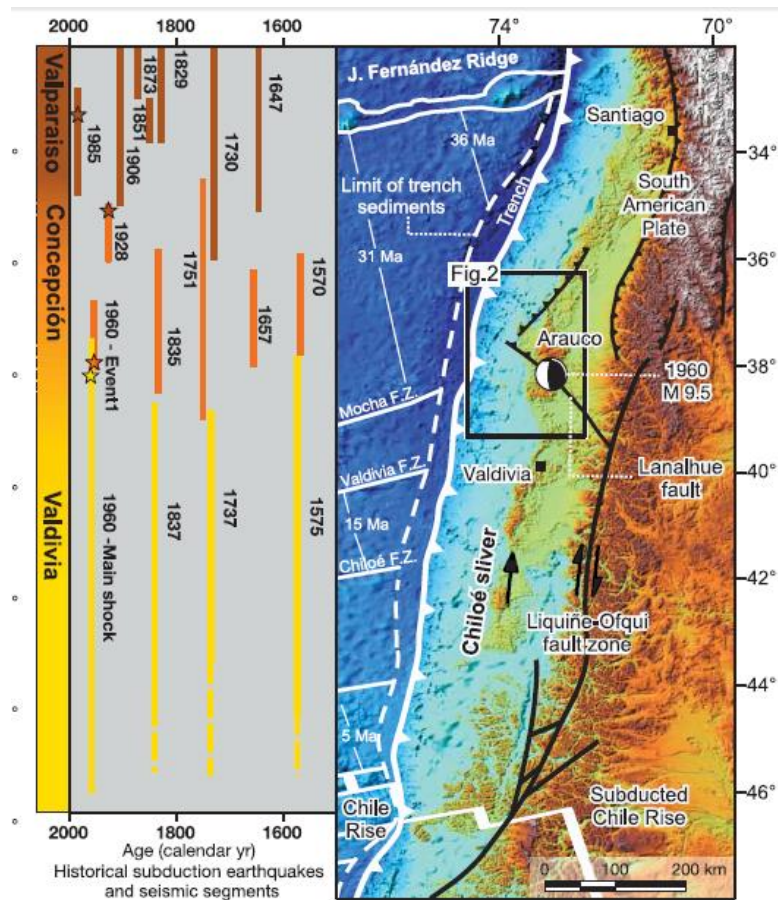
La presente sección describe los terremotos históricos que han ocurrido en la zona de estudio, así como los tsunamis registrados. Además, se presentan los parámetros sísmicos y de tsunami utilizados posteriormente en la modelación numérica.

Terremotos históricos

La ciudad de Puerto Montt se emplaza en uno de los lugares con importantes antecedentes sísmicos del país desde el año 1575 y con magnitudes máximas de hasta 9.5. El contacto inter-placa es el sitio fuente de los mayores eventos ocurridos en la región. Se han identificado 4 grandes eventos en esa zona sísmica (1575, 1737, 1837 y 1960), todos con magnitudes estimadas superior a 9.2 y con longitudes de ruptura de unos 1000 km, desplazamientos interplaca de 13 a 19m y periodos de recurrencia estimados de 128+-62 años (Nishenko, 1985). Dada la poca densidad de población, no existen registros escritos de daños que permitan identificar claramente las zonas de ruptura de cada evento, tal como se ha podido establecer en Chile Central.

La Figura 10 muestra los principales eventos de esta zona sísmica y la longitud de ruptura estimada en base a antecedentes sísmicos disponibles (Melnik et al, 2009). El terremoto de 1575 destruyó las 5 ciudades importantes del reino de España en el sur de Chile, tales como Imperial, Valdivia, Villarrica, Osorno y Castro (Lomnitz, 2004). Se registraron varias réplicas destructivas y se observaron remociones en masa que bloquearon el río Riñihue (igual a lo ocurrido con el sismo de 1960). En cuanto al evento de 1737, se sabe muy poco, salvo que generó daños entre Valdivia y Chiloé (Lomnitz, 2004). Posterior al sismo, se reportaron varias réplicas en Chiloé hasta el año 1748. Para el sismo de 1837, se estima que el epicentro estuvo ubicado entre Valdivia y Castro similar a los eventos de 1575 y 1737 pero más cerca de Chiloé (Lomnitz, 2004). El terremoto del 22 de Mayo 1960 ha sido catalogado como el sismo más grande registrado en la historia. El sismo tuvo una magnitud de momento $M_w=9.5$ y el área de ruptura se extendió desde la Península de Arauco por el norte ($37^\circ S$) hasta la Península de Taitao por el sur ($46^\circ S$), (Barrientos y Ward, 1990). Además, se observaron cambios morfológicos importantes en una longitud de 1000km y un ancho de 200km. El terremoto de 1960 consistió en una serie de eventos sísmicos que ocurrieron durante 33 horas con una distancia total de ruptura de 1000km. Cifuentes (1989) sugirió que los eventos tuvieron una migración desde el norte al sur durante esas 33horas. El primer gran evento ocurrió el 21 de mayo a las 6:00hrs (10:00 UTC) con una magnitud 8.3, el segundo evento ocurrió el 22 de mayo a las 14:55hrs (18:55UTC) con una magnitud 7.8, mientras que el evento principal consistió en dos subeventos de magnitud 8.3 a las 15:10 y 15:11hrs (19:10 y 19:11UTC), (Duda, 1963).

Figura N°10. Eventos sísmicos en el Sur de Chile ocurridos en la misma zona sísmica del evento de 1960 (Melnik et al., 2009).



Desde el punto de vista de la generación de maremotos, en los casos de los terremotos de 1575 y 1837 existen antecedentes de variaciones del nivel de posibles tsunamis. El primero generó ondas que llegaron a la Bahía de Concepción y causaron la muerte de unos 100 indígenas en Imperial (Lomnitz, 2004). Mientras que el segundo, generó ondas que afectaron principalmente la isla de Chiloé y arribaron también a Samoa, Hawaii y Japón. Se observaron también alzamientos costeros de hasta 2m en algunas islas del sur de Chile (Lomnitz, 2004). No hay registros de tsunami del evento de 1737. El tsunami mejor registrado es el generado por el sismo de 1960. Este evento generó gran inundación en toda la Cuenca del Océano Pacífico. Se midió una altura de inundación de 3m en Hawaii, y 4.2m y 4.9m en los puertos Japoneses de Onagawa y Ofunato, respectivamente (Takahashi, 1961). En Chile se registraron efectos diversos a lo largo de la costa. La máxima inundación se observó en Isla Mocha son 20-25m, mientras que al interior de la Bahía de Concepción, las alturas de inundación no sobrepasaron los 3m (Takahashi, 1961). Se podría argumentar que la Bahía de Concepción está orientada hacia el norte, y que la península de Tumbes generó un efecto protector, sin embargo, la Bahía de Coliumo, que también está orientada hacia el norte, registró una inundación que varió entre los 3.5 y 7m. La Tabla 16 muestra un resumen de alturas de inundación medidas en la costa de Chile (Takahashi, 1961).

Tabla N°16. Alturas de inundación en el sur de Chile producto del tsunami de 1960 (Takahashi, 1961).

Localidad	Latitud	Inundación (m)
Constitución	35.33°S	2.4
Dichato	36.54°S	3.5~7
Tomé	36.62°S	2.0
Penco	36.73°S	2.0~2.5
Talcahuano	36.71°	3.0
Coronel	37.03°S	2.0
Lota	37.10°S	2.0~3.0
Tirúa	38.34°S	4.0~5.0
Isla Mocha	38.57°S	20~25
Puerto Saavedra	38.78°S	8.0~9.0
Corral	39.89°S	8.8~10
Ancud	41.87°S	6.0~8.0

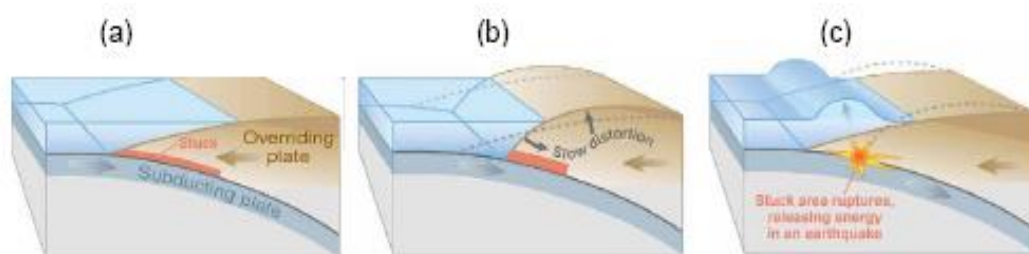
En Ancud se registró una primera onda 20 min después del sismo principal con una amplitud de 1m, y hasta las 17:00hrs se observaron 4 ondas donde la más grande fue la primera (SHOA, 2000). El agua inundó hasta un punto ubicado 1.5m sobre el muelle, el cual tiene una altura del cabezo de 4.7m (SHOA, 2000). Lo que resulta en una inundación de 6.2m. Por su parte Maullín registró una máxima inundación de 14m, donde la segunda y cuarta onda fueron las más altas. En Corral se produjo una primera onda de unos 3-5m entre las 15:30 y 15:50hrs para luego comenzar a descender y retirarse unos 30m, para ingresar una segunda onda estimada en 8.5m a las 16:25hrs, a pesar de haber información sobre daños en puntos ubicados a 10m sobre el nivel del mar (SHOA, 2000). Los máximos descensos del nivel del mar se estimaron en 8m, dejando gran parte de la bahía prácticamente en seco. En Isla Mocha, el tsunami se manifestó mediante 3 ondas que se desplazaron desde el suroeste, siendo la primera la de mayor amplitud, alcanzando los 15m (SHOA, 2000), se midieron, también, runup entre 20 y 25m (Takahashi, 1961). Por el contrario, en Lota se observaron amplitudes en torno a los 1.5m, los que inundaron hasta 20m más arriba del límite de las pleamares en sicigia (SHOA, 2000). De manera similar, en Talcahuano se observó una inundación de 3m sobre el nivel medio del mar, el que inundó sin causar destrucción (SHOA, 2000). Estos datos concuerdan bien con las observaciones realizadas por Takahashi (1961) en la Bahía de Concepción, tal como se observa en la Tabla 16. En Puerto Montt no hay registros claros del tsunami, sin embargo se menciona que hubo una subsidencia de 1m aproximadamente producto del sismo (SHOA, 2000)

Es importante mencionar que estudios de paleotsunamis han entregado mayor información respecto a los sismos generadores de tsunamis en la zona sísmica que va desde la península de Arauco a Taitao (Cisterna et al., 2005). Por ejemplo, se demostró que los eventos de 1837 y 1737 son eventos de menor magnitud y longitud de ruptura que el de 1960. Además, un evento similar o mayor al de 1960 fue el de 1575, ocurrido 385 años antes. Finalmente, mediante muestras de suelo se pudo identificar que en los últimos 2000 años los eventos similares a 1960 tuvieron una recurrencia de 285 años en promedio (Cisterna et al, 2005), lo que es prácticamente el doble del periodo estimado considerando todos los eventos sísmicos conocidos de esta zona (128 años). Por lo tanto, un sismo de magnitud 9.5, similar al de 1960 representaría un escenario conservador para la estimación de la inundación por tsunami.

Generación de tsunamis

La zona de contacto de la placa de Nazca y la Sudamericana se le denomina zona de acoplamiento o zona sismogénica interplaca (Figura 11-a). Debido al acoplamiento de las placas en la zona de subducción, se produce una deformación de la corteza terrestre (Figura 11-b) lo que podría manifestarse a partir de ascensos o descensos de zonas costeras durante periodos intersísmicos. El sismo se produce cuando la placa sudamericana se desplaza respecto a la placa de Nazca volviendo a su posición original, generando deformaciones cosísmicas opuestas a las deformaciones intersísmicas (Figura 11-c). Estas deformaciones cosísmicas generan una perturbación de la columna de agua debido a la deformación del fondo oceánico en un área equivalente a la zona de generación del sismo. Como ejemplo se puede mencionar que el sismo de 2010 (Mw 8.8) se generó en una zona de 450km de largo por 150km de ancho con un desplazamiento interplaca promedio de 10m. Del mismo modo, el sismo de 1960 (Mw 9.5) se generó en una zona de 850km de largo por 130km de ancho y un desplazamiento interplaca de 17m (Barrientos y Ward, 1990). Posteriormente, la perturbación de la columna de agua vuelve a su posición de reposo generando un tren de ondas que se propagan en ambas direcciones, hacia la costa y hacia el Océano Pacífico.

Figura N°11. Esquema muestra la zona de activación sismogénica y consecuente generación de tsunami.



Resultados de las simulaciones

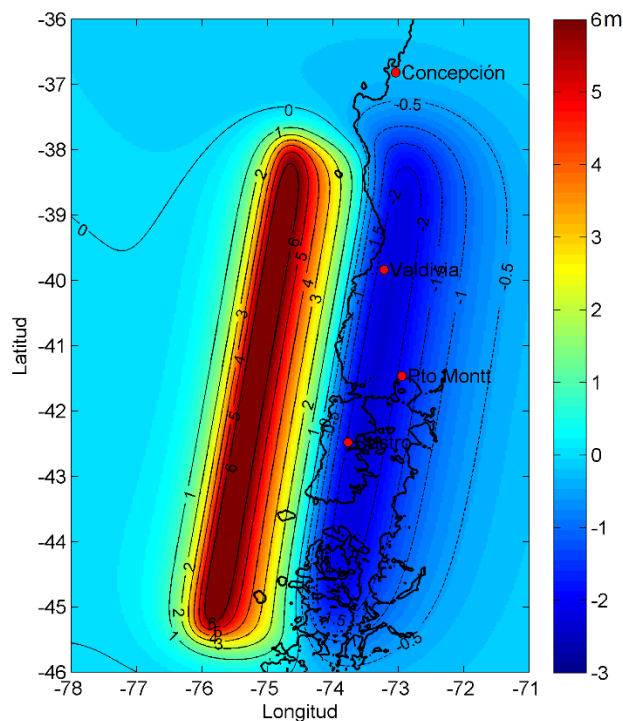
Se presentan los resultados obtenidos mediante las modelaciones numéricas.

Deformaciones cosísmicas

La Figura 12 muestra las deformaciones cosísmicas generadas por el modelo plano de un segmento (PFM) del sismo de 1960. Se puede observar que hay subsidencias mayores a 2m en Valdivia. Estos resultados son coherentes con las observaciones de campo. Por ejemplo, Barozzi y Lemke (1966) citado por Feuker (2006) señalan un hundimiento del terreno en la zona de la ciudad de Valdivia de 2.2m. Mientras que para la zona costera se observaron subsidencias de sólo 1-1.5m. Del mismo modo, el modelo indica que Isla Guafo se levantó unos 2-3m, lo que concuerda relativamente bien con lo reportado en ese lugar que corresponde a 3-4m (SHOA, 2000). Para el caso de Puerto Montt, se reportó una subsidencia de 1m aproximadamente (SHOA, 2000). Sin embargo, el modelo plano de falla rectangular induce una subsidencia de hasta 1.7m para esta zona, representando un escenario desfavorable. Por lo tanto, junto a la modelación numérica, es necesario considerar la subsidencia que las deformaciones cosísmicas

generarían en la zona de Puerto Montt. En el presente estudio, se usará el valor 1.7m para cuantificar la inundación máxima por tsunami.

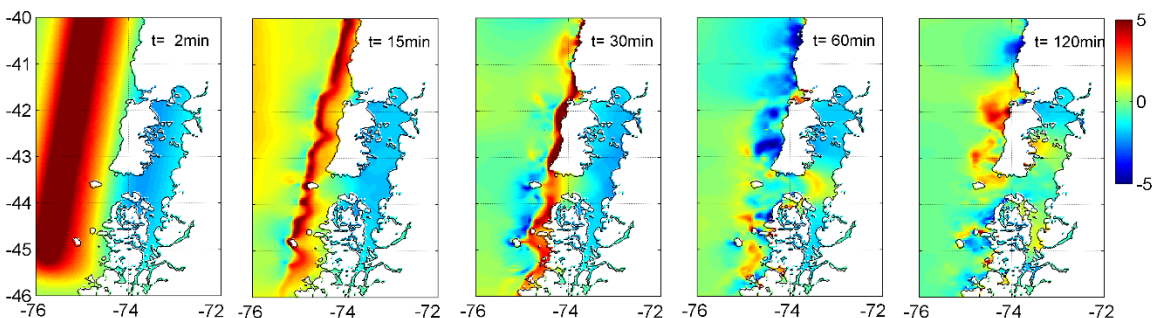
Figura N°12. Deformaciones cosísmicas calculadas con el modelo numérico para el sismo de 1960.



Propagación del tsunami

La Figura 13 muestra una secuencia de imágenes de la propagación del tsunami desde el Océano Pacífico hacia aguas interiores. Se puede observar que después de 2 horas, el tsunami no ingresa realmente por el canal de Chacao, ya que el primer frente es refractado por efecto de los cañones submarinos. Este fenómeno ha sido estudiado en el Cañón submarino del Biobío (Aránguiz y Shibayama, 2013). Sin embargo, se puede observar que el tsunami ingresa por la boca del Guafo, que está ubicada al oriente de la isla Guafo, entre la costa sur de la isla Grande de Chiloé y el lado norte del archipiélago de las Guaitecas. Se puede ver que a los 30 min el tsunami ingresa a la boca del Guafo y a los 60 min ingresa al Golfo Corcovado producto de la difracción inducida por la isla Chiloé propagándose hacia el Golfo de Ancud. De esta forma, se puede concluir que un tsunami generado al norte de la isla Chiloé o frente al canal de Chacao no representa un peligro importante para Puerto Montt, sin embargo, un tsunami generado frente o al sur de la isla ingresaría por la Boca del Guafo hacia aguas interiores. De este modo, en el análisis que sigue se considera sólo el tsunami generado por el modelo PFM, ya que representa una mayor amplitud inicial del tsunami frente a la Boca del Guafo y será más desfavorable para el caso de Puerto Montt. Además, es importante destacar que los tiempos de arribo de la primera onda del tsunami a Puerto Montt serán mayores a las 2 horas.

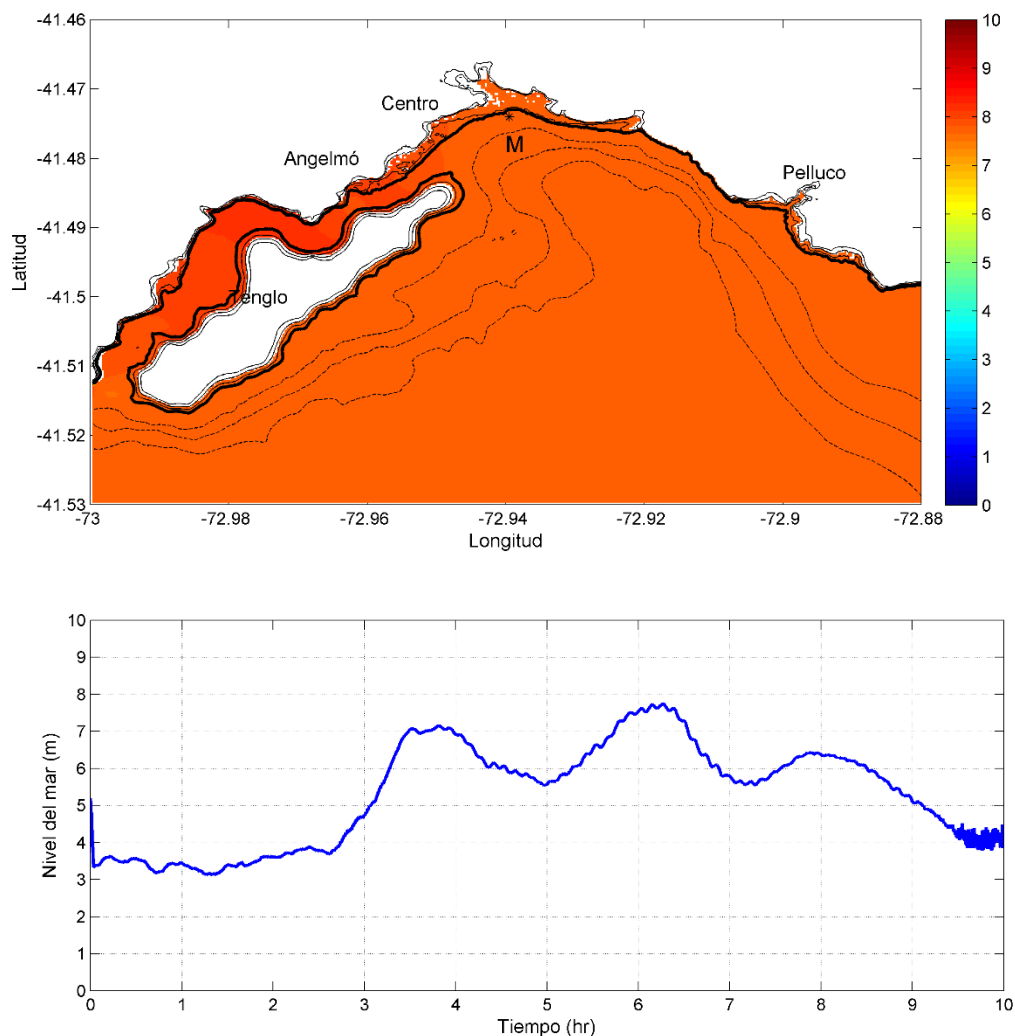
Figura N°13. Secuencia de imágenes que representan la propagación del tsunami de 1960 desde el Océano Pacífico hacia el Golfo Corcovado y Golfo de Ancud.



Alturas de inundación

La altura de inundación se define como el máximo nivel de inundación que alcanza el agua medido desde un nivel del mar de referencia. La Figura 14 muestra las alturas de inundación y serie de tiempo de un mareógrafo virtual "M" obtenidas para Puerto Montt. Se puede observar que las alturas máximas de inundación alcanzan valores entre 7 y 8m. Es importante destacar que en estos resultados se incorporó un descenso de la topografía de 1.7m producto de la subsidencia y un nivel de marea de 3.5m, por lo tanto, la amplitud del tsunami es de sólo 2.8m aproximadamente. De este modo, la máxima cota de inundación se estimó en 8m sobre el NMM considerando la actual topografía. Otro aspecto relevante es el tiempo de arribo. Se puede observar que la primera onda comienza a llegar a las 3 horas después del sismo y la máxima amplitud se alcanza con la segunda onda 6 horas después del sismo.

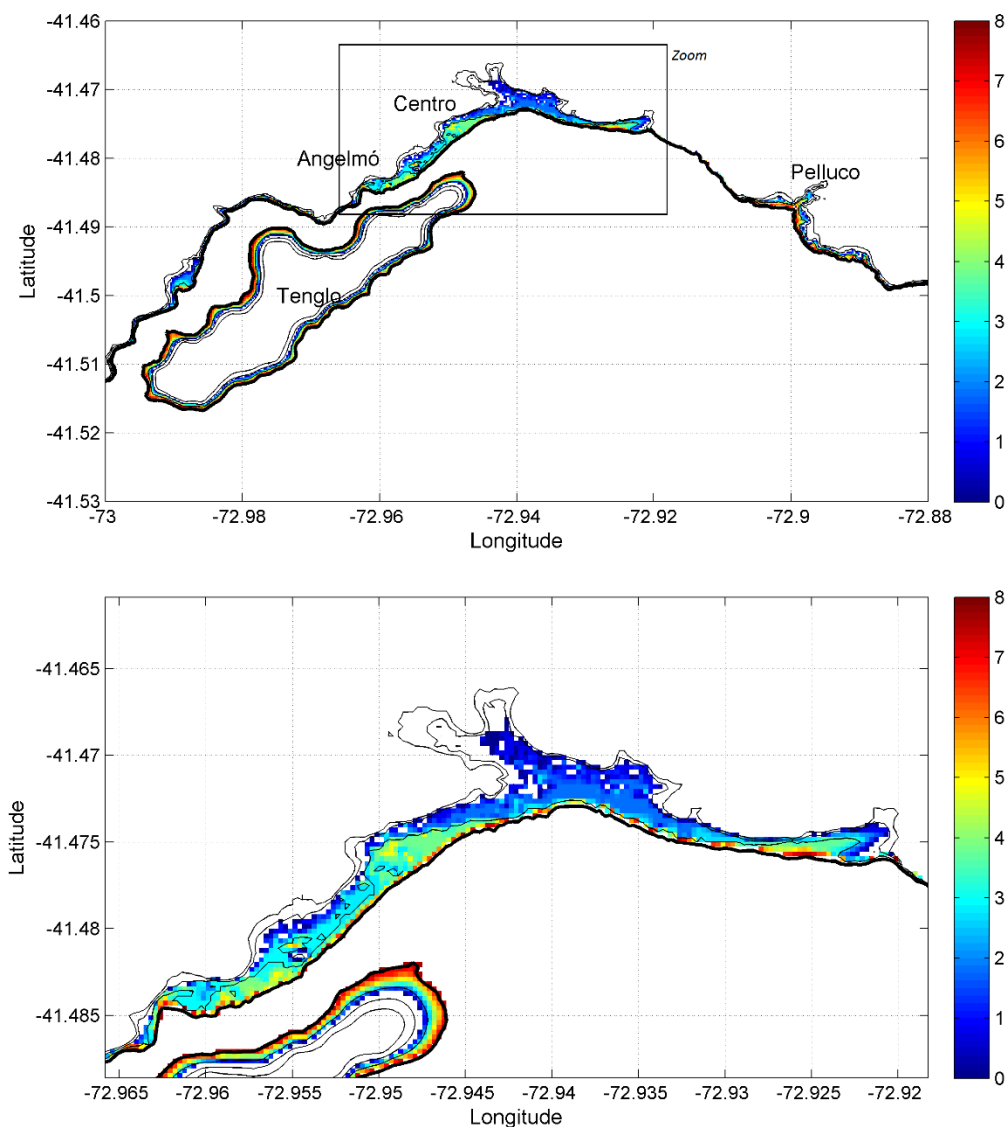
Figura N°14. Superior: Alturas de inundación para la malla 4. El asterisco indica la ubicación del mareógrafo virtual "M" para obtención de la serie de tiempo. Inferior: Serie de tiempo para 10 horas de simulación.



Profundidades de flujo

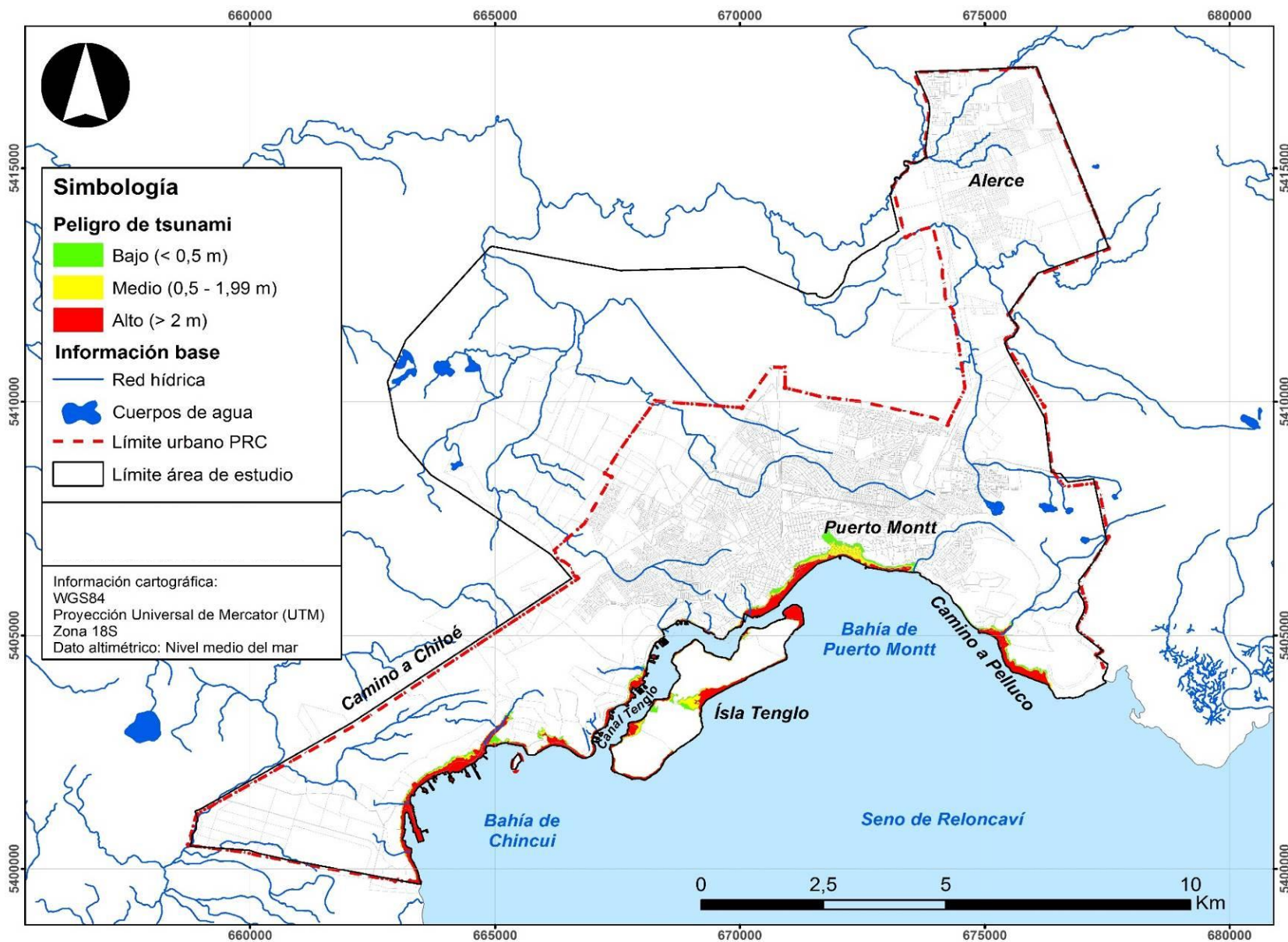
La profundidad de flujo se define como la altura de la columna de agua por sobre la cota de terreno. Esta variable es importante porque entrega una idea del poder destructivo del tsunami cuando ingresa a suelo seco. La figura 15 muestra las profundidades de flujo obtenidas para Puerto Montt. Tal como se mencionó anteriormente, se consideró tanto la marea alta como la subsidencia. Se puede observar que las mayores profundidades de obtienen en la isla Tenglo con valores de 8m en la costa. Este valor está medido respecto al nivel medio del mar. Por su parte, el sector Pelluco alcanza profundidades de 7m en la costa que disminuyen rápidamente hacia el interior. La mayor zona de inundación se observa en el sector céntrico de la ciudad, sin embargo, las profundidades de flujo no superan los 4m en la línea de costa.

Figura N°15. Profundidades de flujo



En total 352 ha del territorio en estudio están bajo el peligro de Tsunami. La Figura 16 muestra las superficies en peligro de Tsunami. El peligro Alto comprende 66.95%, el peligro medio (17.5%) y el bajo 15.53% de la superficie afectada por el peligro de tsunami.

Figura N° 16. Peligrosidad por Tsunami



A.2) Inundación por cursos hídricos superficiales y anegamientos

Anegamientos

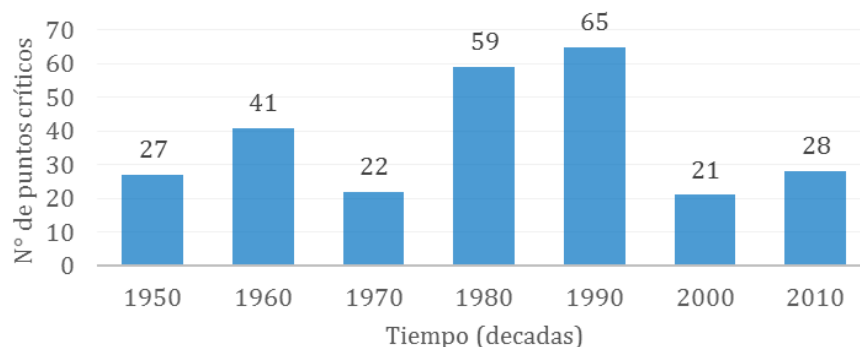
Según Mardones y Vidal (2001), un anegamiento se define como la acumulación de un volumen de agua/lluvia sobre la superficie del suelo, y obedece a factores naturales y antrópicos, entre ellas las autoras mencionan: las características pluviométricas (intensidad de lluvia diaria), las características físicas del suelo y subsuelo (presencia de sedimentos impermeables que limitan la capacidad del suelo para infiltrar con la debida velocidad el agua de la lluvia y sectores morfológicamente deprimidos con pendientes débiles o nulas). Gran importancia se atribuye también a las intervenciones antrópicas tales como: rellenos artificiales y obstrucciones del drenaje.

a) Recurrencia histórica

En el período 1958-2010 se registraron un total de 263 puntos críticos referidos a la ocurrencia de anegamientos urbanos. Se observó un progresivo aumento del número de casos entre el período 1960-1990 (Figura 17), pasando de 41 puntos en 1960 a 65 en la década de 1990. El alto número de casos en la década del 80 puede asociarse con años especialmente lluviosos correspondientes al fenómeno El Niño. Sin embargo, el alto número de casos en la década de 1990 se considera crítico debido a las condiciones de escasas de precipitaciones.

En las últimas dos décadas (2000-2010) se encontró un número menor de puntos críticos (-44 puntos), sin embargo en los primeros 5 años de la década de 2010 los puntos críticos superan a los registrados en la década anterior (+7 puntos). La preocupación por los eventos de anegamientos por parte de las autoridades locales y vecinos, plasmados en el análisis de la prensa local puede estar asociada con la entrada en vigencia de obras destinadas a mitigar el efecto de los anegamientos. Así por ejemplo se encuentran el Plan Maestro de evacuación y drenaje de Aguas Lluvias de Puerto Montt (2002) y el Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de Alerce, Región de Los Lagos.

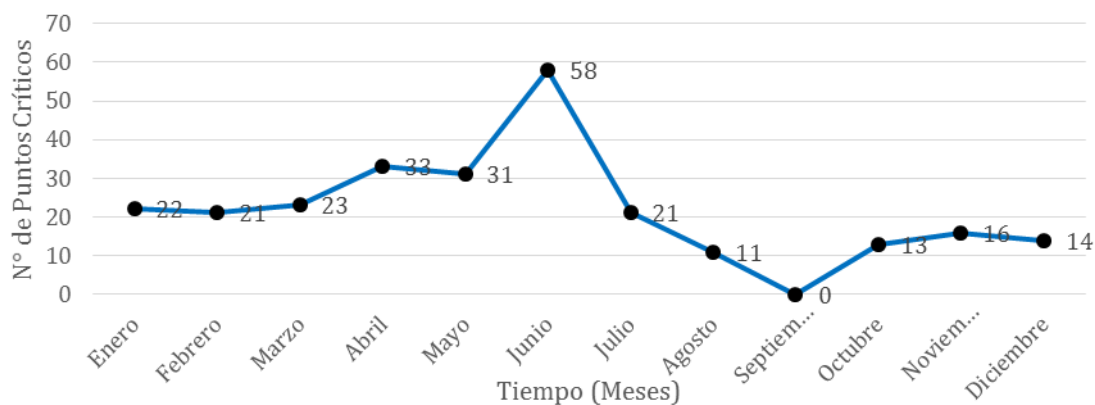
Figura N° 17. Cantidad de puntos conflictivos de anegamientos por década para la comuna de Puerto Montt.



Fuente: Elaboración propia, según: 1958-1998 (AC Ingenieros Consultores); 2000-2008 (GSI Ingeniería); 2005-2015 Información propia del consultor según datos de prensa.

La distribución mensual (Figura 18) de los 263 puntos críticos identificados, indica la ocurrencia de anegamientos durante todos los meses del año. Se observa una ligera concentración de la cantidad de puntos críticos afectados desde abril hasta junio, período en el que se registran más de 30 puntos. El siguiente peak de puntos afectados se produce en enero, febrero, marzo y julio, con 20 lugares críticos aproximadamente. Los menores registros de puntos críticos ocurren en el período agosto-diciembre.

Figura N°18. Distribución mensual de puntos críticos por anegamientos: área urbana de Puerto Montt.



Fuente: Elaboración propia, según: 1958-1998 AC Ingenieros Consultores; 2000-2008 GSI Ingeniería; 2005-2015 Información propia del consultor según datos de prensa.

Según los datos históricos registrados en la prensa los anegamientos son producidos por la falta de limpieza de los sistemas de evacuación de aguas lluvias, obstrucción y fallas de colectores, por el desborde de los colectores. Los eventos son detonados por precipitaciones intensas.

b) Distribución espacial y temporal de sectores críticos

La distribución espacial de los puntos críticos registra variaciones en las décadas analizadas (Figura 19). Entre la década de 1950-1960 los puntos críticos se concentraron en el sector céntrico de la ciudad. Desde la década de 1970 se comienza a visualizar una mayor dispersión de los puntos críticos, la que se hace más notoria en la década de 1980 y 1990 afectando a toda el área con urbanizada del núcleo urbano de Puerto Montt. En la década del 2000 los puntos nuevamente se concentran en el sector más céntrico de la ciudad y en el sector de Alerce.

En el período más reciente (2010-2015) (Figura 20), se observa que los puntos críticos de anegamiento se alejan del centro de la ciudad; sin embargo se mantienen los anegamientos en el sector Angelmó. Otros puntos críticos correspondieron a: Sector Lagunitas, Ibañez con Puntagudo, Calle Uno Norte con Pichoy - Villa Rayén, Población Antue, Población La Esperanza, Población Cumbre Alta, Las Camelias - Población Bernardo O'Higgins, Villa Los Poetas, - Población Modelo, Población Las Camelias, Población Pablo II, Villa Parque los Fundadores, Población Antonio Varas, Población Ewald Hofmann, sector Mirasol.

Figura N°19. Distribución espacial puntos críticos de anegamientos en la zona urbana de Puerto Montt, décadas 1950-2000.

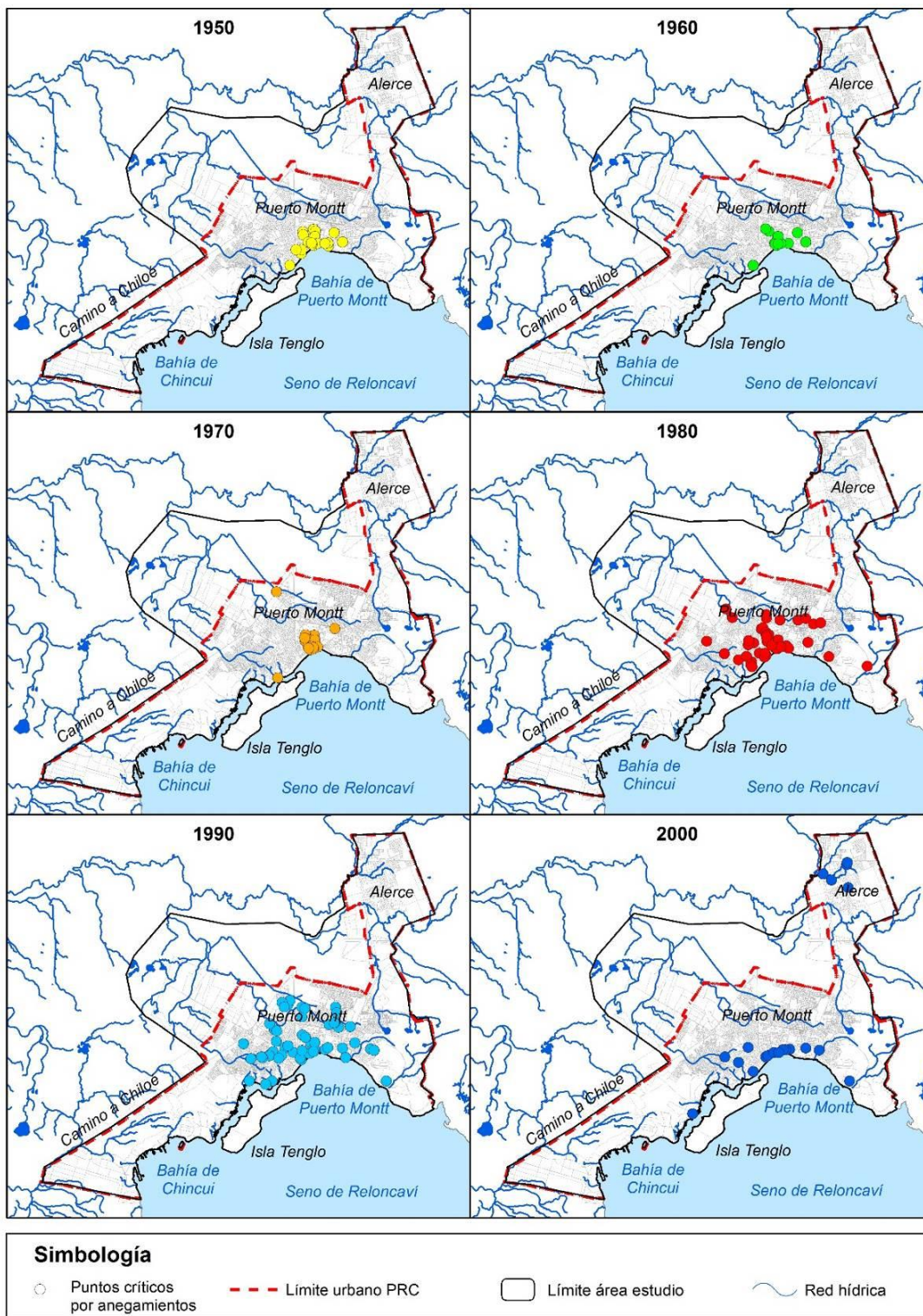
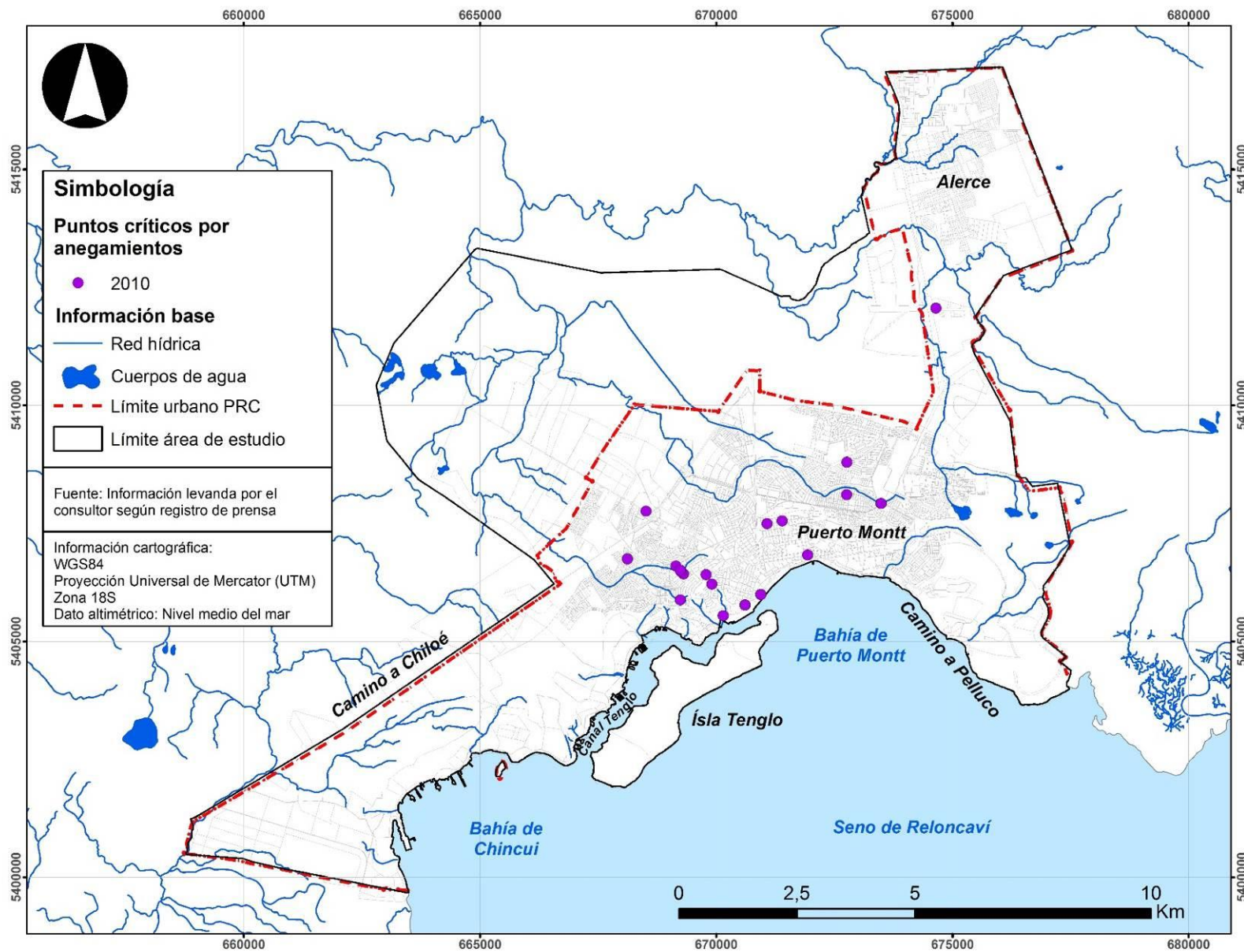


Figura N° 20. Puntos críticos por anegamientos área urbana de Puerto Montt, Período 2010-2015.



c) Modelo de susceptibilidad por anegamientos

Análisis de los factores condicionantes: Geología y Litología

En general la geología de la zona de Puerto Montt, se encuentra dominada por depósitos sedimentarios recientes, principalmente gravas y arenas no consolidadas, estos depósitos tienen su origen en la actividad glaciár, glaciáfluvial y volcánica que afectaron la región durante el Cuaternario⁴ (SERNAGEOMIN, 2000). Los depósitos de estos orígenes alcanzan un espesor de ca. 1.000 m en el subsuelo de la zona de Puerto Montt (SERNAGEOMIN, 1998). En el área de estudio destaca la presencia de 4 unidades geológicas (Figura 21), identificadas por SERNAGEOMIN (2000) a escala 1.100.000:

a) Depósitos piroclásticos (Pldp): Localizados principalmente en el sector de Alerce, con una superficie de 1280 ha. Corresponden a estratos de gran variabilidad composicional y granulométrica, compuestos de material volcánico correspondientes al volcán Calbuco, principalmente escorias, pómez y ceniza. Frecuentemente intercalaciones de niveles más cementados. De ignimbritas y facies fluviales retrabajadas. Litológicamente corresponden desde bloques hasta arcillas, donde se desarrollan acuíferos colgados superficiales, generalmente el agua superficial tiene escaso o poco contacto con el agua subterránea.

b) Depósitos Morréicos (Plm1): Localizados en el sector Norte y al suroeste de Puerto Montt, Camino a Pelluco e Isla Tenglo, en una superficie de 5060 ha. Corresponden a depósitos de la Glaciación Llanquihue, generalmente son macizos y sin estratificación, mal clasificados, incluyen gravas, arenas, limos hasta arcillas. En la litología de los clastos predominan dacitas y andesitas. Presentan morfologías de cordones morréicos. Generalmente se asocian a la presencia de acuíferos colgados

c) Depósitos glaciáfluviales (Plgf1): Localizados en el casco urbano principal de Puerto Montt, camino a Chiloé, camino al Tepual y camino al sector de Alerce, abarcan una superficie de 5060 ha. Corresponden a gravas arenosas con moderada a buena clasificación, con bajo porcentaje de matriz arenosa, generalmente interestratificados con estratos de arena.

