

**Consultoría para el Análisis de Amenazas Naturales y de
Cambio climático y Propuesta de Medidas de Mitigación para
el Proyecto “Magallanes H2V: Desarrollo de la
Infraestructura Portuaria Habilitante” (CH-L1191)**

Entregable 6: Informe Final

Concepción, Chile 2025

Índice

1. Antecedentes y contexto.....	7
2. Objetivos de la consultoría	8
3. Definiciones y metodología	9
4. Descripción del proyecto y delimitación de su área de influencia.....	12
4.1. Fuentes de información	12
4.2. Localización	12
4.3. Justificación de la necesidad del proyecto.....	15
4.4. Situación del proyecto con respecto a los requisitos del SEIA.....	16
4.5. Alternativas estudiadas.....	16
4.6. Principales componentes y dimensionamiento.....	17
4.7. Instalaciones auxiliares	22
4.8. Consumo de materiales y energía.....	23
4.9. Características técnicas de la construcción y métodos constructivos	24
4.10. Etapas del proyecto y cronograma	24
4.11. Mano de obra	25
4.12. Costo	26
5. Marco de actuación.....	26
5.1. Marco del BID	26
5.2. Marco nacional	27
5.3. Brechas marco del BID y el marco nacional.....	33
5.4. Otros estándares y documentos de aplicación	34
6. Fase 1: Screening y Clasificación	35
6.1. Identificar y caracterizar las amenazas naturales.....	35
A. Amenazas geológicas o geofísicas.....	35
6.1.1. Sismos	35
6.1.2. Tsunami.....	38
6.1.3. Deslizamientos (remociones en masa).....	40
6.1.4. Sedimentación	45
6.1.5. Erupciones volcánicas	46
B. Amenazas hidrometeorológicas que consideran el cambio climático.....	51
6.1.6. Inundación fluvial.....	51
6.1.7. Inundación pluvial.....	54
6.1.8. Sequía.....	57
6.1.9. Ola de calor/ola de frío.....	57
6.1.10. Incendios forestales.....	61
6.1.11. Viento y viento máximo diario (tormentas)	61
6.1.12. Oleaje	63

6.1.13. Marejadas y erosión costera	66
6.1.14. Aumento del nivel del mar	69
6.1.15. Cambios en las precipitaciones por efecto de cambio climático (anuales e intensas) 76	
6.1.16. Aumento de la temperatura del mar	79
6.1.17. Aumento salinidad del mar	79
6.1.18. Acidificación del mar	80
6.2. Síntesis proyecciones de cambio climático	81
6.3. Síntesis amenazas a las que el Proyecto está expuesta y calificación inicial del Riesgo	84
7. PASO 2: Evaluación de la criticidad y vulnerabilidad	86
7.1. Evaluación de la criticidad	86
7.2. Evaluación de la vulnerabilidad	89
7.3. Resultados y conclusión de los Pasos 1 y 2: Exposición, Criticidad y Vulnerabilidad	91
8. PASO 3: Evaluación cualitativa simplificada del riesgo	91
8.1. Indagación sobre las amenazas relevantes identificadas	92
8.2. Indagación sobre consideraciones de diseño	101
8.3. Indagación sobre el riesgo incremental	108
8.4. Narrativa del riesgo	108
8.4.1. Resultado y conclusión del Paso 3	111
9. Plan preliminar de Gestión del Riesgo de Desastre	112
9.1. Marco para la gestión del riesgo de desastre	112
9.2. Programa de Medidas Estructurales para la reducción del riesgo	114
9.3. Programa de Medidas no Estructurales para la reducción del riesgo	115
9.4. Programa de Medidas para la Prevención y Respuesta a la Emergencia	116
10. Referencias	118

Índice de Figuras

Figura 1. Componentes del riesgo de desastre	9
Figura 2. Fases de la metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID	11
Figura 3. Localización del proyecto. (A) Región de Magallanes y la Antártica Chilena. (B) Comuna de Punta Arenas. (C) Polígono proyecto	14
Figura 4. Infraestructura actual Muelle J. S. Mardones.....	15
Figura 5. Alternativas consideradas	17
Figura 6. Zona a pavimentar	18
Figura 7. (Izquierda) Representación del reforzamiento de losas. (Derecha) Representación de las nuevas grúas en funcionamiento	18
Figura 8. Ampliación del muelle	19
Figura 9. Modelo de estructuración de cabezo proyectado para ampliación del muelle.	20
Figura 10. Elevación esquemática de elementos estructurales del estribo	21
Figura 11. Planta esquemática (derecha) de elementos estructurales del estribo.....	21
Figura 12. Vistas de ampliación Muelle Mardones	22
Figura 13. Sismicidad en la Región de Magallanes y Antártica	38
Figura 14. Inundación por tsunami en Punta Arenas y Bahía Catalina generada por deslizamientos	40
Figura 15. Mapa geológico de la ciudad de Punta Arenas y sus alrededores.....	42
Figura 16. Estimación de valores de Vs30 para la ciudad de Punta Arenas	44
Figura 17. Estero Llau-llau con dirección al este y luego al noreste.....	45
Figura 18. Distribución de los centros volcánicos Holocenos en la Zona Volcánica Sur (SVZ) y Zona Volcánica Austral (AVZ)	47
Figura 19. Esquema con las posibles consecuencias de la caída de Ceniza en Punta Arenas. Preparado por SERNAGEOMIN.....	50
Figura 20. Mapa de inundación por desborde de Estero Llau-Llau (T=10 años).....	53
Figura 21. Mapa de riesgo de inundación por desborde de Estero Llau-Llau.	54
Figura 22. Precipitación acumulada mensual y anual para la estación meteorológica Punta Arenas (DGA).....	55
Figura 23. Porcentaje de cambio entre el escenario histórico y futuro para la Precipitación máxima diaria en Punta Arenas.....	56
Figura 24. Frecuencia de periodos en que la precipitación acumulada es menor al 75% del promedio la precipitación acumulada en el periodo de referencia (1980 a 2010).57	
Figura 25. Temperatura Media: Valor medio de la temperatura media diaria, calculado como $0.5 \cdot (T_{max} + T_{min})$	58
Figura 26. Días cálidos: Número de días en que la temperatura supera el umbral definido como el percentil 90 de la temperatura diaria en el periodo de referencia (1980 a 2010).....	59
Figura 27. Duración de episodios cálidos (>3): Número de días con al menos 3 días consecutivos en que la temperatura máxima supera el percentil 90	59