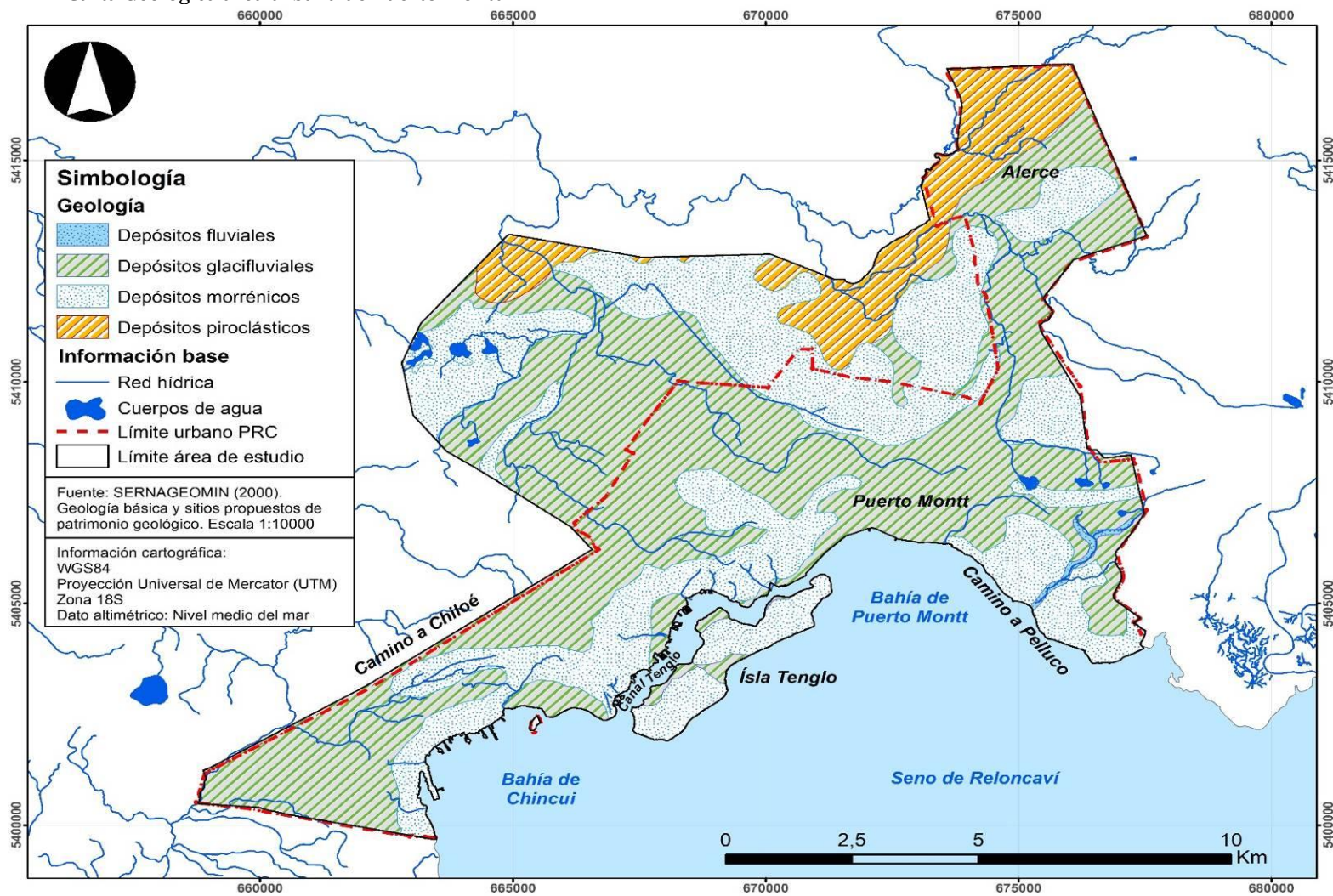
d) Depósitos fluviales (Hf): Se localizan principalmente en las riberas del estero Pelluco, camino a Pelluco, comprenden una superficie de 50 ha. Formados por gravas con buena a moderada clasificación, inmersas en una matriz de arenas gruesas y finas.

Depósitos morreneicos como glaciáfluviales comprenden el 90% de la superficie en el área de estudio, lo que marca la impronta realizada por la Glaciación Llanquihue (14.000 – 130.000 AP). Esta glaciación inicia su retroceso hace aproximadamente 13.900 años AP⁵. Posteriormente, y hasta la actualidad, la zona registra la acumulación de sedimentos fluviales y litorales (SERNAGEOMIN, 2000).

⁴ Últimos 1.8 millones de años

⁵ Años antes del presente; Presente =1950 DC.

Figura N°21. Carta Geológica área urbana de Puerto Montt.



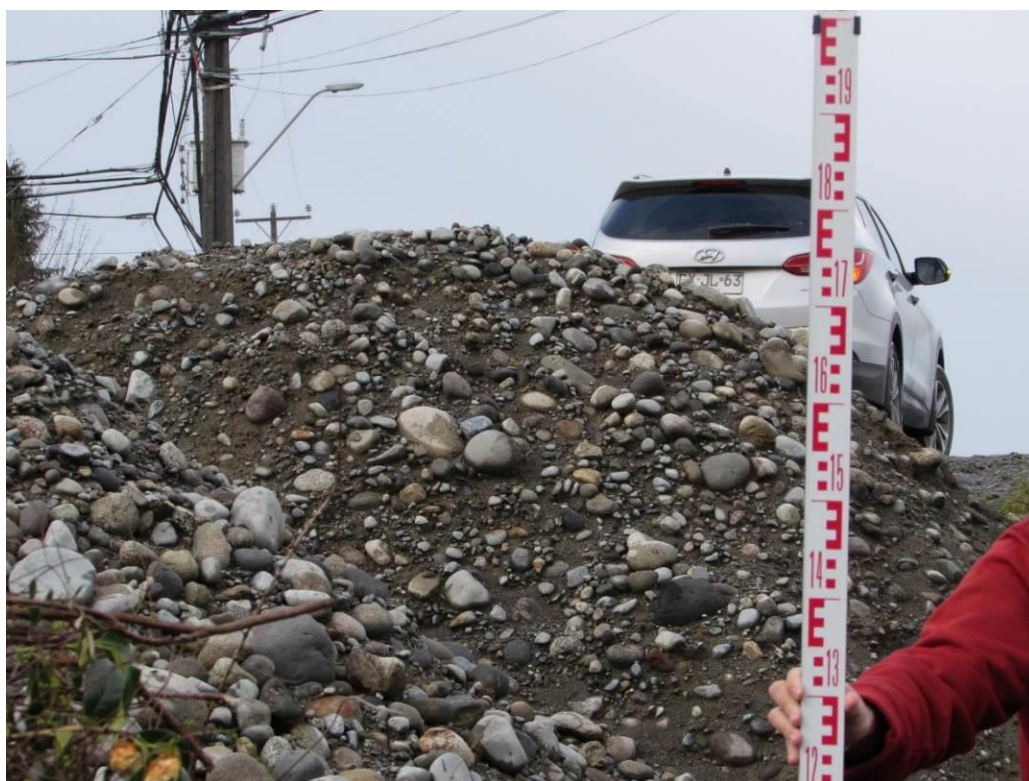
La reclasificación de la variable litología (Figura 23) para el peligro de anegamiento, mostró que en general la zona más urbanizada se encuentra con niveles bajos (50,88%) y medios (69,54%). El nivel alto se localizó en el sector de Alerce (9,6%).

El nivel bajo de peligrosidad quedó representado por los depósitos de morrenas, los que se encuentran formados por gravas y arenas mal clasificadas, debido al tamaño de los clastos de mayor tamaño pueden favorecer un proceso de infiltración debido a la porosidad.

La peligrosidad media quedó representada por los depósitos fluviales (Figura 22) y glaciofluviales, compuestos principalmente por gravas arenosas. Generalmente este tipo de depósitos presenta porosidad intergranular, donde los poros constituyen una red de canales pequeños donde circula el agua subterránea, sin embargo con la mezcla de materiales de menor tamaño se puede generar una obstrucción parcial del flujo (Martínez et al., 2006)

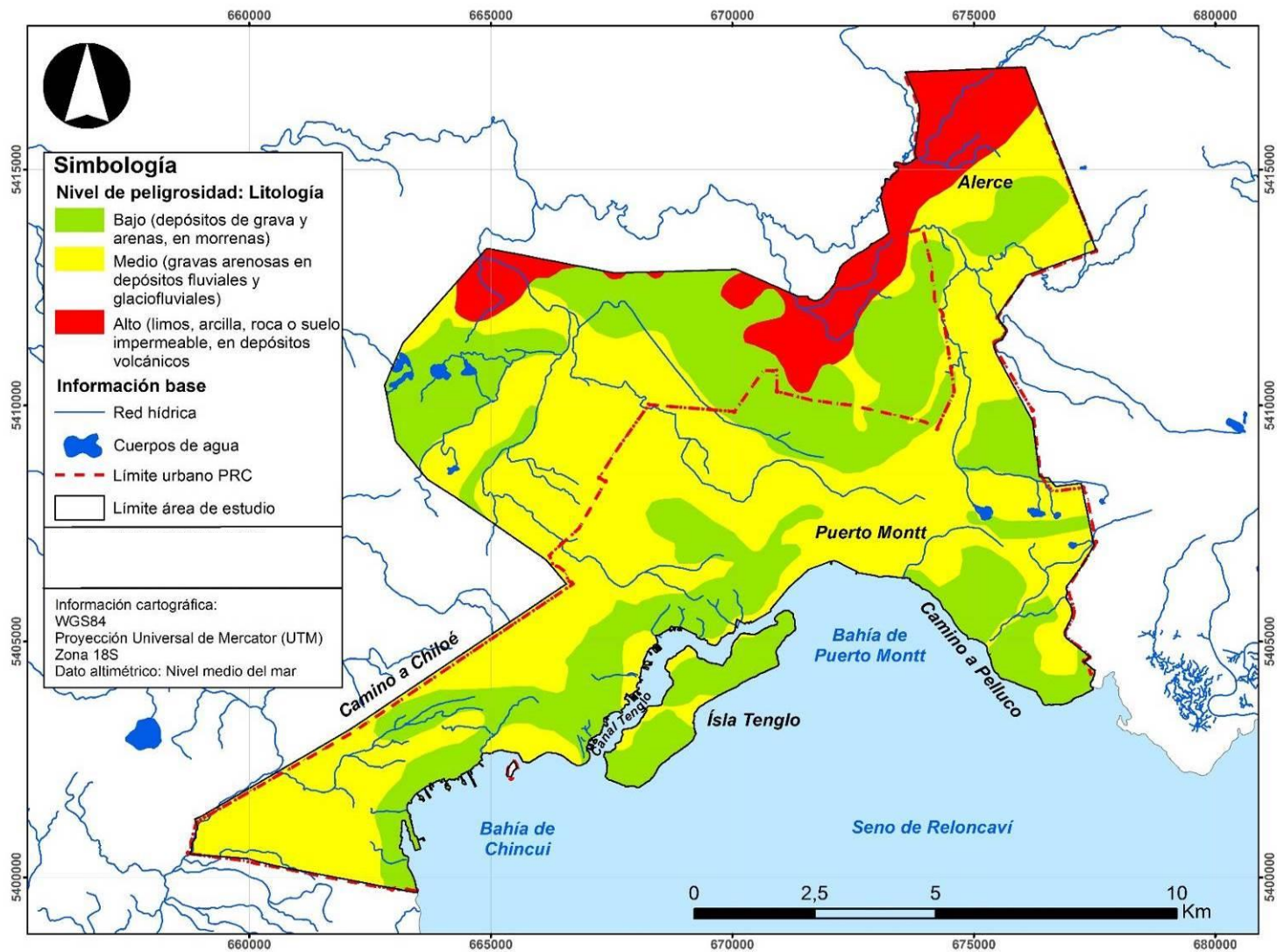
La peligrosidad alta asociada a la variable litología, correspondió a limos, arcillas, roca o suelo impermeable principalmente localizado en los depósitos volcánicos. En terrenos volcánicos se suelen superponer materiales diversos (piroclastos, cenizas, volcanosedimentarios), estas características provocan habitualmente la aparición de materiales permeables por porosidad e impermeables (Martínez et al., 2006); más aún cuando consideramos la presencia de arcillas y la formación de acuíferos colgados de poco contacto con el agua subterránea.

Figura N° 22. Depósitos aluviales, principalmente cantos rodados en matriz arenosa. Estero Pelluco.



Fotografía: Propia del consultor.

Figura N° 23. Nivel de peligrosidad por anegamiento, según litología.

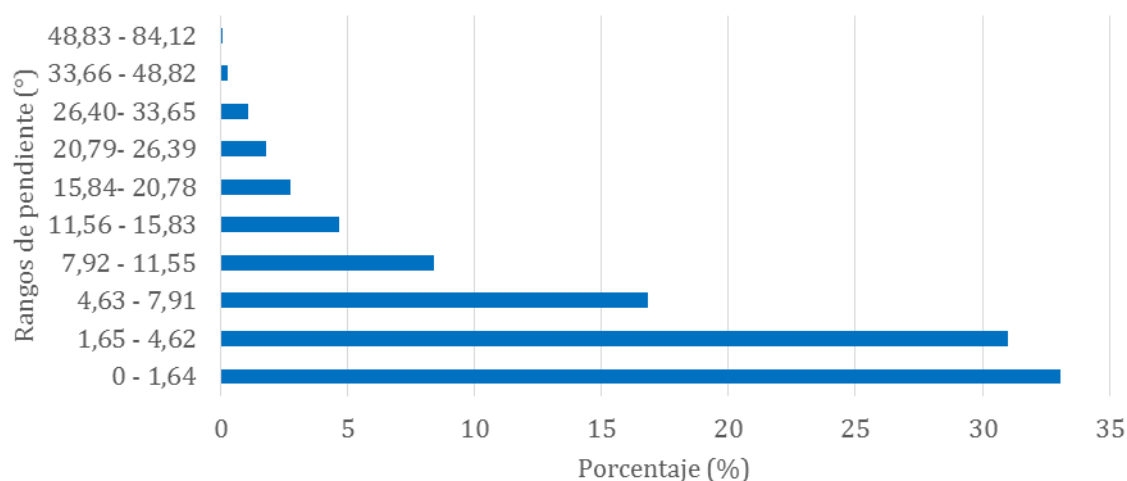


Análisis de pendientes

En el área urbana de Puerto Montt se observa que las pendientes son bajas, así los rangos comprendidos entre 0° - $4,62^{\circ}$ corresponden al 64% del área (Figura 24). Las pendientes moderadas entre $7,91$ - $15,83^{\circ}$ corresponden al 13% de la superficie. Pendientes fuertes entre $15,84$ - $33,65^{\circ}$ agrupan al 6% de la superficie, por último, las pendientes fuertes $\geq 35^{\circ}$ corresponden al 0,37% de la superficie total.

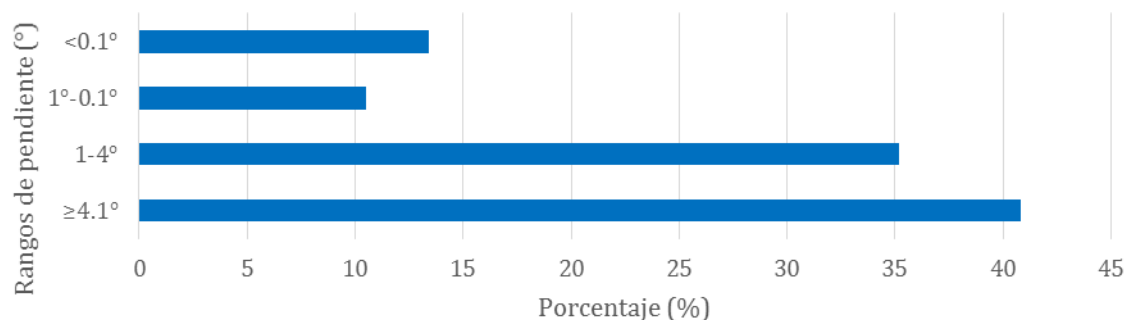
La distribución anterior es importante para el análisis de las pendientes más expuestas al peligro de anegamiento. Al respecto, un 13,4% del área presenta pendientes $\leq 0,1^{\circ}$ consideradas de alta susceptibilidad al fenómeno analizado (Figura 25). En el rango medio 1° - $0,1^{\circ}$ se encuentra un 10,5% de la zona. El nivel de peligro bajo quedó representado por el rango 1 - 4° que corresponde al 35,17% del área. Finalmente, un 40,81% presenta pendientes $\geq 4,1^{\circ}$ consideradas de muy baja susceptibilidad al peligro de anegamientos (Figura 26).

Figura N°24. Histograma de pendientes zona urbana Puerto Montt



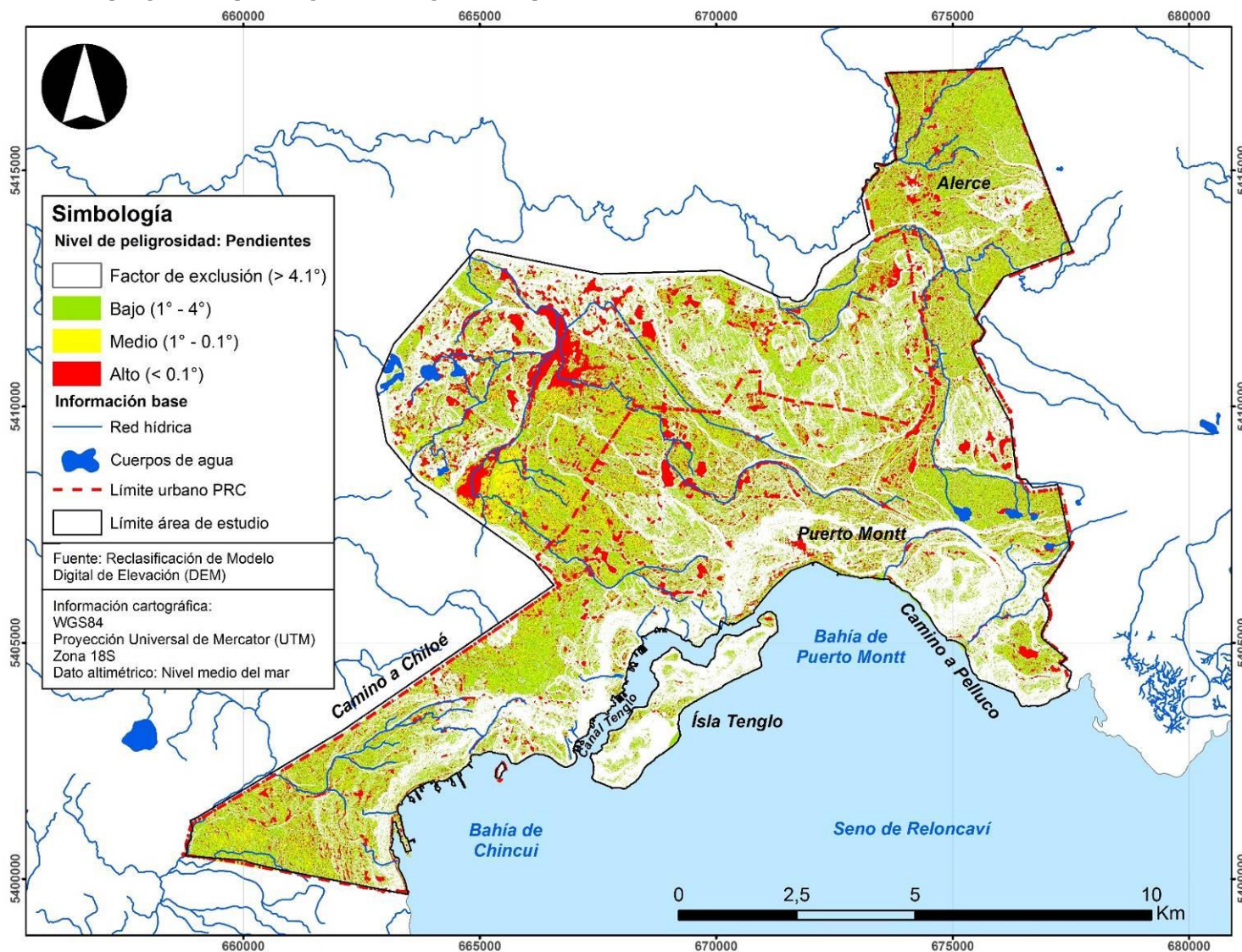
Fuente: Elaboración propia del consultor

Figura N°25. Histograma de frecuencias altimétricas para análisis de anegamientos



Fuente: Elaboración propia del consultor

Figura N°26. Nivel de peligrosidad por anegamiento, según factor pendientes.



Variables morfológicas

El relieve del área urbana de Puerto Montt se caracteriza por suaves lomajes con alturas entre 0 y 161msnm. La peligrosidad por anegamiento en relación al factor morfológico, indica que el (68,35%) de la zona se encuentra en un nivel de peligrosidad alto (Figura 28), estas zonas corresponden a llanuras donde el nivel, las que además evidencian una fuerte intervención antrópica debido a los rellenos observados principalmente en sectores camino a Chinquihue y Alerce (Figura 27).

El nivel medio correspondió a terreno irregular (*hummocky terrain*), que presentan depresiones cerradas con vertientes escarpadas, identificadas con zonas de transición entre las zonas de lomajes y las planicies. Esta morfología se distribuye de forma uniforme por el territorio en estudio (43,16%).

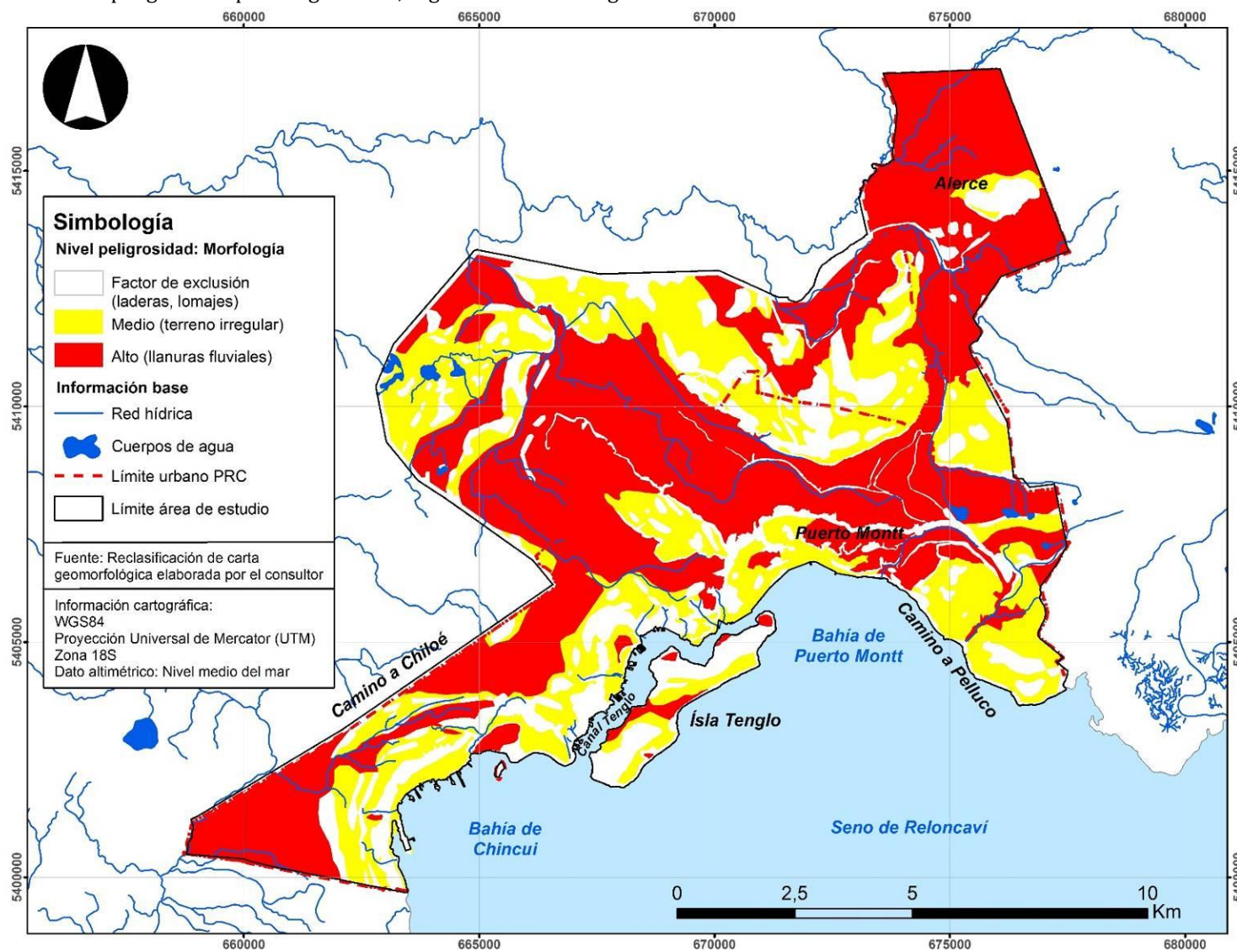
La morfología más elevada correspondió a laderas y lomajes (26,40%), áreas que se consideraron como zonas de exclusión en el análisis debido a su escasa asociación con procesos de acumulación de agua sobre el terreno, la que generalmente escurre a favor de la pendiente.

Figura N° 27. Vista panorámica hacia el sector de Alerce, se observa una topografía plana con suaves lomajes y algunos rellenos antrópicos.



Fuente: Elaboración propia del consultor

Figura N°28. Nivel de peligrosidad por anegamiento, según factor morfológico



Consideraciones finales del Peligro de Anegamiento

La multiplicación en ArcGis de los 3 factores analizados: litología, pendientes y morfología, mostró que un 54% de la zona urbana de Puerto Montt es susceptible al peligro de anegamiento (Figura 30).

Las zonas en peligro bajo representaron el 8,07% de la superficie analizada; las zonas en esta condición se localizan principalmente en: sector sur de Alerce; sector norte del casco urbano de Puerto Montt que corresponden principalmente al área comprendida en las cercanías de la Ruta 5 sur; sector norte de la camino a El Tepual

Las áreas de peligro medio (29,67%) y bajo (17,09%) se distribuyen en forma homogéneas, lo que implica que las zonas de peligro medio se localizan en forma aledaña a zonas de peligro alto. En el área urbana es posible identificar dichos sectores en: zona céntrica de la ciudad incluyendo los sectores Angelmó (Figura 29) y costanera; sectores localizados en la segunda terraza; áreas comprendidas entre los caminos a Chinquihue, El Tepual y Alerce; núcleo urbano de Alerce.

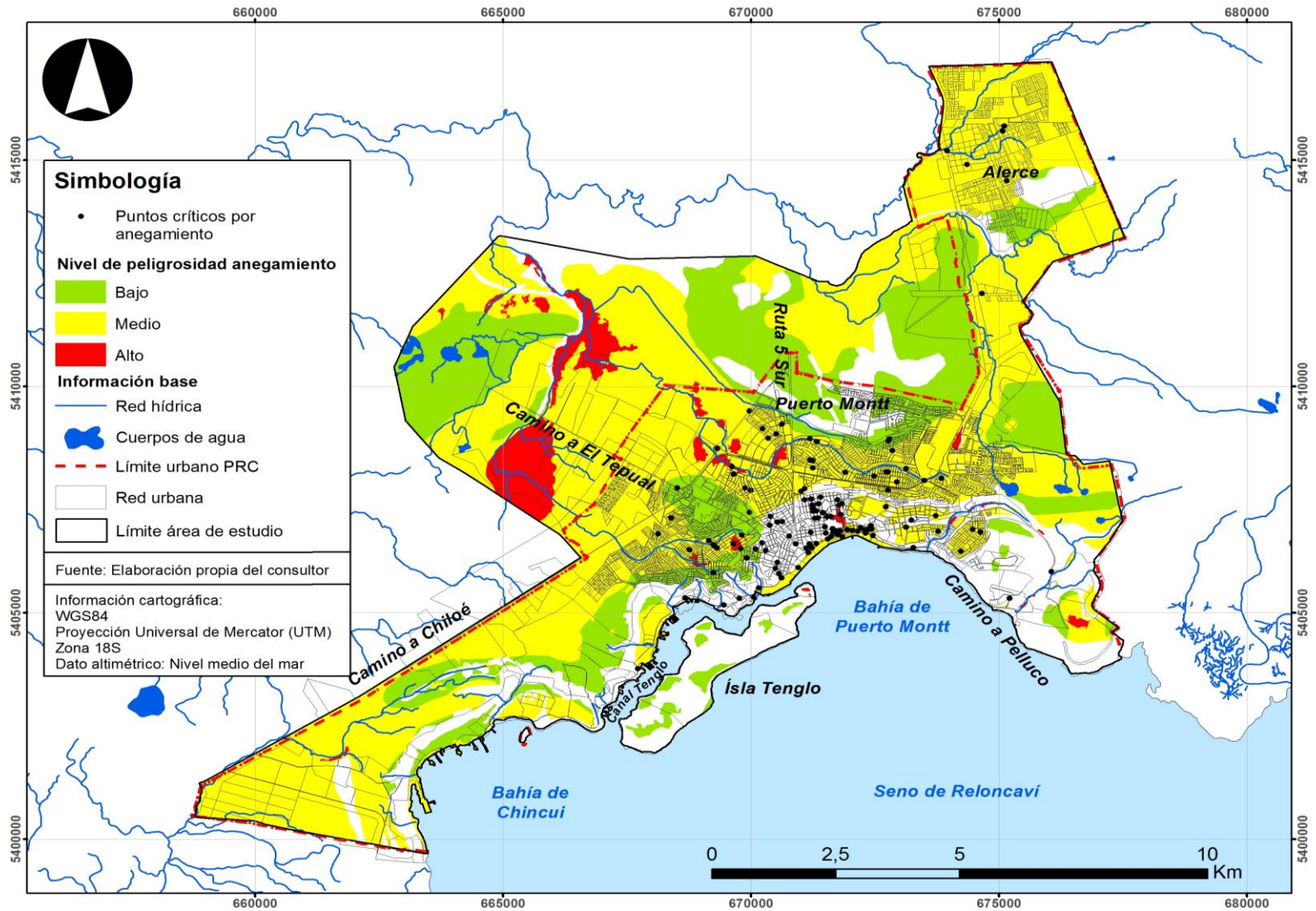
Finalmente se observa que los puntos críticos históricos coinciden con la modelación de las variables realizadas, principalmente en aquellas áreas definidas como de alto y medio peligro, como la zona urbana principal y el sector de Alerce. Es importante considerar estos puntos críticos mencionados en el análisis de la recurrencia histórica principalmente en el período 2010-2015.

Figura N°29. Anegamientos Puerto Montt Junio 2014: Sector Angelmó.



Fuente: Karen Oyarzo Uribe (Twitter)

Figura N°30. Peligrosidad por anegamientos, área urbana de Puerto Montt



Análisis de los factores desencadenantes.

La zona se encuentra en el dominio climático templado húmedo (Rojas et al., 2015), en el bloque comprendido en los cinturones de los vientos del oeste. Esta condición genera un clima templado sin estación seca; las precipitaciones se presentan durante todo el año, sin embargo en el período invernal (julio a septiembre) se concentra la mayor cantidad. La precipitación anual promedio corresponde a 2000 mm en el sector de Puerto Montt (SERNAGEOMIN, 2000).

A escala diaria las precipitaciones registradas en 24-h en 54 años para la estación el Tepual (1958-2011), oscilaron entre un mínimo 31mm hasta 100 mm registrados en los años 1992 y 2006, el promedio de la precipitación en el período correspondió a 55,5 mm (D.E. 15,7). Se observan 4 eventos con montos superiores a los 80 mm (1997, 1982, 2006 y 1992), y 35 eventos con montos superiores a los 50 mm.

En relación con los montos de precipitación diaria y los anegamientos en los últimos 5 años, se observó que estos se relacionaron con montos pluviométricos superiores a los 40 mm 24-h, con una mayor cantidad de puntos críticos cuando los umbrales superaron los 50 mm 24-h.

El estudio del "Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de Alerce, Región de Los Lagos" determinó las precipitaciones máximas anuales de diseño para una duración de 24 horas, resultantes para períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50 y 100 años (Tabla 17). Al respecto se observa que la precipitación detonante de anegamientos tiene una alta probabilidad de ocurrencia anual, con una tasa de retorno de 2 años.

Tabla N°17. Valores de Precipitaciones Máx. Anuales 24 hrs, por período de retorno, estación El Tepual.

Período Retorno	Pp. Máx. 24 horas.
2	53,31
5	68,49
10	78,08
25	89,78
50	98,25
100	106,56

Fuente: GSI Ingeniería

Inundaciones

Peligro de inundaciones por desborde de cauces

a) Recurrencia histórica y contexto

La topografía del área urbana de Puerto Montt, debido a sus escasos gradientes altitudinales, determina la formación de cuencas de drenaje pequeñas. Además las constantes precipitaciones provocan que los esteros mantengan caudales constantes, los que aumentan con el aporte pluvial o bien por acuíferos que afloran a la superficie en vertientes o vegas (Rojas et al., 2015; Saavedra, 2007).

Los principales cauces que forman parte de la zona urbana de Puerto Montt corresponden a: río negro, río arenas, estero El Roble, Río Trapen, Estero Los Lobos, Estero Las Camelias, Estero Chávez, Estero La Paloma, Estero Larraín, Estero Pelluco, Estero Las Garzas, estero Las Camelias, Estero Chinquihue y Río Taylor. La mayoría de estos cauces sólo transitan por algunos sectores puntuales del límite urbano definido por el Plan Regulador Comunal (PRC), mientras que otros que desembocan en la Bahía de Puerto Montt completan su recorrido por el área urbana.

Adicionalmente la creciente urbanización ha implicado la modificación de algunos cauces lo que han sido canalizados, como ocurrió con el estero Cállele, que fue transformado en subterráneo. Se describen algunos cauces naturales del área, complementada con información obtenida de Araya y Cabrera (2002) y Saavedra (2007):

- ✚ Estero Pelluco: Descarga sus aguas al mar en el Balneario Pelluco en el extremo oriente de la ciudad. Presenta una orientación NO-SE y nace en el sector denominado Pelluco Alto, a los 147 msnm. En general es una cuenca que presenta una urbanización incipiente con algunas viviendas localizadas a menos de 10 m del lecho menor.
- ✚ Estero Lobos: Corresponde al principal cauce de la ciudad de Puerto Montt, nace en el sector alto al oriente de la ciudad, en el sector la Paloma (área urbana). En dicha área se ubica la divisoria de aguas entre la cuenca del estero y un área lateral de la cuenca del Río Arenas. Presenta importantes tributarios como el estero El Roble, Arena y Las Camelias y Las Garzas. El estero escurre en dirección E-O con un caudal promedio de 12,95 m³/s. En su recorrido el cauce presenta microbasurales, lo que impide el escurrimiento de las aguas y agrava los desbordes en época de lluvias intensas (Saavedra, 2007).
- ✚ Estero Larraín: Corresponde a una cuenca Pequeña localizada al E del centro de Puerto Montt. Nace a 148 msnm y escurre en sentido NE-SO. Presenta una urbanización mayor.
- ✚ Estero los Pelúes: Se ubica al poniente de la ruta 5 sur al sur del estero Lobos.
- ✚ Río Trapén: Su rol en el límite urbano queda restringido al sector localizado al SO de Puerto Montt, tomando la dirección de la ruta 5 sur.
- ✚ Río Taylor: Corresponde a un cauce pequeño ubicado el S de la ruta 5 camino a Chinquihue. Dicho estero no fue encontrado en la campaña de terreno, el área se observó intervenida. Lo anterior es indicativo de un proceso de intervención mayor que derivó en la eliminación del cauce.

- ✚ Río Negro: Corresponde a una de las cuencas más importantes de la zona urbana, nace a los 155 msnm. El río presenta una orientación NE-SO, en su tramo medio recorre la zona de Alerce, la que es dividida en dos sectores por el mismo cauce. En el lecho del cauce se evidencian problemas de contaminación física y bacteriológica, la primera asociada a microbasurales (Figura 31) y la segunda a la descarga de aguas servidas.
- ✚ Río Arenas: El río Arenas nace a 160 msnm al NE de la ciudad de Puerto Montt, escurriendo en sentido E-O. En su interior se localizan importantes tributarios como el Estero Chávez y el estero La Paloma, ambos escurren en dirección SE-NO

Adicionalmente se encuentran una serie de quebradas exorreicas de menor tamaño, que presentan corta longitud de los cauces principales. Su característica principal es una fuerte pendiente, la que decrece antes de desembocar al mar. Entre estas quebradas destacan: Egaña, Mirador, Mirasol, Socovesa Norte y Sur, Alessandri, Terminal, Anahueac.

Figura N°31. Microbasurales al interior del cauce del río Negro, sector de Alerce.



Los antecedentes históricos indican problemas de inundaciones en el estero Lobos, asociado a desbordes en el sector contiguo a la Ruta 5 Sur (Población Manuel Rodríguez). Otra zona conflictiva corresponde al sector localizado al N del área urbana, sin embargo los problemas en el sector se asocian con el asentamiento precario de viviendas en las cercanías del cauce.

Otros puntos conflictivos identificados en terreno corresponden al estero Chávez y el Río Negro, sin embargo en este último se han realizado un mayor número de obras destinadas a mitigar de forma estructural los desbordes vinculados al cauce. En forma reciente destacan los desbordes del estero Larraín y Lobos el año 2004 como consecuencia de la caída de 53,6 mm de precipitación en 24-h; mientras que el año 2014 se desborda el río Negro, con consecuencias sobre la conectividad vial, principalmente en el sector de Alerce sur.

Para este estudio, las zonas de peligro fueron definidas considerando las metodologías de cota histórica-geomorfología. La Tabla 18 contiene el resumen de la metodología empleada en los principales cauces.

Tabla N°18. Metodología de análisis de zonas inundables en los principales cauces.

Cauce	Metodología de análisis de área inundable
Estero Arena ruta V-226	Cota histórica-Geomorfología
Estero Lobos	Cota histórica-Geomorfología
Estero Pelluco	Cota histórica-Geomorfología
Estero Chávez	Cota histórica-Geomorfología
Río Trapen	Cota Histórica-Geomorfología
Río Taylor	Cauce no encontrado
Río Arenas	Cota Histórica-Geomorfología
Río Negro	Cota Histórica-Geomorfología

Fuente: Elaboración propia.

b) Análisis hidrológico

Se determina la magnitud de los caudales máximos con periodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25, 50 y 100 años, para el río Negro. Los caudales máximos fueron estimados a través de los hidrogramas unitarios sintéticos tipo Linsley y tipo Gray, según recomienda el “Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas sin Información Fluviométrica”, de la Dirección General de Aguas, DGA, cabe mencionar que los métodos DGA-AC, Verni y King modificado y Formula Racional, son sólo aplicables hasta la novena región, y es por esto que se decide utilizar la metodología de los hidrogramas unitarios sintéticos.

El estudio hidrológico detallado se ajunta en el anexo digital (I-5). El estudio fue realizado según la siguiente información:

- ✚ Topografía original.
- ✚ Estadística hidrometeorológica disponible a través del Ministerio de Obras Públicas y de la Dirección Meteorológica de Chile.
- ✚ DGA 1995. “Manual de cálculo de crecidas y caudales mínimos en cuencas sin información fluviométrica”.
- ✚ DGA 1991. “Precipitaciones máximas en 1, 2 y 3 días”.
- ✚ DOH 2013. “Plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias de alerce” Región de los Lagos.

En la Tabla 19 se muestra un resumen de los caudales obtenidos por los métodos de los hidrogramas unitarios sintéticos tipo Linsley y tipo Gray. Se observa que en todos los casos los valores entregados por el método del hidrograma unitario sintético tipo Gray son mayores a los entregados por Linsley y muy superiores a los calculados en el plan “Plan maestro de evacuación y drenaje de aguas lluvias de alerce” DOH, 2013. Debido a esto se recomienda utilizar los valores entregados por el método de Linsley para el peligro de inundación.

Tabla N°19. Caudales Máximos para distintos periodos de retorno para las cuencas estudio.

T (años)	Río Negro Q(T) (m ³ /s)	
	Linsley	Gray
2	46.7	108.8
5	60.1	139.8
10	68.9	160.4
20	77.4	180.1
25	80.1	185.2
50	88.4	205.7
100	96.6	224.8

Debido a las diferencias altimétricas alcanzadas en el sector de Alerce (Anexo Digital I-2 “Reporte DEM Geosoluciones), se aplicaron correcciones de altitud al Modelo Digital de Elevación con datos de perfiles transversales obtenidos en terreno (Figura 32). De esta forma se obtuvieron precisiones para la zona próximas al cauce del orden de 50-70 cm; las profundidades del cauce fueron corregidas con los perfiles obtenidos en terreno.

Figura N°32. Trabajo de terreno para topobatimetría, río Negro (Alerce).



C) Consideraciones del peligro de inundación

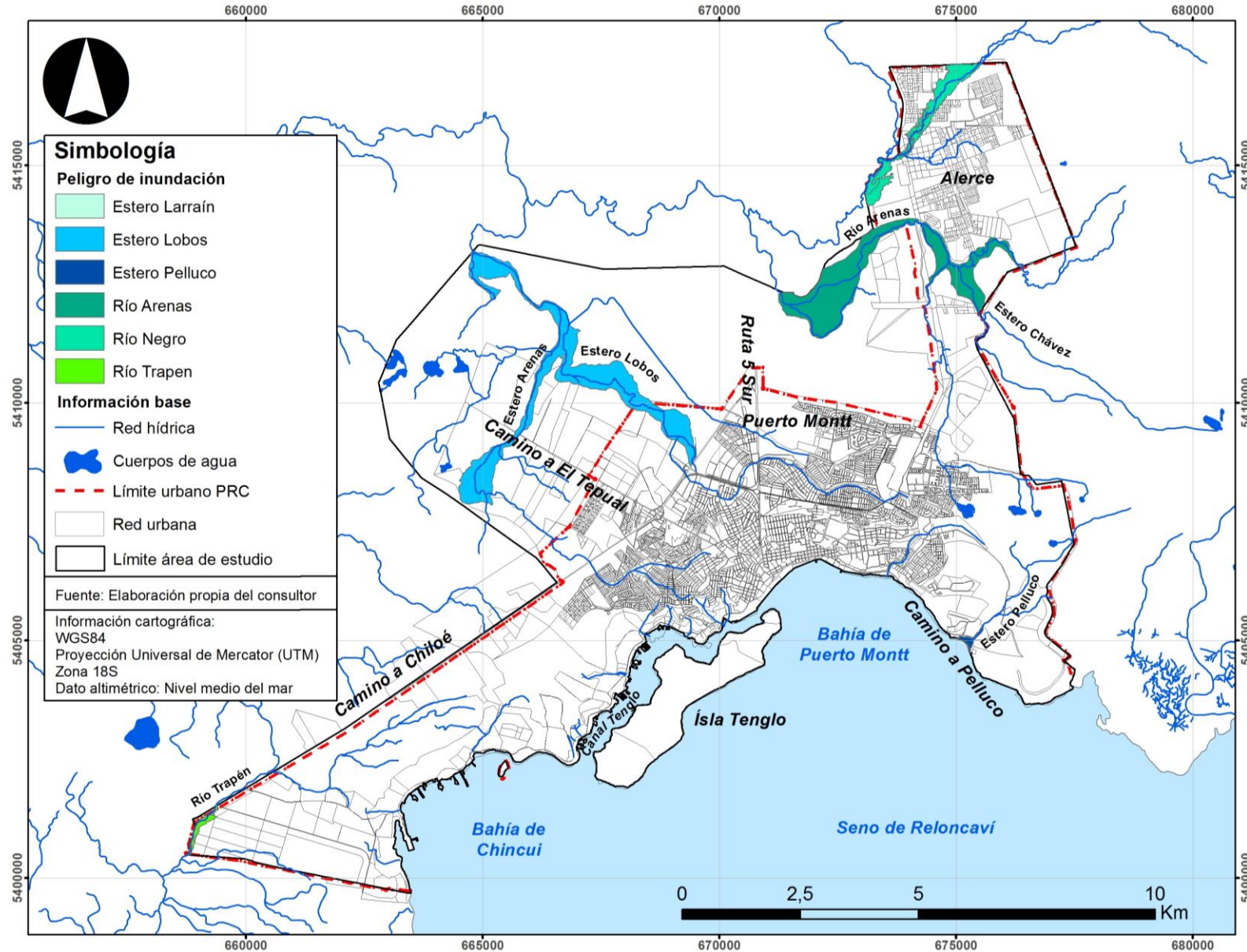
En relación al peligro de inundación, se observa una alta susceptibilidad al proceso, considerando los montos pluviométricos elevados y los bajos tiempos de concentración. Según las cuencas analizadas es posible indicar que 750 ha son susceptibles a inundarse, entre ellos:

- ✚ Estero Pelluco: Presenta una zona consolidada de desborde, en su interior se localizan escasas viviendas de material ligero. No representa un peligro potencial para un gran número de habitantes.
- ✚ Estero Arena (Camino al Tepual): Presenta una extensa área de inundación en el sector O de la ruta V-226. No hay presencia de gran cantidad de viviendas en la zona.
- ✚ Estero Lobos: Presenta una zona de inundación amplia aguas debajo de la Ruta 5 Sur, en relación a los niveles de asentamientos humanos, corresponde al cauce con mayor presencia humana, sin embargo, las viviendas no están localizadas en sectores urbanos consolidados, y en gran parte corresponden a asentamientos precarios.
- ✚ Estero Chávez: Presenta una zona de desborde más controlada en su recorrido por la zona habitada antes de la confluencia con el río Arenas. Posterior a la zona anteriormente mencionada, se abre paso en una extensa llanura de inundación, limitada hacia el O por un escarpe.
- ✚ Río Trapen: La zona del río que escurre por el área urbana de Puerto Montt, presenta un área de inundación elevada y bien consolidada topográficamente. No existen viviendas inundadas históricamente, pero sí caminos y empresas instaladas en el sector.
- ✚ Río Arenas: El cauce del río Arenas posee una amplia planicie para su desborde, la que se consolida al O de la ruta V-625, sin embargo, al N la elevación topográfica (Figura 33) existente provoca el escurrimiento de las aguas en crecidas hacia el S. Cercano a la Ruta 5 el río se desborda en una amplia llanura, con escasas variaciones topográficas. La mayor parte de la zona inundable no se encuentra con asentamientos humanos importantes.
- ✚ Río Negro: Presenta dos zonas topográficamente bien definidas como terrazas, la zona de mayor peligrosidad se encuentra en el núcleo urbano de la localidad, la que presenta baja densidad poblacional.

Figura N° 33. Río Arenas agua arriba de la ruta a Alerce, se observa la diferencia topográfica a la Izquierda (viviendas) y la llanura inundable a la derecha.



Figura N°34. Zonas susceptibles al peligro de inundación por desbordes de cauces.



1.1.2 Remociones en masa

Factores condicionantes

Los factores condicionantes considerados fueron geomorfología, pendientes, orientación de laderas y cobertura vegetal, los cuales se describen a continuación:

a) Geomorfología:

Las unidades geomorfológicas reconocidas en este estudio corresponden al dominio fluvio-glacial que domina en el área de estudio (Figura 37), tales como llanuras fluvio-glaciales (*outwash plains*), cinturones de morrenas, terreno irregular (*hummocky terrain*), escarpes y sistemas de laderas, las cuales se presentan vegetadas o urbanizadas (Figuras 34 y 35). Estas presentan las siguientes características:

Llanuras fluvio-glaciales (*outwash plains*)

Las llanuras fluvio-glaciales aparecen a continuación de las morrenas terminales. Su formación está vinculada a la movilización de sedimentos glaciares por parte de las aguas provenientes de la fusión del hielo glaciar y su posterior deposición en extensas llanuras de pendiente suave.

Las facies fluvio-glaciares consisten en una sucesión de estratos horizontales de sedimentos glaciares gruesos y mal seleccionados en las áreas próximas a las morrenas, para ir volviéndose más finos y mejor seleccionados según nos alejamos de las mismas. Los bloques encontrados presentan un diámetro máximo de 0.3m y formas que oscilan entre redondeadas y sub-redondeadas (Figura 38). Por otro lado, la aparición de laminación cruzada en materiales finos es significativa, aunque no dominante. Finalmente, existen depósitos piroclásticos intercalados en la secuencia estratigráfica de la llanura fluvio-glacial.

El área de estudio se encuentra dominada por llanuras fluvio-glaciares subsidiarias localizadas en depresiones inter-morrénicas. Presentan una configuración escalonada y menor altura topográfica que la llanura fluvio-glacial principal. En algunos casos se extienden en canales que atraviesan las morrenas terminales, alcanzando la llanura fluvio-glacial principal, donde el sistema de drenaje regional converge en cursos fluviales que fluyen hacia el Océano Pacífico. Los espesores de estos depósitos pueden alcanzar entre 80 y 100m.

Cinturones de morrenas

Las morrenas son depósitos sedimentarios originados por la movilización de materiales por parte del hielo glaciar. Estos sedimentos son transportados sobre, dentro y bajo el hielo, para finalmente dar lugar a un depósito alineado no estratificado con morfología de cresta, compuesto por clastos heterométricos de formas angulosas. Estos depósitos glaciares marcan el límite espacial de los glaciares, localizándose entre las antiguas masas de hielo y las llanuras fluvio-glaciares. Presentan espesores de hasta 10m.

La zona de estudio se encuentra dominada por dos cinturones morrénicos asociados a la glaciación Llanquihue (20.000 años AP), separados entre sí por llanuras fluvio-glaciares subsidiarias. El núcleo interno de estos depósitos está compuesto por gravas y sedimentos glaciofluviales. Ocasionalmente es posible encontrar bloques erráticos en su superficie.

Terreno irregular (*hummocky terrain*)

El terreno irregular aparece como consecuencia de la acción compresiva del hielo glaciar sobre el lecho sedimentario durante la fusión del mismo. A diferencia de los cinturones de morrenas, presenta una morfología irregular sin alineaciones, donde abundan las depresiones cerradas con vertientes escarpadas. Está formado por sedimentos glaciares mal seleccionados originados por flujos de agua subglaciar y la fusión del hielo. Ocasionalmente pueden aparecer bloques erráticos.

En el área de estudio, el terreno irregular se encuentra intensamente relacionado con los cinturones de morrenas, dando lugar a una unidad morfoestratigráfica de transición entre los cinturones morrénicos y las llanuras fluvio-glaciares.

Escarpes

Corresponden a rupturas de pendiente que delimitan los distintos niveles de llanuras fluvio-glaciares o valles e incisiones fluviales. Se han clasificado en función del salto topográfico.

Laderas

Corresponden a pendientes abruptas que conectan diferentes niveles topográficos de llanuras fluvio-glaciares o valles e incisiones fluviales. Se han clasificado en función de la susceptibilidad a la ocurrencia de fenómenos de remoción en masa:

- **Laderas vegetadas:** Presencia significativa de masas forestales. Elevado grado de fito-estabilización, infiltración e interceptación de aguas atmosféricas. Escorrentía superficial restringida a canales, surcos y regueros preexistentes. Susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa baja.
- **Laderas intermedias:** Presencia significativa de vegetación arbustiva o herbácea. Grado medio de fito-estabilización, infiltración e interceptación de aguas atmosféricas. Escorrentía superficial restringida a surcos y regueros preexistentes. Susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa media.
- **Laderas urbanizadas:** Presencia significativa de construcciones e infraestructura. Escasa vegetación de cualquier tipo. Nula fito-estabilización, infiltración e interceptación de aguas atmosféricas. Escorrentía superficial intensa, comúnmente en manto. Susceptibilidad a fenómenos de remoción en masa elevada.

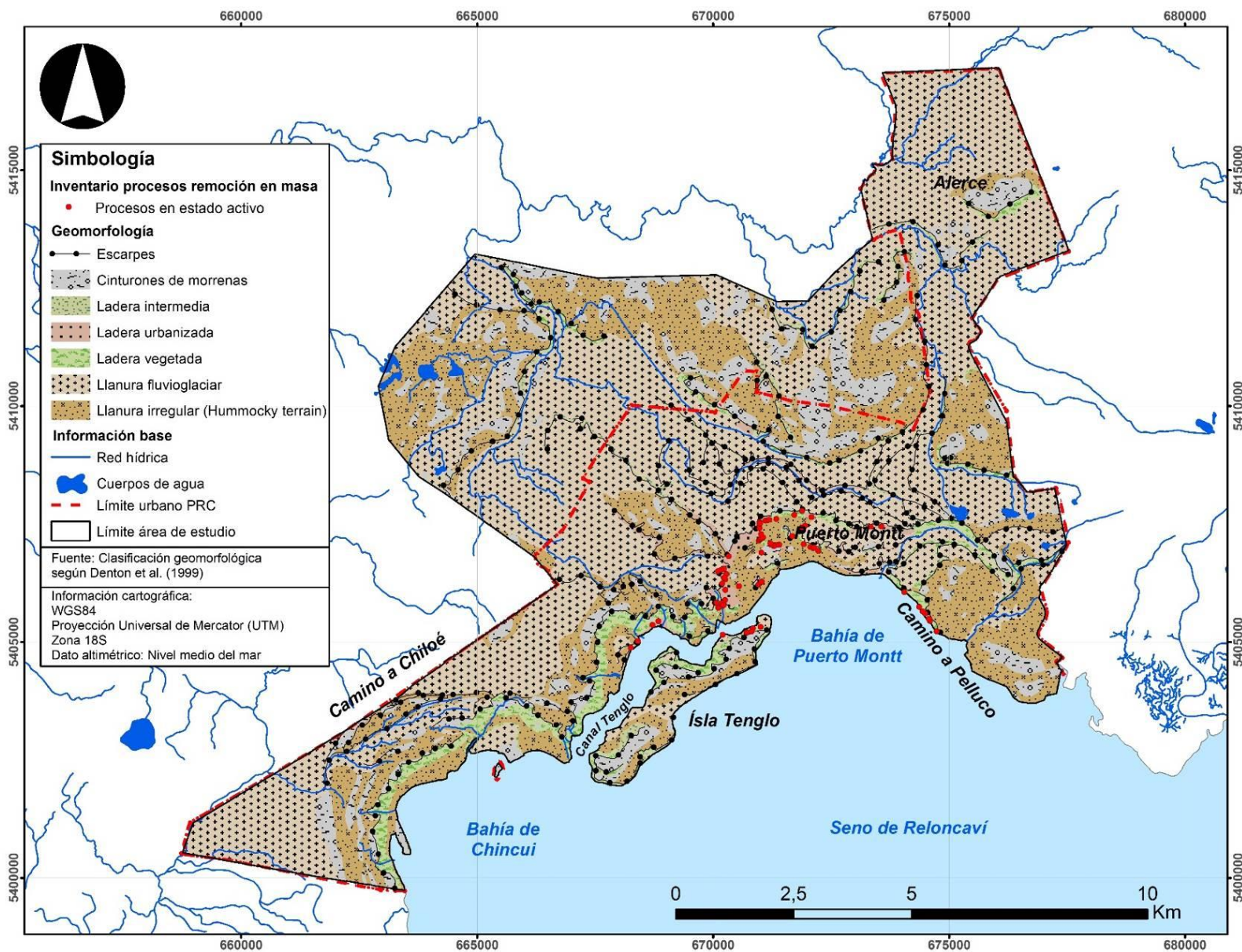
Figura N°35. Laderas urbanizadas, planicie fluvio-glaciar, Población Modelo.



Figura N°36. Laderas urbanizadas, fotografía desde sector Angelmó



Figura N°37. Geomorfología del área urbana de la comuna de Puerto Montt.



Desde el punto de vista del peligro a remoción en masa, las geoformas con mayor representación espacial corresponden al sistema de vertientes las cuales ocupan el 45.6% del área y se clasifican como de peligro Muy Alto (Tabla 20). Los cinturones de morrenas y el terreno irregular ocupan el 23.3% del área total y presentan una peligrosidad Alta. Se distribuyen de manera amplia en el área, en forma de franjas extensas. La planicie fluvio-glaciaria se clasificó como peligrosidad Baja y representa el 31.1% del área total. Esta unidad también se distribuye de manera amplia y ocupan una superficie de 680 ha.

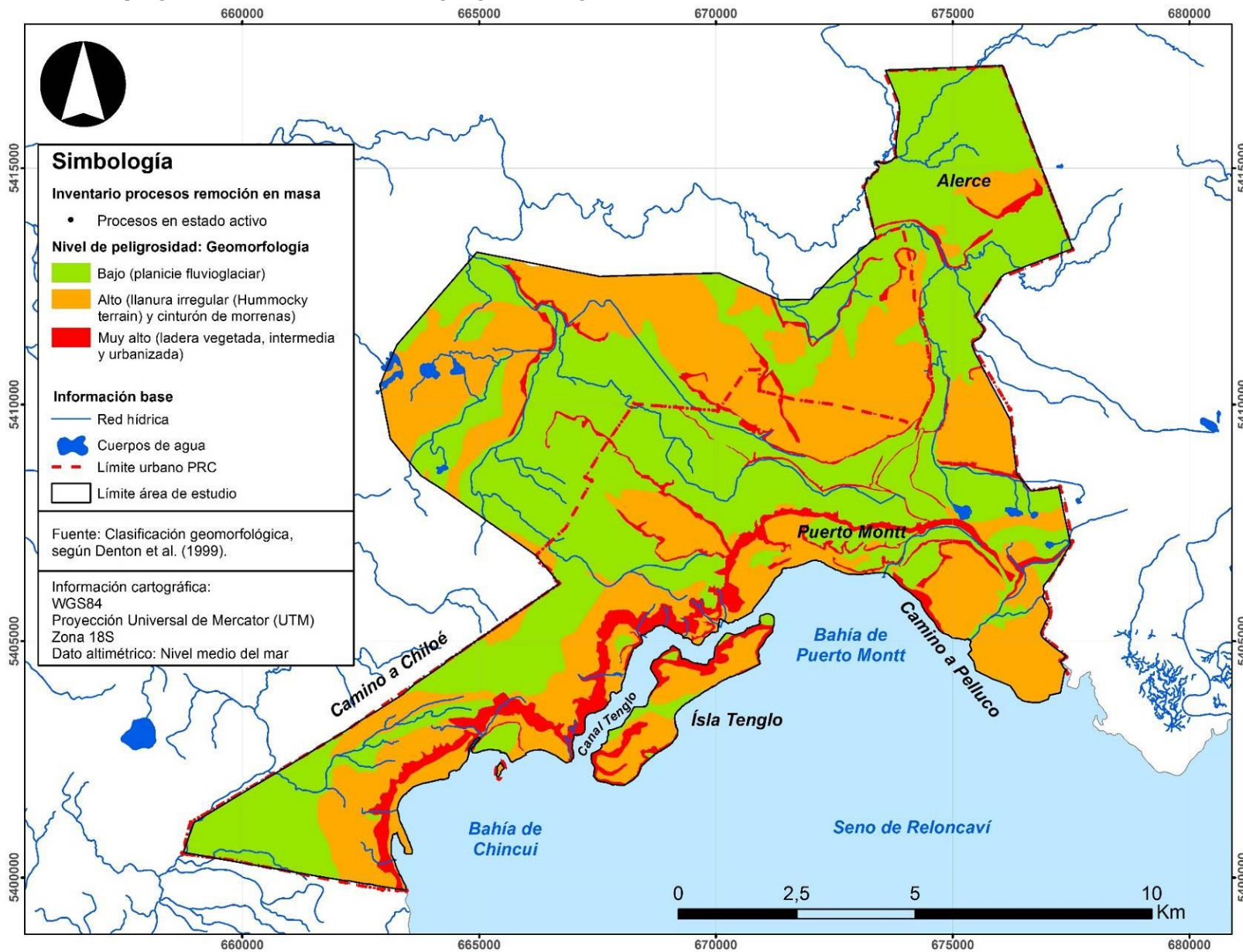
Tabla N°20. Distribución de geoformas y nivel de peligrosidad (km²).

Geomorfología	Peso	Peligrosidad	Superficie ha	Superficie %
Planicie fluvio-glaciaria	1	Baja	680	31.1
Terreno irregular (Hummocky terrain) y Cinturones de morrenas	3	Alta	509	23.3
Ladera vegetada, intermedia y urbanizada	4	Muy Alta	998	45.6

Figura N°38. Terraza fluvio-glaciaria (materiales constituyentes).



Figura N°39. Nivel de peligrosidad a remoción en masa según geomorfología.



b) Pendiente:

La pendiente en el área presenta valores distribuidos en tres rangos principales, sin embargo predominan las pendientes suaves, con valores entre 0° y 10° que representan el 74.8% del total, clasificándose como de Peligrosidad Baja. Estas pendientes se distribuyen ampliamente en el área, ocupando topografías bajas localizadas en el área urbana y de Isla Tenglo (Tabla 21). Las pendientes entre 10° y 25° ocupan el 11.3% del total y se asocian a un Peligro Alto. Estas pendientes ocupan los primeros niveles de terrazas formando laderas empinadas y comprenden la mayor parte del área urbana.

Las pendientes fuertes y escarpadas > 25° asociadas a un Peligro Muy Alto, ocupan el segundo rango de importante, con un 14% de la superficie total del área.

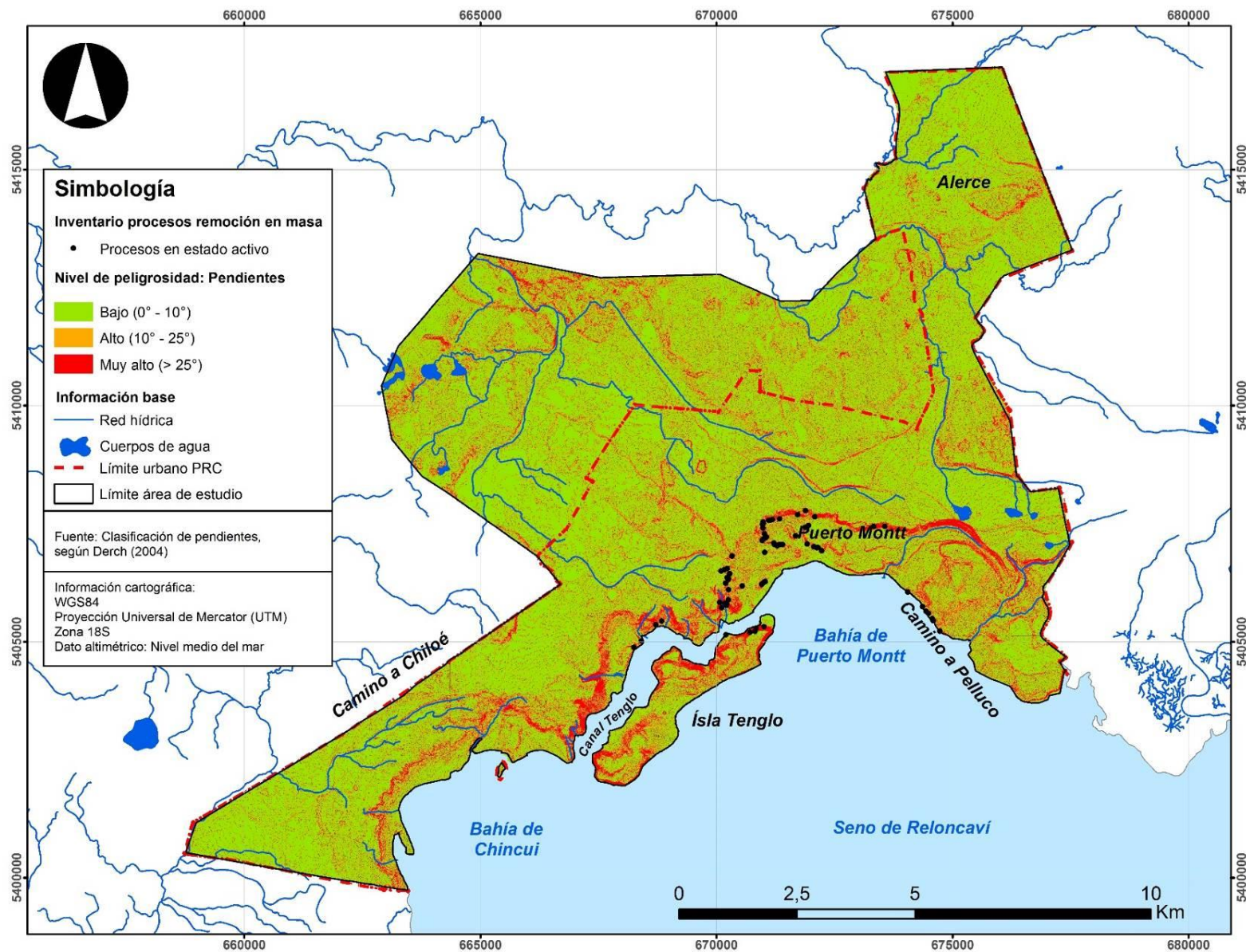
Tabla N°21. Distribución de rangos de pendiente y nivel de peligrosidad (km²).

Pendiente	Peso	Clasificación	Superficie ha	Superficie %
0° - 10°	1	Baja	968	74.8
10° - 25°	3	Alta	146	11.3
> 25°	4	Muy Alta	181	14.0

Figura N°40. Laderas con pendiente escarpada y peligro Muy Alto, Quebrada Angelmó.



Figura N°41. Nivel de peligrosidad a remoción en masa según el grado de pendiente.



a) Cubierta vegetal:

La cubierta vegetal presenta cuatro rangos diferenciados, todos ellos asociados a peligrosidad desde Baja a Muy Alta. La mayor superficie es ocupada por vegetación de tipo Matorral y herbácea el cual representa el 41.7% de la superficie total, clasificándose con Peligrosidad Alta (Tabla 22). Se presenta en el área urbana consolidada de Puerto Montt y en aquellos lugares de ocupación urbana dispersa. La cubierta Edificado con vegetación semi-densa presenta el 15.8% de la superficie total y se clasifica con Peligro Muy Alto (Figuras 42 y 43). Esta se distribuye especialmente en el área urbana consolidada. La vegetación arbórea ocupa 191 ha y representa el 14.8% del total, clasificándose con Peligro Medio.

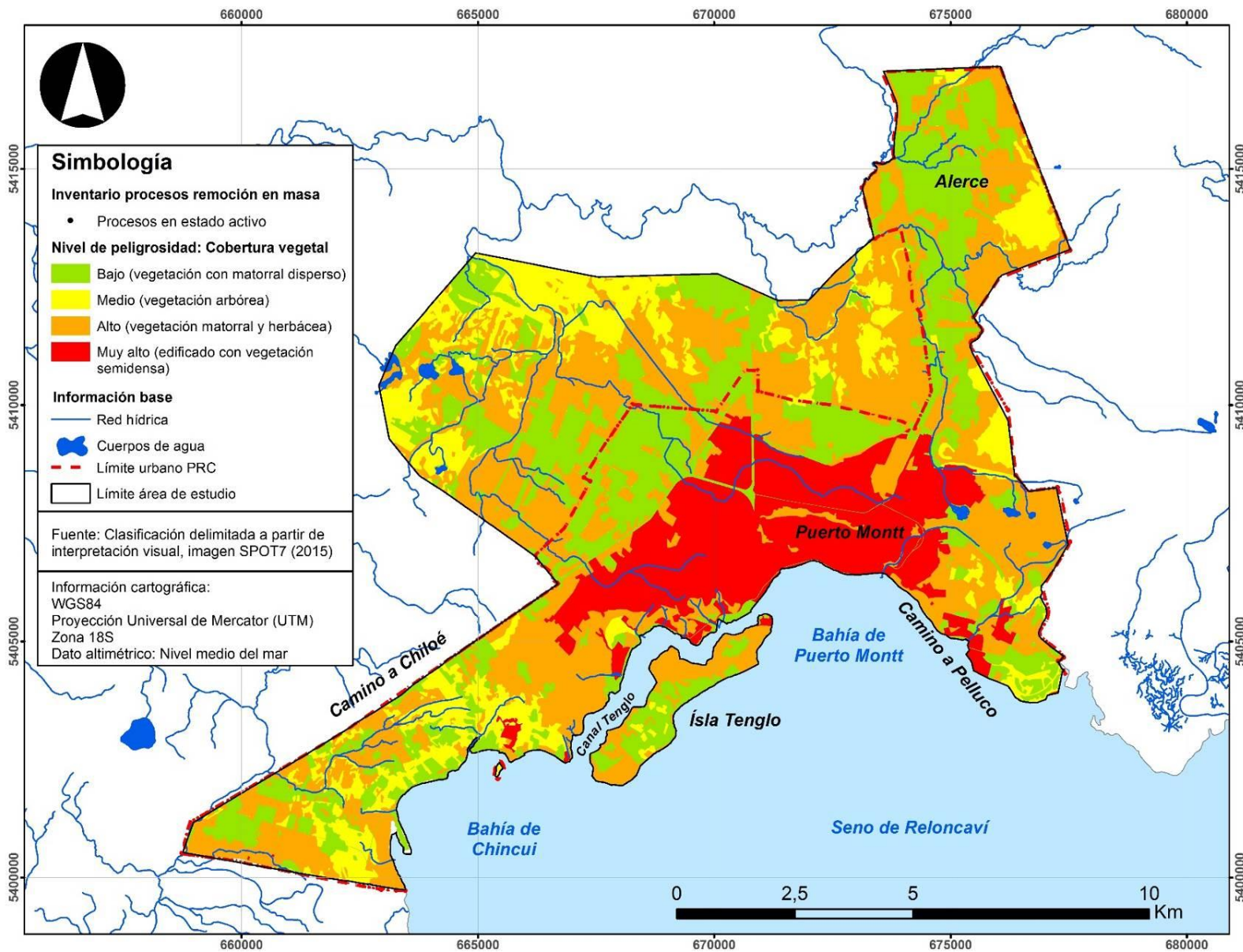
Tabla N°22. Distribución de rangos de cubierta vegetal de las laderas y nivel de peligrosidad (km²).

Cubierta vegetal	Peso	Peligrosidad	Superficie ha	Superficie %
Vegetación con matorral disperso	1	Baja	357	27.7
Arbórea	2	Media	191	14.8
Matorral y Herbácea	3	Alta	537	41.7
Edificado con Vegetación semi-densa	4	Muy Alta	204	15.8

Figura N°42. Laderas con cubierta vegetal matorral y herbácea.



Figura N°43. Nivel de peligrosidad a remoción en masa según el grado de cubierta vegetal.



c) Orientación de las laderas:

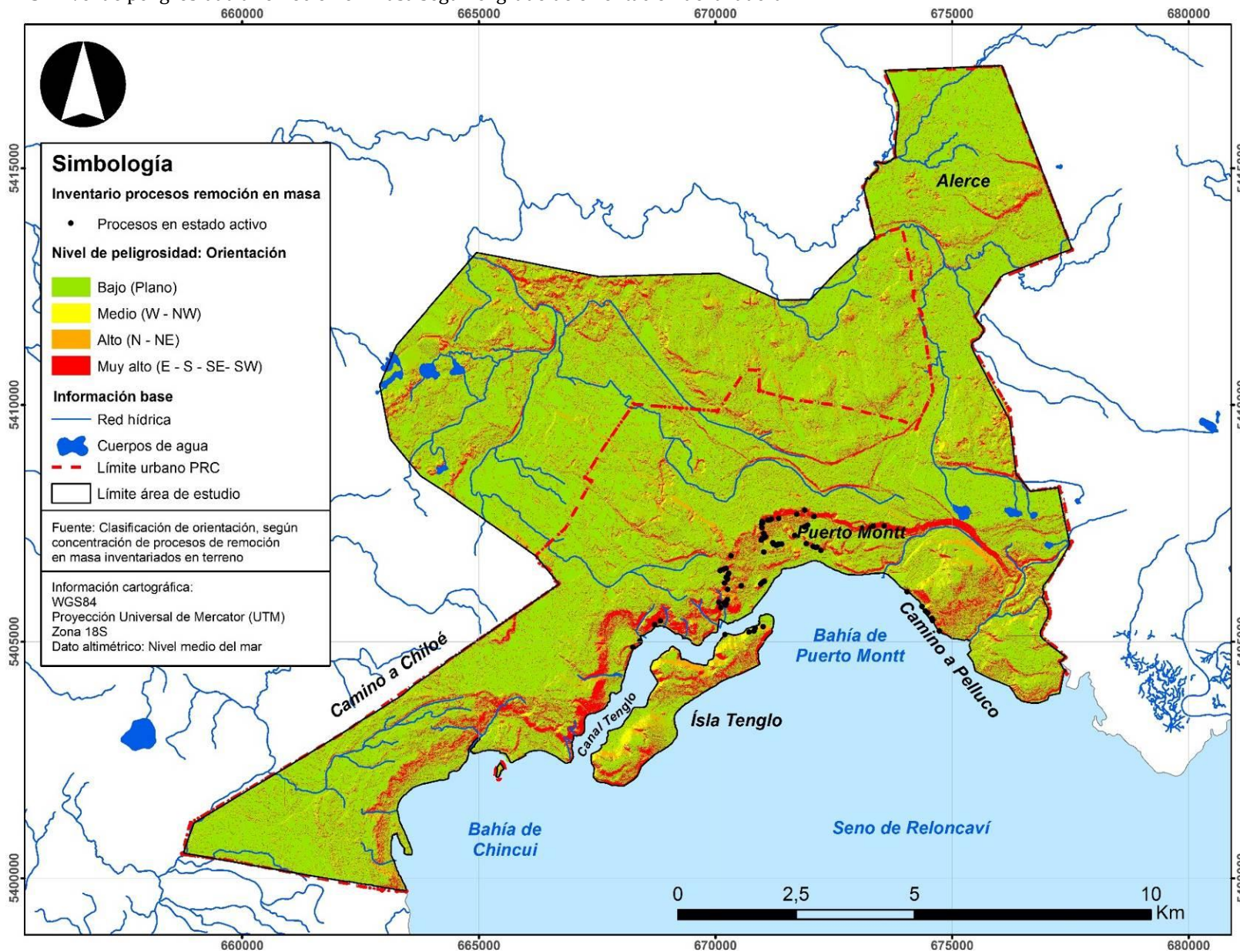
La orientación de las laderas presenta tres rangos importantes asociadas a un peligro desde Bajo a Alto (Tabla 23). La mayor superficie corresponde a la orientación plana, con peligro Bajo, que se vincula a terrenos con escasa pendiente, la cual ocupa 968 ha y se distribuye ampliamente en el área. La orientación W-NW representa el 28.2% del total y se ubica preferentemente en los relieves de laderas. Esta presenta peligrosidad Media. La orientación N-NE ocupa el 27.7% del total y se clasifica como de peligro Alto. Las orientaciones restantes (E-S-SE y SW) presentan la menor distribución, con un 7% del total, sin embargo son las que presentan el peligro Muy Alto. Estas coinciden con las zonas de laderas escarpadas formando franjas alrededor de los niveles de terrazas (Figuras 44 y 45).

Tabla N°23. Distribución de rangos de orientación de las laderas y nivel de peligrosidad (ha).

Orientación	Peso	Peligrosidad	Superficie	Superficie %
Plano	1	Baja	968	37.2
W - NW	2	Media	733	28.2
N - NE	3	Alta	721	27.7
E - S - SE - SW	4	Muy Alta	182	7.0

Figura N° 44. Ladera con orientación E – S – SE – SW, Sector quebrada Angelmó.

Figura N°45. Nivel de peligrosidad a remoción en masa según el grado de orientación de la ladera.



Volumen de deslizamiento

De acuerdo a la identificación de los procesos de remoción en masa realizada en terreno, se determinó la dimensión del movimiento de los procesos de mayor magnitud. Para ello, se calculó el volumen de deslizamiento, el cual expresa en metros cúbicos (m^3) el volumen aproximado de un deslizamiento después de una falla. El resultado indicó, para los procesos de mayor magnitud, que los factores internos del material litológico contribuyen a disminuir las fuerzas de resistencia, mediante la modificación de las propiedades mecánicas como la cohesión, elasticidad y porosidad. Lo anterior, aumenta el grado de susceptibilidad que aproxima a la ocurrencia de procesos de remoción en masa, donde los factores externos aumentan o activan las fuerzas impulsoras (factores internos), que inician el desplazamiento o movimiento.

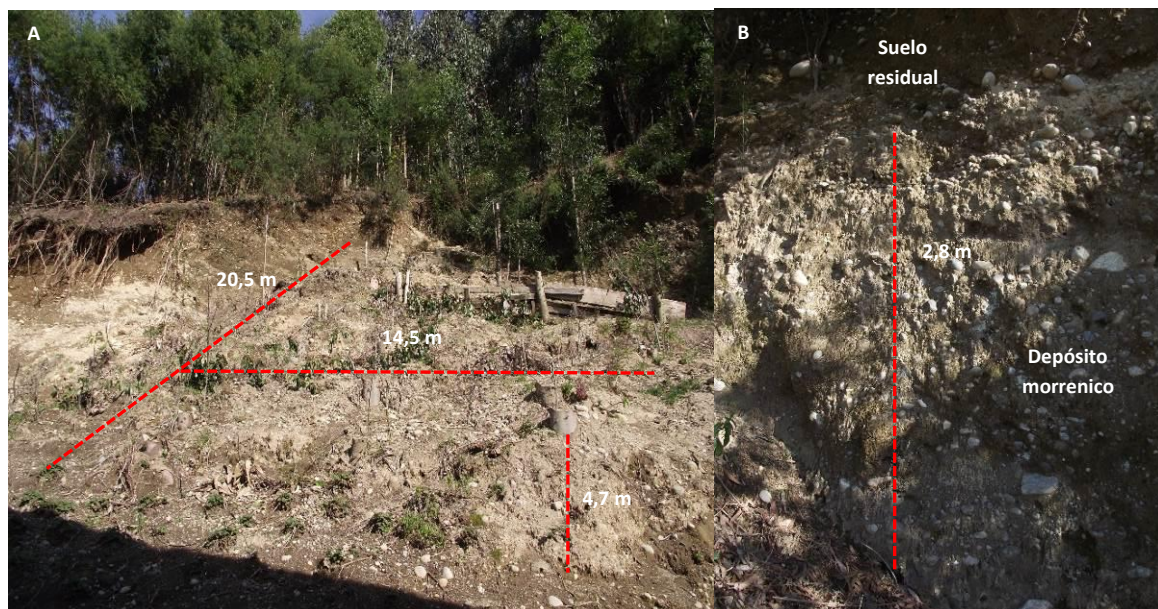
En la Tabla 24, se indica el volumen del material desplazado de los eventos de mayor magnitud inventariados dentro de la ciudad de Puerto Montt, donde se identificó que los procesos de remoción en masa de tipo rotacional y traslacional, son los de mayor aporte al material movilizado. En este sentido, los factores externos e internos como cambios morfológicos que ejercen variaciones de pendiente, procesos erosivos y procesos de meteorización, que modifican las propiedades mecánicas del material litológico, determinan el tipo de proceso y volumen de material movilizado. Lo anterior, se evidencia en la conformación de laderas dentro de la ciudad de Puerto Montt, donde se registran relictos de material movilizado al pie de laderas y escarpes.

Para el caso de la ciudad de Puerto Montt, se identificó para el deslizamiento rotacional inventariado en Isla Tenglo, específicamente en el sector de Puntilla Tenglo (Figura 46), un volumen de masa movilizada de aproximadamente de $936,3 m^3$ (v Tabla 23). La característica de este proceso, es que obtuvo un ancho de falla de 14,5m y una longitud de falla de 20,5m con una profundidad de 4,7m (Figura N°12.A). Este proceso, es el de mayor magnitud registrada dentro del sector de Isla Tenglo, donde además al pie de ladera se encuentra una vivienda que se ha visto afectada por el constante avance de material.

Las características, que componen el volumen de material movilizado son depósitos morrenicos que afloran en la parte occidental de la Isla Tenglo, estos se distribuyen en gran parte del horizonte de suelo (Figura 44-b), principalmente en sectores de mayor profundidad, estos depósitos subyacen bajo una capa de suelo residual de baja cohesión producto de una cubierta vegetal de tipo arbórea, la cual genera pequeñas fracturas que producen una fragmentación del material litológico, esto genera un alto nivel de humedad del suelo, el cual presenta un alto grado de permeabilidad desde el horizonte superior, principalmente por la composición del depósito morrenico, el cual se caracteriza por un 25% de clastos o coluvios, un 50% de arenas de grano fino a medio y un 25% de sedimentos finos, principalmente limos y arcillas (Derch, 2004). Lo anterior, indicó que la composición textural del material litológico contribuye a la inestabilidad mediante la alta permeabilidad del suelo, la cual presenta una alta saturación, en los meses en que existe una mayor infiltración como consecuencia de intensas precipitaciones, las cuales pueden originar movimiento del material.

Tabla N°24. Volumen de deslizamiento de procesos de mayor magnitud.

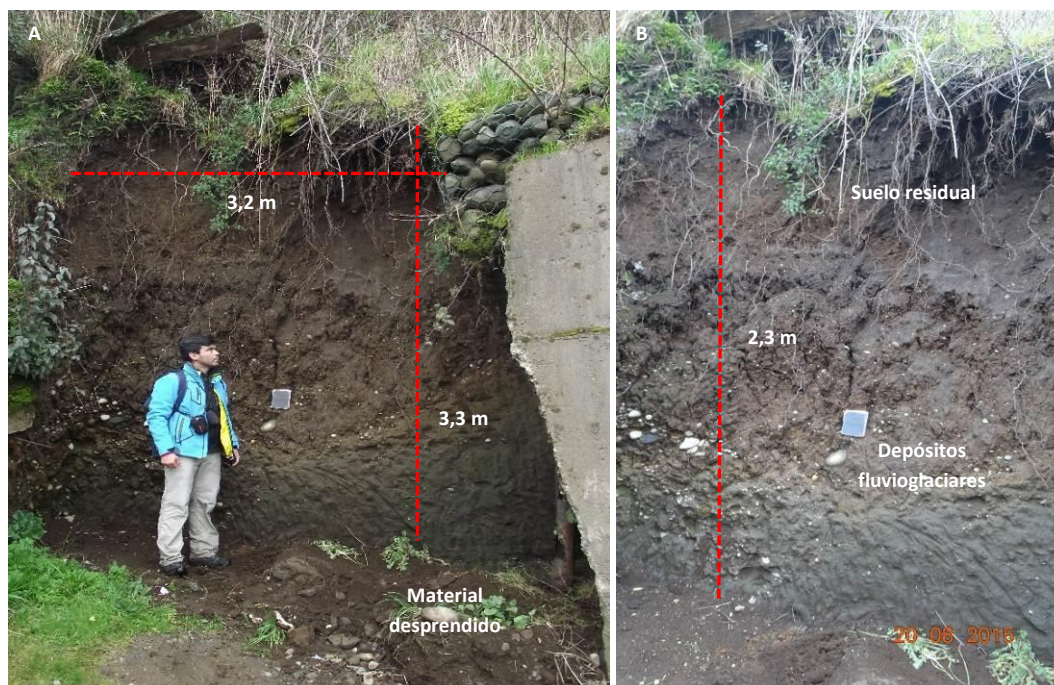
Puntos	Dimensión del Movimiento				Tipo de Proceso	Lugar
	Ancho superficie de falla (W_r)	Longitud superficie de falla (L_r)	Profundidad superficie de falla (D_r)	Volumen Deslizamiento (m^3)		
1	14,5	20,5	4,7	936,33	Deslizamiento rotacional	Isla Tenglo, Puntilla Tenglo
12	3,2	3,3	2,3	16,28	Deslizamiento rotacional con desprendimiento	Población Modelo, Av. Santa María
23	3,3	3,2	1,19	8,42	Deslizamiento rotacional	Cerro Modelo/Pob. Modelo, calle Mac Iver
58	3,8	5,1	3,2	41,56	Deslizamiento tralacional con desprendimiento	Población Ebensperger, entre calle Ebensperger y Emiliano Figueroa

Figura N°46. Volumen deslizamiento rotacional, Isla Tenglo.

Para el caso del deslizamiento rotacional con desprendimiento registrado en Av. Santa María, en el sector de la Población Modelo (Figura 47), se identificó un volumen de desplazamiento de $16,28 \text{ m}^3$, con un ancho de falla de $3,2\text{m}$ y una longitud de falla de $3,3\text{m}$ con una profundidad de $2,3\text{m}$ (Figura 47-A). Este proceso, de menor magnitud registrado dentro del área urbana de la ciudad de Puerto Montt, indica el grado de inestabilidad en algunos sectores de cortes de terrazas sobre los que se desarrolla la ciudad, y que tienen una alta inestabilidad producto del material en el cual se conforman. Este proceso de alto grado de actividad, registrado al borde la Av. Santa maría, implica en el futuro eventuales cortes de camino y consecuencias para las viviendas que se circunscriben alrededor.

Las características de este proceso, es el desarrollo de un deslizamiento de tipo rotacional, donde su grado de actividad se mantiene constante a través del desprendimiento de material litológico, mediante la caída de bloques o depósitos no consolidados desde la cabecera o escarpe. Las características del volumen de material desprendido, se conforma por depósitos fluvio-glaciares, que corresponden a lentes de grava y arena limosa de alta densidad relativa, pero sin cementación y muy poco o nada consolidados (Figura 47.B) (Derch, 2004). Estos depósitos se encuentran cubiertos por una cubierta vegetal de tipo matorral y herbácea. Lo anterior, incide en el grado de permeabilidad del horizonte de suelo, el cual presentó altos niveles de humedad, aumentando el nivel de inestabilidad y movilización, especialmente desprendimiento.

Figura N°47. Volumen deslizamiento rotacional con desprendimiento, Población Modelo.

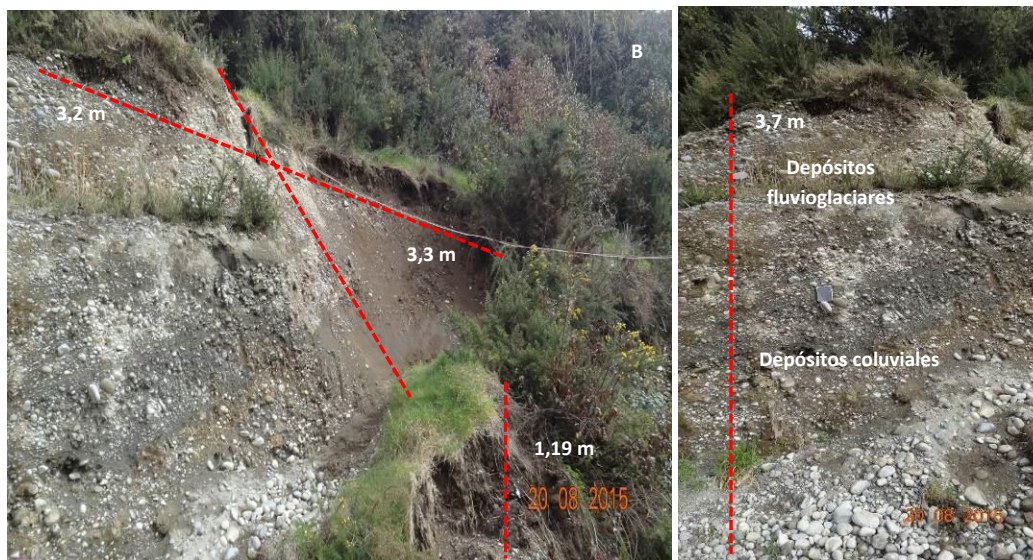


El deslizamiento rotacional registrado en la población Modelo, específicamente en el Cerro Modelo, por el pasaje Mac Iver (Figura 48), registró un volumen de desplazamiento de $8,42 \text{ m}^3$ (Tabla 23), con un ancho de falla de 3,3m y una longitud de falla de 3,2m, con una profundidad de 1,19m. Este proceso se registró, dentro de una de las áreas más inestables dentro de la ciudad de Puerto Montt, la cual presenta una alta tasa de recurrencia de procesos de remoción en masa.

Las características del volumen de material movilizado, corresponden a depósitos fluvio-glaciares y depósitos coluviales de tipo morrenas, con abundante material arcilloso, limoso y gravas. Este tipo de depósito, posee una característica de movimiento de masa que es bastante destructiva alcanzando más allá del pie de la ladera. Se evidencia el volumen de material desplazado, el cual se moviliza a través de bloques de material compacto y consolidado de gran magnitud. El horizonte de suelo, correspondiente al escarpe originado por el deslizamiento rotacional, evidencia la composición litológica, la cual corresponde a depósitos fluvio-glaciares en el horizonte superior y depósitos coluviales, derivados de morrenas terminales en el horizonte inferior.

Lo anterior, indica que la composición litológica influye en el tipo de proceso y el volumen de masa movilizada, principalmente bloques de material mayormente cohesionados y de gran volumen. En este sentido, el nivel de permeabilidad influye en la fractura de este tipo de bloques, los cuales son muy susceptibles a moverse en periodos de intensa precipitación.

Figura Nº 48. Deslizamiento rotacional, ladera Mac Iver, Población Modelo.



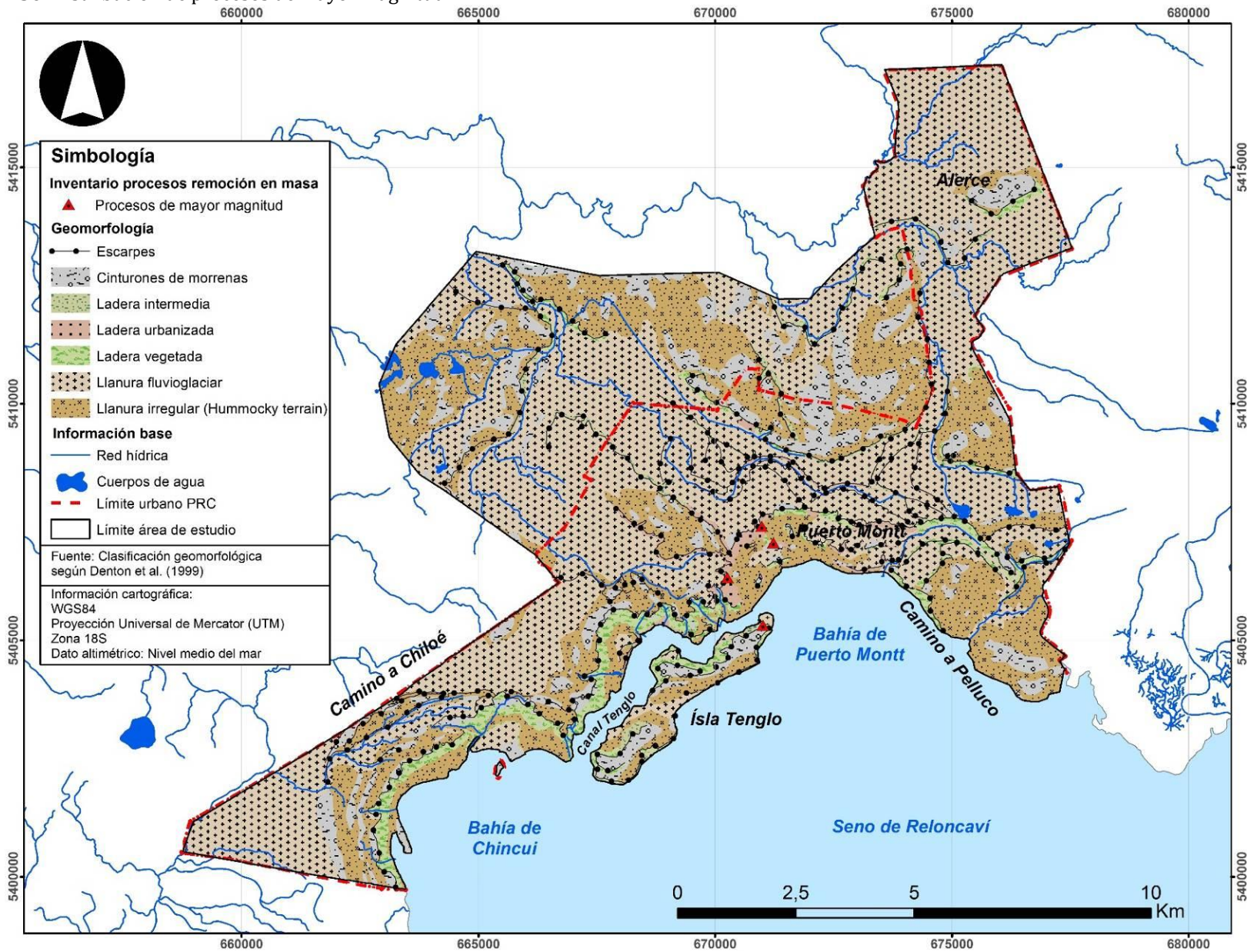
El deslizamiento rotacional con desprendimiento registrado en la población Ebensperger (Figuras 49 y 50), registró un volumen de masa movilizada de aproximadamente de $41,56 \text{ m}^3$. La característica de este proceso, es que obtuvo un ancho de falla de $3,8\text{m}$ y una longitud de falla de $5,1\text{m}$ con una profundidad de $3,2\text{m}$. Este proceso se registró detrás de una vivienda, la cual se vio afectada por el volumen de material, el cual se depositó encima, este proceso fue fuertemente desarrollado por intervención humana, donde se socavó parte de la ladera para la construcción de la vivienda.

Las características del material movilizado, corresponden a depósitos fluvioglaciares con gravas, arenas y limos, estos se distribuyen en gran parte del horizonte, y además subyacen bajo una capa de suelo residual de baja cohesión producto de una cubierta vegetal de tipo herbácea de muy baja densidad, la cual no cohesionan el material litológico, favoreciendo la infiltración e interceptación de agua, mediante escorrentía superficial, esto genera un alto nivel de humedad del suelo, el cual presenta un alto grado de permeabilidad desde el horizonte superior, principalmente por la composición del depósito muy poco consolidado. Lo anterior, evidenció que la composición textural del material litológico contribuye a la inestabilidad mediante la alta permeabilidad del suelo, la cual presenta una alta saturación, en los meses en que existe una mayor infiltración como consecuencia de intensas precipitaciones, las cuales pueden originar el desprendimiento de material.

Figura N° 49. Deslizamiento rotacional con desprendimiento, población Ebensperger.



Figura N°50. Distribución de procesos de mayor magnitud.



Síntesis de peligrosidad a remoción en masa

De acuerdo al rol de los factores desencadenantes, se presentan cuatro niveles de peligrosidad en el área, siendo el más importante por su distribución espacial el peligro Medio, el cual ocupa 563 ha y representa el 32.1% del total (Tabla 25). El peligro Muy Alto ocupa el 29.5% de la superficie total y encuentra concentrado en formas de franja a lo largo de los sistemas de laderas de los primeros niveles de terrazas fluvio-glaciares. También se presenta en laderas interiores de la Isla Tenglo. El peligro Alto comprende el 11.9% de la superficie total y se encuentra distribuida especialmente en el sistema de laderas. La peligrosidad Baja presenta el 26.5% del total y se distribuye de preferencia al interior de las terrazas fluvio-glaciares y en áreas alejadas del núcleo urbano (Figura 51).

Tabla N°25. Niveles de peligrosidad por remoción masa (km²).

Peligrosidad	Superficie ha	Superficie %
Baja	464	26.5
Media	563	32.1
Alta	208	11.9
Muy Alta	518	29.5
Total	1753	100

Las áreas de peligro Muy Alto se encuentran condicionados por pendientes escarpadas de las laderas tanto urbanizadas, intermedias como vegetadas y presentan orientación E-S-SE y SW. Se distribuyen formando franjas que rodean la costa, en algunos lugares se extienden hasta los acantilados marinos frente a Isla Tenglo. Algunos escarpes que forman el relieve irregular generan también áreas de peligro Muy Alto. Dentro del área urbana, hay escarpes que disectan el relieve irregular presentando a su vez Peligro Muy Alto. La naturaleza irregular de estas geoformas hace propensos estos sectores a desarrollar procesos de remoción en masa.

Si se considera el inventario de procesos de remoción en masa activos, se observa una concordancia entre las áreas afectadas por recurrencia histórica y el sistema de laderas de la llanura fluvio-glaciar en cotas de altura de 120m. En esta zona se localiza la población Modelo, una de las más afectadas. Otro grupo de procesos activos se localiza en torno a los acantilados costeros del camino a Pelluco y Chiquihue. Igual situación se aprecia en las laderas interiores de Isla Tenglo. Estas laderas, aunque presentan un tipo de vegetación, esta no es suficiente para estabilizar el terreno (Figuras 52 y 53).

Figura N°51. Niveles de peligrosidad por remoción en masa según factores desencadenantes

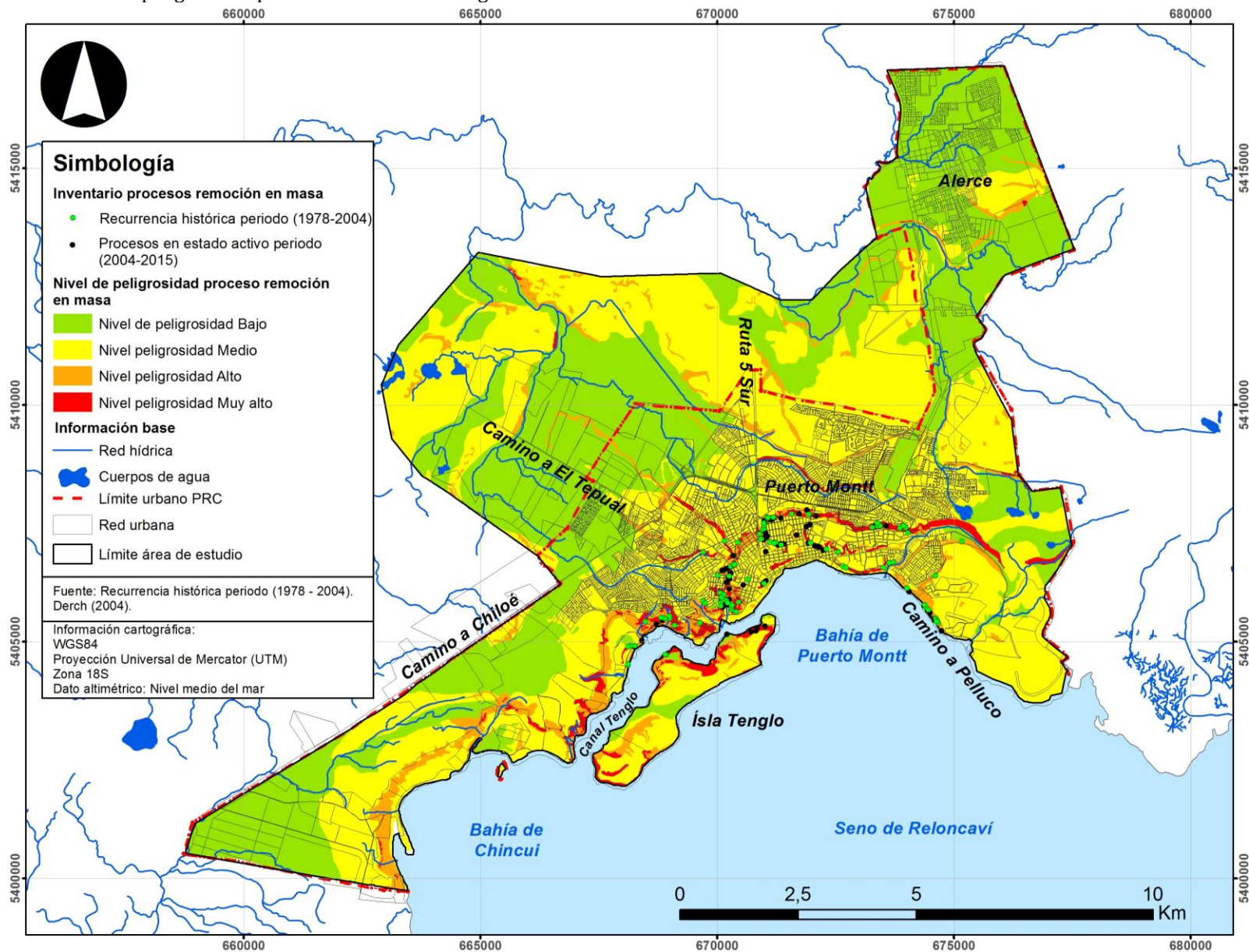


Figura N°52. Laderas intervenidas por ocupación humana, Población Modelo.



Figura N°53. Laderas intervenidas con peligro Muy Alto, Población Modelo.



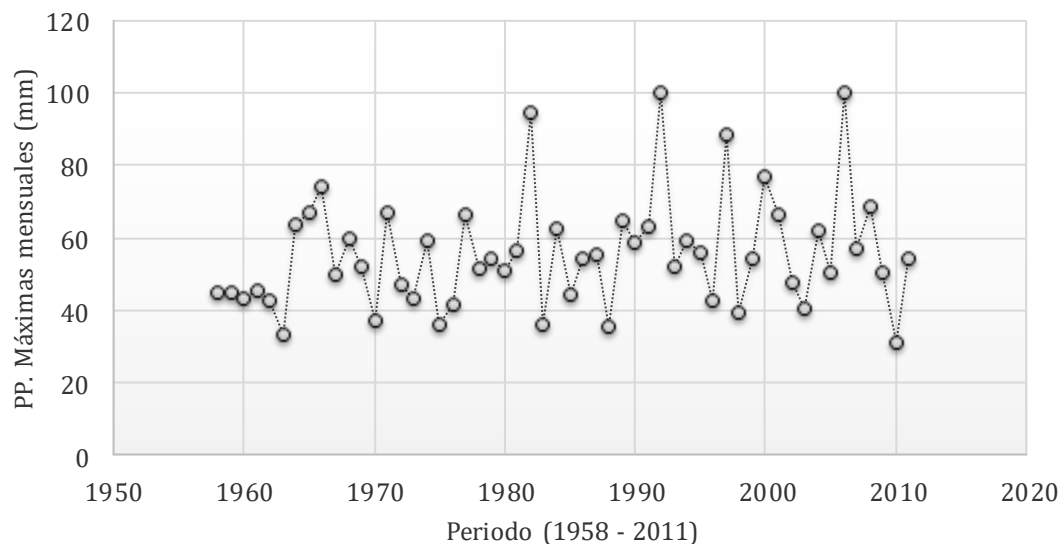
Factores desencadenantes

a) Precipitaciones:

Dentro del área urbana de la ciudad de Puerto Montt, las precipitaciones son unas de las principales energías que detonan procesos de remoción en masa. Lo anterior, se comprobó con el inventario de recurrencia histórica realizado por Derch (2004), el cual registró numerosos procesos de remoción en masa desencadenados bajo intensas precipitaciones durante los meses de invierno. Según el registro de precipitaciones del periodo 1958 - 2011 (Figura 54), el comportamiento de las precipitaciones máximas mensuales, varió aproximadamente entre los 34 mm de precipitación en 24 horas hasta los 80 mm de precipitación en 24 horas, llegando a registrar máximas que alcanzaron los 94,5 mm en 24 horas en el año 1982 y los 100 mm de precipitación en 24 horas en los años 1992 y 2006.

Estas precipitaciones máximas están asociadas a una tendencia de excesos pluviométricos influenciados por fases extremas de la oscilación de sur, correspondiente al fenómeno de El Niño, específicamente en la zona centro - sur de Chile y que se expresaron en fuertes episodios de lluvia durante los meses de invierno. Lo anterior, evidenció la fuerte incidencia de la precipitación en el desarrollo de procesos de remoción en masa, principalmente en laderas y en unidades geomorfológicas donde el grado de actividad se ve determinado por el tipo de proceso desencadenado y la intensidad del movimiento.

Figura N°54. Precipitaciones máximas en 24 horas del periodo 1958 - 2011. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.



Por otro lado, el resultado de la probabilidad de excedencia asociada a un periodo de retorno, indicó que en promedio las precipitaciones máximas mensuales en 24 horas registradas durante el periodo 1958 - 2011 en la ciudad de Puerto Montt. Tienen una alta probabilidad de alcanzar una precipitación menor o igual a los 59,9 mm en 24 horas (Figura 55), a partir de un periodo de retorno de 2 años (Figura 56), cantidad que aumenta a medida que se incrementa el periodo de retorno. En este sentido, bajo el régimen climático registrado durante el periodo 1958 - 2011, la probabilidad de excedencia, indica que la cantidad de precipitación en 24 horas tiene altas probabilidades de alcanzar montos de precipitación que pueden

llegar a los 66,8 mm en 24 horas, a partir de un periodo de retorno de 5 años, con una probabilidad del 80%, además podría llegar a los 76 mm en 24 horas, a partir de un periodo de retorno de 10 años, con una probabilidad del 90%.

Lo anterior, indica que las precipitaciones máximas en 24 horas tienen alta incidencia en el desarrollo de procesos de remoción en masa, lo cual concuerda con el inventario de procesos de recurrencia histórica e inventario de procesos en estado activo, donde según el registro histórico, la mayor cantidad de procesos de remoción en masa en la ciudad de Puerto Montt se desencadenó con precipitaciones que sobrepasaron los 40 mm en 24 horas, donde el aporte de agua, producto de las precipitaciones originó un incremento del nivel freático y de la presión de agua intersticial, lo que ocasiona una disminución en la resistencia al corte del suelo aumentando el peso y facilitando la movilización del material litológico, aumentando la probabilidad de ocurrencia de procesos de remoción en masa.

Figura N°55. Probabilidad de excedencia del registro de precipitación mensual máxima del periodo 1958 - 2011. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.

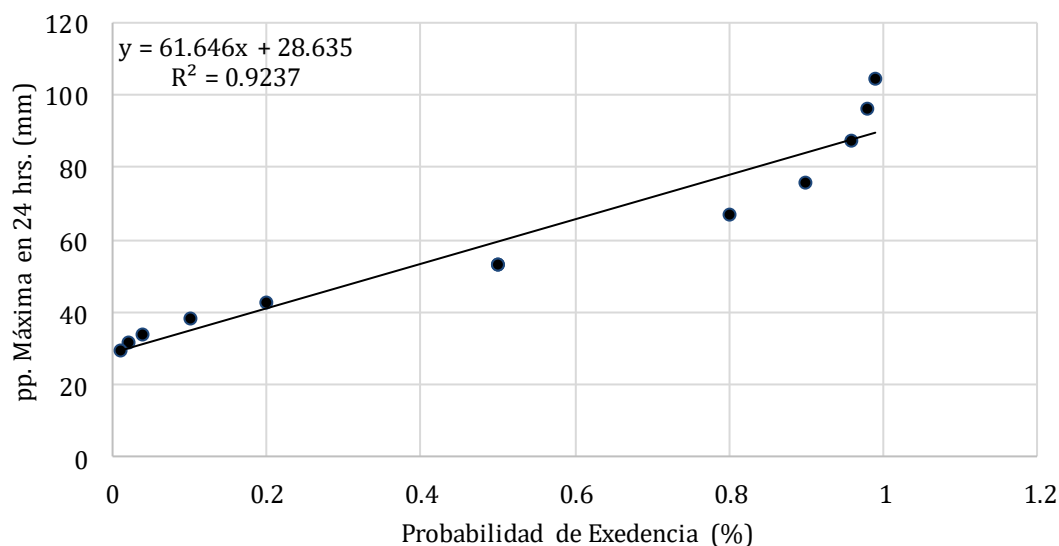
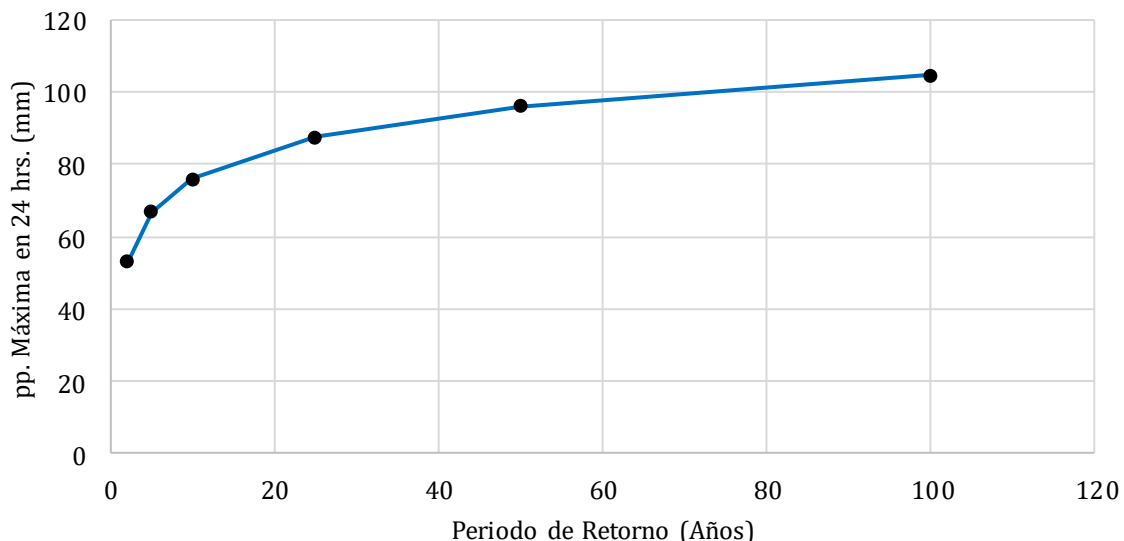


Figura N°56. Periodo de retorno del registro de precipitación mensual máxima del periodo 1958 – 2011. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.



Según la relación intensidad – duración – frecuencia del registro de precipitación del periodo 1958 - 2011, se identificó que la mayoría de las precipitaciones alcanzó en las 2 primeras horas de iniciada la precipitación, intensidades máximas que variaron entre los 15 mm y los 50,5 mm, cantidad que disminuyó a medida que aumentó el tiempo de precipitación, así hasta las 8 horas de precipitación se registró una intensidad que varió entre los 3,9 mm y los 12,6 mm y hasta las 16 horas una intensidad que varió entre los 1,9 mm y los 6,3 mm, y sobre las 24 horas se registró una intensidad que varió entre los 1,3 mm hasta los 4,2 mm de precipitación (Figura 57).

Lo anterior, se intensifica con un periodo de retorno de 2 a 5 años donde la intensidad de precipitación tiene una alta probabilidad de alcanzar máximas hasta los 50,5 mm en 2 horas. De esta forma, se consideró que en un tiempo de precipitación menor a 2 horas, las intensidades presentan una concentración determinante para la generación de procesos de remoción en masa, especialmente para el área urbana de la ciudad de Puerto Montt.

Por otro lado, para precipitaciones menores a 3 horas (Figura 58), estas pueden alcanzar intensidades que pueden llegar hasta los 8 mm de precipitación a partir de un periodo de retorno de 2 a 5 años. Sin embargo, a partir de un periodo de retorno de 10 años, estas intensidades pueden aumentar a 12 mm de precipitación.

Figura N°57. Curvas I-DF del registro de precipitación mensual máxima del periodo 1958 – 2011. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.

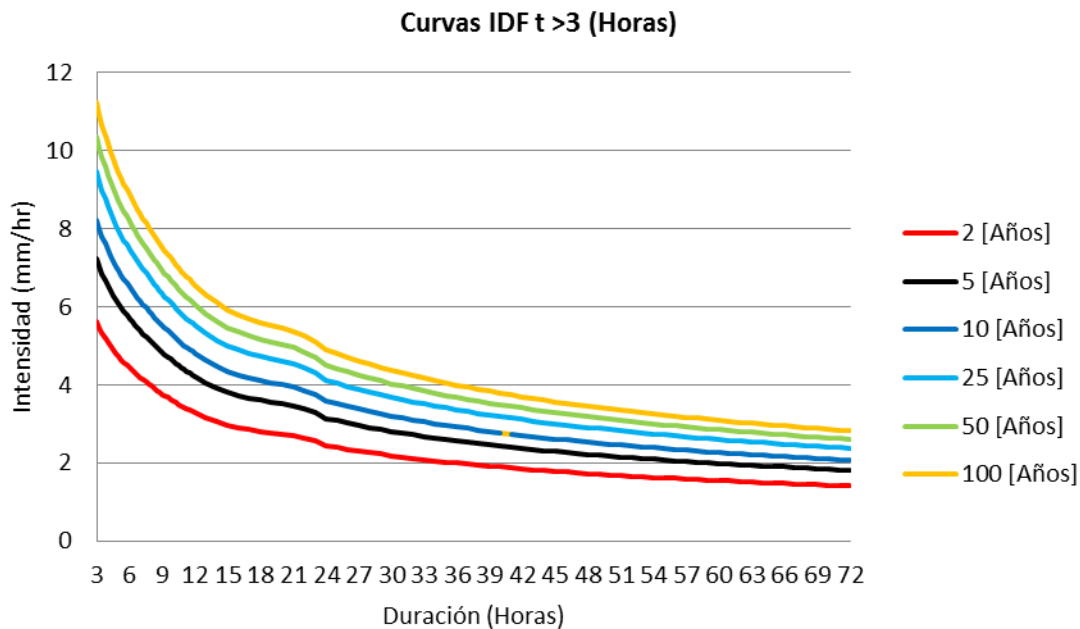
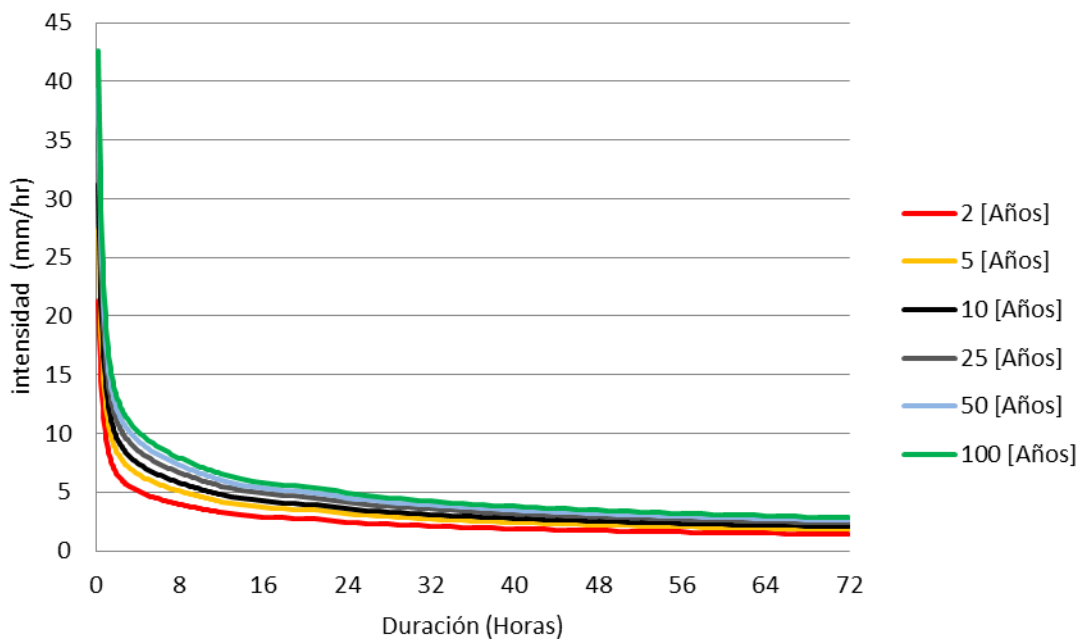


Figura N°58. Curvas I-D mayor a 3 horas del registro de precipitación mensual máxima del periodo 1958 – 2011. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.

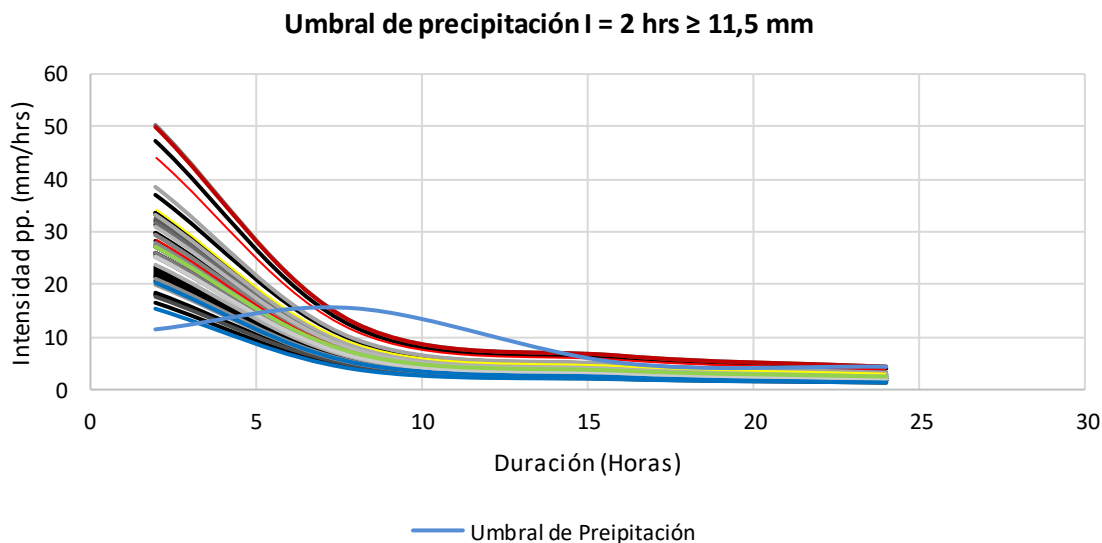


De esta forma, se consideró como intensidad crítica aquella cuya duración de precipitación es de al menos 2 horas. En este sentido, la precipitación en 24 horas del registro de precipitación del periodo 1958 – 2011, presentó una clara tendencia a un aumento de la intensidad bajo las 4 horas de precipitación, sobre

todo en las 2 primeras horas, alcanzando una intensidad máxima de 100 mm en 2 horas, específicamente para los registros de precipitación de los años 1992 y 2006. Lo anterior, indicaría que la precipitación acumulada en las 2 primeras horas sería un factor crítico para desencadenar procesos de remoción en masa, según la intensidad identificada y la información del catastro de recurrencia histórica e inventario de procesos de remoción en masa de la ciudad de Puerto Montt, la cual indicó como antecedente, que la mayor cantidad de procesos desencadenados se inició con fuertes precipitaciones abarcando un periodo de 2 a 6 horas.

Otro factor a considerar es la relación de la precipitación registrada y la precipitación acumulada al día del evento, adecuadamente previo a los tres días. En este sentido, se consideró una intensidad de precipitación acumulada de hasta 2 horas como umbral crítico, donde mayoritariamente se concentran las precipitaciones que varían entre los 15 mm y 50,5 mm y que serían la fuerza de acumulación y saturación en donde el suelo alcanzaría su máximo nivel freático favoreciendo las condiciones de inestabilidad. De esta forma las intensidades concentradas que están sobre los 11,5 mm en las 2 primeras horas de precipitación, se consideraron como la potencial cantidad de precipitación que iniciaría el desarrollo de procesos de remoción en masa bajo las condiciones climáticas del periodo 1958 - 2011, dentro del área urbana de la ciudad de Puerto Montt.

Figura N°59. Intensidad de precipitación y umbrales de precipitación. Estación El Tepual, GSI Ingeniería.



b) Movimientos sísmicos:

El terremoto de 1960 generó numerosos deslizamientos y flujos de barro en la zona urbana de Puerto Montt, algunos de ellos con importantes volúmenes desplazados. El estudio Geoambiental realizado por el Sernageomin (2000), establece al menos 5 deslizamientos en la población Modelo y 1 en Angelmó. Según este estudio, el peligro de deslizamiento ha sido amplificado por la intervención humana a través de las viviendas construidas ilegalmente en los escarpes, tala de vegetación y excavación al pie de taludes.

1.1.3 Actividad Volcánica

El estudio y zonificación del riesgo volcánico es un aporte fundamental en la planificación territorial y protección ambiental de zonas urbanas y áreas protegidas. En particular, la zona urbana de Puerto Montt (ZUPM) se encuentra emplazada en una región volcánica.

El principal centro volcánico ubicado en las cercanías de Puerto Montt corresponde al volcán Calbuco, un volcán activo de composición andesítica y cuya última erupción ocurrió en abril de 2015. Otros centros eruptivos mayores que podrían desarrollar peligros que conformen una amenaza a la ZUPM son los volcanes Osorno, Puntagudo, Chaitén y Michinmavida (Tabla 26). La principal amenaza de estos últimos sería la generación de columnas eruptivas que dispersen material piroclástico hacia Puerto Montt provocando la caída de ceniza en la ciudad. Existen, además, otros centros eruptivos menores cercanos que, según sus características, no deberían presentar una amenaza considerable. Entre ellos se encuentran los volcanes Yate y Hornopirén. En la Tabla 26 se presentan los peligros que se consideran que podrían alcanzar la ZUPM, y que puedan provocar un impacto de consideración. Esta evaluación se realizó considerando la geología e historia eruptiva de los centros volcánicos mencionados, y las características generales de los diferentes fenómenos que se podrían generar durante una erupción volcánica en los próximos 100 años.

Tabla N°26. Ubicación de algunos centros volcánicos principales y su distancia a la ciudad de Puerto Montt (centro cívico).

	Longitud	Latitud	Distancia (km)
Calbuco	-72.612	-41.331	31.5 ⁽¹⁾
Osorno	-72.493	-41.105	54.5
Puntagudo	-72.267	-40.973	78.6
Hornopirén	-72.433	-41.879	62.4
Chaitén	-72.654	-42.837	154.5

(1) La localidad de Alerce, en el sector NE del área urbana, se encuentra a 26 km

El volcán Calbuco, el volcán más cercano a Puerto Montt (Tabla 27), podría desarrollar columnas eruptivas de gran altura (sobre los 10 km), lahares, corrientes de densidad piroclástica y sismos, que deben ser evaluados para determinar el posible impacto que podrían causar. Si bien el volcán Calbuco ha desarrollado avalanchas volcánicas en el pasado, se estima que la probabilidad de que ocurra este fenómeno y que además se dirija a la zona occidental, en dirección a la ZUPM, es muy baja en la escala de tiempo considerada.

Debido a la lejanía de los otros centros eruptivos y el relieve de la zona, un análisis inicial reveló que los alcances de todos los peligros evaluados, salvo la caída de ceniza, están muy limitados y no son suficientes para impactar a la ZUPM. Una mayor fundamentación a estas consideraciones se desprende del análisis de los peligros volcánicos en el volcán Calbuco.

En este informe preliminar se exponen los resultados de la modelación numérica desarrollada para evaluar los peligros volcánicos que podrían afectar de manera considerable la zona urbana de Puerto Montt. Se entenderá como efecto considerable el impacto o alcance directo de un peligro volcánico que

amenace la vida de las personas o que pueda ocasionar daños a la infraestructura propia de una zona urbana.

Tabla N°27. Evaluación de la posibilidad de alcance con impacto de consideración en la zona urbana de Puerto Montt, de los principales fenómenos volcánicos que podrían desarrollarse durante una erupción volcánica. La ubicación de los centros volcánicos considerados se entrega en la Tabla 26.

	Ceniza	Lahar	CDP	Lavas	Bala	Gases	Aval	Sismo
Calbuco	1	1	1	-	-	-	-	1
Osorno	1	-	-	-	-	-	-	-
Puntiagudo	1	-	-	-	-	-	-	-
Hornopirén	1	-	-	-	-	-	-	-
Chaitén	1	-	-	-	-	-	-	-

Peligros volcánicos

Ceniza: Caída de ceniza

Lahar: Flujos laháricos

CDP: Corrientes de densidad piroclástica (e.g. Flujos piroclásticos)

Lavas: Flujos de lava

Bala: Fragmentos balísticos

Gases: Emisión de gases magmáticos con niveles tóxicos

Aval: Avalancha volcánica

Sismo: Sismicidad volcánica perceptible

Posibilidad de impacto considerable

1 Posible

- Nula o muy baja probabilidad

Nota: Con el nombre del volcán Hornopirén también se incluyen edificios volcánicos aledaños, como el Yate. Asimismo, con el nombre del volcán Chaitén se incluyen volcanes más al sur de Hornopirén que incluyen los volcanes Huequi y Michinmavida

Caracterización de la actividad volcánica pasada y futura del volcán Calbuco

En esta sección se presentan los aspectos generales de la geología del volcán Calbuco y de su actividad eruptiva. Esta información es utilizada para posteriormente discutir los posibles escenarios eruptivos en los próximos 100 años, y el análisis que se lleva a cabo de los peligros volcánicos. La geología se basa principalmente en el trabajo de Sellés y Moreno (2011), mientras que la descripción de la actividad histórica se basa en el trabajo de Petit-Breuilh (1999); información sobre la actividad ocurrida en abril de 2015 ha sido tomada de los reportes de actividad volcánica emitidos por SERNAGEOMIN, reportajes publicados en diferentes medios de comunicación, y observaciones personales. Otras referencias son citadas según corresponde.

Geología

La geología básica del área alrededor del volcán Calbuco está dominada en su mayoría por depósitos volcánicos, los cuales se han desarrollado desde el Pleistoceno Medio hasta el Reciente y han ido formando la actual morfología del edificio. La cobertura volcánica y volcanosedimentaria de composición andesítica presente muestra evidencias de la explosividad de las erupciones prehistóricas e históricas que han tenido lugar en el cono volcánico y que han afectado los sectores aledaños a distancias considerables. Las erupciones han sido principalmente del tipo subplinianas, con eyección de piroclastos, tanto de caída como de flujo, así como también del tipo pliniana, con generación de frecuentes flujos piroclásticos, algunos de los cuales se han extendido más de 40 km hacia al oeste.

Los depósitos que se encuentran cubriendo los flancos del volcán, en casi su totalidad, son secuencias de lavas y rocas piroclásticas de cono, las cuales se caracterizan por su composición andesítica (subordinadamente dacítica) con intercalaciones de brechas piroclásticas y de lahares, de edades que van desde el Pleistoceno Medio hasta el Holoceno, lo que nos permite deducir la actividad violenta preglaciación de este volcán. En cuanto a los depósitos de las erupciones recientes, se puede observar que en las partes proximales del cráter principal hay depósitos de lava y domos históricos de las erupciones del volcán en el siglo XX. Se evidencian, por ejemplo, relictos de un domo que en 1912 se emplazaba en borde norte del cráter; depósitos de lava-domo andesítica formada durante la erupción de 1917, que cubre gran parte del lado NE del actual cono; coladas de lavas andesíticas de tipo “aa” y bloques, emitidas durante la erupción de 1929, principalmente hacia el NE con algunas menores hacia el S-SE; y finalmente, coladas de lava andesíticas de tipo bloques con “levées” laterales, emitidas hacia el NE y SE durante la erupción de 1961. Así, los depósitos de lava recientes del volcán no alcanzan extensiones mayores a 5 km, y se dirigen preferentemente hacia el NE encausadas por el valle del Río Blanco-Caliente, siendo las lavas de 1961 las que llegan a una mayor distancia.

El sector sur del volcán está cubierto por depósitos principalmente laháricos los cuales han formado el abanico de Correntoso (al S) y el abanico del lago Chapo (al SE). Estos lahares históricamente se han encauzado por los valles de los ríos Correntoso-Blanco (sur), Colorado y Este, evidenciado en depósitos de gravas gruesas y finas, ricas en matriz arenosa con ceniza ocasional, correspondientes a depósitos de lahares fríos y calientes (flujos piroclásticos abortados), asociados a las erupciones de 1961 y 1929 principalmente, y últimamente a la erupción de abril de 2015.

Desde el N hacia el NW del volcán, se observan depósitos de avalanchas volcánicas con algunos “hummocks” que se extienden ampliamente y se atribuyen a un colapso de la cima ocurrido a fines de la Glaciación Llanquihue (ca. 14 ka). Estos depósitos se encuentran cubiertos por la ignimbrita Alerce y otros depósitos volcanoclásticos holocenos. En el sector NE, donde se encuentra la localidad de Ensenada, se extiende el abanico de lahar de Ensenada el cual ha registrado frecuentes depósitos de aluviones volcánicos que se encausan por los valles de los ríos Blanco-Hueñuhueñu, Tepú y Blanco (norte). Además, esta zona ha registrado en todas sus erupciones históricas la caída de material piroclástico por la dispersión de la columna eruptiva debido a los vientos preferenciales en la atmósfera (Petit-Breuilh, 1999). Está cubierta se extiende por kilómetros con espesores de gran dimensión, llegando el material particulado más fino incluso a países como Argentina, Uruguay y Brasil (erupción de abril de 2015).

Actividad histórica y amenaza volcánica

La actividad histórica se caracteriza por erupciones explosivas de baja y mediana magnitud (Índice de Explosividad Volcánica, IEV, de 2-4) en las cuales, frecuentemente, se desarrolla sismicidad volcánica perceptible, eyección de proyectiles balísticos que afectan las inmediaciones del volcán (hasta unos pocos kilómetros de distancia), lahares al NW, NE y/o S del volcán, flujos piroclásticos menores, y la formación de una columna eruptiva que facilita el transporte y caída de ceniza siguiendo la dirección de los vientos presentes. La Tabla 28 presenta un resumen de la actividad eruptiva histórica.

Los antecedentes geológicos disponibles de este volcán, además de la cronología eruptiva reciente, permiten establecer que los procesos volcánicos más peligrosos en un futuro evento eruptivo serán principalmente: caídas de piroclastos balísticos y de dispersión eólica, lahares fríos y calientes, corrientes de lava, colapsos del domo y flujos de piroclastos de diversa magnitud. Igualmente, es probable que las erupciones estén acompañadas por emisiones de gases tóxicos, actividad sísmica local, deslizamientos menores, incendios forestales, tormentas eléctricas, obstrucción de cursos fluviales, avalanchas de nieve y alteraciones fisicoquímicas de aguas, suelos y vegetación. La probabilidad de ocurrencia de flujos piroclásticos mayores, en el corto plazo, es más baja, debido a que en el registro geológico reciente la actividad es “menos” explosiva, pero es un proceso que no se puede descartar (Sellés y Moreno, 2011).

De acuerdo a los tipos de depósitos observados, se puede determinar que los depósitos piroclásticos de tamaño lapilli y ceniza, son preferentemente transportados por los vientos hacia el sector E del volcán, donde afecta a las localidades de Ensenada, Ralún, Petrohué, Peulla y la cuenca del Lago Chapo. En el caso de las erupciones de varios días, semanas o meses de duración, las cenizas propagadas por la acción eólica, podrían afectar severamente el área con un radio de hasta 100 km desde el volcán, como se documenta en la erupción de 1893-1895 (Petit-Breuilh, 1999). En el sector argentino, las cenizas afectarían principalmente el territorio comprendido entre Villa La Angostura, por el norte, hasta El Bolsón por el sur, y sería la ciudad de San Carlos de Bariloche la que podría sufrir el mayor impacto.

Los lahares fríos y calientes, producidos por el contacto de cuerpos de hielo o nieve con productos volcánicos, se encauzan por los valles de los ríos más importantes de la zona, donde crecen pequeños asentamientos humanos aumentando considerablemente el riesgo en el área. Los lahares calientes producidos por corrientes de densidad piroclásticas alcanzan velocidades máximas de 40 km/h, mientras que los lahares fríos, más fluidos y móviles alcanzan velocidades del orden de 60 km/h. El volumen de estos dependerá de la magnitud del mecanismo generador, y de la disponibilidad de agua (o nieve/hielo). El volcán Calbuco se caracteriza por tener solo glaciares pequeños en la cima. Sin embargo, en la temporada invernal (entre junio y octubre) se observa un extenso manto de nieve que cubre el volcán sobre la cota 1000m. Los valles de ríos que encauzan estos lahares son: ríos Blanco (norte), Tepú y Blanco-Hueñuhueñu, por el norte, y ríos Correntoso-Blanco (sur), Pichiblanco, Colorado y Este, por el sur. La principal consecuencia de estos aluviones volcánicos, sería el corte de la carretera internacional 225-CH, la carretera Ensenada-Ralún, el acceso al Lago Chapo y la carretera Chamiza-Correntoso (que lleva a la reserva), además de toda la destrucción de la infraestructura y los efectos en la apicultura y piscicultura. Dependiendo de la explosividad y volumen del material piroclástico eyectado, también se podrían generar lahares hacia el río Pescado.

Tabla N°28. Resumen de la cronología eruptiva histórica del volcán Calbuco. IEV se refiere al Índice de Explosividad Volcánica, el cual se relaciona con la magnitud de la erupción.

Año Erupción	IEV	Descripción de la erupción	Fenómenos Reconocidos	Áreas cercanas afectadas
1792	2	Actividad explosiva con sismos perceptibles por lugareños.	Sismos volcánicos, ruidos subterráneos, columnas de gases y cenizas, eyección de piroclastos balísticos y flujos de lava	¿?
1837-1838?	2	Posible actividad eruptiva (Domeyko, 1850)	Columna de gases y cenizas y eyección de piroclastos balísticos	¿?
1893-1895	4	Importante ciclo eruptivo de meses de duración con una columna de ca. 10 km de alto y con una dispersión de la caída de ceniza en distintas direcciones con el paso de los meses. Generó un aumento en la temperatura de los ríos, incendios forestales, muerte de ganado y una cubierta de cenizas en un radio de 90 km con espesores considerables.	Sismos volcánicos, Ruidos subterráneos, Columnas de gases y cenizas, Eyección de piroclastos Balísticos, Flujos piroclásticos, Flujos de lava (?), Lahares, Derrumbes, erupción con componente freática.	Sector Ralún, Río Blanco-Caliente, Río Petrohué, Ensenada, Río Blanco Sur, Lago Chapo, Puerto Montt, Puerto Octay (ceniza), Río Poza.
1906-1907	2	Pequeña actividad explosiva acompañada de emanaciones de cenizas y gases.	Columna de gases y ceniza, Eyección de piroclastos balísticos, componente freática.	¿?
1911-1912	2	Coladas de lavas con explosiones de cenizas y gases.	Columna de gases y ceniza, Eyección de piroclastos balísticos	¿?
1917	3	Fase eruptiva con emisión de cenizas y efusión de lavas andesíticas. Alta producción de lahares por el Río Blanco-Caliente. Destrucción de terrenos arables. Se produce pequeño domo con emanaciones solfatáricas.	Sismos volcánicos, Ruidos subterráneos, Columnas de gases y cenizas, Eyección de piroclastos Balísticos, Actividad en el cono-domo, Flujos piroclásticos, Flujos de lava, Lahares, erupción con componente freática.	Río Blanco-Caliente. Ensenada. Bariloche (ceniza).
1929	4	Actividad eruptiva con formación de cráter de 500 m de diámetro con explosiones laterales que provocan avalanchas de nieve y hielo. Muerte de vegetación. Colada de lava provoca en el NW del volcán desencadena lahares e incendios forestales. El Lago Chapo se desbordó y evacuó sobre el Río Chamiza que inundó extensiones considerables destruyendo casas y matando al ganado	Sismos volcánicos, Ruidos subterráneos, Columnas de gases y cenizas, Eyección de piroclastos Balísticos, Actividad en el cono-domo, Flujos piroclásticos, Flujos de lava, Lahares, Derrumbes asociados al volcán, erupción con componente freática.	Ensenada, Puerto Montt, Sector Chamiza-Correntoso Lago Chapo, Puerto Varas. Caída de ceniza hacia el NE-E y lahares por los Ríos Caliente-Blanco, Pescado y Este.

Año Erupción	IEV	Descripción de la erupción	Fenómenos Reconocidos	Áreas cercanas afectadas
		existente. Estas avalanchas de arena y limo afectaron cerca de 20.000 Ha.		
1932	2	Intensa actividad explosiva de pocos días de duración.	Ruidos Subterráneos (?), Columna de cenizas y gases y Eyección de piroclastos balísticos.	¿?
1945	2	Actividad eruptiva explosiva	Ruidos Subterráneos (?), Columna de cenizas y gases y Eyección de piroclastos balísticos.	¿?
1961	3	Actividad eruptiva explosiva con generación de una columna eruptiva de ca. 12 km de altura. Actividad fisural en la ladera oriental con la efusión de dos coladas andesíticas. Grandes corrientes de barro que bajaron por las laderas NW, NE, SE y S que llegaron al Lago Llanquihue y Chapo. La actividad continua por varios meses.	Sismos volcánicos, Ruidos subterráneos, Columnas de gases y cenizas, Eyección de piroclastos Balísticos, Actividad en el cono-domo, Flujos piroclásticos (?), Flujos de lava, Lahares, erupción con componente freática.	Sectores aledaños al volcán en un radio de 20 km.
1972	2	Emisión de piroclastos desde el cráter central de pequeñas dimensiones.	Sismos volcánicos, Ruidos subterráneos, Columnas de gases y cenizas, Eyección de piroclastos Balísticos.	¿?
2015	4	Actividad eruptiva explosiva que genera una columna eruptiva que supera los 15 km de altura y más de 300 km de dispersión. La dispersión piroclástica se centra en el N y NE principalmente, mientras que los flujos laháricos bajan por el flanco S y NE del edificio volcánico. La erupción genera pérdidas en la agricultura, acuicultura y turismo, además de graves daños a la infraestructura vial.	Sismos volcánicos, Ruidos subterráneos, Columnas de gases y cenizas, Eyección de piroclastos Balísticos, Actividad en el cono-domo, Flujos piroclásticos, Lahares.	Principalmente sectores NE (Ensenada) y S del volcán.

Futuras erupciones de lavas escurrirían, de preferencia, desde el domo central por los cauces del flanco NE y SE. Debido a la viscosidad relativamente alta de las lavas, estas también podrían rebasar el borde norte del cráter y descender por esa ladera. Cabe destacar que las coladas recientes no sobrepasan los 5 km de distancia desde el cráter, pero hay registro de erupciones que han llegado hasta 9 km del cráter por el valle del Río Blanco-Correntoso.

Durante las erupciones holocenas del volcán Calbuco, y en particular en el registro histórico, ha sido frecuente la generación de flujos piroclásticos y flujos de bloques y ceniza de volúmenes reducidos, los cuales han afectado principalmente el sector NE del volcán (Ríos Caliente-Blanco) y, en menor medida, hacia el lago Chapo. En consecuencia, es probable que futuras erupciones explosivas del volcán continúen generando flujos piroclásticos capaces de cubrir los flancos y la base del volcán en forma radial. Por su parte, el crecimiento del domo central y su empinada e inestable ladera oriental, podría producir colapsos gravitacionales y en generar flujos de bloques y ceniza más voluminosos, con descargas piroclásticas laterales o dirigidas (oleadas), como la ocurrida en la erupción de 1929. Estas caídas gravitacionales voluminosas del domo central descenderían hacia el río caliente y se podrían expandir en forma de abanico en la zona apical del abanico de Ensenada (Sellés y Moreno, 2011). Flujos piroclásticos de volúmenes superiores a 1 km³, generados en grandes erupciones plinianas en la historia geológica del volcán Calbuco, han alcanzado hasta el fiordo de Reloncavi, a 30 km al este del volcán, y han dejado depósitos entre Ralún y Canutillar, cruzando el lago Chapo, donde alcanzan espesores de hasta 70cm. De ocurrir una erupción de estas características, la zona urbana de Puerto Montt podría ser afectada si es que el flujo se dirigiera hacia el occidente.

Modelación numérica de peligros volcánicos

La descripción de la actividad volcánica presentada en la sección anterior permite definir los escenarios eruptivos que deben tomarse en consideración para evaluar el posible impacto de la actividad volcánica a la ZUPM. Bajo ciertos escenarios, la modelación numérica permite evaluar la distribución espacial del impacto o inundación sobre Puerto Montt. La evaluación se llevará a cabo según el fenómeno volcánico, y evaluando primeramente la amenaza que presentaría la actividad del volcán Calbuco. Una consideración importante en este análisis es que la actividad volcánica que presente el volcán Calbuco en las próximas décadas seguirá el mismo patrón que se ha observado en la historia eruptiva del volcán durante los últimos 220 años. Complementariamente, se discutirá la posibilidad de desarrollar fenómenos de mayor magnitud y mayor alcance, como los que se han visto en la historia geológica.

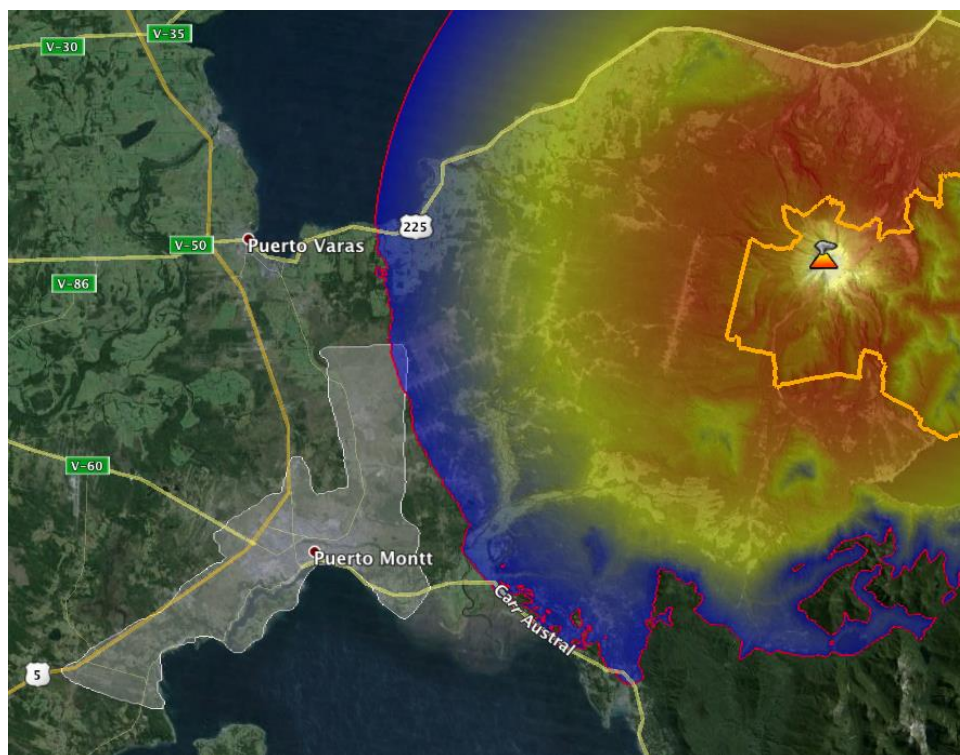
Corrientes de densidad piroclásticas (CDP):

Como se mencionó anteriormente, el único volcán que podría desarrollar una CDP capaz de alcanzar la ZUPM es el volcán Calbuco. La actividad histórica solamente muestra la generación de CDPs de bajo volumen y alcance que difícilmente podrían avanzar más de 25 km hacia el oeste. En consecuencia, se evalúa como muy baja la probabilidad de que una CDP alcance la ZUPM, cuyo límite más cercano se ubica en el borde NE a ca. 23 km de la cima del volcán.

Sin embargo, la historia geológica da cuenta de la generación de CDPs de gran volumen que podrían viajar por decenas de kilómetros y que podrían afectar la ZUPM. Para evaluar un escenario como este, se simuló la inundación de un CDP con una movilidad determinada por un coeficiente de Heim de 0.1, que se origina a 2.5 km de altura, utilizando el modelo del cono de energía (Figura 60). El CDP modelado en este caso se

generaría por el colapso de una columna eruptiva a baja altura, lo cual podría ocurrir en el caso de una explosión de gran magnitud que pudiera destruir parte de la cima del cono volcánico y así no desarrollar una sustentación en la atmósfera. El coeficiente de Heim utilizado representa una gran movilidad para un flujo como éste. No se utiliza un coeficiente menor ya que también se considera que el flujo podría perder energía rápidamente al encontrarse con una barrera topográfica de mediana altura ubicada a aprox. 3.4 km al WSW del volcán. El resultado de esta simulación (Figura 60) indica que un CDP de estas características difícilmente inunda la ZUPM, y sólo una pequeña área al NE sería afectada.

Figura N°60. Alcance teórico de corrientes de densidad piroclástica (CDP) que presenten una pérdida energética relacionada a un coeficiente de Heim de 0.1, liberadas a 2.5km de altura. La línea de contorno roja delimita el alcance máximo. Los colores de azul a rojo indican áreas con un aumento en el volumen de material que sería depositado, y las áreas con mayor probabilidad de ser afectadas. Las zonas que serían efectivamente afectadas por la ocurrencia de un CDP dependerán de la dirección que tome el flujo. La imagen de fondo fue tomada de Google Earth. Esta simulación tiene como propósito mostrar que aún con un CDP de gran movilidad la zona urbana de Puerto Montt sería difícilmente afectada. Aunque no se puede descartar por completo la ocurrencia de una CDP de estas características, se estima que su ocurrencia posee una muy baja probabilidad.

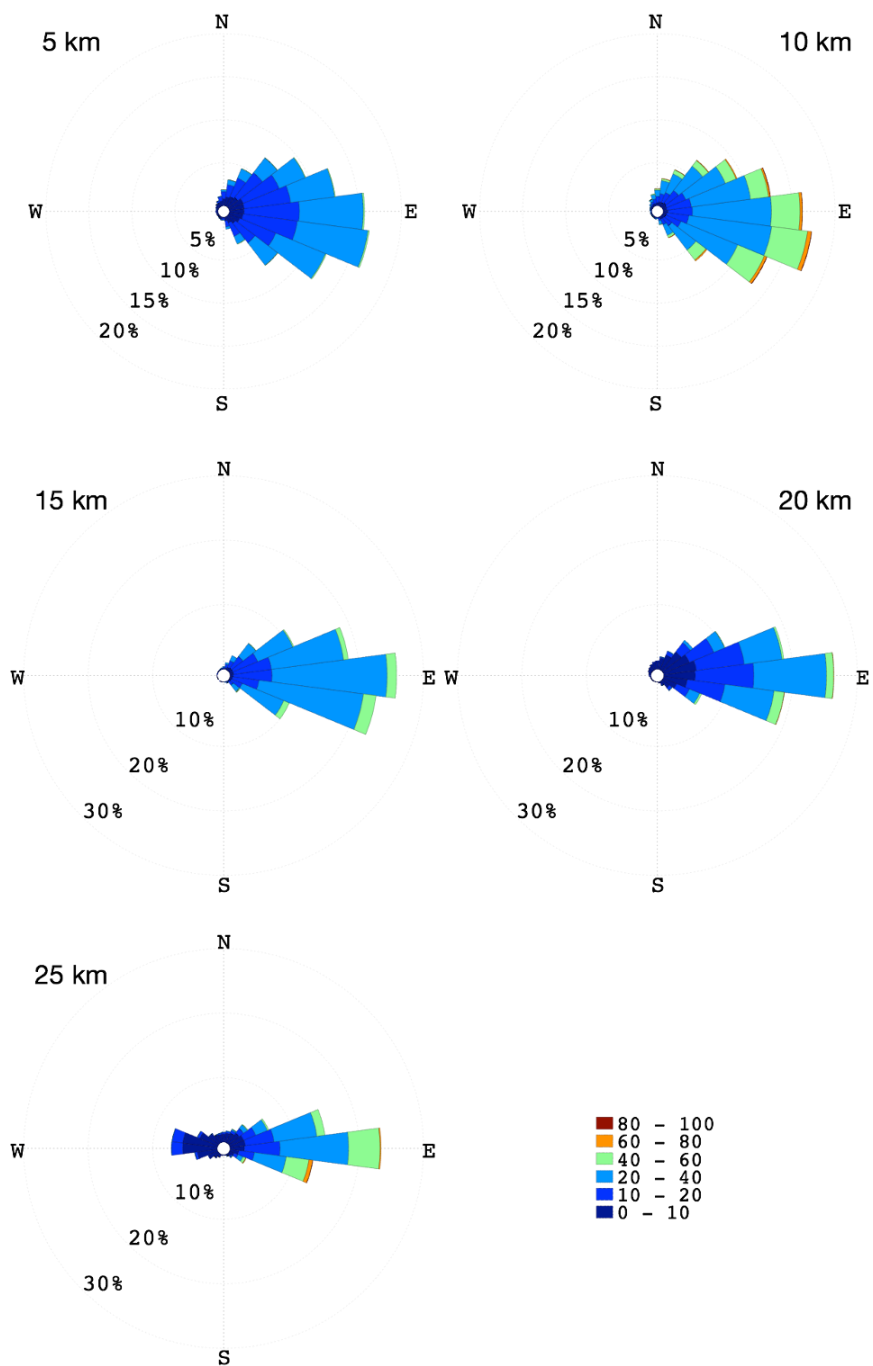


Caída de ceniza:

El principal factor que determina la caída y acumulación de ceniza (tefra en general) es el perfil de vientos en la zona. Se analizó la estadística de los vientos en altura en la región cercana a Puerto Montt utilizando la base de datos NCEP Reanalysis II de la NOAA. La base de datos utilizada considera 32140 perfiles de vientos entre los años 1990 y 2011, con datos extraídos del nodo de grilla ubicado a 42.5 latitud S, 72.5 longitud W, ubicado a 130 km al sur del volcán Calbuco. Temporalmente, los perfiles de vientos en esta base de datos se encuentran evaluados cada 6 horas. La estadística de la dirección de los vientos y sus

velocidades se presenta en la Figura 61, y muestra claramente la predominancia de los vientos hacia el Este. Solamente a alturas sobre los 20 km se aprecia una mayor frecuencia de vientos hacia el Oeste.

Figura N°61. Estadísticas de vientos para las alturas 5, 10, 15, 20 y 25 km. Las direcciones indican hacia donde el viento se dirige y las velocidades (cuadro inferior derecho) se expresan en m/s. Se utilizó la base de datos NCEP Reanalysis II, y considera 32140 perfiles entre 1990 y 2011, en el nodo de la grilla ubicado en -42.5 lat., -72.5 lon., a 130 km al sur del volcán Calbuco.



Para que se produzca la caída de ceniza en una dirección particular es necesario que los vientos a alturas menores de la parte superior de la columna eruptiva se dirijan en esa dirección. En consecuencia, si se considera que la probabilidad de una erupción es igual en cualquier día del año, la probabilidad de que la caída de ceniza se concentre en la ZUPM es muy baja. Por ejemplo, la Tabla 4 muestra que la probabilidad de que los vientos a 10 km de altura se dirijan hacia la ZUPM es 0.7%. Esta probabilidad se calculó considerando los vientos que se dirigen entre los ángulos 210 y 270, y con cualquier velocidad. Debido a la cercanía del volcán Calbuco, esa sería la probabilidad de tener ceniza en la ZUPM. El mismo tratamiento se puede utilizar para evaluar la dirección de transporte de la ceniza desde un volcán al sur de Puerto Montt, como es el volcán Chaitén. En este caso, si se evalúan los vientos con una dirección entre los ángulos 315 y 0, se obtiene que la probabilidad de que los vientos se dirijan desde el volcán Chaitén a Puerto Montt es de 4.8% (Tabla 29). Si bien esta probabilidad es mayor, la cantidad de ceniza que podría caer en la ZUPM sería menor debido a la mayor distancia que existe entre Chaitén y Puerto Montt (Tabla 29), y a la rápida disminución (exponencial) que existe en la acumulación de ceniza caída con la distancia.

Es importante notar aquí que estas probabilidades se refieren a un evento de corta duración (< 6 horas). Si una erupción dura más tiempo, entonces es posible que los vientos cambien de dirección durante el desarrollo de la erupción, aumentando la probabilidad de coincidencia entre la creación de una columna eruptiva de gran altura y un perfil de vientos que transporten la ceniza hacia la ZUPM. En el registro histórico de la actividad eruptiva del volcán Calbuco se observa que cuando las erupciones han presentado una duración de días a meses, la columna eruptiva de gran altura (> 10 km) ocurren por períodos cortos de tiempo, aunque otros fenómenos se puedan mantener durante el proceso eruptivo. Por ejemplo, en la erupción de 1893, entre septiembre y noviembre se generaron columnas eruptivas que duraron pocas horas o incluso menos de una hora (Petit-Breuilh, 1999).

Para evaluar la cantidad de ceniza que podría caer en la ZUPM se considerará un escenario eruptivo similar al ocurrido en la madrugada del 23 de abril de 2015. La Tabla 30 muestra los parámetros que se utilizaron con el modelo numérico de advección, difusión y sedimentación de tefra, llamado Tephra2. La modelación de este escenario permitió estimar la probabilidad de caída de ceniza en diferentes localidades de interés. La Figura 62 muestra la probabilidad de excedencia de acumulación de ceniza en la ZUPM. Como comparación también se incluye Ensenada (al NE del volcán Calbuco). Estas probabilidades se calcularon considerando el mismo escenario eruptivo en proceso de Monte Carlo que escogió 10,000 perfiles de vientos en forma aleatoria. Los resultados muestran que la probabilidad es bastante baja para concentraciones que pueden ser afectar la infraestructura en la ZUPM, sobre 100 kg/m².

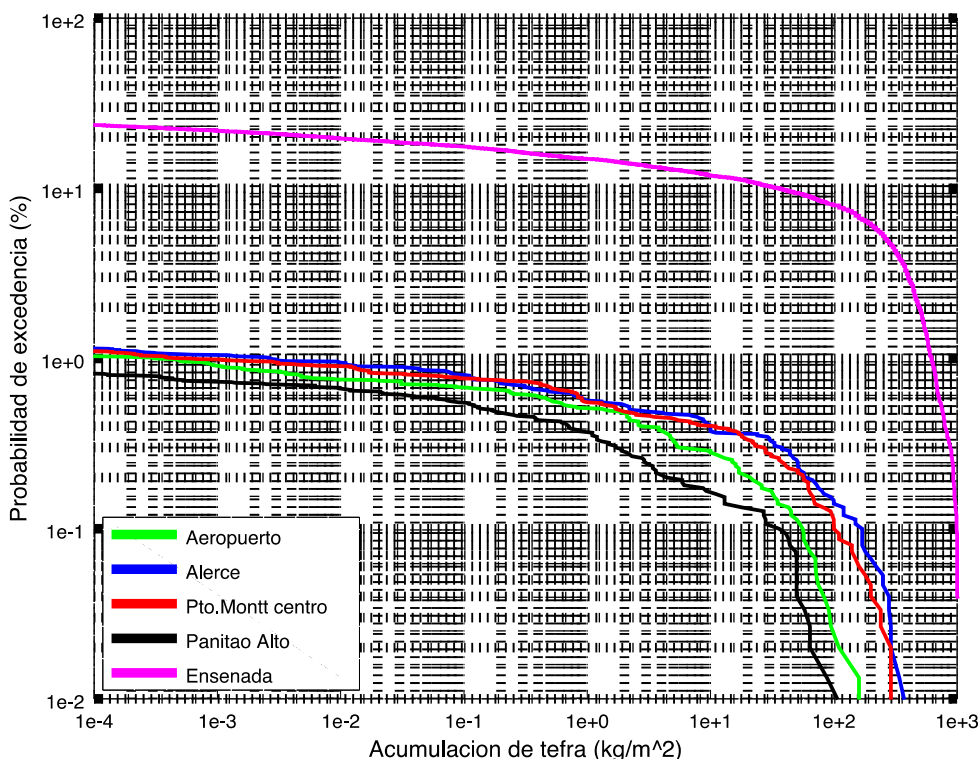
Tabla N°29. Estadística de vientos por ángulo de avance y velocidad, a una altura de 10 km. De 32140 muestras, los vientos que se dirigen hacia el área urbana de Puerto Montt (ángulos 210-270) son 237 en total, lo cual significa una probabilidad de 0.7% de que una erupción ocurrida en el volcán Calbuco, en cualquier día del año, provoque la caída de ceniza en Puerto Montt. En el caso de una erupción del volcán Chaitén, los vientos en los ángulos 315-0 suman 1533, lo cual entrega un 4.8% de probabilidad de que la ceniza se dirija hacia Puerto Montt.

Ángulo	Velocidad (m/s)						Total
	0-10	10-20	20-40	40-60	60-80	>=80	
0	108	242	235	46	2	0	
15	148	313	487	76	3	0	
30	141	412	754	159	6	0	
45	186	592	1141	264	17	0	
60	147	785	1603	436	32	0	
75	142	924	2230	682	63	1	
90	187	913	2947	1071	91	1	
105	145	826	3122	1355	148	3	
120	117	627	2292	1079	102	3	
135	102	360	1145	470	45	0	
150	91	233	432	97	4	0	
165	37	90	152	15	0	0	
180	17	23	21	0	0	0	
195	33	30	22	0	0	0	
210	27	20	4	0	0	0	
225	27	18	2	0	0	0	
240	19	15	5	0	0	0	
255	39	11	3	0	0	0	
270	15	24	8	0	0	0	
285	46	19	12	0	0	0	
300	36	40	25	0	0	0	
315	58	62	40	0	0	0	
330	85	97	99	6	0	0	
345	87	168	171	27	0	0	
210-270	127	88	22	0	0	0	237
315-0	338	569	545	79	2	0	1533

Tabla N°30. Parámetros de entrada ocupados en el modelo Tephra2, representando una erupción de similares características a la ocurrida en la madrugada del 23 de Abril de 2015.

Parámetro	Valor	Descripción
Columna eruptiva	16000	Altura de la columna eruptiva (m)
Masa	2.00E+11	Masa total expulsada durante la erupción
Tamaño de partículas	5.5, 0, -5	Mínimo, media y máximo en unidades phi
Constante turbulenta	0.04	"Eddy diffusion" de partículas menores
Difusión atmosférica	800	Coefficiente de difusión y advección para partículas mayores (m ² /s)
Tiempo de caída	1.00E+06	Tiempo límite de caída (s)
Densidad de líticos	2400	Densidad estimada de fragmentos líticos (kg/m ³)
Densidad de pómez	1200	Densidad estimada de fragmentos juveniles (kg/m ³)
Segmentos de columna	100	Número de pasos de integración en la columna eruptiva
Modelo de columna	0	Masa distribuida uniformemente en la columna eruptiva
Liberación de masa	0.6	Fracción superior del segmento de la columna eruptiva desde dónde se liberan las partículas

Figura N°62. Probabilidades de excedencia de acumulación de ceniza en diferentes localidades del área urbana de Puerto Montt (ver Tabla 6 con las coordenadas). Se incluye el caso de Ensenada para su comparación. Para realizar este análisis se consideró un escenario similar al ocurrido en la madrugada del 23 de abril de 2015. Este escenario corresponde a una de las erupciones individuales más explosivas ocurridas en la historia del volcán Calbuco.



Si se considera una acumulación de ceniza de 1 kg/m², lo cual puede provocar problemas de salud en las personas, se observa que la probabilidad de excedencia de esa acumulación en la ZUPM alcanza solamente un 0.5%. Las mayores probabilidades de excedencia se concentran al E del volcán Calbuco en consistencia con la dirección preferencial de los vientos en altura.

Los resultados probabilísticos expuestos aquí, a pesar de ser bajos, no descartan la posibilidad de que se acumulen grandes concentraciones de tefra en la ZUPM. Al considerar el peor escenario de vientos de la base de datos y el mismo escenario eruptivo, se observa que gran parte de la ZUPM alcanza niveles de acumulación que superan los 100 kg/m² (Figura 64). Estos niveles de acumulación de ceniza son suficientes para afectar sustancialmente techumbres construidas con material ligero

Tabla N°31. Coordenadas de los lugares utilizados en el análisis de caída de ceniza. Las coordenadas corresponden a la Proyección Universal de Mercator (UTM), Zona 18S.

	UTM E	UTM N
Calbuco, cráter	699700	5421650
Puerto Montt, centro	671920	5407170
Aeropuerto El Tepual	659200	5411000
Alerce	674701	5415286
Terminal Panitao Alto	662466	5399800
Ensenada	706246	5435285

Figura Nº63. Distribución espacial de la probabilidad de excedencia (en porcentaje) para una acumulación de 1 kg/m². El triángulo muestra la ubicación del volcán Calbuco. Notar que los mayores valores de probabilidad se encuentran hacia el E del volcán, mientras que en el área urbana de Puerto Montt la probabilidad de alcanzar o exceder una acumulación de ceniza de 1 kg/m² es de 0.5%.

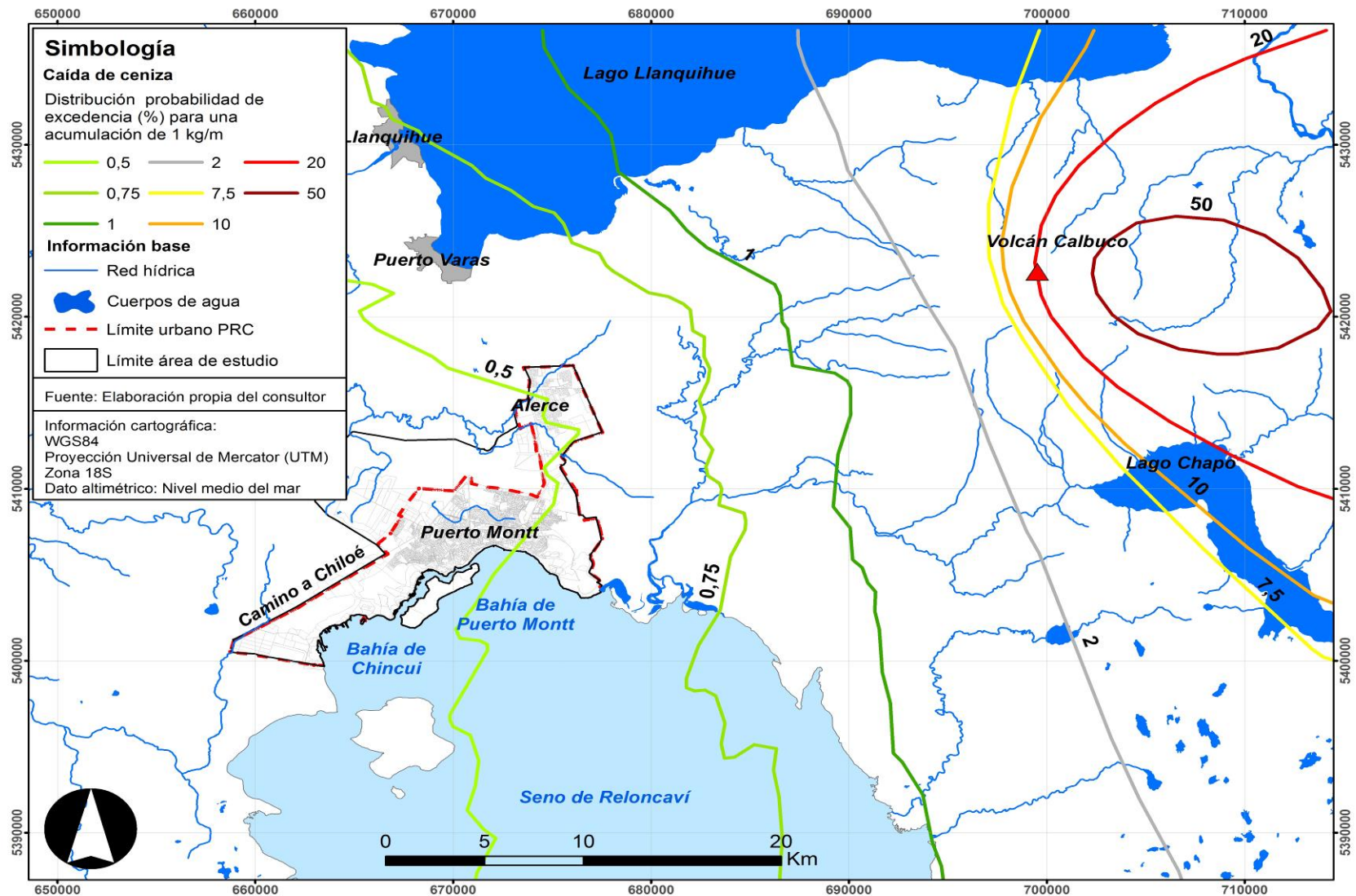
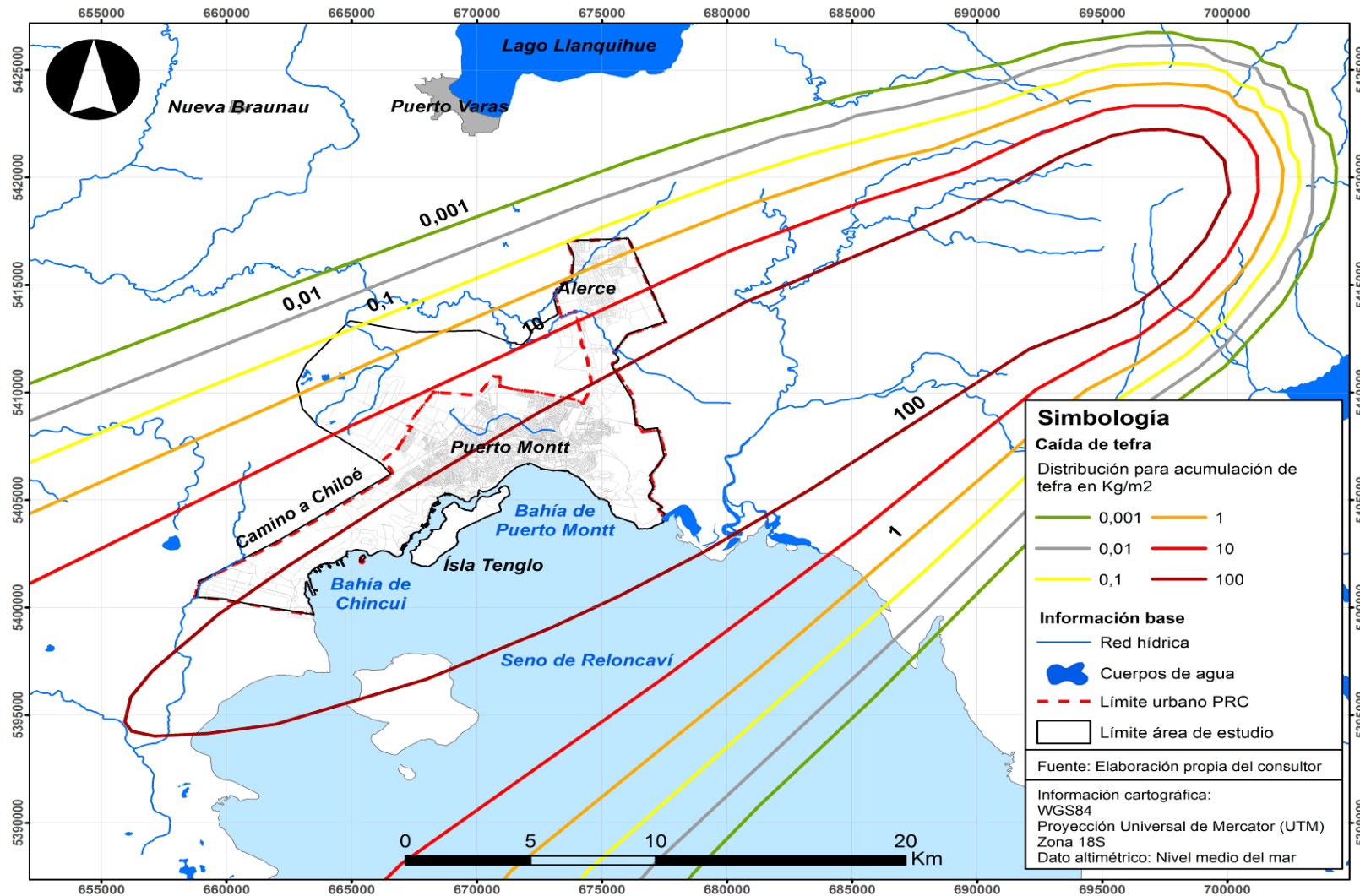


Figura N°64. Distribución de caída de tefra en kg/m² considerando el peor escenario de vientos encontrado en la base de datos utilizada. La erupción simulada tiene características similares a la ocurrida en la madrugada del 23 de abril de 2015 (Ver Tabla 5). En este escenario Puerto Montt puede recibir sobre 100 kg/m², lo cual puede provocar daños en techos de material ligero, además de otras consecuencias en el sistema eléctrico y alcantarillado; la salud de las personas también podría verse fuertemente afectada. Notar que la probabilidad de ocurrencia de una erupción con estas características, al mismo tiempo de presentarse un perfil de vientos, tiene una muy baja probabilidad.



1.1.4 Actividad o intervención humana

a) Accidentes de tránsito

El presente apartado contiene un análisis de recurrencia de accidentes⁶ para la comuna de Puerto Montt, en particular para el área urbana, a partir de los datos aportados por la Secretaría de Planificación de Transporte (SECTRA).

Del total de accidentes registrados en la comuna de Puerto Montt (Tabla 32, entre los años 2010 a 2014, un 88% ocurrió en el área urbana. El año con mayor registro de accidentes a nivel comunal correspondió al 2013, con 1.358 casos, en tanto que el mayor número de accidentes en el área urbana tuvo lugar el año 2014, con 1.154.

Tabla N°32. Número total de accidentes comuna de Puerto Montt, según área urbana o rural, años 2010 a 2014.

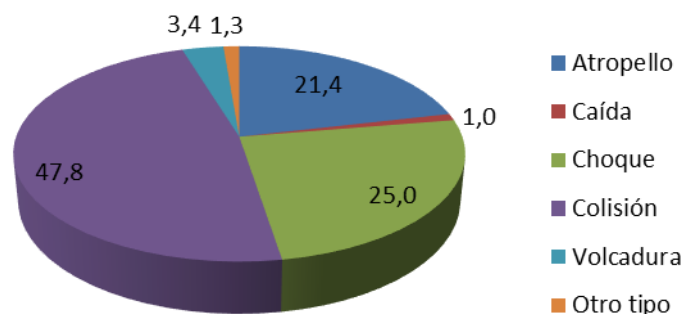
Año	Número de accidentes	Área	
		Urbana	Rural
2010	1022	962	60
2011	986	892	94
2012	823	731	92
2013	1358	1152	206
2014	1352	1154	198
Total	5541	4891	650

Fuente: Elaboración propia, según datos SECTRA, 2015.

Respecto de los tipos de accidentes registrados en la comuna entre los años 2010 a 2014 (Figura 65; Tabla 33), un 48% corresponde al tipo **colisión**, un 25% son **choques** y 21% corresponde a **atropellos**. Estos tres tipos de accidentes registraron un aumento importante durante los años 2013 y 2014, respecto de los años anteriores.

Por ejemplo, las colisiones registradas en 2014 se incrementaron un 46% respecto de 2010; los choques ocurridos en 2014 superaron en un 25% a aquellos del año 2010, y lo mismo ocurre con los atropellos: entre 2010 y 2014 aumentaron un 19%.

⁶ Accidente de tránsito (siniestro de tránsito): Evento que involucra uno o más vehículos, que resulta en lesiones físicas a las personas y daños a la propiedad privada. Generalmente, un accidente de tránsito se define como fenómeno de baja ocurrencia, aleatorio, causado por múltiples factores, precedido de una situación en que una o más personas maniobraron mal su vehículo o medio de transporte.

Figura N°65. Tipos de accidentes, periodo 2010 - 2014 (porcentaje).

Fuente: Elaboración propia, según datos SECTRA, 2015.

Tabla N°33. Tipo de accidente por año, 2010 a 2014.

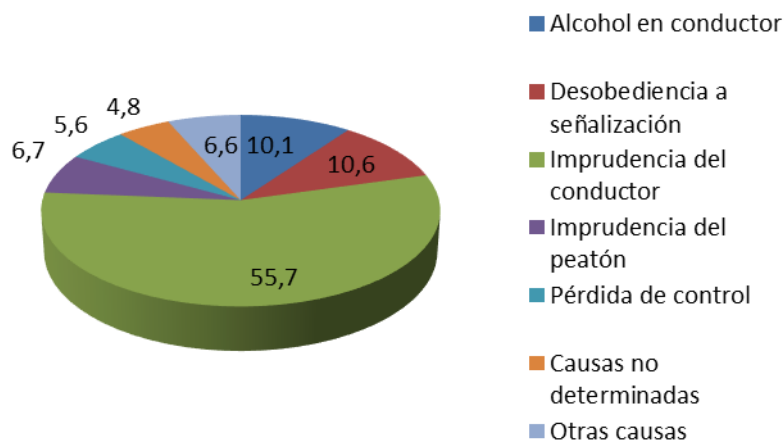
Año	Tipo de accidente						Total
	Atropello	Caída	Choque	Colisión	Volcadura	Otro tipo	
2010	218	14	272	463	39	16	1022
2011	213	7	266	456	29	15	986
2012	212	10	171	393	29	8	823
2013	284	9	337	663	46	19	1358
2014	259	16	339	675	48	15	1352
Total	1186	56	1385	2650	191	73	5541

Fuente: Elaboración propia, según datos SECTRA, 2015.

De acuerdo con su definición, un accidente de tránsito puede ser causado por múltiples factores. Para el periodo 2010-2014, las causas más recurrentes de accidentes en Puerto Montt (Figura 66, Tabla 34) fueron: i) imprudencia del conductor (56%); ii) desobediencia a señalización (11%) y iii) alcohol en conductor (10%).

En cuanto al comportamiento en el tiempo de las causas citadas, en 2014 se incrementó el número de casos respecto de 2010, principalmente en dos tipos de causas: los casos catalogados como "desobediencia a señalización" aumentaron un 79%, y aquellos casos registrados como "imprudencia del conductor" aumentaron un 59%.

Figura N°66. Causas de accidentes, periodo 2010 - 2014 (porcentaje).



Fuente: Elaboración propia, según datos SECTRA, 2015.

Tabla N°34. Causa de accidentes por año, 2010 a 2014.

Causa del accidente	Año					Total
	2010	2011	2012	2013	2014	
Alcohol en conductor	128	116	48	134	131	557
Alcohol en peatón	20	11	14	27	23	95
Alcohol en pasajero	0	0	0	0	1	1
Deficiencias viales	6	5	0	9	11	31
Desobediencia a señalización	102	95	63	143	183	586
Drogas y/o fatiga en conductor	4	3	4	9	4	24
Fallas mecánicas	13	7	9	14	9	52
Imprudencia del conductor	476	516	525	812	756	3085
Imprudencia del peatón	68	71	55	95	83	372
Imprudencia del pasajero	11	6	6	8	6	37
Pérdida de control	51	61	44	58	95	309
Velocidad imprudente	4	5	4	29	19	61
Causas no determinadas	128	69	45	9	15	266
Otras causas	11	21	6	11	16	65
Total	1022	986	823	1358	1352	5541

Fuente: Elaboración propia, según datos SECTRA, 2015.

Respecto de los tipos de accidentes, los principales que se registran entre 2010 y 2014 son colisiones, choques y atropellos. En todas estas categorías se repite como causa principal la "imprudencia del conductor", que en promedio:

- Causa el 51% de los atropellos;
- El 55% de los choques; y
- El 64% de las colisiones.

Los antecedentes exhibidos en la Tabla 35 complementan lo indicado anteriormente, en el sentido que las principales causas de los accidentes ocurridos en la comuna se relacionan con "factores humanos" (imprudencia, desobediencia a señalización e ingesta de alcohol), y no con causas asociadas estrictamente al camino, como puede ser el estado de la calzada. Según los datos, el 91,4% de los accidentes ocurridos en la comuna se han producido sobre calzadas en buen estado.

Tabla N°35. Accidentes según estado de calzada, años 2010 a 2014.

Año	Estado de la calzada		
	Bueno	Malo	Regular
2010	985	2	35
2011	915	5	66
2012	757	6	60
2013	1225	8	125
2014	1180	5	167
Total	5062	26	453

Fuente: Elaboración propia, según datos SECTRA, 2015.

Un aspecto de suma importancia en un análisis de este tipo se relaciona con la cantidad de afectados por accidentes de tránsito y la gravedad de sus lesiones (Tabla 36). En tal sentido, los datos indican que en la comuna de Puerto Montt las personas afectadas por accidentes, en su mayoría, sufren lesiones leves (83%). En cuanto a las otras categorías, cada año se registra una media de 56 afectados con lesiones menos graves, 123 afectados con lesiones graves y 21 casos de afectados con resultado de muerte.

Tabla N°36. Afectados por accidentes según año y gravedad.

Año	Afectados por accidente			
	Muertos	Graves	Menos grave	Leve
2010	25	126	66	754
2011	19	121	56	675
2012	15	94	40	681
2013	23	124	73	766
2014	22	149	47	817
Total	79	488	216	3693

Fuente: Elaboración propia, según datos SECTRA, 2015.

En cuanto a casos de accidentes en las principales rutas que cruzan el área urbana de la comuna de Puerto Montt, entre 2010 y 2012 las cifras fluctuaron entre los 63 y los 81 casos de accidentes (Tabla 37). No obstante, el año 2013 las cifras se incrementaron un 226% respecto del año 2010.

Vinculando las cifras comentadas anteriormente con los caminos donde ocurren la mayor cantidad de accidentes, se tiene que la **Ruta 5** concentra un 31% de los casos. Esta vía principal, localizada en el límite del área urbana (zona poniente y sur-poniente) es la de mayor longitud, factor que puede explicar el

número de casos de accidentes registrados en esta ruta (la ubicación de las rutas se indica en la Figura 67). Le sigue la **Ruta V-505**, que conecta Puerto Montt con la localidad de Alerce, camino que concentra un 29% de los accidentes de tránsito en el área urbana.

Tabla N°37. Número de accidentes según ruta y año, comuna de Puerto Montt

Nombre camino	Descripción	Número de accidentes					Total
		2010	2011	2012	2013	2014	
Ruta 5	Camino nacional	29	23	29	70	s/i	151
Ruta 7	Camino nacional	12	14	12	35	s/i	73
Ruta 226	Pto. Montt - El Tepual	11	4	10	52	s/i	77
V-505	Pto. Montt - Pto. Varas	19	18	21	83	s/i	141
V-615	Camino a las Colonias	6	1	0	2	s/i	9
V-625	Senda Central	2	1	0	1	s/i	4
V-629	Senda Sur	0	1	0	1	s/i	2
V-805	Pto. Montt - Calbuco	2	1	4	20	s/i	27
Total		81	63	76	264	s/i	484

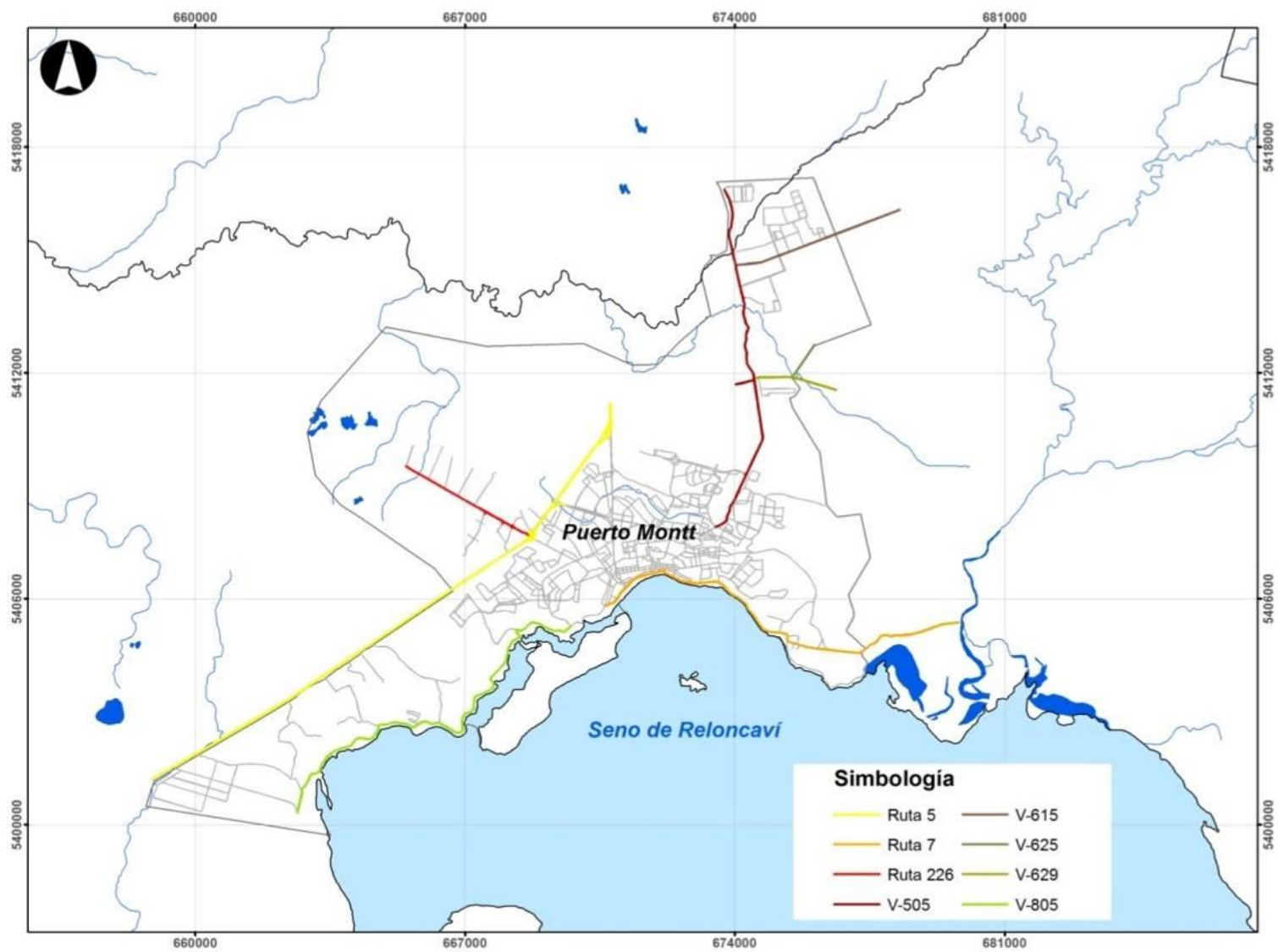
Fuente: Elaboración propia, según datos SECTRA, 2015.

Tabla N° 38. Causas de accidentes por rutas

Causa del accidente	Ruta 5	Ruta 7	Ruta 226	V-505	V-615	V-625	V-629	V-805
Alcohol en conductor	12	7	7	32	1	1	0	2
Alcohol en peatón	1	4	0	1	0	0	0	0
Alcohol en pasajero	0	0	2	0	0	0	0	0
Deficiencias viales	2	3	1	0	1	1	0	0
Desobediencia a señalización	4	0	3	4	0	0	0	1
Drogas y/o fatiga en conductor	5	1	3	1	0	0	0	0
Fallas mecánicas	3	1	0	2	0	0	0	1
Imprudencia del conductor	74	32	48	72	2	1	1	13
Imprudencia del peatón	19	6	6	13	0	0	1	3
Imprudencia del pasajero	0	0	0	1	0	0	0	1
Pérdida de control	18	5	4	3	1	1	0	6
Velocidad imprudente	3	6	0	2	2	0	0	0
Causas no determinadas	4	7	3	9	2	0	0	0
Otras causas	6	1	0	1	0	0	0	0
Total	151	73	77	141	9	4	2	27

Fuente: Elaboración propia, según datos SECTRA, 2015

Figura N°67. Caminos principales en área urbana de Puerto Montt



b) Incendios forestales

Este apartado muestra información de ocurrencia (número) y daño (superficie afectada) por incendios forestales⁷ en el periodo comprendido entre la temporada 2009-2010 a 2014-2015⁸. Los datos de la Tabla 38 muestran que la cantidad de incendios por temporada se ha incrementado sostenidamente en los últimos cinco años, convirtiendo a Puerto Montt en la comuna con mayor ocurrencia de incendios forestales en la Región de los Lagos.

Respecto de las causas, para la totalidad de los incendios registrados, un 47% corresponde a uso de fuego por transeúntes y un 33% a niños jugando con fuego.

Tabla N°39. Número de incendios por temporada, comuna de Puerto Montt.

Temporada	N° incendios
2009-2010	12
2010-2011	48
2011-2012	75
2012-2013	88
2013-2014	110
2014-2015	161
Total	494

Fuente: CONAF, 2015

En promedio, cada temporada se queman 356 hectáreas, afectando principalmente vegetación natural: i) 75% de matorral; ii) 21% de pastizal y iii) 4% de bosque. Específicamente, en la temporada 2014 - 2015, de acuerdo a la información proporcionada por CONAF (Tabla 40), el número de incendios ocurridos en la comuna de Puerto Montt fue de 161, afectando una superficie de 1.088 hectáreas.

Tabla N°40. Cobertura vegetal afectada por incendio según temporada.

Categoría	Cobertura vegetal	Superficie afectada según temporada					
		2009-2010	2010-2011	2011-2012	2012-2013	2013-2014	2014-2015
Plantaciones	Pino	0	0	0	0	0	0
	Eucalipto	0	1	0,3	0	0,01	8,2
Vegetación natural	Arbolado	0	0,6	5,65	1,45	5,57	218,4
	Matorral	2,75	22,74	332,39	68,06	441,68	787,23
	Pastizal	0,4	101,65	30,6	9,48	20,09	72,45
Otras superficies	Agrícola	0	0	0	0	0	0
	Desechos	0	0,4	0	0,99	0	1,43
Total		3,15	126,39	368,94	79,98	467,35	1087,71

Fuente: CONAF, 2015

⁷ Un incendio forestal corresponde a un fuego que se propaga sin control a través de vegetación rural o urbana y pone en peligro a las personas, los bienes y/o el medio ambiente (CONAF).

⁸Temporada comprende el periodo entre el 1° julio al 30 Junio del año siguiente.

En los meses de enero a marzo de 2015 las autoridades decretaron alertas por la ocurrencia de gran cantidad de incendios forestales en los límites de la ciudad, que afectaron áreas de matorral, pastizal y bosque. La propagación de los incendios se vio favorecida por las condiciones meteorológicas, situación que por momentos amenazó al sistema interconectado que abastece de electricidad a Puerto Montt y Chiloé, además de la cercanía con sectores habitados, como Alerce. A través de la figura 68, es posible observar el resultado de la acción del fuego sobre especies arbustivas como Espinillo o Chacai (*Ulex europaeus*).

Figura N°68. Paisaje resultado de la acción de incendios forestales en el sector de Alerce, principalmente la quema de *Ulex europaeus*.

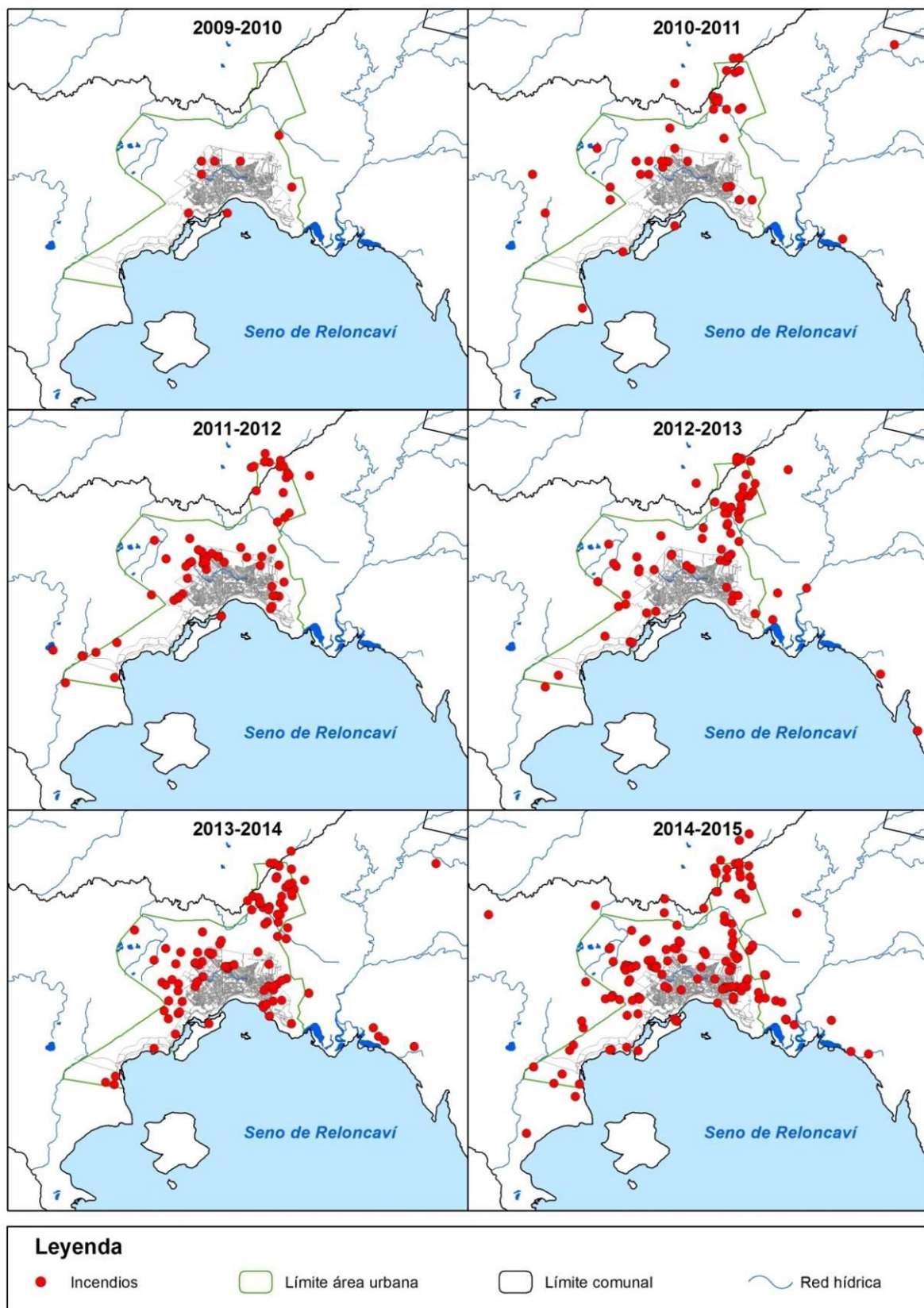


Fuente: Elaboración propia.

La Figura 69 ilustra la ocurrencia de incendios en Puerto Montt según temporadas. Se observa que hasta la temporada 2009-2010, los incendios estaban acotados al núcleo urbano central. Sin embargo, desde la temporada 2010-2011 paulatinamente se registraron incendios en toda la extensión del área urbana de la comuna. Destaca la ocurrencia de incendios en y hacia el sector de Alerce, así como la concentración sostenida durante las últimas dos temporadas en torno a los límites del núcleo urbano central.

En relación al consumo de leña como combustión dendroenergética y episodios de contaminación atmosférica. Uno de los principales problemas ambientales de Chile lo constituye la contaminación atmosférica. En la zona centro-sur del país, son comunes los episodios de mala calidad del aire, sobre todo en los meses fríos donde el uso de sistemas de calefacción, sumado a las fuentes de emisión industriales y de transporte provocan un aumento de la concentración de material particulado respirable (PM10). En este sentido, la ciudad de Puerto Montt ya cuenta, hace poco tiempo, con una estación de monitoreo de la calidad del aire, en el sector de Mirasol.

Figura N°69. Distribución espacial de incendios por temporada, periodo 2009-2015



A nivel nacional, el intensivo uso de la leña con altos contenidos de humedad (leña húmeda), sumado a la utilización de calefactores ineficientes de tecnología obsoleta y a la deficiente aislación térmica de viviendas, han contribuido a que las principales ciudades del centro-sur estén saturadas por material particulado respirable (PM10). Por tanto se deben intensificar los programas de recambio de calefactores y aumentar los subsidios de aislación de las viviendas.

Históricamente se ha observado a la leña desde un punto de vista negativo, pues evidentemente el mal uso es responsable de enormes gastos a nivel de salud. Pese a ello, si es utilizada en forma responsable, se transforma en un significativo aporte social y ambiental, ya que representa un combustible renovable, autóctono y sustentable si se produce a partir de planes de manejo forestal, generando además un fuerte aumento en fuentes de empleo que aportan a las dinámicas locales de las regiones, disminuyendo el grado de dependencia de éstas, respecto de otros combustibles.

c) Emergencias químicas

De acuerdo con información proporcionada por la SEREMI de Medio Ambiente de Los Lagos, durante el año 2014 se registraron dos emergencias químicas en la comuna de Puerto Montt, correspondiendo ambas a incendios en industrias.

La primera de estas emergencias consistió en un incendio que afectó las oficinas de la empresa **AquaGestión**, con peligro de propagación, en calle Panamericana Sur esquina Santa Inés (Figura 70). Por efecto del fuego no hubo propagación a viviendas aledañas; no obstante y producto de elementos químicos propios de su trabajo al interior de este laboratorio, tales como alcohol, algunos ácidos y sales, como así también reactivos y gas licuado de petróleo GLP, se habría producido una explosión que provocó daños a viviendas contiguas de mediana consideración. Cabe señalar que en este recinto no existía almacenamiento de sustancias peligrosas.

La segunda emergencia, también un incendio estructural industrial, afectó la bodega de empaque del recinto de la empresa **AquaChile**, sin peligro de propagación (Figura 71). Los materiales peligrosos que se encontraban en las bodegas adyacentes al fuego, no revistieron peligro ya que bomberos logró evitar la propagación.

Figura N°70. Incendio en Laboratorio AquaGestión (Febrero 2014)



Figura N°71. Incendio en sector de Planta AquaChile (Abril 2014)



Fuente: Portal www.soychile.cl/puerto-montt

Análisis de peligro

A) Análisis de peligrosidad por Incendios forestales

El modelo de susceptibilidad de incendios aplicado, indicó que un 40% del área de estudio (zona urbana) presenta un bajo nivel de peligrosidad, un 29% presenta un nivel medio y un 31% de la superficie del área de estudio presenta un alto nivel de peligrosidad (Figura 72).

El peligro medio y alto se concentró en los sectores Norte (localidades de Alerce, ruta 5 sur, camino al Tepual) y Suroeste (camino a Chiloé), Sureste (Camino A Pelluco).

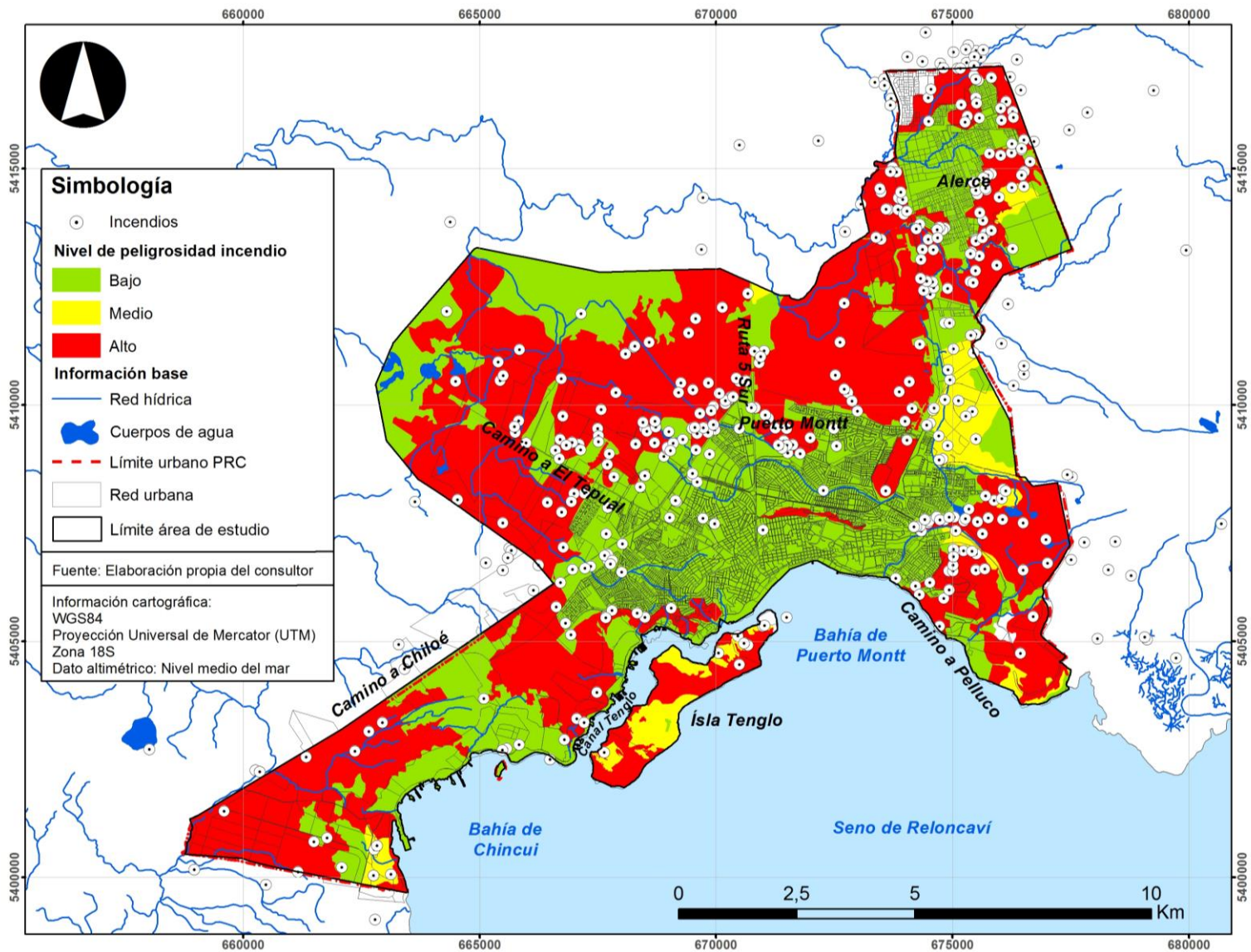
Respecto de la vegetación, los sectores con peligro alto se caracterizan por la presencia de praderas o zonas agrícolas (forraje) y matorral denso, con especies como Quila (*Chusquea quila*) y Espinillo o Chacai (*Ulex europaeus*). En tanto, en los sectores de la comuna que presentan un nivel de peligro medio predominan praderas y matorrales abiertos y semidensos, con especies como Chaura (*Gaultheria mucronata*), Calafate (*Berberis microphylla*), Canelo (*Drimys winteri*) y Avellano (*Gevuina avellana*).

Por ejemplo, en el núcleo urbano central de la comuna (área con bajo nivel de peligrosidad) el peligro se localiza en los taludes de las terrazas, donde la presencia de vegetación es abundante con especies como Coihue (*Nothofagus dombeyi*), Canelo (*Drimys winteri*), Ulmo (*Eucryphia cordifolia*) y Avellano (*Gevuina avellana*).

La presencia de estas asociaciones vegetacionales y especies es un factor que incide en que los sectores de la comuna ya citados se caractericen por la susceptibilidad de incendios. Además, si las categorías vegetacionales antes descritas se localizan en suelos con pendientes mayores a 30° o 45°, el nivel de peligrosidad se incrementa.

Al cotejar el modelo de peligrosidad con los puntos de recurrencia histórica de incendios (Figura 72) se observa una respuesta adecuada del modelo obtenido, donde los puntos históricos concuerdan con las zonas de mediana y alta peligrosidad. A través de la figura ello se evidencia en el sector comprendido entre Puerto Montt y El Tepual, donde los incendios coinciden con las áreas caracterizadas por un nivel de peligrosidad medio o alto. Lo mismo ocurre si se coteja el modelo tomando como referencia el sector de Alerce: hay concordancia entre puntos de incendios y nivel de peligrosidad.

Figura N°72. Peligro y Validación del modelo de peligrosidad por Incendios forestales.



1.2 Análisis de vulnerabilidad y exposición

a) Caracterización de la vulnerabilidad del medio construido

La materialidad de la pared en las vivienda (según el Censo 2002) (Figura 73), muestra que en general el área presenta viviendas de alta vulnerabilidad (2886 ha), correspondientes a material de abobe y madera. Ambos, se reconocen frágiles ante eventos de remociones en masa, inundaciones por tsunami y por cursos hídricos superficiales. Este tipo de viviendas, ha sido reconocido por su fragilidad ante la velocidad del flujo en fenómenos hídricos (Rojas, 2010; Rojas, 2015); sin embargo el tipo de construcción es propio de la zona sur de Chile.

En el nivel bajo de vulnerabilidad por materialidad predominante en cada manzana, se encuentra en algunos sectores céntricos. Aquí, las viviendas se caracterizan por estar construidas con hormigón armado y acero. En general corresponden a viviendas de reciente construcción.

La evaluación de la componente materialidad del techo predominante por manzana (Figura 74), para el peligro volcánico, indica que las viviendas presentan un nivel medio de vulnerabilidad (2957 ha) representada por techumbre de zinc o pizarreño. Escasas unidades de análisis presentan una alta vulnerabilidad, con materialidades de fibra, fonolita, paja o desechos. El nivel bajo de vulnerabilidad por techumbre, solamente correspondió a 219 ha, sectores que se corresponden con los analizados en la materialidad de la pared.

La Tabla 41, presenta un resumen de las componentes anteriormente descritas con su respectiva superficie en ha.

Tabla N°41. Resumen de la caracterización de la vulnerabilidad del medio construido, según variables relevantes ha.

Componente	Bajo	Medio	Alto
Materialidad del Techo	219	2957	6800 m2
Materialidad de la vivienda (Pared)	223	0	2886

Figura N°73. Vulnerabilidad por materialidad de la vivienda

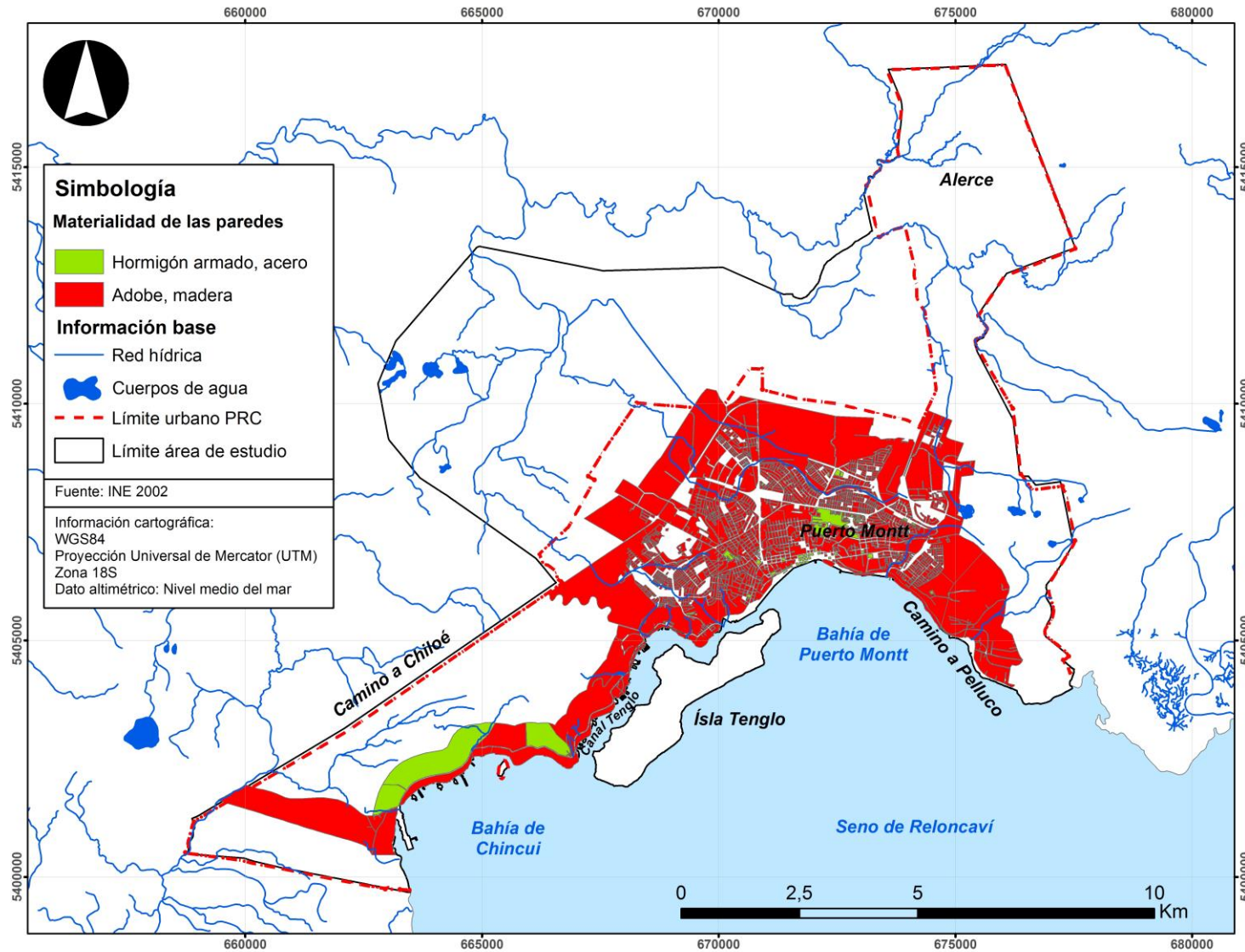
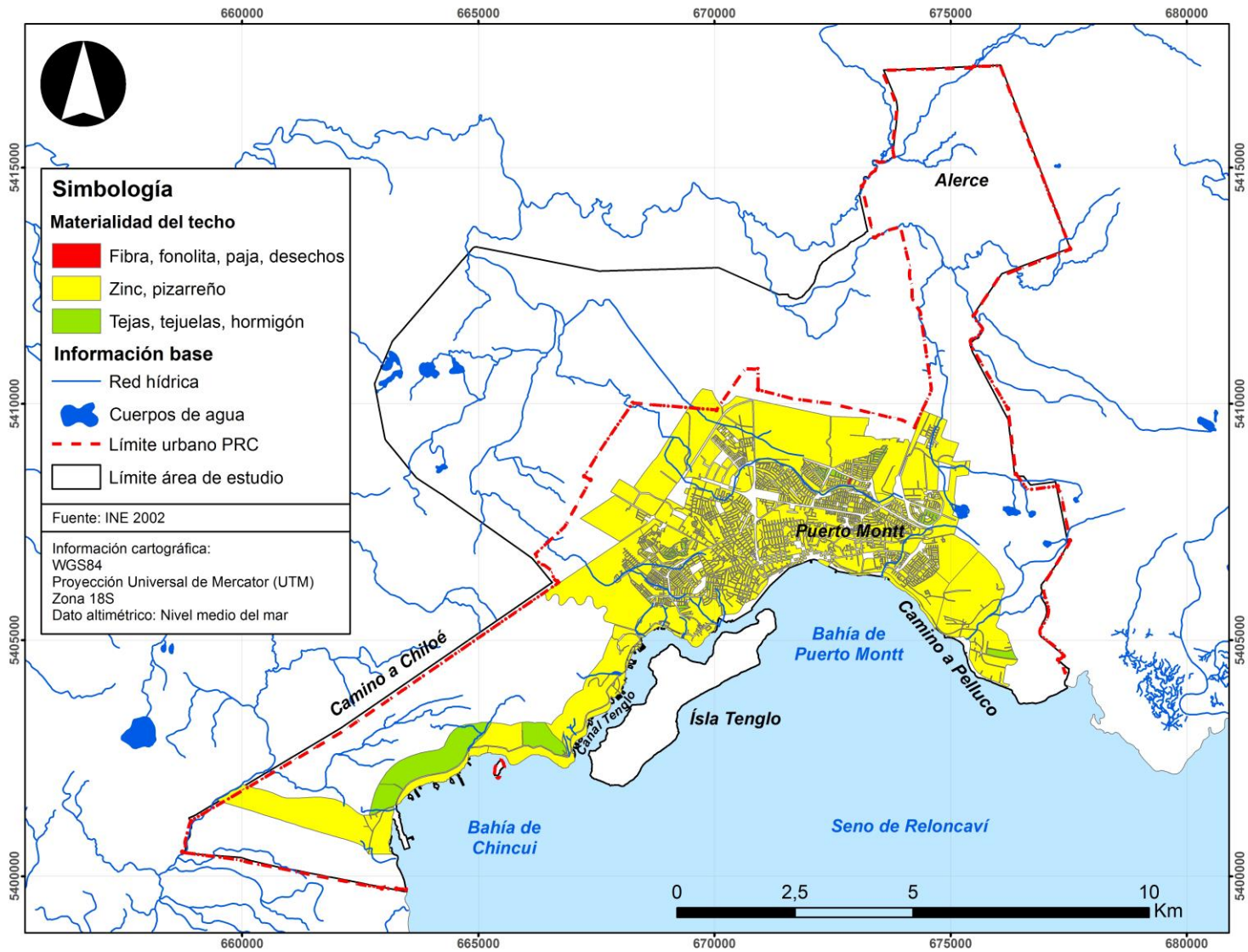


Figura N°74. Vulnerabilidad por materialidad del Techo



b) Análisis de la vulnerabilidad

La caracterización de elementos funcionales de la variable salud, muestra que en el área urbana de Puerto Montt existen 30 establecimientos del sistema público y privado. De ellos 14 corresponden a consultorios, los que presentan una baja vulnerabilidad. 12 establecimientos fueron clasificados como Hospital Tipo IV; mientras que 1 y 3 establecimientos correspondieron a centros Hospitalarios categorizados como Tipo III y I respectivamente. El nivel máximo de vulnerabilidad corresponde a los centros Tipo I. La distribución espacial de estos elementos, corresponde de forma preferente al casco urbano de la ciudad de Puerto Montt. Cabe señalar, que de esta infraestructura 2 y 3 establecimientos se encuentran en áreas de peligro por tsunami medio y bajo respectivamente.

La variable sistema de educación, muestra la presencia de 142 establecimientos educacionales públicos y privados con diferentes niveles de matrícula. La vulnerabilidad más baja, representada por aquellos establecimientos con matrícula inferior a 100 estudiantes, corresponde a 34 establecimientos. Sobre ese umbral se encuentran 25, 30 y 32 establecimientos, con una matrícula máxima de 250, 500 y 999 respectivamente. 21 establecimientos educacionales, presentan una matrícula superior o igual a 1000 estudiantes. Espacialmente se distribuyen de forma más homogénea por el territorio. 11 establecimientos se emplazan en zonas de peligro de Tsunami; en zonas definidas por peligro alto (2), medio (2) y bajo (7).

La Tabla 41, muestra el número de población expuesta por tipo/nivel de cada peligro analizado; en general se observa que la mayor parte de los habitantes están expuestos al peligro de remociones y anegamientos. Para el peligro de Tsunami 4086 personas se encuentran expuestas, de ellas 1833 se localizan en zonas de alta peligrosidad. El panorama de la exposición por Vivienda Tabla 42 muestra una situación similar.

Tabla N°42. Población expuesta por tipo de peligro

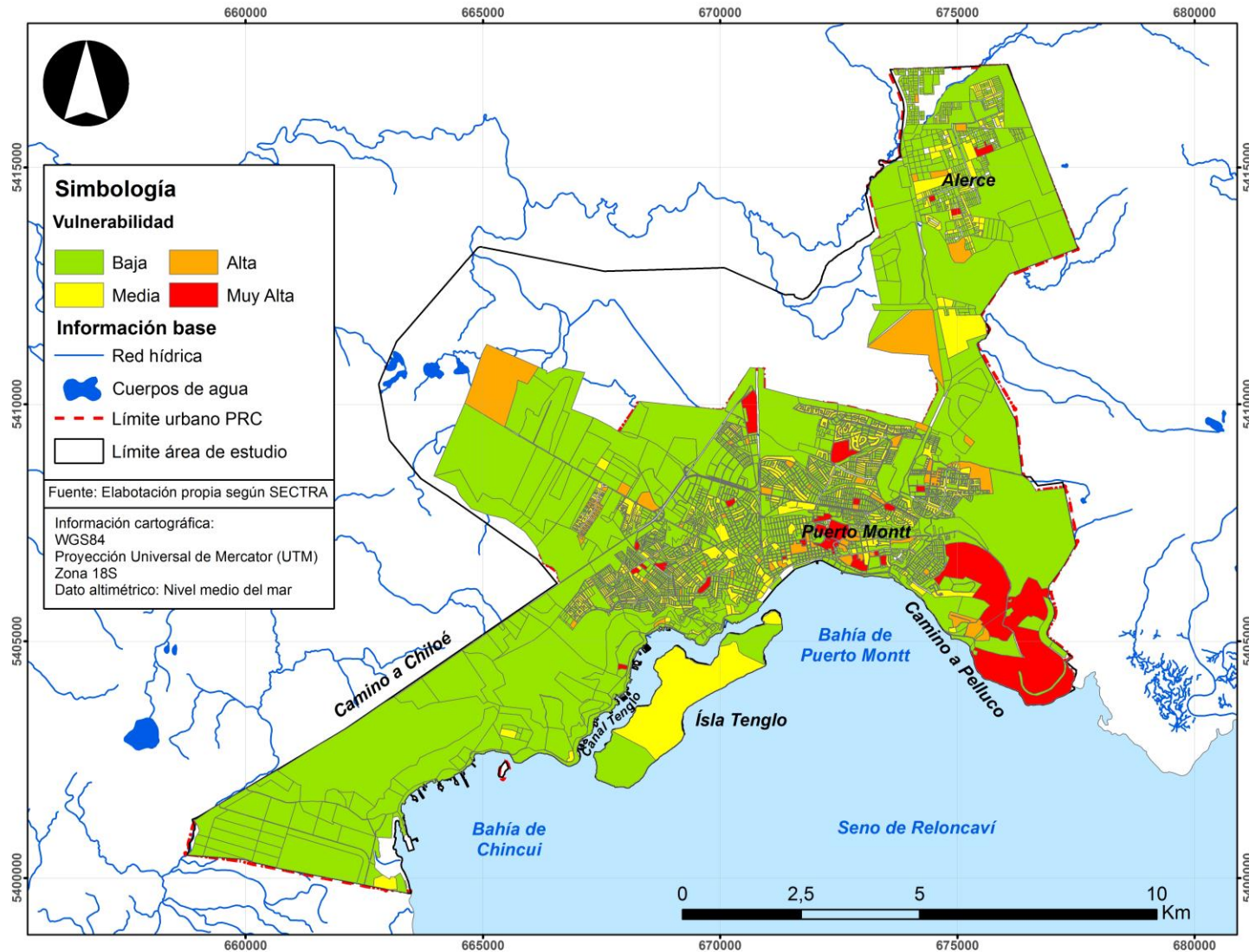
Peligro/nivel	Bajo	Medio	Alto	Total
Incendio	23402	279	2055	25736
Tsunami	1833	1707	546	4086
Remociones	33393	125547	7016	165956
Anegamientos	7449	65271	11663	84383

Tabla N°43. Vivienda expuesta por tipo de peligro

Peligro/nivel	Bajo	Medio	Alto	Total
Incendio	7800	93	685	8579
Tsunami	611	569	182	1362
Remociones	41849	572	2338	55317
Anegamientos	2483	21757	3887	28127

Los niveles de vulnerabilidad finales (exposición + elementos funcionales) (Figura 75), indican que 7815 ha presentan una baja vulnerabilidad, principalmente en sectores alejados de los núcleos urbanos más importantes. Los niveles medios y altos corresponden a 843 y 428 ha respectivamente. Finalmente, el nivel muy alto de vulnerabilidad, es equivalente a 505 ha, estas manzanas poseen al menos un elemento funcional en alto grado de vulnerabilidad y presentan elevados niveles de habitantes y viviendas por manzana; se localizan de forma preferente en los núcleos urbanos de Puerto Montt y Alerce.

Figura N°75. Carta de síntesis de Vulnerabilidad



1.3 Análisis de riesgo

El modelo de riesgo propuesto, considera la interacción de los factores amenaza*vulnerabilidad. Al respecto, la mayor superficie expuesta a riesgo corresponde al peligro de remociones con el 9589 ha (Tabla 44) de la zona con algún grado de riesgo. Espacialmente (Figura 78), el nivel bajo agrupa al aproximadamente al 79% del área, son sectores principalmente rurales. Los niveles medios y altos de riesgo corresponden a la zona urbana de Puerto Montt, se ubican principalmente en laderas y en las zonas próximas a ellas.

En segundo nivel le sigue el riesgo de Incendio, que abarca 7923 ha. En el destaca el riesgo alto en 4260 ha, estas áreas corresponden principalmente a sectores que rodean el casco urbano de Puerto Montt (Figura 79) y a las zonas aledañas de la localidad de Alerce; sin embargo, al interior de la ciudad también es posible localizar algunos sectores en riesgo alto, principalmente en los taludes de terrazas y zonas quebradas, las que se presentan vegetadas y con viviendas de madera. El riesgo bajo y medio se encuentra mayoritariamente en el núcleo urbano de Puerto Montt.

El riesgo de Anegamiento (Figura 77), corresponde al tercero en superficie (7748 Km²). El nivel bajo, destaca al ocupar 4890 Km², principalmente en sectores altos de la ciudad y zonas con baja densidad de población por manzana. El riesgo medio y alto, corresponde a una superficie menor, no obstante, son zonas con mayor densidad de población con actividades comerciales importantes, como los sectores de Angelmó y sector centro de la ciudad. Otras zonas, se emplazan en conjuntos habitacionales de reciente construcción hacia el N del sector céntrico de la ciudad.

Finalmente, el riesgo de Tsunami (Figura 76) representa la menor extensión en el área (285 ha). Las superficies se distribuyen de forma más homogénea entre las diferentes categorías. Sin embargo, es importante, ya que considerando un posible Tsunami por deformaciones cosísmicas, las zonas afectadas pueden llegar hasta la cota de altitud 8 (MSNM), área donde se emplazan actividades comerciales, industriales, portuarias y de gobierno.

Tabla N°44. Superficie de Riesgo para los diferentes peligros en ha

Riesgo/Nivel	Bajo	Medio	Alto	Total
Tsunami	74	153	58	285
Remociones	7536	1126	927	9589
Incendio	1591	2066	4266	7923
Anegamiento	4897	2482	369	7748

Figura N°76. Carta de Riesgo por Tsunami

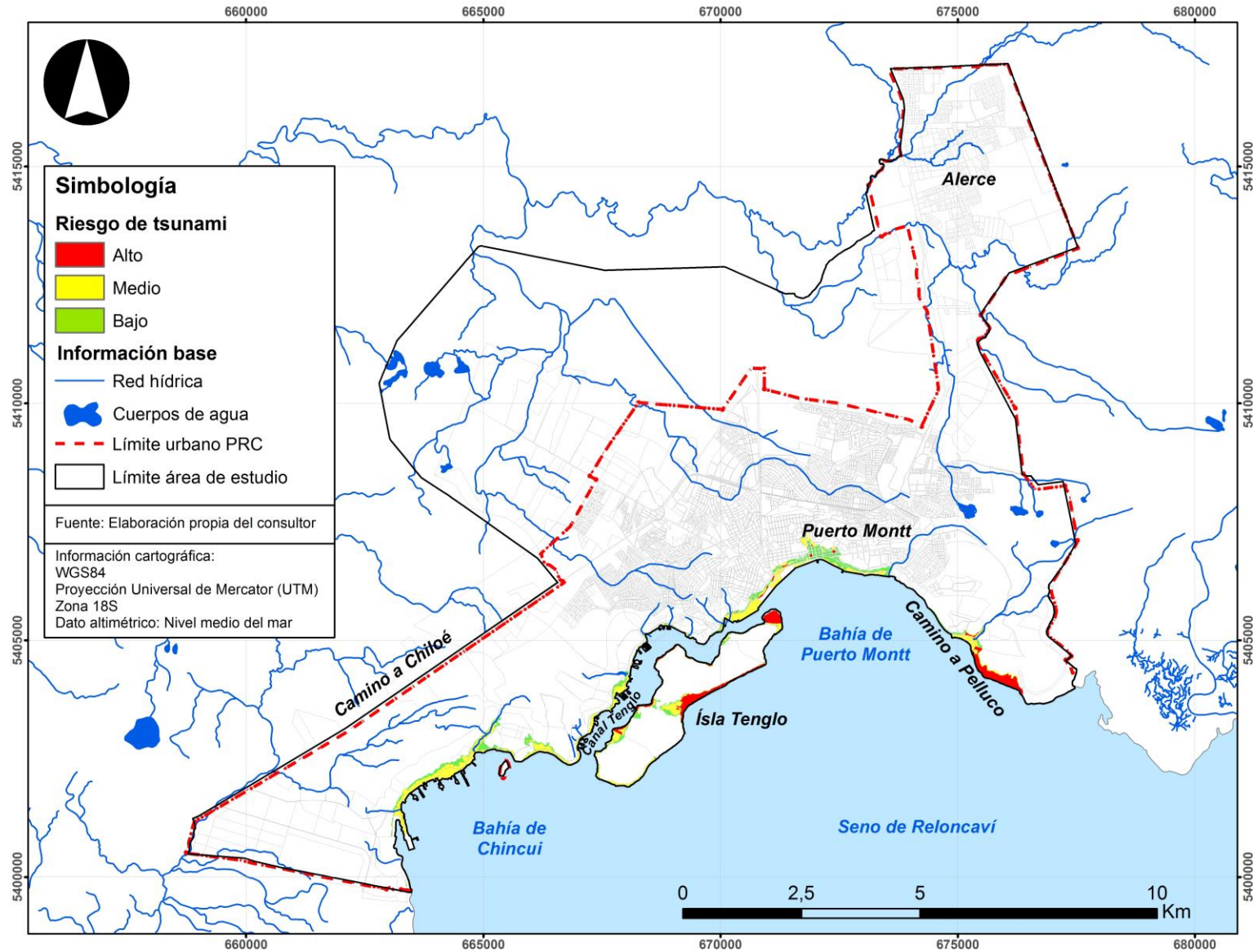


Figura N°77. Carta de Riesgo por Anegamiento

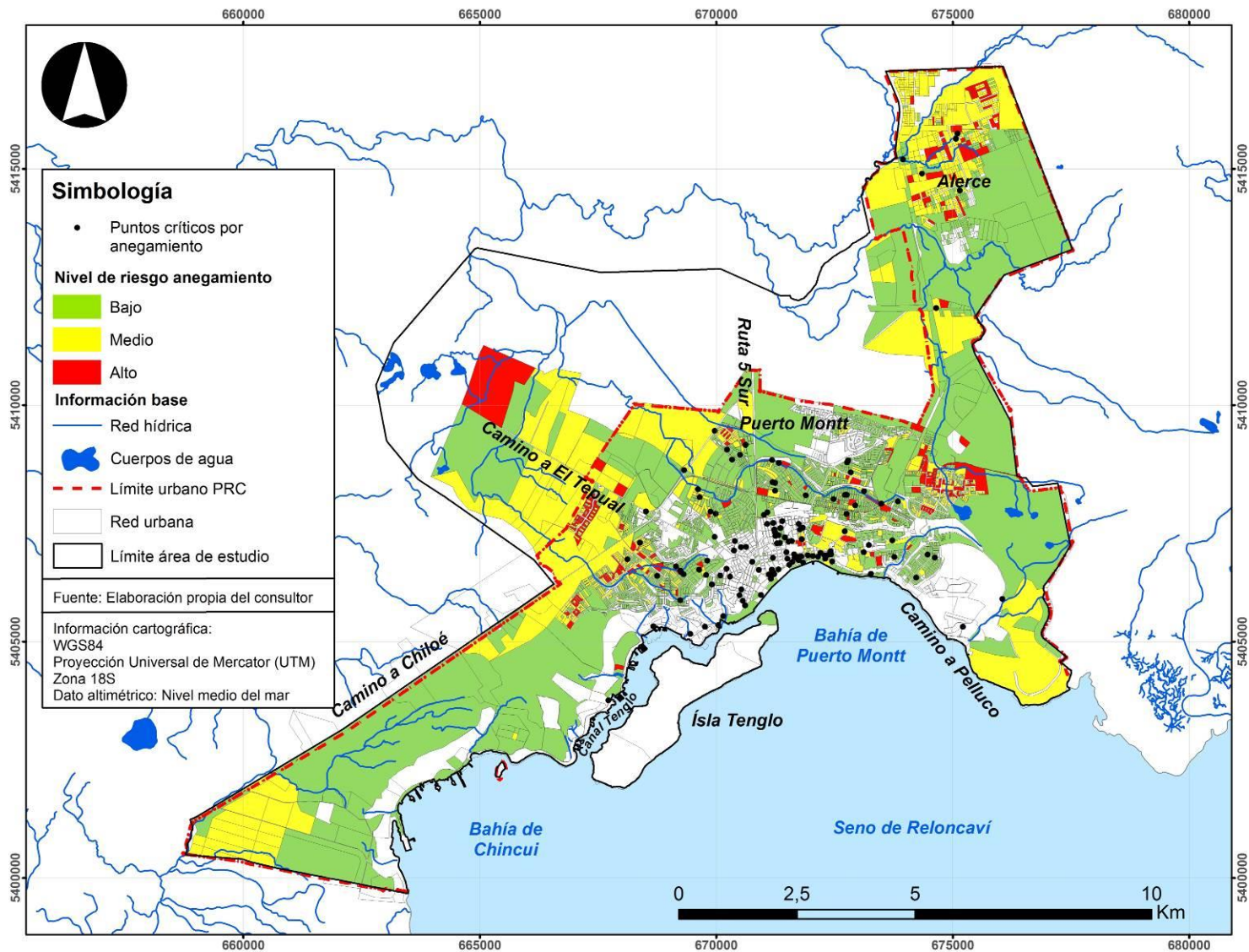


Figura N°78. Carta de Riesgo por Remociones

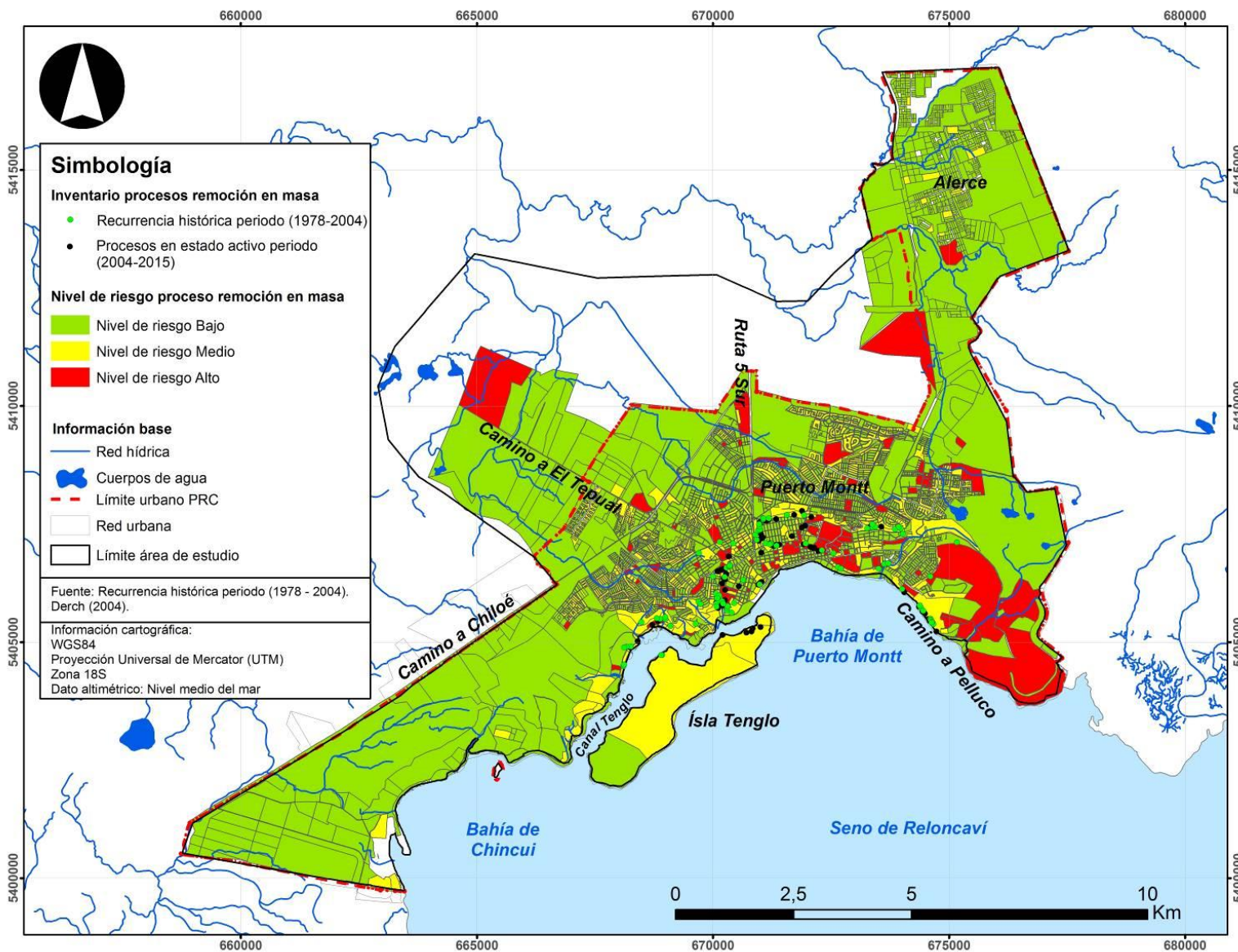
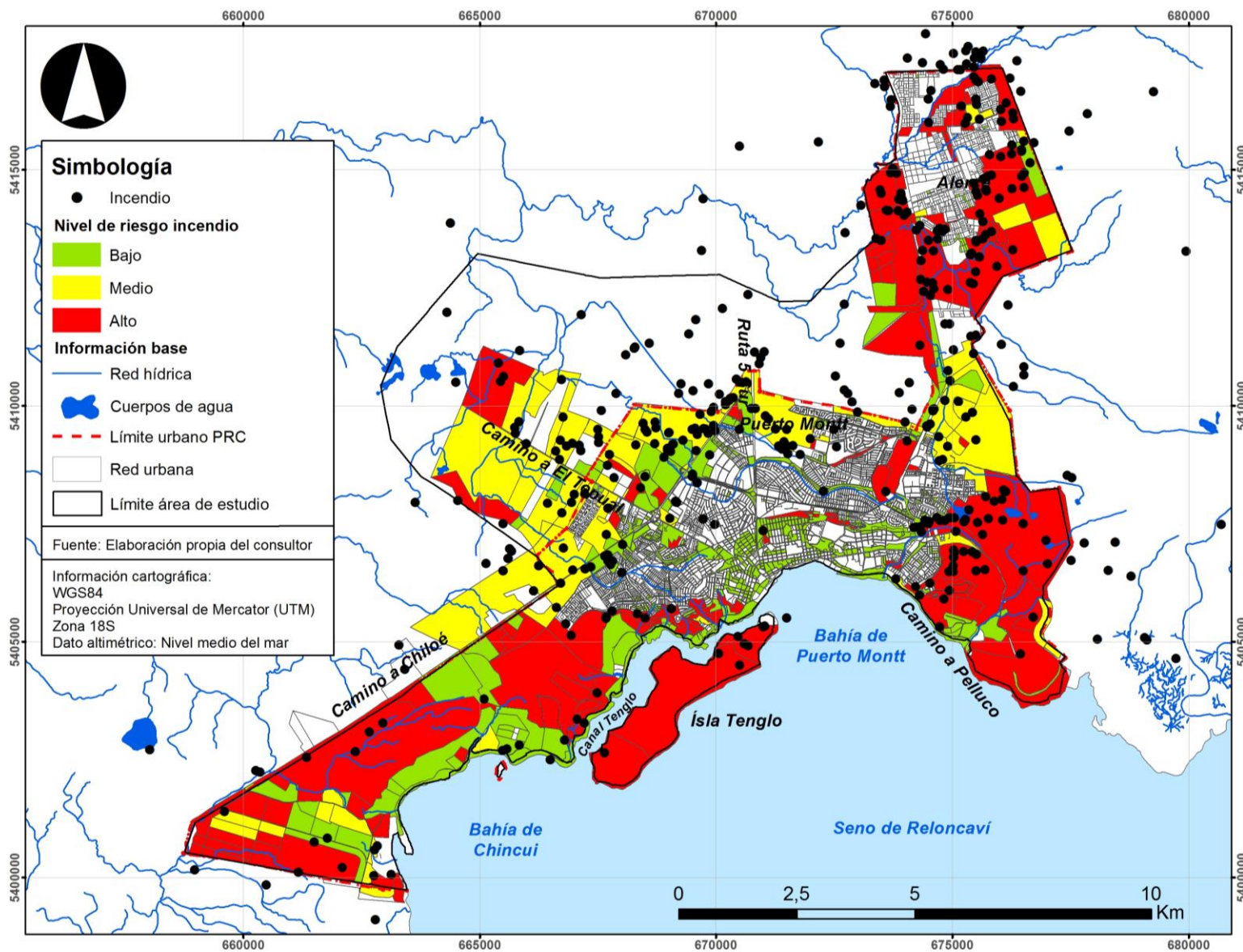


Figura N°79. Carta de Riesgo por Incendio



2. Protección ambiental

2.1 Áreas o elementos naturales reconocidos por el ordenamiento jurídico vigente.

De acuerdo al Plan Regulador Comunal (PRC) vigente, las zonas y/o elementos naturales que potencialmente constituyen el patrimonio ambiental del área urbana de Puerto Montt son aquellos relacionados con el Sistema de Áreas Verdes y Espacios Públicos. Sin embargo, la escasa planificación y el gran número de loteos que sitúan a las áreas verdes en una constelación de espacios residuales impiden la conformación de áreas verdes que ejerzan una influencia real en el área urbana.

La propuesta del PRC rescata los hitos y accidentes naturales presentes en la ciudad tales como el borde costero, las laderas, cauces naturales y bosques. Estos elementos de gran valor natural y paisajístico pueden ser incorporados como espacios verdes y de valor natural. Así por ejemplo, las laderas son una zona que puede ser potenciada a través de recorridos y miradores. Por su parte, el borde costero a su vez representa el espacio que es propio de toda la ciudad y debiera pasar a ser el espacio público de mayor jerarquía dentro del sistema. Los elementos naturales que conforman el actual sistema de espacios públicos son (Figura 80):

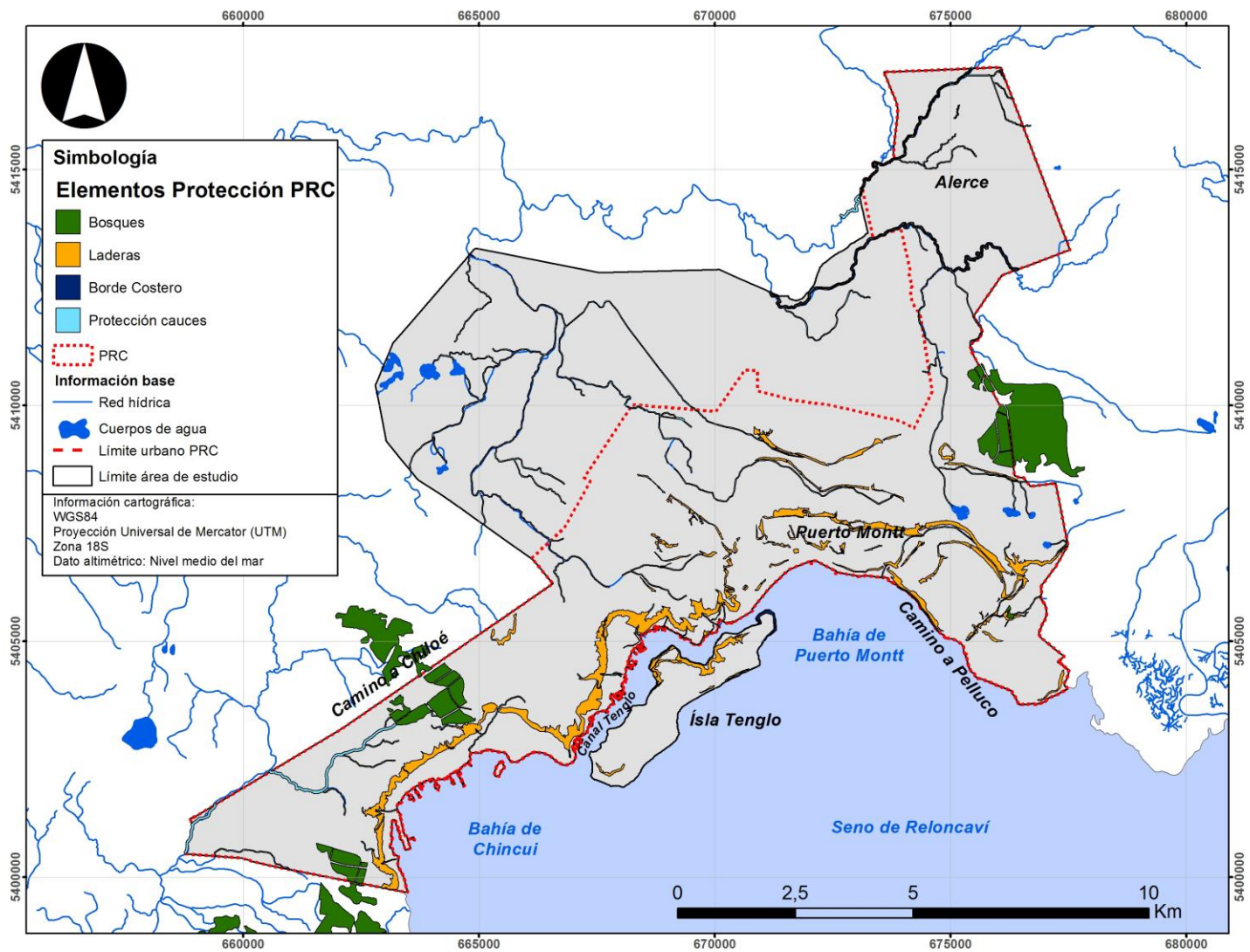
Borde costero. La zonificación propuesta para el borde costero pretende darle la mayor continuidad posible a su utilización recreativa, marginando las actividades productivas al límite poniente.

Laderas. Estas áreas cubren una superficie de 439,9 ha y tienen un alto potencial para ser utilizadas como zonas peatonales implementando escaleras y ascensores que permitan conectar transversalmente las terrazas. Su continuidad longitudinal se puede dar a través de recorridos peatonales y ciclovías conectando un sistema de miradores. En el caso de los proyectos inmobiliarios a desarrollarse en las zonas de consolidación y extensión urbana se les exigirá dejar el borde ladera como circulación y área verde impidiendo la aparición de fondos de sitio sobre las laderas.

Cauces naturales. La definición de los cauces naturales y restricción de sus zonas adyacentes permite incorporarlos al sistema de áreas verdes. Estas áreas cubren una superficie de 271,8 ha, y cobran especial importancia como elementos estructurantes de la conectividad norte – sur en la ciudad. Como por ejemplo el estero Chiquihue, estero Pichipelluco y estero Pelluco.

Bosques. La ampliación del límite urbano incorpora a la ciudad sectores de bosque nativo que se espera mantener mediante la propuesta de una normativa especial para complementar su coexistencia con el desarrollo urbano. Estos bosques se encuentran catastrados por CONAF y definirán el carácter de sus zonas urbanas adyacentes.

Figura N°80. Los elementos naturales del actual sistema de espacios públicos.



2.2 Áreas de Valor Ambiental basado en la valoración de Servicios Ecosistémicos.

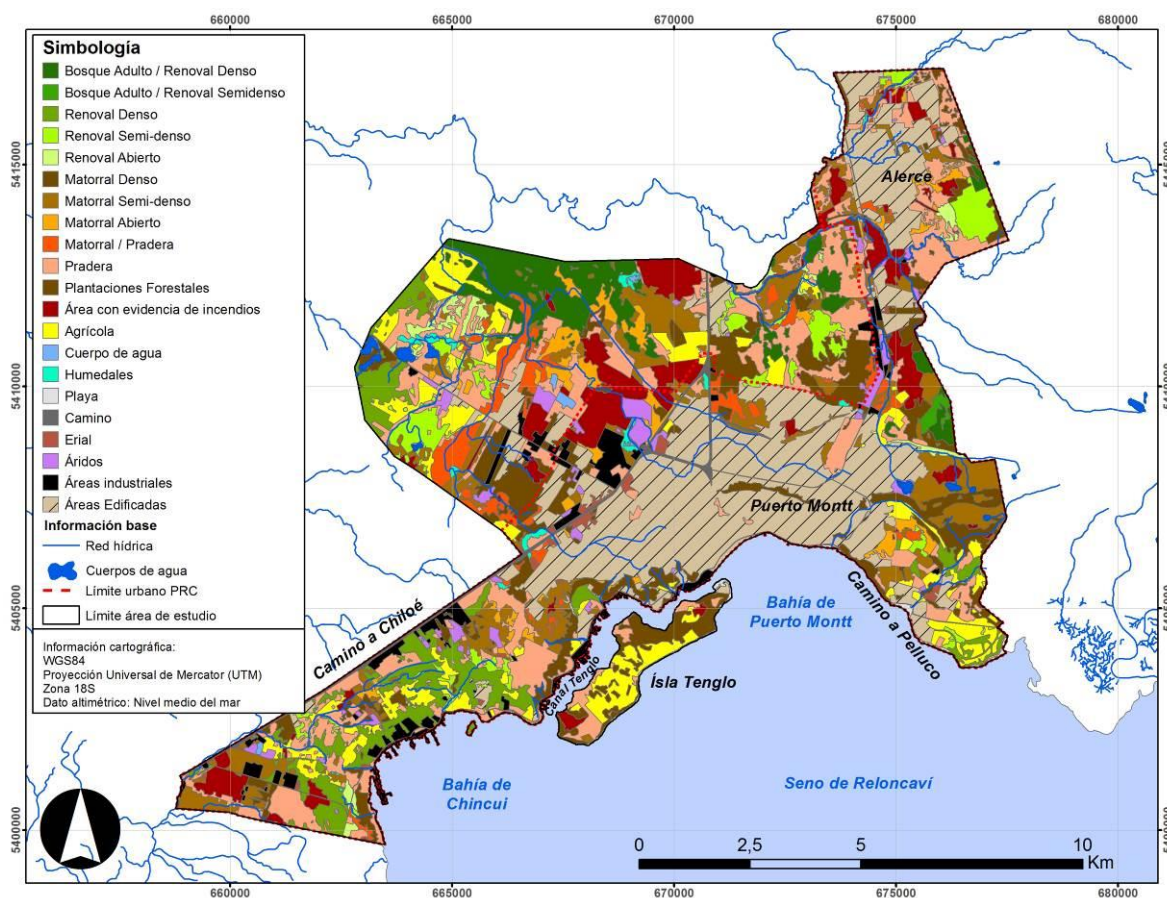
2.2.1 Identificación de Unidades Homogéneas para la valoración de Servicios Ecosistémicos

La definición de Unidades Homogéneas deriva de un tipo de modelo de planificación física que considera el desarrollo metodológico de procedimientos integrados (Gómez-Orea 1999). Las Unidades Homogéneas pueden determinarse en forma simplificada, como resultado de un estudio zonificado de variables concretas, como por ejemplo unidades edafológicas, hidrográficas, vegetacionales, cobertura del suelo. En nuestro caso, las Unidades Homogéneas sobre las cuales se realizó valoración de los Servicios Ecosistémicos, corresponden a un análisis combinado de coberturas de suelo y estructura vegetal. Esta información fue levantada a partir de la interpretación de una imagen satelital obtenida por el sensor SPOT 7, con fecha de 2 de mayo de 2015, y resolución espacial de 1,5 metros en el canal pancromático y 6 metros en los canales multispectrales (Azul, Verde, Rojo e Infrarrojo Cercano). En la Tabla 45 se presenta las superficies de cada coberturas de suelo usadas como unidades homogénea de análisis (UH), y la Figura 81 muestra su distribución espacial en el área de estudio. Las coberturas de suelo predominantes en el área muestran que zonas edificadas e industriales son las coberturas que presentan mayor superficie (26,3 %), seguido por el matorral (23 %), praderas (17,7 %) y bosque nativo, incluido el renoval (14,9%).

Tabla N°45. Coberturas de suelo usadas para la valoración de Servicios Ecosistémicos

Cobertura de suelo	Superficie (ha)	Porcentaje (%)
Agrícola	891,76	6,7
Áridos	240,31	1,8
Bosque Adulto/Renoval Denso	662,59	5,0
Bosque Adulto/Renoval Semi-denso	27,52	0,2
Camino	165,78	1,2
Cuerpos de agua	96,07	0,7
Áreas Edificadas	3105,99	23,3
Erial	71,55	0,5
Humedales	69,46	0,5
Área con evidencia de incendios	803,26	6,0
Áreas Industriales	395,31	3,0
Matorral Abierto	343,07	2,6
Matorral Denso	1508,70	11,3
Matorral Semi-denso	1217,83	9,1
Plantaciones Forestales	28,56	0,2
Playa	51,40	0,4
Pradera	1964,07	14,7
Matorral/Pradera	397,42	3,0
Renoval Abierto	142,71	1,1
Renoval Denso	715,99	5,4
Renoval Semi-denso	431,50	3,2
Total	13330,85	100,0

Figura N°81. Distribución geográfica de las coberturas de suelo usadas para la valoración de Servicios Ecosistémicos.



2.2.2 Identificación y descripción de Servicios Ecosistémicos

Basado en la definición y clasificación de Servicios Ecosistémicos propuestos por *Millenium Ecosystem Assessment* (MEA, 2005), Haines-Young y Potschin (2013), y Esse et al., (2014), se identificaron y describieron los Servicios Ecosistémicos que fueron valorados para cada Unidad Homogénea (cobertura de suelo). La definición y caracterización de los Servicios Ecosistémicos, permitió identificar un total de once servicios (Tabla 46).

Tabla N°46. Descripción de Servicios Ecosistémicos seleccionados (basado Esse et al. 2014)

Nº	Servicio Ecosistémicos	Descripción
1	Provisión de plantas y animales, terrestres y acuáticos	Incluyen las especies nativas y domesticadas utilizadas para nutrición humana (<i>e.g.</i> : Ganado, cultivos, peces, hierbas, hongos).
2	Provisión de agua para agricultura, consumo humano, subsistencia y usos industriales	Incluye toda el agua que se extrae de ríos y napas subterráneas para los distintos usos (<i>e.g.</i> : consumo doméstico, para ganado, pisciculturas, plantas de tratamiento, riego).
3	Provisión de materiales bióticos estructurales y energéticos	Incluyen todos aquellos materiales para las construcciones domésticas, ornamentos y obtención de material combustible (<i>e.g.</i> : madera y leña).
4	Bioremediación, dilución, filtración, y degradación de contaminantes	Incluye la capacidad del ambiente biofísico para la regulación de agentes contaminantes y nocivos, en especial la regulación en la calidad del agua (<i>e.g.</i> : Fitodegradación, fitoabsorción, dilución-degradación de sustancias en cuerpos de agua).
5	Regulación de flujos hídricos	Involucra la atenuación de crecidas en los flujos hídricos, el control de avenidas o incrementos repentinos de la escorrentía superficial (<i>e.g.</i> : servicios provistos por humedales, franjas ribereñas, coberturas de bosque nativo).
6	Regulación de la erosión	Incluye los componentes bióticos y abióticos del ecosistema que controlan los procesos erosivos del suelo y los deslizamientos en masa (coberturas de bosque nativo, humedales).
7	Regulación climática	Incluyen los componentes bióticos, especialmente la vegetación que permite el control del clima local o regional a través del secuestro de carbono (<i>e.g.</i> : Vegetación nativa, humedales, vegas).
8	Regulación del ambiente biótico	Abarca la mantención de los ciclos biológicos vitales (<i>e.g.</i> : polinización), del hábitat (integridad biótica a través de refugios para especies), del pool genético de especies (<i>e.g.</i> : dispersión de semillas) y el control de especies exóticas (<i>e.g.</i> : mecanismos de control biológicos).
9	Recreación y ecoturismo	Se relaciona con la experiencia física y psicológica del uso de los ecosistemas en actividades no extractivas (<i>e.g.</i> : senderismo, nado, observación de fauna, fotografía).
10	Representación estéticas, espirituales y de no uso.	Incluyen todas las representaciones intelectuales y significados que el ser humano asigna a los ecosistemas (<i>e.g.</i> : simbolismos, cosmovisión, lugares o especies sagradas, sentido de identidad/pertenencia a un lugar, herencia cultural, valores de existencia de las especies silvestres).
11	Información y conocimiento	Información y conocimiento Constituye el acervo histórico, científico y educacional de un determinado grupo humano y asociado a un espacio geográfico (<i>e.g.</i> : investigación científica, registro de acontecimientos históricos, establecimientos educacionales).

2.2.3 Valoración de las áreas homogéneas según SE

Para la valoración de los Servicios Ecosistémicos identificados se simplificó el protocolo ECOSER (Laterra et al., 2012) que corresponde a un esquema de procedimientos para evaluación no monetaria y mapeo de SE aplicable a un amplio rango de escalas espaciales y calidad de información. Entre las características distintiva del procedimiento se destacan la estimación indirecta de la provisión relativa de SE a través del flujo de las funciones que los soportan en cada tipo de ecosistema, que en nuestro caso corresponde a las coberturas de suelo. El marco de aplicación de este protocolo puede consistir en una cuenca, un paisaje o una porción arbitraria del territorio en la que se reconocen elementos del paisaje (e.g., parches, corredores, matrices) relativamente homogéneos (Laterra et al., 2012). Como parte del protocolo ECOSER, se han realizado las siguientes actividades: a) delimitación de áreas de interés, b) definición de Unidades Homogéneas, c) identificación de Servicios Ecosistémicos y d) valoración de Servicios Ecosistémicos.

En el área de estudio, se identificaron 23 Unidades Homogéneas (Tabla 45), que han sido consideradas como base para la valoración no monetaria de Servicios Ecosistémicos. Es importante destacar la inclusión de las categorías de cauces naturales y laderas definidas como parte de los elementos naturales que conforman el actual sistema de espacios públicos son según el Plan Regulador Comunal.

En una matriz de doble entrada, en donde las filas corresponden a las Unidades Homogéneas y las columnas a los Servicios Ecosistémicos, se valoró cada servicio en función de la provisión que cada unidad homogénea proporciona del mismo (Tabla 46). Para tales efectos, se usó una escala ordinal en donde: 0: corresponde a una nula provisión del Servicio Ecosistémico,

- 1: corresponde a una baja provisión del Servicio Ecosistémico,
- 2: corresponde a una provisión media del Servicio Ecosistémico,
- 3: corresponde a una alta provisión del Servicio Ecosistémico,

Según la valoración, las Unidades Homogéneas que presentan la máxima valor, es decir, la que proporcionan mayores y mejores Servicios Ecosistémicos corresponden al bosque nativo, incluido el renoval denso y semi-denso, laderas, los humedales, cauces naturales y los cuerpos de agua. En un lugar intermedio están los matorrales, playas y plantaciones forestales. En este sentido, se propone que las áreas que presentan valoraciones altas sean consideradas como áreas de valor natural en el marco de los instrumentos de planificación territorial, en especial en el Plan Regular Comunal, para promover su protección y/o uso ambientalmente sustentable. Las Figuras 82 y 83 muestran la distribución geográfica de las Unidades Homogéneas valoradas.

Tabla N°47. Matriz de valoración de Servicios Ecosistémicos según Unidades Homogéneas

	Provisión de plantas y animales, terrestres y acuáticos	Provisión de agua para agricultura, consumo humano, subsistencia y usos industriales	Provisión de materiales bióticos estructurales y energéticos	Bioremediación, dilución, filtración, y degradación de contaminantes	Regulación de flujos hídricos	Regulación de la erosión	Regulación climática	Regulación del ambiente biótico	Recreación y ecoturismo	Representación estéticas, espirituales y de no uso.	Información y conocimiento	Valoración cuantitativa	Valoración Cualitativa
Bosque Adulto/Renovoal Denso	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	32	Alto
Bosque Adulto/Renovoal Semidenso	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3	3	32	Alto
Renovoal Denso	3	3	3	2	2	3	3	3	3	3	3	31	Alto
Renovoal Semi-denso	3	3	3	2	2	2	3	3	3	3	3	30	Alto
Laderas	3	2	2	2	3	3	1	3	3	3	2	27	Alto
Humedal	2	3	1	3	3	0	3	3	3	3	3	27	Alto
Cuerpos de agua	1	3	0	1	3	0	2	3	3	3	3	22	Alto
Cauces Naturales	1	3	0	1	3	0	2	3	3	3	3	22	Alto
Matorral Denso	2	2	2	1	2	3	2	2	2	1	0	19	Medio
Renovoal Abierto	2	2	2	1	2	2	2	2	2	1	0	18	Medio
Playas	3	0	0	1	2	0	0	3	3	3	2	17	Medio
Matorral Semi-denso	2	1	2	1	2	2	2	2	1	1	0	16	Medio
Plantaciones Forestales	2	1	3	1	2	2	2	1	1	1	0	16	Medio
Matorral Abierto	2	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	9	Bajo
Matorral/Pradera	2	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	9	Bajo
Agrícola	3	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	8	Bajo
Praderas	3	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	8	Bajo
Áreas con evidencia de Incendios	1	0	2	0	1	1	0	0	0	0	0	5	Bajo
Áridos	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	3	Bajo
Camino	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Nulo
Áreas Edificadas	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Nulo
Erial	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Nulo
Áreas Industriales	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Nulo

Figura N°82. Mapa de valoración cuantitativa de Servicios Ecosistémicos según cobertura de suelo.

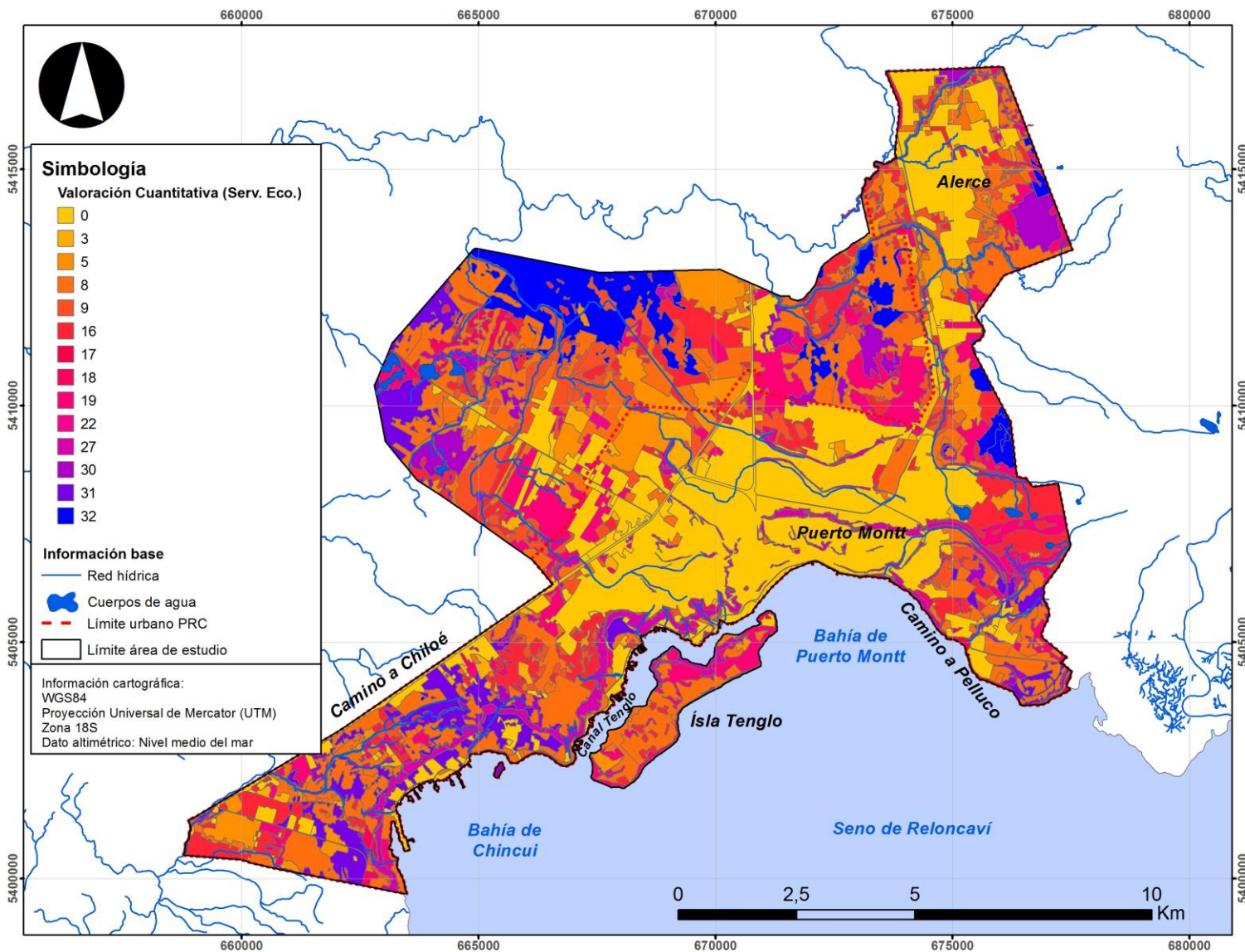
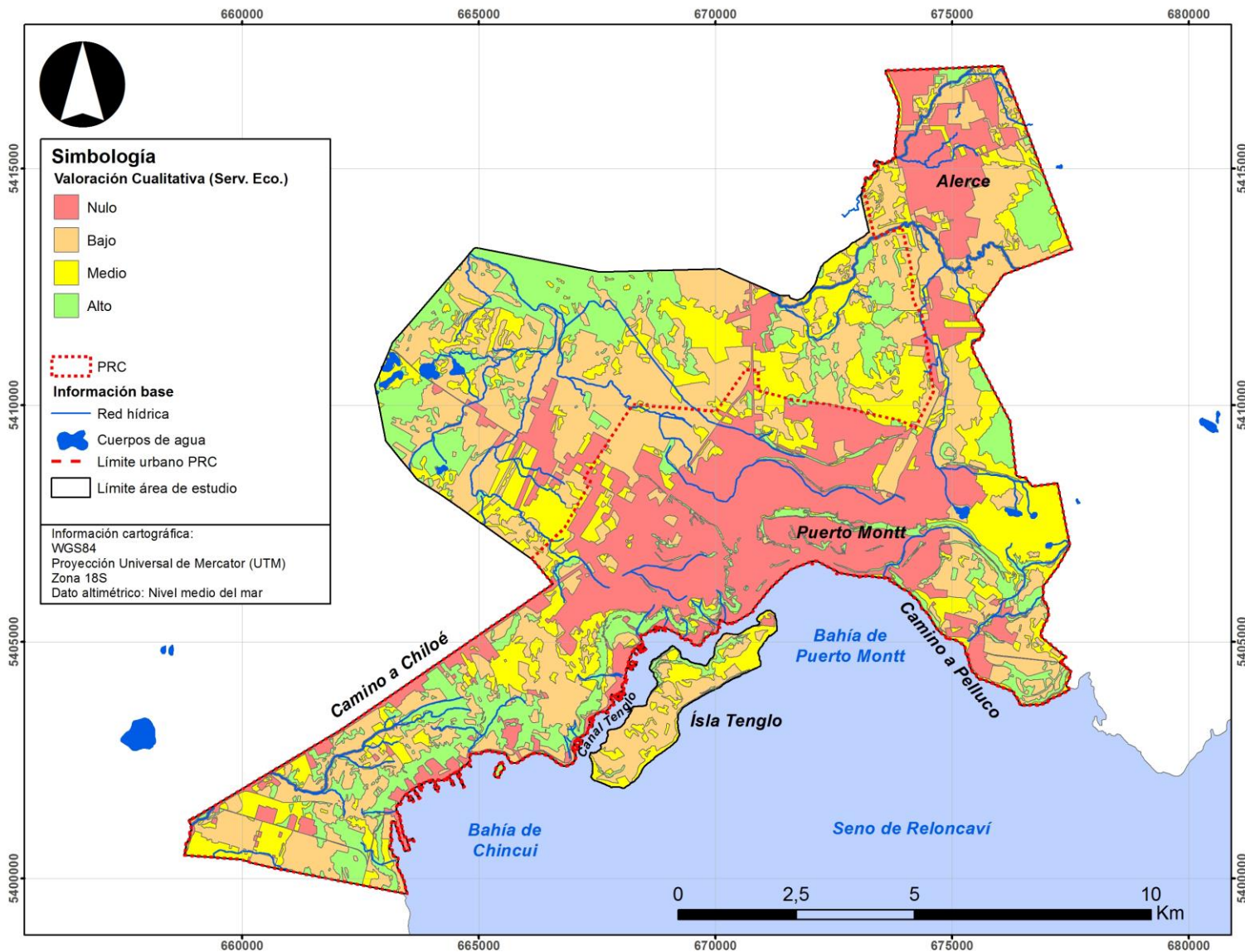


Figura N°83. Mapa de valoración cualitativo de Servicios Ecosistémicos según cobertura de suelo



2.3 Efectos de la urbanización sobre humedales

El proceso de urbanización actualmente en desarrollo ha ido afectando y reemplazando las funciones y servicios ecosistémicos prestados por los paisajes naturales y seminaturales preexistentes, provocando modificaciones que en algunos casos son irreversibles. Entorno a la ciudad de Puerto Montt existen ecosistemas de mucha importancia y de reconocido valor ambiental como son los humedales. Los humedales se sitúan entre los ecosistemas biológicamente más productivos, siendo importantes fuentes de diversidad biológica, debido principalmente a que son reservorios de agua, y por lo tanto brindan este elemento vital para las especies, y también porque son responsables de una alta cantidad de productividad primaria, que constituye la base de la cadena trófica sobre la cual se sostienen los organismos vivos. Las funciones ecológicas de los humedales proporcionan beneficios tanto a la propia naturaleza como a las sociedades humanas.

Los humedales ubicados al interior de la ciudad o cercanos a ella, adquieren aún mayor importancia debido a que las funciones y mecanismos naturales de estos ecosistemas deben ser entendidos como servicios ecosistémicos que reportan beneficios directos e indirectos a la humanidad, entre los que se encuentran purificación de aire, regulación microclimática, reducción de ruido, drenaje de aguas lluvias, tratamiento de aguas residuales, regulación de inundaciones y oferta de espacios para la recreación. No obstante, los humedales son actualmente los ambientes más amenazados por la intervención humana, que los drena, rellena, deseca, destruye su vegetación y contamina sus aguas y sedimentos. Así lo demuestran las cifras entregadas por la Convención RAMSAR (2006), que señala que en el último siglo más de la mitad de la superficie de humedales en el mundo ha desaparecido, quedando alrededor de 600 a 900 millones de hectáreas, de las cuales solo 60 o 70 millones (menos del 10%) se encuentran protegidas.

Los humedales urbanos están continuamente sujetos a disturbios antrópicos tales como contaminación y fragmentación del hábitat. Existen claras señales de que los remanentes de humedales localizado entorno a la ciudad de Puerto Montt han sido rellenados y usados para localizar desarrollos residenciales y complejos industriales. En la mayoría de los casos el proceso de urbanización en estas áreas lleva a la conversión del humedal a un sistema terrestre completamente distinto al original.

Estos rellenos que simulan ambientes terrestres afectan las cualidades físicas y biológicas propias de estos humedales, provocando la desaparición de importantes servicios ecosistémicos como la regulación hidrológica, el control de las inundaciones, la protección costera y la depuración del agua. Simultáneamente, estos desarrollos inmobiliarios conllevan un incremento de la vulnerabilidad social frente a los efectos del cambio climático. En este sentido, se considera que la construcción sobre rellenos comprende nuevas formas de generación de riesgos de desastres en áreas inundables que deberían ser previstos.

2.4 Efectos de la explotación de bosque nativo

Las alteraciones de nuestros bosques no sólo implican la pérdida de ecosistemas únicos en el mundo, sino también profundos impactos en la producción de los diversos servicios ecosistémicos que estos bosques proveen a la sociedad, lo que inevitablemente afectará la calidad de vida de un número importante de

familias rurales y urbanas. Los bosques nativos, que en un comienzo parecían un recurso inagotable, hoy en día para los propios campesinos ha resultado ser un bien cada vez más escaso e improductivo. La degradación de los bosques se produce no sólo como consecuencia de su sobreexplotación, sino también por sistemas y técnicas de extracción inapropiados que no consideran criterios silvícolas, en especial a través de la extracción de los individuos de mejores características maderables, práctica conocida como “floreo”. Este consiste en la corta de los mejores árboles de las especies de mayor valor comercial, deteriorando el potencial productivo del bosque.

La principal dificultad para revertir este escenario está dada por la escasa asistencia técnica, relacionados con métodos de manejo silviculturales, con la que cuentan la mayor parte de las familias campesinas del sur de Chile, para las cuales la producción de leña representa una importante fuente de ingresos prediales. Los criterios silvícolas corresponden a intervenciones aplicadas en los bosques con el objetivo de simular fenómenos naturales para el aprovechamiento del recurso. En conjunto con la adecuada definición de técnicas de manejo forestal, es igualmente relevante su correcta implementación, ya que en muchas ocasiones, a través del volteo y madereo, se dañan los árboles residuales y la regeneración natural, o la extracción se concentra en los árboles de mayor tamaño, mejor calidad y de determinadas especies. Para definir si estas intervenciones han sido correcta o incorrectamente aplicadas es necesario evaluar y monitorear las prácticas silvícolas que se aplican en los bosques.

2.5 Marco legal asociado a la protección de áreas de valor natural

La legislación asociada a la protección del patrimonio ambiental muestra una constante evolución desde normas sectoriales dispersas a otras más globales tales como la Ley de Bosques, el Decreto Ley N° 701, Ley N° 20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal, Ley de Bases del Medio Ambiente (N° 19.300) y su modificación (Ley N° 20.417). Con el objetivo de sustentar legalmente la propuesta de áreas de valor natural –bosque nativo, humedales, cauces naturales, cuerpos de agua y laderas- se revisó la legislación orientada a la protección de estas unidades territoriales.

En relación a la protección de bosque nativo, la Ley N° 20.283 define como **Bosque Nativo de Preservación y Bosque Nativo de Conservación y Protección** las que puede ser aplicado para la protección de la cobertura de bosque nativo (incluida la categoría de renoval) identificada en el área de estudio.

- **Bosque Nativo de Preservación:** a aquél, cualquiera sea su superficie, que presente o constituya actualmente hábitat de especies vegetales protegidas legalmente o aquéllas clasificadas en las categorías de en “peligro de extinción”, “vulnerables”, “raras”, “insuficientemente conocidas” o “fuera de peligro”; o que corresponda a ambientes únicos o representativos de la diversidad biológica natural del país, cuyo manejo sólo puede hacerse con el objetivo del resguardo de dicha diversidad.
- **Bosque Nativo de Conservación y Protección** a aquél, cualquiera sea su superficie, que se encuentre ubicado en pendientes iguales o superiores a 45%, en suelos frágiles, o a menos de doscientos metros de manantiales, cuerpos o cursos de aguas naturales, destinados al resguardo de tales suelos y recursos hídricos.

Esta misma Ley en su **artículo 19** prohíbe la corta, eliminación, destrucción o descepado de individuos de las especies vegetales nativas clasificadas, de conformidad con el artículo 37 de la Ley N° 19.300 y su reglamento, en las categorías de “en peligro de extinción”, “vulnerables”, “raras”, “insuficientemente conocidas” o “fuera de peligro”, que formen parte de un bosque nativo, como asimismo la alteración de su hábitat. Excepcionalmente, podrá intervenir o alterarse el hábitat de los individuos de dichas especies, previa autorización de la Corporación, la que se otorgará por resolución fundada, siempre que tales intervenciones no amenacen la continuidad de la especie a nivel de la cuenca o, excepcionalmente, fuera de ella, que sean imprescindibles y que tengan por objeto la realización de investigaciones científicas, fines sanitarios o estén destinadas a la ejecución de obras o al desarrollo de las actividades señaladas en el inciso cuarto del artículo 7º, siempre que tales obras o actividades sean de interés nacional. Para autorizar las intervenciones a que se refiere el inciso anterior, la Corporación deberá requerir informes de expertos respecto de si la intervención afecta a la continuidad de la especie y sobre las medidas a adoptar para asegurar la continuidad de las mismas. Para llevar adelante la intervención, el solicitante deberá elaborar un plan de manejo de preservación, que deberá considerar, entre otras, las medidas que señale la resolución fundada a que se refiere el inciso segundo precedente. Para calificar el interés nacional, la Corporación podrá solicitar los informes que estime necesarios a otras entidades del Estado.

En este contexto, en la Tabla 48 se presentan las especies con problemas de conservación potencialmente presente en el área de estudio según 11º proceso de clasificación de especies.

Respecto a la protección cuerpos y cursos naturales de agua y humedales el reglamento de sobre suelos, aguas y humedales de la misma Ley N° 20.283 define las siguientes zonas:

- **Zona de protección de exclusión de intervención:** Corresponde a los 5 metros aledaños a ambos lados de cursos naturales de agua, cuya sección de cauce, delimitada por la marca evidente de la crecida regular, es superior a 0,2 metros cuadrados e inferior a 0,5 metros cuadrados. Tratándose de manantiales y cuerpos naturales de agua, esta zona tendrá un ancho de 10 metros. En cursos naturales de agua de sección de cauce mayor a 0,5 metros cuadrados, el ancho de esta zona será de 10 metros a ambos lados de éste. Las distancias previamente señaladas se miden en proyección horizontal en el plano, desde el borde del cauce, cuerpo de agua, o manantial y perpendicular al eje, o a la línea de borde de éstos.
- **Zona de protección de manejo limitado:** Corresponde al área contigua a la zona de exclusión de intervención de cuerpo de agua, manantial y cursos naturales de agua de sección de cauce mayor a 0,5 metros cuadrados. Esta zona de manejo tiene un ancho de 10 metros para pendientes entre 30 y 45% y de 20 metros para pendientes superiores a 45%. Las distancias previamente indicadas, se miden en proyección horizontal en el plano desde el borde de la zona de exclusión y perpendicular a su eje.

Los artículos referidos a la protección de los suelos, aguas y humedales son:

Artículo 3º. En la zona de protección de exclusión de intervención, excepto lo establecido en el artículo 17 letras f) y g) de este Reglamento, se prohíbe la corta, destrucción, eliminación o menoscabo de árboles y arbustos nativos, en bosque nativo, la corta de plantaciones acogidas a lo establecido en el inciso segundo del artículo 13 del DL 701, de 1974, modificado por la ley 19.561, así como la construcción de estructuras, vías de saca, el ingreso de maquinarias y el depósito de desechos de cosecha.

Artículo 4º. En la zona de protección de manejo limitado, salvo lo establecido en el artículo 17 letras f y g de este Reglamento, se podrá intervenir dejando una cobertura arbórea de al menos un 50%. Sin embargo, no está permitido al interior de esta zona, la construcción de estructuras, vías de saca y el depósito de desechos de cosecha.

Artículo 5º. Lo indicado en los artículos 3º y 4º precedentes, se aplica a manantiales, cuerpos de agua, y cursos naturales de agua permanentes y no permanentes en la Región de Arica y Parinacota, hasta la Región del Bío Bío y sólo para los permanentes entre las Regiones de la Araucanía y la de Magallanes y de la Antártica Chilena.

Artículo 8º. Una vez realizadas las actividades de intervención, en bosque nativo distinto de los tipos forestales esclerófilo y palma chilena ubicados en pendientes inferiores a 45%, se debe dejar una cobertura arbórea y arbustiva mínima de 30%. En aquellas zonas con pendiente igual o superiores a 45% se debe mantener una cobertura arbórea y arbustiva mínima de 40%. Excepto la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo y la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, en suelos con pendientes sobre 60% o precipitaciones sobre 1.500 milímetros anuales, la cobertura arbórea y arbustiva mínima exigida será 60%.

Artículo 9º. En suelos con profundidad menor a 20 centímetros se prohíbe la corta de bosques nativos.

Artículo 10. En los humedales declarados sitios Prioritarios de Conservación, por la Comisión Nacional del Medio Ambiente, o sitios Ramsar, prohíbese la corta, destrucción, eliminación o menoscabo de su vegetación hidrófila nativa.

Artículo 11. Prohíbese la descarga de aguas de lavado de equipos, maquinarias y envases que hayan contenido sustancias químicas, desechos orgánicos, productos químicos, combustibles, residuos inorgánicos tales como cables, filtros, neumáticos, baterías, en los cuerpos y cursos naturales de agua, manantiales y humedales y en las zonas de protección definidas en los literales p) y q) del artículo 1º de este Reglamento.

Artículo 12. La corta de bosques nativos aledaños a humedales declarados sitios Prioritarios de Conservación por la Comisión Nacional del Medio Ambiente, o sitios Ramsar, deberá dejar una faja de 10 metros de ancho, medidos en proyección horizontal a partir de los límites establecidos por la citada Comisión, en la cual se podrá intervenir dejando una cobertura arbórea de a lo menos un 50%.

A partir de la normativa indicada anteriormente es posible sustentar legalmente la protección de las áreas que presentan valoraciones altas respecto a la provisión de servicios ecosistémicos, y sobre las cuales se propone sean consideradas como áreas de valor natural en el marco de los instrumentos de planificación territorial.

Tabla N°48. Listado de especies con problemas de conservación potencialmente presente en el área de estudio

Nombre científico	Nombre común	Categoría vigente CR = En peligro crítico DD = Datos insuficientes EN = En Peligro EW = Extinta en estado silvestre EX = Extinta FP = Fuera de Peligro IC = Insuficientemente Conocida LC = Preocupación menor NT = Casi amenazada R = Rara VU = Vulnerable
<i>Blechnum asperum</i>		VU
<i>Blechnum blechnoides</i>		LC
<i>Blechnum chilense</i>	costilla de vaca, quiquil, palmilla	VU(JF), LC (Chile continental)
<i>Blechnum corralense</i>		EN
<i>Blechnum hastatum</i>		NT(JF), LC(Chile continental)
<i>Citronella mucronata</i>	huillipatagua, naranjillo, patagua	NT
<i>Clinopodium multiflorum</i>	menta de árbol	NT
<i>Fitzroya cupressoides</i>	alerce	EN
<i>Lepidothamnus fonkii</i>		LC
<i>Pteris chilensis</i>		VU(JF), LC (Chile continental)
<i>Pteris semiadnata</i>		VU(JF), LC (Chile continental)

2.6 Patrimonio cultural

En términos de arquitectura de interés la comuna posee 101 edificaciones identificadas en el Inventario del Patrimonio Cultural Inmueble de Chile, Edificación Patrimonial de la X Región de la Dirección de Arquitectura del Ministerio de Obras Públicas. Cabe señalar, que 90 de estas edificaciones se encuentran en el casco antiguo de la ciudad de Puerto Montt, para las cuales se define un área de protección. Entre los Monumentos Nacionales destacan el Monumento Histórico Torre Campanario del Colegio San Francisco Javier y el Santuario de la Naturaleza Bosque Fósil de Punta Pelluco.

En Plan Regulador se proponen las categorías Inmuebles de Conservación Histórica, (ICH) y Zonas de Conservación Histórica, (ZCH). Esta propuesta se sustenta en el catastro del Patrimonio Arquitectónico de la comuna correspondiente al área Urbana, encomendado por el Ministerio de Obras Públicas.

Respecto a la normativa, son dos los referentes legales explícitos que regulan la puesta en valor y protección del Patrimonio Arquitectónico: 1) La Ley General de Urbanismo y Construcciones, en su artículo 60, inciso 2°, indica que “el plan regulador señalará los inmuebles o zonas de conservación histórica, en cuyo caso los edificios existentes no podrán ser demolidos o refaccionados sin previa autorización de la SEREMI de Vivienda correspondiente”; y 2) la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, en su artículo 2.1.10, al señalar los documentos constitutivos del Plan Regulador Comunal, señala como Inmuebles y Zonas en los contenidos de la Memoria Explicativa.

Respecto de los criterios para identificar los inmuebles: la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, en el Art. 2.1.18 dentro de las denominadas “Áreas de Protección”, establece que:” Se entenderá por recursos de valor patrimonial cultural aquellas áreas o construcciones declaradas de conservación histórica, incluidas aquellas declaradas zonas típicas y monumentos nacionales”.

En específico, en el artículo 2.1.43, se indican como criterios:

- Que se trate de inmuebles que representen valores culturales que sea necesario proteger sean éstos arquitectónicos o históricos.
- Inmuebles urbanísticamente relevantes.
- que se trate de una obra arquitectónica que constituya una obra de significación urbana.

En relación a las categorías de conservación, el Plan Regulador Puerto Montt identifica dos categorías de Conservación, establecidas DDU 186 del Ministerio de Vivienda y Urbanismo.

Conservación Histórica Total (CHT). En estos casos se podrán autorizar obras de restauración o refacciones asociadas a su rehabilitación y conservación siempre que no se afecte negativamente – en este último caso sus cualidades estéticas originales o elementos significativos, identificados como tales en la respectiva “ficha de valoración de inmueble como conservación histórica”. Se incluye en este nivel los inmuebles cuya protección está asociada tanto a la edificación como al predio en que se emplaza.

Conservación Histórica Parcial (CHP). En estos casos se podrá autorizar demoliciones parciales y refacciones asociadas a su rehabilitación, alteración, reparación, ampliación u otra obra menor, siempre que las modificaciones interiores o exteriores no afecten negativamente los elementos significativos, identificados en la respectiva “ficha de valoración de inmuebles de conservación histórica”.

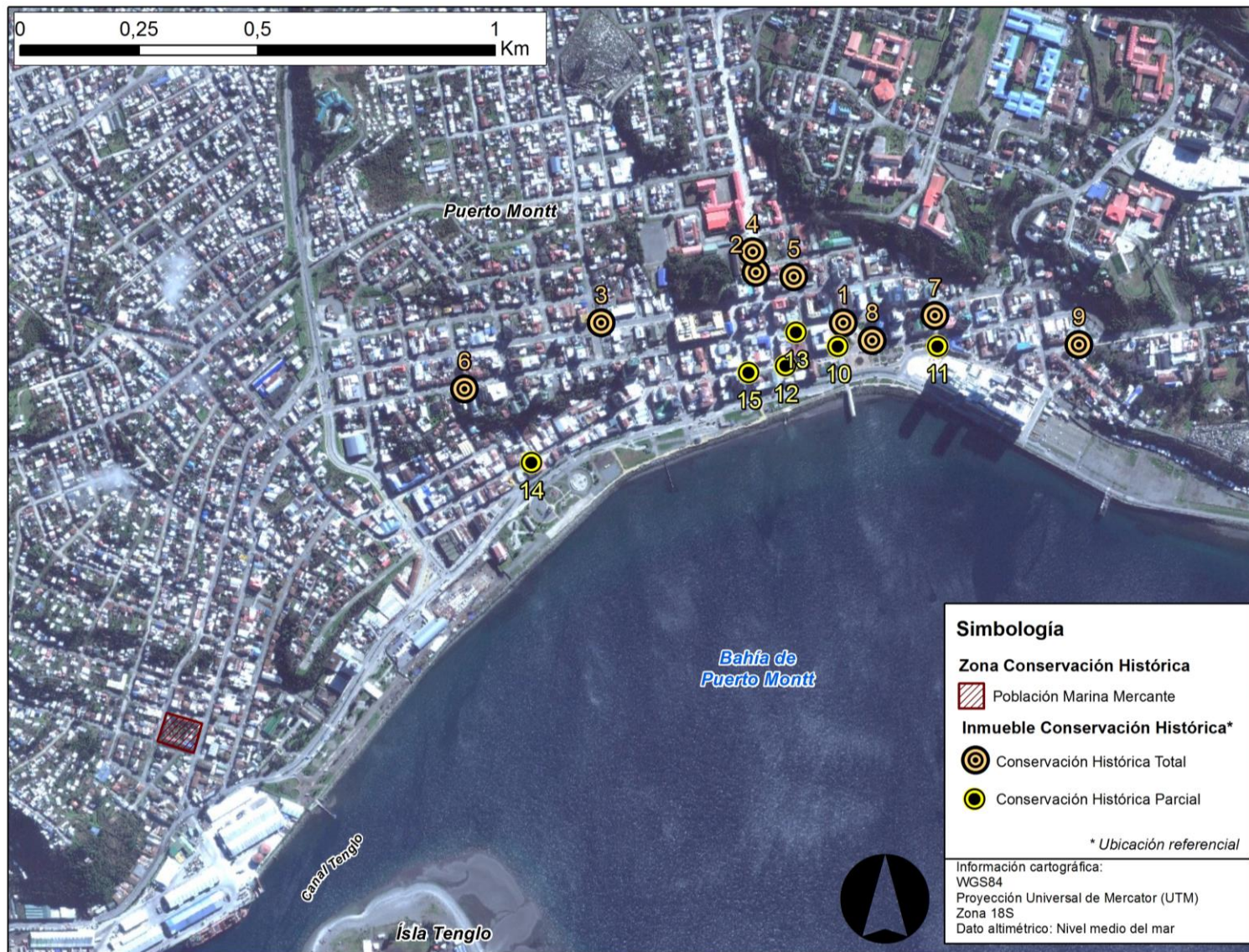
En la Tabla 49 se indican los Inmuebles de Conservación Histórica (CHT o CHP) y Zonas de Conservación Histórica (ZCH) contemplados en el Plan Regulador Comunal (Figura 84).

Tabla N° 49. Inmuebles de Conservación Histórica y Zonas de Conservación Histórica

ID	Nombre	Ubicación	Rol	Data	Destino	Estado de conservación	Categoría
1	Catedral Católica	Urmeneta 370	64-2	1930	culto	bueno	CHT
2	Iglesia de los Jesuitas	Guillermo Gallardo 269	145- 29	1972	culto	bueno	CHT
3	Casa Ebel	Balmaceda 212	145- 12	1932	Comercial	bueno	CHT
4	Colegio San Javier	Guillermo Gallardo 269	145- 30	1875	Educacional	bueno	CHT
5	Casa Pauly	Rancagua 245	75-2	1920	Habitacional	bueno	CHT
6	Casa Fernández	Urmeneta 890	264- 7	1923	Habitacional	bueno	CHT
7	Casa Arteaga	San Felipe 146	33-4	1926	Comercial	bueno	CHT
8	Casa Rensinghoff	Bbo. O'Higgins 114	53-5	1935	Comercial	bueno	CHT
9	Casa Burchkart	Egaña 150- 156	712- 24	1945	Comercial	bueno	CHT
10	Gobernación Provincial	San Martin 80	73-1	SI	Civil publica	bueno	CHP
11	Municipalidad de Puerto Montt	San Felipe 80	32-2	1948	Civil publica	bueno	CHP
12	Edificio Dias	Antonio Varas 480	83-4	1929	Comercial	bueno	CHP
13	Edificio Rancur	Urmeneta 459	83-2	1925	Comercial	bueno	CHP
14	Gendarmería	Antonio Varas 922- 928	263- 9	SI	Comercial	bueno	CHP
15	Edificio Salco	Antonio Varas 549	102- 6	SI	Comercial	bueno	CHP
	Población Marina Mercante	Ñuble / Pudeto / Chorrillos / Ecuador	534	SI	Comercial	bueno	ZCH

Nota: ID (identificador en cartografía)

Figura N° 84. Inmuebles de Conservación Histórica y Zonas de Conservación Histórica



VI. RECOMENDACIONES Y CONCLUSIONES

1. Medidas de mitigación y propuestas para la zonificación urbana

Las medidas de mitigación pueden ser de varios tipos, tales como estructurales (muros, terraplenes) o no estructurales (regulaciones constructivas, señalética, simulacros de evacuación, etc.). Todas estas medidas pueden apuntar a tres aspectos: reducir el peligro, reducir la exposición o reducir la vulnerabilidad.

Considerando el nivel de **peligro por remoción en masa** en el área, se recomiendan las siguientes medidas de mitigación (Tabla 50):

- **Peligro Muy Alto y alto:**

Dada la alta susceptibilidad al desarrollo de procesos de remoción en masa, se recomienda restringir la ocupación, especialmente de infraestructura esencial. Eventualmente pueden ser zonas urbanizables, pero se deberá demostrar mediante estudio fundado detallado aprobado por el organismo competente las medidas de mitigación adecuada a los factores locales y al tamaño de los proyectos (aplicación 2.1.17), debido a la posibilidad de desestabilizar laderas o escarpes adyacentes. En áreas ya ocupadas, se recomienda relocalizar o realizar medidas para reducir/controlar el peligro, tales como aumento de la cobertura vegetal en laderas inestables, especialmente en escarpes donde se localizan las coronas de deslizamientos, y construcción de taludes para contención de laderas.

- **Peligro Medio:**

Las áreas con peligro medio, presentan posibilidad de uso pero con restricción, debido a que aquellas intervenciones o usos que no se realicen con medidas de control ingenieril (estudios geotécnicos), podrían desestabilizar laderas o escarpes menores y activar procesos de remoción en masa. En estos casos, son recomendable las medidas de control de drenaje, para facilitar procesos de infiltración y evitar situaciones de colapso de estructuras.

- **Peligro Bajo:**

Las áreas con peligro bajo, son adecuadas para la ocupación, tomando medidas de mitigación para evitar procesos erosivos que puedan potenciar el desarrollo de remociones en masa.

Considerando el nivel de **peligro por Tsunami** en el área, En general, se recomienda adoptar una estrategia de mitigación que considere múltiples medidas y no sólo una. De este modo, una estrategia propuesta debe considerar tres aspectos claves:

1. Retener o retardar la inundación por tsunami
2. Desviar la inundación
3. Preparar para la emergencia y facilitar la evacuación.

El primer aspecto lo construyen principalmente elementos estructurales tales como rompeolas, muros, diques. Sin embargo, Puerto Montt posee elementos naturales que facilitan este aspecto tales como las islas y canales en aguas interiores. Además, actualmente existe una costanera con enrocados que puede evitar la inundación en case de eventos menores o retardar la inundación, por lo tanto, todos esos elementos se podrían considerar como elementos de protección frente a tsunamis. De este modo las medidas de mitigación propuestas se centrarán en los otros aspectos.

En general, se recomiendan las siguientes medidas de mitigación:

- Instalar señalética indicando claramente la zona inundable tal como “Zona Amenaza tsunami”.
- Instalar señalética indicando las vías de evacuación, dirección y distancia hacia las zonas seguras.
- Definir espacios abiertos sobre la cota 15m (sobre el nivel medio del mar) que puedan ser usados como zonas de seguridad y/o evacuación en caso de tsunami.
- Incluir en la información turística un mapa general con vías de evacuación y zonas de seguridad. Definir un punto de reunión para turistas extranjeros con sus respectivas embajadas y/o consulados. Esta información debe ser indicada en los mapas de información turística. Incluir esta información tanto en castellano como en inglés.
- Capacitar al personal de los centros de información turística sobre terremotos, tsunamis y zonas de inundación.

Las medidas de mitigación por nivel de peligro se indican en la Tabla 50.

Considerando el nivel de **peligro por anegamiento** en el área, se recomiendan las siguientes medidas de mitigación (Tabla 50):

- **Peligro Alto:**

Dada la alta susceptibilidad al desarrollo de procesos de anegamiento, se recomienda restringir la ocupación; en especial se debe evitar la localización de infraestructura crítica. Se debe considerar el mal comportamiento que presentan estas áreas en casos de sismos debido a procesos de licuefacción. En zonas rurales o no urbanas, se recomienda mantener o mejorar la cubierta vegetal para ayudar al proceso de infiltración, se sugieren usos destinados a parques o áreas verdes. En áreas ya urbanizadas, realizar medidas para reducir/controlar el peligro, tales como corredores verdes, limpieza y mejoramiento de los sistemas de evacuación de aguas lluvias. Adicionalmente, gestionar/solicitar la separación de las redes de aguas servidas y lluvias.

- **Peligro Medio y bajo.**

Las áreas de peligro medio, presentan posibilidad de uso. Eventualmente pueden ser urbanizables, pero se debe demostrar mediante estudio fundado detallado las medidas de mitigación adecuadas a los factores locales y al tamaño de los proyectos (2.1.17), debido a su cercanía con las zonas de alta probabilidad de anegamiento. En zonas con futura urbanización se recomienda considerar infraestructura verde para facilitar los procesos de infiltración. En

áreas ya están ocupadas, se recomienda realizar medidas para reducir/controlar el peligro, tales como corredores verdes, limpieza y mejoramiento de los sistemas de evacuación de aguas lluvias, adicionalmente se sugiere gestionar/solicitar la separación de las redes de aguas servidas y lluvias.

- **Peligro Bajo:**

Las áreas de peligro bajo son adecuadas para una ocupación, se recomienda la aplicación de normas urbanísticas.

Considerando el nivel de **peligro por inundaciones por cursos hídricos superficiales** en el área, se recomiendan medidas de mitigación (Tabla 50):

Dada la alta susceptibilidad al desarrollo de procesos de inundación por desborde de cauces, se recomienda restringir la ocupación, en especial la localización de infraestructura crítica. En general en estas zonas se sugiere la utilización de parques de inundación/infraestructura verde. Eventualmente pueden ser urbanizables, pero se deberá demostrar mediante estudio fundado detallado aprobado por el organismo competente las medidas de mitigación adecuada a los factores locales y al tamaño de los proyectos (aplicación artículo 2.1.17). En zonas con población cercana/urbanizada implementar medidas destinadas al control y conducción del escurrimiento como limpieza periódica de cauces, gaviones, estabilización de taludes. En las zonas correspondientes a quebradas ya urbanizadas relocalización y/o implementación de soluciones ingenieriles amigables con el medio ambiente. Otras medidas pueden ser mantener la cubierta arbórea y arbustiva de la zona ribereña presente en la planicie de inundación, ya que representa una posibilidad natural de reducir el impacto de posibles inundaciones.

Considerando el peligro por **actividad volcánica**, se recomiendan las siguientes medidas (Tabla 50):

Normas para construcción

Con respecto al peligro que pueda presentar la acumulación de ceniza en la ZUPM, se recomienda establecer normas de construcción de techumbres para que puedan soportar cargas considerables. Una carga de 100 kg/m² se considera, conservativamente, como una carga que puede comenzar a provocar problemas de estabilidad en estructuras débiles. Esta carga corresponde a aproximadamente 10 cm de tefra (ceniza volcánica) en condiciones secas. La adición de agua, por ejemplo, por lluvias, puede incrementar la carga del material caído considerablemente. Se ha estimado que cargas de 200 kg/m² son cargas que seriamente podrían dañar estructuras ligeras y generar su colapso. En particular, esta norma debería cumplirse para aquellos lugares que sirvan de refugio de la población o en establecimientos mayormente vulnerables como recintos educacionales y de salud. Aunque se ha visto que la probabilidad del desarrollo de un evento eruptivo considerable en el volcán Calbuco coincidente con vientos que se dirijan hacia el W-SW es muy baja, en este caso la acumulación

de material volcánico podría superar esta cantidad y se deberían tomar las medidas adecuadas para evitar que la población se encuentre expuesta al colapso de estructuras.

Limitaciones en la expansión urbana

Considerando la actividad volcánica histórica presentada por el volcán Calbuco (más detalles en la sección correspondiente), la ZUPM sería difícilmente afectada en forma directa por peligros volcánicos de alto impacto, como lo son las corrientes de densidad piroclástica, avalanchas y lahares. Sin embargo, erupciones de mediana a gran magnitud podrían generar fenómenos que alcancen zonas aledañas. En particular, se recomienda limitar la expansión urbana hacia el este y hacia cauces importantes que nacen de las faldas del volcán, de las siguientes zonas:

- 1) Barrio Alerce, al NE de la ZUPM, y
- 2) Zonas aledañas al estero Chamiza, al SE de la ZUPM,

La expansión urbana anterior aumentaría la exposición de la población a los productos volcánicos derivados de erupciones del volcán Calbuco, no solo aquellos relacionados con los fenómenos de impacto directo, pero también por los efectos secundarios que se desarrollan después del emplazamiento de los depósitos. Por ejemplo, lahares o corrientes de densidad piroclástica que se emplacen hacia el W-NW-SW del volcán podría aumentar la escorrentía y contenido de sólidos de los esteros que llegan a la ZUPM, y provocar inundaciones en las zonas bajas aledañas a estos esteros.

Considerando el nivel de peligro por **incendios forestales**, se recomiendan las siguientes medidas de mitigación (Tabla 50):

- **Peligro Alto:**

Dada la alta susceptibilidad al desarrollo de este tipo de eventos en algunas áreas específicas de Puerto Montt, se recomienda restringir la ocupación, en especial la localización de infraestructura crítica. Eventualmente pueden ser urbanizables, pero se debe demostrar mediante estudio fundado detallado aprobado por el organismo competente las medidas de mitigación adecuada a los factores locales y al tamaño de los proyectos (aplicación artículo 2.1.17). En áreas ya ocupadas, se recomienda relocalizar o realizar medidas estructurales para reducir/controlar el peligro.

- **Peligro Medio:**

Las áreas con peligro medio, presentan posibilidad de uso pero con restricción, debido a que aquellas intervenciones o usos que no se realicen con medidas de control podrían desencadenar incendios. En estos casos, es recomendable la elaboración de un Plan de Protección Contra Incendios Forestales, que contemple medidas anuales de prevención y mitigación.

- **Peligro Bajo:**

Las áreas con peligro bajo, son adecuadas para una ocupación, tomando medidas de mitigación para reducir los efectos que puedan tener los incendios forestales sobre las personas, los bienes y el medio ambiente.

Tabla N°50. Medidas de mitigación y recomendaciones para la zonificación urbana.

Tipo de peligro	Nivel de peligro	Medidas de mitigación recomendadas	Recomendación para zonificación urbana*
Tsunami	Alto	<p>Restringir la construcción de estructuras con destino habitacional, salvo edificaciones de 3 o más pisos en que el primer piso y segundo estén destinados a estacionamientos y/o comercio.</p> <p>Prohibir la instalación de salas de equipamientos (bombas, tableros eléctricos, etc.) en el subterráneo o primer piso de edificaciones.</p> <p>Restringir la construcción de estructuras de madera.</p> <p>Verificar y/o exigir el uso de la norma NCh 3363:2015 "Diseño estructural - Edificaciones en áreas de riesgo de inundaciones por tsunami o seiche"</p> <p>Verificar y/o exigir la aplicación de la norma NCh 3359:2015 "Requisitos para edificaciones estratégicas y de servicio comunitario" En edificaciones ubicadas en zonas portuarias y/o en Angelmó.</p>	Área de riesgo por Tsunami. Restricción moderada. Mitigación con Normas urbanísticas.
	Medio	<p>Restringir la construcción de estructuras con destino habitacional, salvo edificaciones de 2 o más pisos en que el primer piso esté destinado a estacionamientos y/o comercio.</p> <p>Restringir la construcción de estructuras de madera.</p> <p>Prohibir la instalación de salas de equipamientos (bombas, tableros eléctricos, etc.) en el subterráneo o primer piso de edificaciones.</p> <p>Verificar y/o exigir el uso de la norma NCh 3363:2015 "Diseño estructural - Edificaciones en áreas de riesgo de inundaciones por tsunami o seiche"</p> <p>Verificar y/o exigir la aplicación de la norma NCh 3359:2015 "Requisitos para edificaciones estratégicas y de servicio comunitario" En edificaciones ubicadas en zonas portuarias y/o en Angelmó.</p>	Área de riesgo por Tsunami. Restricción moderada. Mitigación con Normas urbanísticas.
	Bajo	<p>El peligro bajo, considera inundaciones de menos de 50 cm. Por lo que se recomienda:</p> <p>Restringir la construcción de estructuras de madera.</p> <p>Prohibir la instalación de salas de equipamientos (bombas, tableros eléctricos, etc.) en el subterráneo o primer piso de edificaciones.</p> <p>Estudiar en detalle qué pasaría en instalaciones subterráneas, tales como estacionamientos, tal que no se dificulte la evacuación en caso de sismo y posterior tsunami.</p>	Área de riesgo por Tsunami. Restricción moderada. Mitigación con Normas urbanísticas.

Tipo de peligro	Nivel de peligro	Medidas de mitigación recomendadas	Recomendación para zonificación urbana*
Anegamiento	Alto	<p>Se recomienda restringir la ocupación; en especial evitar la localización de infraestructura crítica. Eventualmente pueden ser urbanizables, pero se debe demostrar mediante estudio fundado las medidas de mitigación adecuada a los factores locales y al tamaño de los proyectos (aplicación artículo 2.1.17).</p> <p>Mantener o mejorar la cubierta vegetal en zonas no urbanizadas. Se recomiendan usos destinados a parques o áreas verdes.</p> <p>En zonas urbanas impulsar corredores verdes y/o programas para la limpieza/mejoramiento de colectores.</p> <p>Debido a la alta probabilidad de ocurrencia de peligros asociados (infectocontagiosos), se recomienda gestionar/solicitar la separación de las redes de aguas servidas y aguas lluvias.</p>	<p>Área de riesgo por anegamiento.</p> <p>Restricción máxima.</p>
	Medio	<p>Eventualmente pueden ser urbanizables, pero se debe demostrar mediante estudio fundado las medidas de mitigación adecuada a los factores locales y al tamaño de los proyectos (aplicación artículo 2.1.17), sin embargo, se recomienda excluir equipamiento esencial.</p> <p>En zonas ya urbanizadas impulsar infraestructura verde y/o programas de para la limpieza/mejoramiento de colectores.</p>	<p>Área de riesgo por anegamiento.</p> <p>Restricción moderada.</p> <p>Mitigación con Normas urbanísticas.</p>
	Bajo	<p>Limpieza periódica de colectores de aguas lluvias.</p>	<p>Zona de ocupación con restricción baja.</p> <p>Mitigación con Normas urbanísticas.</p>
Inundación por cursos hídricos superficiales	Alto (río Negro)	<p>Se recomienda restringir la ocupación en especial de infraestructura crítica, privilegiar la utilización de parques de inundación. Eventualmente pueden ser urbanizables, pero se debe demostrar mediante estudio fundado las medidas de mitigación adecuada a los factores locales y al tamaño de los proyectos (aplicación artículo 2.1.17).</p> <p>En zonas con población cercana/urbanizada se recomienda implementar/gestionar medidas destinadas al control y conducción del escurrimiento como limpieza periódica de cauces, gaviones, estabilización de taludes.</p> <p>En quebradas ya urbanizadas se recomienda relocalización y/o la implementación de soluciones ingenieriles amigables con el medio ambiente. Otras medidas pueden ser mantener la cubierta arbórea y arbustiva de la zona ribereña presente en la planicie de inundación.</p>	<p>Área de riesgo por inundaciones fluviales. Restricción moderada.</p>

Tipo de peligro	Nivel de peligro	Medidas de mitigación recomendadas	Recomendación para zonificación urbana*
Remociones en Masa	Muy Alto y alto	Zona con restricción máxima de ocupación, especialmente de infraestructura crítica. Eventualmente pueden ser urbanizables, pero se debe demostrar mediante estudio fundado detallado las medidas de mitigación adecuadas a los factores locales y al tamaño de los proyectos (aplicación artículo 2.1.17). Estabilización de laderas mediante métodos de fijación del suelo. En algunas laderas es posible utilizar cobertura vegetal arbustiva y en otras, estructuras de contención dada la intensa ocupación y alteración de los escarpes. Control de drenaje e infiltración, orientado a conocer el tránsito y circulación del agua en el sistema de laderas, lo cual puede repercutir en el colapso de estructuras. Protección de escarpes.	Área de riesgo por Remoción en Masa. Restricción máxima.
	Medio	Control de drenaje e infiltración, orientado a conocer el tránsito y circulación del agua en el sistema de laderas, lo cual puede repercutir en el colapso de estructuras. Protección de escarpes. Eventualmente pueden ser urbanizables, pero se debe demostrar mediante estudio fundado detallado las medidas de mitigación adecuada a los factores locales y al tamaño de los proyectos.	Zona de ocupación con restricción moderada. Mitigación con Normas urbanísticas.
	Bajo	Uso de cobertura vegetal para control de procesos erosivos y estabilización de suelos.	Zona de ocupación con restricción moderada. Mitigación con Normas urbanísticas.
Volcanismo	Para toda la ciudad de Puerto Montt	Se recomienda establecer normas de construcción de techumbres para que puedan soportar cargas considerables. En particular, se recomienda limitar la expansión urbana hacia el este y hacia cauces importantes que nacen de las faldas del volcán, de las siguientes zonas: 1) Barrio Alerce, al NE de la ZUPM, y 2) Zonas aledañas al estero Chamiza, al SE de la ZUPM.	Normas urbanísticas.

Tipo de peligro	Nivel de peligro	Medidas de mitigación recomendadas	Recomendación para zonificación urbana*
Incendios forestales	Alto	<p>Eventualmente pueden ser urbanizables, pero se debe demostrar mediante estudio fundado detallado las medidas de mitigación adecuadas a los factores locales y al tamaño de los proyectos (aplicación artículo 2.1.17).</p> <p>Gestionar la implementación de cortafuegos en zonas urbanas, mantención de fajas limpias las bajo tendidos eléctricos</p> <p>Exigir la implementación de franjas cortafuego alrededor de nuevos proyectos urbanos, que aminoren la propagación del fuego. En estos sectores se debe eliminar la vegetación inflamable.</p> <p>Gestionar la elaboración de un Plan de Prevención, que involucre aspectos como la eliminación responsable de basura o desechos agrícolas y forestales con fuego, importancia de quemas controladas, señalética y educación en los colegios.</p>	Área de riesgo por incendios forestales. Restricción moderada.
	Medio y bajo	<p>Eventualmente pueden ser urbanizables, pero se debe demostrar mediante estudio fundado detallado las medidas de mitigación adecuadas a los factores locales y al tamaño de los proyectos (aplicación artículo 2.1.17).</p> <p>Construcción y mantención de franjas cortafuego o cubierta vegetal de especies ignífugas, herbáceas, densas u con hojas suculentas.</p> <p>Gestionar la implementación de cortafuegos en zonas urbanas, mantención de fajas limpias las bajo tendidos eléctricos</p> <p>Gestionar la elaboración de un Plan de Prevención, que involucre aspectos como la eliminación responsable de basura o desechos agrícolas y forestales con fuego, importancia de quemas controladas, señalética y educación en los colegios.</p>	Zona de ocupación con restricción moderada. Mitigación con normas urbanísticas.
Protección Ambiental		Se propone que las unidades ambientales que presentan altas valoraciones en relación a la provisión de servicios ecosistémicos sean considerados como áreas de valor natural en el marco de los instrumentos de planificación territorial, en especial en el Plan Regular Comunal, promoviendo su protección y/o uso ambientalmente sustentable.	Aplicación 2.1.18

2. Medidas de manejo del riesgo

Considerando las características de los peligros analizados, se proponen las siguientes medidas de manejo del riesgo (complementarias al punto 1):

a) **Medidas estructurales:** Para remociones en masa se requieren aplicar a las áreas incluidas como de Peligro Muy Alto donde se localizan poblaciones vulnerables (Ej. Población Modelo) y aquellas donde las laderas se presentan intervenidas y desestabilizadas por la ocupación irregular.

En el caso de inundaciones y anegamientos, se requieren aplicar a las áreas incluidas como de riesgo alto y medio con urbanización importante. Para inundaciones estos casos se localizan en quebradas urbanas.

b) **Medidas de control de la erosión y estabilización de suelos:** las cuales están orientadas al manejo de las áreas afectadas por Peligro/riesgo Medio y Bajo por remociones en masa, pueden potenciar el desarrollo de procesos. Se recomienda un programa de forestación y mantención de la cubierta vegetal.

c) **Medidas de control/mantención/fiscalización de los sistemas de evacuación de aguas lluvias/cauces:** las cuales están orientadas al manejo de las áreas afectadas por peligro alto y medio de inundaciones y anegamientos en zonas en riesgo y/o con presencia de puntos críticos, entre estos incluir colectores, sumideros, tanques de almacenamiento, cámaras sedimentadoras, pozos de infiltración, canales, atraviesos, compuertas, etc.

d) **Medidas de educación ambiental:** estas medidas son importantes de considerar ya que muchas de las laderas/cauces/colectores se encuentran contaminados/obstaculizados con microbasurales o son vertederos de escombros. Es recomendable la realización de programas de educación ambiental a la comunidad, especialmente en aquellas más vulnerables, que involucren: educación formal escolar, programas informativos en áreas productivas, elaboración de cartografía temática, desarrollo de artículos, folletos en prensa, etc.

e) **Educación ambiental actividad volcánica:** Se recomienda definir e implementar una estrategia adecuada para preparar a la población a enfrentar cualquier escenario eruptivo, basada en la educación masiva de las personas que viven dentro y cercanas a la ZUPM. En este caso se incluye, específicamente, informar a la población acerca de las zonas fuera de la ZUPM que son de alto riesgo y que deben evitar, a las actividades que deben realizar y otras que deben evitar en el caso de caída de ceniza en la zona, sobre las vías de evacuación en caso que sea necesario implementar este tipo de medidas, e información acerca de la naturaleza volcánica del área donde viven. El objetivo principal es preparar a la población para enfrentar de la mejor forma posible el impacto que puedan tener las erupciones volcánicas en la región.

3. Lineamientos de futuros estudios

Dada la susceptibilidad del área a desarrollar procesos de remoción en masa, inundaciones, anegamientos, incendios forestales es prioritario el **monitoreo y seguimiento de las áreas afectadas**, con el propósito de evitar futuras situaciones de emergencia o desastres. Lo anterior es adecuado para la actualización de los inventarios/catastro de procesos y sus características, en especial si se consideran las transformaciones territoriales en el tiempo, principalmente de ocupación.

Otro aspecto relevante a considerar es el estudio sistemático de factores desencadenantes mediante una red de monitoreo (estaciones meteorológicas y pluviométricas), determinación de umbrales críticos son

fundamentales para la **implementación de sistemas de alerta temprana y evacuación** que deben ser comunicados y practicados oportunamente por comunidad. Sin embargo hay otros factores tales como los eventos sísmicos y el comportamiento hidrogeológico que pueden gatillar procesos de remociones en masa/anegamientos y que requieren ser analizadas con mayor profundidad. Lo anterior debe ser complementado con el **diseño de planes de educación y evacuación en desastres** para usuarios/funcionarios de infraestructura crítica en zonas de peligro.

Respecto a los Tsunamis, el presente estudio consideró sólo **tsunamis** de origen sísmico, y dada la geomorfología del sector, es recomendable realizar un estudio más detallado **sobre deslizamientos** y posibles tsunamis generados por estos fenómenos, tal como el ocurrido en Aysén en el año 2007. Para ello, se debe realizar un estudio específico que identifique los posibles deslizamientos tal que se puedan definir las potenciales fuentes de tsunamis en aguas interiores, esto es, Seno de Reloncaví, Golfo de Ancud, Golfo Corcovado.

Adicionalmente el presente estudio demostró que un tsunami de origen sísmico ingresa por la boca del Guafo y no por el Canal de Chacao. Por lo tanto, se podría complementar con **un estudio de tsunami en Castro**, ya que existe un mareógrafo en esa localidad y se podrían correlacionar las amplitudes máximas de ambas localidades, tal que cuando ocurra un evento sísmico que genere tsunami, se pueda estimar anticipadamente la amplitud en Puerto Montt observando la máxima amplitud en Castro, la que se observará al menos una hora antes.

Adicionalmente se recomienda realizar un estudio para **evaluar la calidad de los suelos** (respuesta sísmica, materiales constituyentes), este estudio tendrá como objetivo generar una cartografía de suelos a escala 10.000 o 20.000. Sería útil de forma indicativa para establecer zonas más seguras para los futuros asentamientos, de forma de entregar prioridad a determinados sitios. Debería considerar la evaluación histórica de los rellenos realizados en el sector del casco histórico de la ciudad, mediante un estudio multitemporal con cartografía histórica.

Para mejorar el conocimiento sobre el desarrollo, desplazamiento e inundación/afectación de fenómenos volcánicos, **es necesario estudiar con mayor detalle las características de los flujos que pueden derivarse del volcán Calbuco**. Para ello es imprescindible ocupar un modelo de elevación digital de alta resolución (< 1m) que permita modelar apropiadamente la inundación de lahares y de corrientes de densidad piroclástica. Si bien estos flujos probablemente no alcancen los límites de la ZUPM, es importante conocer el efecto que su emplazamiento podría tener sobre los caudales de los ríos y esteros, impacto en servicios energéticos y/o de agua potable, consecuencias en zonas rurales aledañas a las ZUPM, etc.

Respecto al tema ambiental, se recomienda que los **humedales y parches de bosque nativo** localizado en el contexto urbano, sean priorizados en términos de acciones de conservación. Para ambas unidades se deberán elaborar **planes de manejo o gestión** que garanticen su protección y usos sustentables en el largo plazo, controlando sus presiones y amenazas, así como también la pérdida y fragmentación de estos ecosistemas. En efecto, dichos planes de manejo deberán contemplar 1) un monitoreo continuo que evalúe sus estados de conservación; 2) un programa de restauración ecológica orientado a la recuperación e incremento de la conectividad, y 3) programas de uso público y educación ambiental que permitan su puesta en valor ante la comunidad local. Se recomienda analizar en detalle la ley y reglamentos presentado en este estudio, y realizar los procedimientos legales para declarar las áreas que presentan

valoraciones altas de provisión de servicios ecosistémicos áreas de valor natural en el marco de los instrumentos de planificación territorial.

4. Conclusiones

Los tsunamis ingresan por la Boca del Guafo, entre Chiloé y el Archipiélago de las Guaitecas. Un tsunami generado por un sismo de magnitud 9.5 con un periodo de recurrencia de 285 años alcanzaría los 2.8m de amplitud en la zona céntrica de la ciudad. Sin embargo, debido al descenso del terreno producto de las deformaciones cosísmicas y los rangos de marea medidos en Puerto Montt, la máxima cota de inundación podría alcanzar los 8m respecto al nivel medio del mar considerando la actual topografía. Lo anterior significa que la zona céntrica, desde el Mall Costanera hasta el sector Angelmó, podría inundarse en caso de un tsunami destructivo.

Los tiempos de arribo del tsunami se estimaron en 3 horas y la amplitud máxima ocurriría 6 horas después del sismo. Lo anterior permitiría evacuar anticipadamente las zonas de peligro de inundación y estimar con anticipación la ocurrencia simultánea de la marea y la máxima amplitud del tsunami.

Los procesos de anegamiento en el área de Puerto Montt están condicionados por su situación morfológica, principalmente zonas llanas y terrenos irregulares (hummocky terrain) con depresiones cerradas, con fuerte intervención antrópica. Adicionalmente sus pendientes que en un 64% corresponden a rangos entre 0°-4,62°.

De ahí que se estableció que el 17,08 % del área de estudio se encuentra expuesta a peligro alto y un 29% al peligro medio, superficie distribuida en forma homogénea, lo que implica que las zonas de peligro medio se localizan en forma aledaña a zonas de peligro alto. En el área urbana es posible identificar dichos sectores en: zona céntrica de la ciudad incluyendo los sectores Angelmó y costanera; sectores localizados en la segunda terraza; áreas comprendidas entre los caminos a Chinquihue, El Tepual y Alerce; núcleo urbano de Alerce.

Esta situación es concordante con la ocurrencia de 263 puntos críticos de anegamientos entre 1958-2010, los que se distribuyeron durante todos los meses del año. Sin embargo, a escala decadal se produce una disminución de sectores afectados entre la década del 2000 y en el periodo 2010-2015. Posiblemente la reducción estuvo asociada al Plan Maestro de evacuación y drenaje de Aguas Lluvias de Puerto Montt (2002) y el Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de Alerce, Región de Los Lagos.

En relación con los montos de precipitación diaria y los anegamientos en los últimos 5 años, se observó que estos se relacionaron con montos pluviométricos superiores a los 40 mm 24-h, con una mayor cantidad de puntos críticos cuando los umbrales superaron los 50 mm 24-h.

Los procesos de inundaciones por cursos hídricos superficiales en el área de Puerto Montt están condicionados por su situación geomorfológica, principalmente zonas llanas con fuerte intervención antrópica (rellenos). Los eventos son detonados por precipitación intensa y persistente. Un total de 750 ha son susceptibles a inundarse. Sin embargo, la mayor parte de la zona no presenta población asociada, a excepción de la localidad de Alerce.

Los procesos de remoción en masa en el área de Puerto Montt están condicionados por su situación genética, donde la geomorfología a través de un conjunto de relieves irregulares y depósitos de morrenas,

hace susceptible el desarrollo de estos procesos. De ahí que se estableció que el 77.8% del área de estudio se encuentra expuesta a peligro Muy Alto o Medio, donde el peligro Muy Alto se localiza en forma de franja a lo largo del sistema de laderas que forman las terrazas fluvio-glaciares, afectando las poblaciones Modelo, Ebensperger, Chinquihue y Lintz.

Se clasificó un total de 226 eventos de RM durante el período 1971-2015, considerando los catastros históricos disponibles, la revisión de prensa local y el trabajo en terreno efectuado por los consultores en agosto de 2015. La mayoría de estos eventos corresponden a deslizamientos rotacionales y traslacionales. Se determinó que los volúmenes máximos involucrados en los deslizamientos para eventos activos fueron de 936,3 m³ (Isla Tenglo), mientras que otros fueron de 41,5 m³ en la población Ebensperger y entre 16,2 y 8,42 m³ en la población Modelo. Por otro lado, existe alta probabilidad de alcanzar montos de precipitación de hasta 66,8 mm en 24 horas. La mayoría de los eventos registrados en el inventario de RM ocurrió con una precipitación sobre 40 mm en 24 horas.

La zona urbana de Puerto Montt presenta una baja probabilidad de ser impactada severamente por fenómenos eruptivos derivados de la actividad de los volcanes cercanos. Sin embargo, esto no significa que una erupción volcánica no causaría un impacto en las actividades económicas y sociales que se desarrollan en la zona urbana y sus alrededores.

Una erupción volcánica del Calbuco, Chaitén, Osorno, o cualquier otro volcán de la X Región podrían tener como consecuencia la caída de ceniza en la ZUPM. Acumulación de 1mm a 1cm (aprox. 1-10 kg/m²) pueden provocar la suspensión o funcionamiento incompleto de infraestructura de transporte, tales como el aeropuerto. Concentraciones aún más bajas, 0.05 mg/m³, pueden comenzar a provocar problemas respiratorios en niños (a) s, ancianos, y personas con alguna enfermedad pulmonar. En este caso sería necesario minimizar la exposición de la población al material particulado suelto. Además, los servicios de salud deberían estar preparados para atender una mayor demanda de público que pueda presentar problemas respiratorios. La limpieza de calles e instalaciones críticas (energía, salud, educación) también debería estar debidamente planificada para evitar problemas indirectos que se pueden derivar de la acumulación de material volcánico.

El riesgo de Incendio abarca 9591 ha. En él destaca el riesgo alto en 4260 ha. Estas áreas corresponden principalmente a sectores que rodean el casco urbano de Puerto Montt y a las zonas aledañas de la localidad de Alerce; sin embargo al interior de la ciudad también es posible localizar algunos sectores en riesgo alto, principalmente en los taludes de terrazas y zonas quebradas, las que se presentan vegetadas y con viviendas de madera. El riesgo bajo y medio se encuentra mayoritariamente en el núcleo urbano de Puerto Montt. El peligro Medio y Alto se concentró en los sectores Norte (localidades de Alerce, ruta 5 sur, camino al Tepual) y Suroeste (camino a Chiloé), Sureste (Camino A Pelluco).

Respecto de la vegetación, los sectores con peligro Alto se caracterizan por la presencia de praderas o zonas agrícolas (forraje) y matorral denso. En tanto, en los sectores de la comuna que presentan un nivel de peligro medio predominan praderas y matorrales abiertos y semidensos. En tal sentido, en el núcleo urbano central de la comuna (área con bajo nivel de peligrosidad) el peligro se localiza en los taludes de las terrazas, donde la presencia de vegetación es abundante.

La presencia de estas asociaciones vegetacionales y sus respectivas especies es un factor que incide en que los sectores de la comuna ya citados se caractericen por la susceptibilidad de incendios. Además, si las

categorías vegetacionales antes descritas se localizan en suelos con pendientes mayores a 30° o 45°, el nivel de peligrosidad se incrementa.

Finalmente, en relación la protección ambiental las unidades ambientales homogéneas que proporcionan mayores y mejores Servicios Ecosistémicos corresponden al bosque nativo, laderas, humedales, cauces naturales y los cuerpos de agua. Valores intermedios corresponde a los matorrales, playas y plantaciones forestales.

Los remanentes de humedales localizados entorno a la ciudad de Puerto Montt están siendo sometidos a fuerte presiones relacionadas con procesos de urbanización e industrialización ligados al crecimiento urbano. En la mayoría de los casos los procesos de urbanización en estas áreas afectan las cualidades físicas y biológicas propias de estos ambientes, provocando la desaparición de importantes servicios ecosistémicos como la regulación hidrológica, el control de las inundaciones, la protección costera y la depuración del agua. Simultáneamente, el desarrollo inmobiliario entorno a los humedales conllevan un incremento de la vulnerabilidad social frente a los efectos del cambio climático y desastres naturales.

Por su parte, las intervenciones del bosque nativo no sólo implican la pérdida de ecosistemas únicos, sino también profundos impactos en la producción de los diversos servicios ecosistémicos que estos bosques proveen a la sociedad, lo que inevitablemente afecta la calidad de vida de un número importante de familias rurales y urbanas. La degradación de los bosques se produce no sólo como consecuencia de su sobreexplotación, sino también por sistemas y técnicas de extracción inapropiados que no consideran criterios silvícolas, en especial a través de la extracción de los individuos de mejores características maderables, práctica conocida como “floreo”. Estas intervenciones degradan el bosque afectando tanto su estado de conservación como su productividad en relación a la producción de madera y Productos forestales no madereros.

La Ley N°20.283 sobre Recuperación del Bosque Nativo y Fomento Forestal proporciona un marco legalmente que permite la protección de las áreas que presentan valoraciones altas respecto a la provisión de servicios ecosistémicos, y sobre las cuales se propone sean consideradas como áreas de valor natural en el marco de los instrumentos de planificación territorial.

.....
Director del Estudio
Dr. Octavio Rojas Vilches
Profesor de Historia y Geografía, Dr. en Ciencias Ambientales

Suscriben el “Estudio de Riesgos y Protección Ambiental del Área Urbana de la comuna de Puerto Montt” en calidad de profesionales participantes y responsables:

.....

Dr. Rafael Aránguiz Muñoz
Estudio de Tsunami
Ingeniero Civil

.....

Dr. Octavio Rojas Vilches
Estudio de Inundaciones-Anegamientos
Profesor de Historia y Geografía

.....

Dra. Carolina Martínez Reyes
Estudio de Remociones en Masa
Geógrafo

.....

Dr. José Palma Lizana
Estudio de Volcanismo
Geólogo

.....

Mg. Marcelo Araya Mardones
Estudio de Intervención Humana
Sociólogo

.....

Dr. Mauricio Aguayo Arias
Estudio de Protección Ambiental
Ingeniero Forestal

.....

Dr. Octavio Rojas Vilches
Estudio de Vulnerabilidad y Riesgo
Profesor de Historia y Geografía

.....

MSc. Jorge Félez Bernal
Cartografía
Geógrafo

V. Bibliografía

Aneas de Castro, S. (2000). "Riesgos y peligros: una visión desde la Geografía" [en línea] Barcelona: Universidad de Barcelona, SCRIPTA NOVA N° 60. ISSN: 1138-9788.

Aparicio, F. (1989). Fundamentos de hidrología de superficie. Noriega: México.

Aranguiz, R., (2013). Generación del tsunami de 1960 en el sur de Chile. XX Congreso Chileno de Ingeniería Hidráulica. Agosto 2013. Concepción-Chile.

Aránguiz, R. (2010). Modelación numérica del tsunami 2010 en la Bahía de Concepción utilizando deformación inicial estática no uniforme. Obras y Proyectos 8.

Aránguiz, R., & Shibayama, T. (2013), Effect of Submarine Canyons on tsunamis propagation: Case study of Biobio Canyon, Coast. Eng. J(55): 22. DOI: 10.1142/S0578563413500162.

Barredo, J. & Gómez, M. (2005). Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. Madrid, España: Editorial RA - MA.

Barrientos, S. y Ward, (1990) S. The 1960, Chile earthquake: Inversion for slip distribution from surface deformation. Geophysical Journal International, 1990, N° 103, p. 589-598.

Barzev, R. , 2002. Guía Metodológica de valoración económica de bienes, servicios e impactos ambientales. Corredor Biológico Mesoamericano.

Caine, N. (1980). The rainfall intensity: duration control of shallow landslides and debris flows. *Geografiska Annaler. Series A. Physical Geography* 62(1-2): 23-27.

Cardona, O. (1993). Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo: "Elementos para el Ordenamiento y la Planeación del Desarrollo" [en línea]. Consultado el 06 de diciembre de 2008, LA RED, página web Red de Estudios Sociales en prevención de desastres en América Latina: <http://www.desenredando.org/public/libros/1993/ldnsn/html/cap3.htm>

Chow, V.T.; D.R. Maidment & L.W. Mays. (1994). Hidrología Aplicada. McGraw-Hill, 580 pp.

Cifuentes, I., (1989). The 1960 Chilean earthquakes. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* (1978–2012) Volume 94, Issue B1, pages 665–680, 10 January 1989

Cisternas, M., Atwater, B., F., Torrejón, F., Sawai, Y., Machuca, G., Lagos, M., Eipert, A., Youlton, C., Salgado, I., Kamataki, T., Shishikura, M., Rajendran, C., P., Malik, J., K., Rizal, Y., Husni, M., (2005). Predecessors of the giant 1960 Chile earthquake, *Nature* 437, 404-407 (15 September 2005) | doi: 10.1038/nature03943.

Constanza, R., Arge, R.d., Groot, R.d., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., Neill, R.V.O., Paruelo, J., Raskin, R.G., Sutton, P. and Belt, M.v.d. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *NATURE* 387, 253-260.

Daily, G. 1997. *Nature's Services. Societal dependence on natural ecosystems*. Island Press. Washington, D.C. United States. 392 p.

Derch, P. 2004. Peligros geológicos por Remoción en Masa área urbana de Puerto Montt, Región de Los Lagos, Chile. Tesis para optar al Título de Geólogo, Depto. Ciencias de la Tierra, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad de Concepción. 110 pág.

Derch, R. (2004). Peligros geológicos por remociones en masa área urbana de Puerto Montt, Región de Los Lagos, Chile. Tesis de pregrado en geología. Universidad de Concepción, Concepción, Chile.

DGA, (1995). Manual de Cálculo de Crecidas y Caudales Mínimos en Cuencas Sin Información Pluviométrica, Dirección General de Aguas, Gobierno de Chile.

Díez, H. Laín, H. & Llorente, I. (2008). Mapas de peligrosidad por avenidas e inundaciones: Guía metodológica para su elaboración. Instituto Geológico y Minero de España, Madrid: 190 pp.

Duda, S. J., 1963. Strain release in the circum-pacific belt, Chile, 1960, J. geophys. Res., 68, 5531-5544.

Dzierma, Y., Wehrmann, H. (2010). Statistical eruption forecast for the Chilean Southern Volcanic Zone: Typical probabilities of volcanic eruptions as baseline for possibly enhanced activity following the large 2010 Concepción earthquake. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10, p. 2093-2108.

Esse, C., Valdivia, P., Encina-Montoya, F., Aguayo, C., Guerrero, M. Figueroa, D. , 2014. Modelo de análisis espacial multicriterio (AEMC) para el mapeo de servicios ecosistémicos en cuencas forestales del sur de Chile. *Revista Bosque* 35(3): 289-299.

Feuker, P. (2006). Alzamiento y subsidencia cosísmica en el área de Valdivia durante el terremoto del 22 de mayo de 1960. XI Congreso Geológico Chileno. Vol 2, Geodinámica Andina.

Flores, P. & Alcántara I. (2002). Cartografía morfogenética e identificación de procesos de ladera en Teziutlán, Puebla. *Investigaciones Geográficas (Mx)*, 49: 7-26.

Gómez-Orea, D. (1999). Evaluación de impacto ambiental. Un instrumento preventivo para la gestión ambiental. Madrid, España. Ediciones Mundi-Prensa. Editorial Agrícola Española. 701 p.

González de Vallejo, L.I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). Ingeniería Geológica. Madrid, España.: Editorial Pearson-Prentice Hall.

Gumbel, E. J. (1941). The return period of flood flows. *The Annals of Mathematical Statistics* (2):163 – 190.

Haines-Yong R, Potschin, M.. (2013). CICES V4.3–Revised report prepared following consultation on CICES Version 4, August-December 2012. EEA Framework Contract No EEA/ IEA/09/003. Nottingham, UK. University of Nottingham.

I. Municipalidad de Puerto Montt. (2008). Proyecto Plan Regulador Comunal de Puerto Montt 2008.

INE. (2002). Censo de Población y vivienda. Santiago: Gobierno de Chile.

Keller, E. & Blodgett, R. (2007). Riesgos Naturales: Procesos de la Tierra como riesgos, desastres y catástrofes. Trad. Gil, P. Madrid: Pearson Prentice Hall.

Lavell, A. Sobre la Gestión del Riesgo: Apuntes hacia una Definición [versión electrónica]. (2001?). De: <http://www.ceprode.org.sv/staticpages/pdf/spa/doc15036/doc15036.htm>

Leopold, L., Wolman, M., & Miller, P. (1964). Fluvial processes in Geomorphology. San Francisco, Freeman. 522 pp.

López, P. (2013). Evaluación de la peligrosidad por procesos de remoción en masa en los cerros La Unión y Zaror, comuna de Talcahuano. *Revista Geográfica del Sur*, 4(6): 59-83.

López-Escobar, L., Parada, M.A., Hickey-Vargas, F.A.F., Kempton, P.D., & Moreno, H. (1995). Calbuco volcano and minor eruptive centers distributed along the Liquiñe-Ofqui Fault Zone, Chile (41°-42° S): Contrasting origin of andesitic and basaltic magma in the Southern Volcanic Zone of the Andes. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 119, p. 345-361.

Lomnitz, C. (2004). Major Earthquakes of Chile: A historical survey, 1535-1960. *Seismological Research Letters*, Vol 75, N°3, pg 368-378.

Mardones, M., & Vidal, C. (2001). La zonificación y evaluación de los riesgos naturales de tipo geomorfológico : un instrumento para la planificación urbana. *Eure*, XXVII (81), 97-122.

Martínez, C.; Rojas, O.; Aránguiz, R.; Belmonte, A.; Quezada, J.; Altamirano, A. & Flores, P. (2012). Riesgo de tsunami en Caleta Tubul, Región del Bio-Bío: escenarios extremos y transformaciones territoriales post-terremoto. *Revista de Geografía Norte Grande*, 53: 85-106.

Maskrey, A. (1993). Vulnerabilidad y mitigación de desastres [versión electrónica]. En: Maskrey, A '(Compil.). *Los Desastres No Son Naturales*, La Red.

Melnick, D., B. Bookhagen, M. R. Strecker, and H. P. Echtler (2009), Segmentation of megathrust rupture zones from fore-arc deformation patterns over hundreds to millions of years, Arauco peninsula, Chile, *J. Geophys. Res.*, 114, B01407, doi: 10.1029/2008JB005788.

Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: Biodiversity synthesis*. World Resources Institute, Washington, D.C.

Montes, C. and Sala, O. (2007). La Evaluación de los Ecosistemas del Milenio. Las relaciones entre el funcionamiento de los ecosistemas y el bienestar humano. *Ecosistemas* 16(3), 137-147.

Nishenko, S.P. (1985). Seismic potential for large and great interplate earthquakes along the Chilean and southern Peruvian margins of South America: A quantitative reappraisal. *Journal of Geophysical Research* 90: doi: 10.1029/JB090iB05p03589. issn: 0148-0227.

Oficina Nacional de Emergencia (ONEMI). (2011). *Análisis de impactos por Sistemas Frontales de magnitud*. Santiago: ONEMI.

Olcina, J. & Ayala-Carcedo, F. (2002). *Riesgos naturales, conceptos fundamentos y clasificación*. En: Ayala-Carcedo F. y Olcina, J. (coord.). *Riesgos Naturales*. Barcelona: Ariel S.A, 2002.

Olcina, J. (2006). *I maestría en ordenación y desarrollo territorial: riesgos naturales y tecnológicos y ordenación del territorio [versión electrónica]*. Alicante: Universidad de Alicante.

Petit-Breuilh, M., (1999). *Cronología Eruptiva Histórica de los volcanes Osorno y Calbuco, Andes del Sur (41°-41°30S)*. Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, No. 53, p. 46

Petit-Breuilh, M., (1999). Cronología Eruptiva Histórica de los volcanes Osorno y Calbuco, Andes del Sur (41°–41°30S). Servicio Nacional de Geología y Minería, Boletín, No. 53, p. 46

Rodríguez, J.P., T. Douglas Beard, J., Bennett, E.M., Cumming, G.S., ork, S.J., Agard, J., Dobson, A.P. and Peterson, G.D. (2006). Trade-offs across Space, Time, and Ecosystem Services. *Ecology and Society* 11(1).

Rojas, A., Maturana, F., Morales, M. (2015). Evolución histórica de las ciudades intermedias en el siglo XX: crecimiento, jerarquía y funcionalidad. En: Maturana, F. y A. Rojas (Eds.) “Ciudades intermedias en Chile: territorios olvidados”. RIL Editores. Primera edición: febrero de 2015. p 43-71.

Rojas, C., & Mardones, M. (2003). Las Inundaciones en la ciudad de Valdivia. Eventos Históricos 1899-2002. *Revista Geográfica de Valparaíso*, 34, 225-242.

Rojas, O. (2015). Cambios Ambientales y dinámica de inundaciones fluviales en una cuenca costera del Centro sur de Chile. Tesis Doctoral. Centro EULA, Universidad de Concepción.

Rojas, O. (2010). Evaluación del Riesgo de Inundación Fluvial en el curso inferior del río Carampangue, comuna de Arauco, Chile. Tesis para optar al Título de Licenciado en Educación en Historia y Geografía. Universidad de Concepción.

Rojas, O., Mardones, M., Arumí, J., y Aguayo, M. (2014). Una revisión de inundaciones fluviales en Chile, período 1574-2012: causas, recurrencia y efectos geográficos. *Revista de Geografía Norte Grande*, 57, 177–192.

Rojas, O., y Martínez, C. (2011). Riesgos naturales: evolución y modelos conceptuales. *Revista Universitaria de Geografía*, 20, 83–116.

Saavedra, D. (2007). Análisis y evaluación de vulnerabilidad a amenazas naturales y socioeconómicas en la ciudad de Puerto Montt y sus áreas de expansión. Tesis para optar al Título de Geógrafo, Depto. De Geografía, Facultad de Arquitectura y Urbanismo, Universidad de Chile. 162 pág.

Sellés, D. & Moreno, H., (2011). Geología del volcán Calbuco, Región de los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No.XX, 30 p., 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.

Sellés, D. & Moreno, H., (2011). Geología del volcán Calbuco, Región de los Lagos. Servicio Nacional de Geología y Minería, Carta Geológica de Chile, Serie Geología Básica, No.XX, 30 p., 1 mapa escala 1:50.000, Santiago.

SERNAGEOMIN. (2000). Geología para el ordenamiento territorial: estudio geoambiental del área Puerto Montt – Frutillar, X región de Los Lagos. Boletín N° 55, 34, pp.

SUBDERE, (2011). Guía Análisis de Riesgos Naturales para el Ordenamiento Territorial. Subsecretaría de Desarrollo Regional y Administrativo (SUBDERE), Gobierno de Chile, 147 pp.

SHOA, (2000). El Maremoto del 22 de Mayo de 1960 en las Costas de Chile. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, 2da Edición.

Takahashi, R. (1961). A Summary Report on the Chilean Tsunami of May 1960. Report on the Chilean Tsunami of May 24, 1960, as observed along the Coast of Japan. Committee for the Field Investigation of the Chilean Tsunami of 1960.

Vieux, Baxter E. y Philip B. Bedient. (2004). “Assessing Urban Hydrologic Prediction Accuracy through Event Reconstruction”. *Journal of Hydrology* 299 (3-4): 217-236. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.08.005.

Watt, S.F.K., Pyle, D.M., Naranjo, J.A., Rosqvist, G., Mella, M., Mather, T.A., & Moreno, H. (2011). Holocene tephrochronology of the Hualaihue region (Andean southern volcanic zone, ~42° S), southern Chile. *Quaternary International* 246, p. 324-343.

Whittow, J. (1984). “Diccionario de geografía física”. Madrid: Alianza, 557 p.

Wilches-Chaux, G. (1993). La vulnerabilidad global [versión electrónica]. En: Maskrey, A (Comp.). *Los Desastres No Son Naturales*. La Red.

LISTADO DE ANEXOS DIGITALES

CARPETA	LISTADO
ANEXO I-0 CARTOGRAFÍAS	1_CARTOGRAFIA DIGITAL 1:10.000 2_SHP
ANEXO I-1 DEM	1_VUELO SAF 2_APOYO GPS 3_DEM 4_CURVAS DE NIVEL 5_REPORTE DEM GEOSOLUCIONES
ANEXO 1-2 IMAGEN SPOT	
ANEXO 1-3 FOTOGRAFICO	1_ASENTAMIENTO EN LADERAS 2_COTAS HISTÓRICAS DE INUNDACIÓN 3_RIO NEGRO LEVANTAMIENTO GPS 4_RIO NEGRO RECORRIDO
ANEXO 1-4 TSUNAMI	1_PARAMETROS MODELACIÓN TSUNAMI
ANEXO 1-5 ESTUDIO HIDROLOGICO	1_ESTUDIO HIDROLOGICO 2_DISTRIBUCIONES
ANEXO II-I	1_ACTA REUNIÓN 1 2_ACTA REUNIÓN 2 3_ACTA REUNIÓN 3
TEXTOS	1_INFORME1 2_INFORME2 3_INFORME3