Figura 28. Duración de episodios fríos (> 6 días): Número de días con al menos 6 días consecutivos en que la temperatura mínima no supera el percentil 10 de la temperatura mínima diaria en el periodo de referencia (1980 a 2010)	60
Figura 29. Grados-Día bajo 0	60
Figura 30. Amenaza de incendios forestales	61
Figura 31. Viento máximo diario (m/s) en el periodo actual (1980-2010), periodo futuro (2035-2065) para escenarios de Cambio climático, y cambio del viento máximo (m/s) en la región de Magallanes.....	62
Figura 32. Frecuencia de ocurrencia de magnitud de Viento máximo diario (m/s) en el periodo actual (1980-2010) y periodo futuro (2035-2065) para escenarios de Cambio climático en Punta Arenas	62
Figura 33. Viento medio: Valor medio del máximo diario de la magnitud del viento (m/s).	63
Figura 34. Mapas de altura significativa del oleaje para el percentil 99% para los escenarios históricos (1985-2004), proyección (2026-2045) y la diferencia entre ambos escenarios	64
Figura 35. Registros de oleaje en la boya de Punta Arenas 2025	65
Figura 36. Histograma de frecuencia de Altura significativa, Periodo peak y dirección media medidas por la boya del SHOA durante 2025	65
Figura 37. Cantidad de eventos de marejada por región.....	67
Figura 38. Rangos y niveles erosión costera.	68
Figura 39. Visor de erosión a escala global.	68
Figura 40. Gráfico evolución de línea de costa emplazamiento proyecto portuario.....	69
Figura 41. Registro de nivel del mar relativo en Punta Arenas para septiembre y octubre de 2025	70
Figura 42. Tasa anual de cambio del NMMR para 11 mareógrafos ubicados en las costas de Chile, análisis considera series de tiempo de entre 32 y 73 años de duración.	70
Figura 43. Variación de la cota de inundación para el año 2040 en Magallanes.....	72
Figura 44. Tendencia del NMM entre los años 2010 - 2040 en Magallanes.....	73
Figura 45. Áreas que estarían debajo del agua si aumenta un 1,5°C o 3°C la temperatura global.....	74
Figura 46. Áreas que se proyectan para estar por debajo del nivel de inundación anual para el año 2050	75
Figura 47. Precipitación acumulada: Cantidad de precipitación (lluvia y nieve) acumulada (unidad mm)	76
Figura 48. Nieve acumulada: Cantidad de nieve acumulada, expresada en mm de agua equivalente	77
Figura 49. Lluvia acumulada: Cantidad de lluvia (agua líquida) acumulada en milímetros durante el período (año, estación, o mes).....	77
Figura 50. Días de precipitación intensa: Número de días en que la precipitación diaria supera 10 mm	78
Figura 51. Días de precipitación muy intensa: Número de días en que la precipitación diaria supera 20 mm.....	78

Figura 52. Temperatura superficial del mar.....	79
Figura 53. Nivel de salinidad del mar (g/L).....	80
Figura 54. Nivel de pH del mar	81
Figura 55. Cubo de criticidad.	86

Índice de tablas

Tabla 1. Otros estándares y documentos-marco de aplicación.....	12
Tabla 2. Fecha de inicio y término de las fases del Proyecto	25
Tabla 3. Alcance y enfoque de las NDAS	26
Tabla 4. Convenios internacionales vigentes en Chile.....	27
Tabla 5. Síntesis de pertinencia y aplicabilidad del marco internacional para el proyecto	29
Tabla 6. Normativa y legislación nacional.	31
Tabla 7. Institucionalidad.....	33
Tabla 8. Otros estándares y documentos-marco de aplicación.	34
Tabla 9. Vs30 (Velocidad de Onda de Corte) en diferentes suelos de Punta Arenas.....	43
Tabla 10. Resumen de los depósitos de tefra de los volcanes revisados.....	49
Tabla 11. Caudales de crecida para río estero Llau-Llau para distintos periodos de retorno en m3/s.....	52
Tabla 12. Extracto de los eventos de inundación registrados en la prensa local.....	57
Tabla 13. Resumen de los escenarios de proyección Intermedio (2010-2040) y de Largo plazo (2040-2100) para el aumento del NMM.	73
Tabla 14. síntesis de amenazas vinculadas al cambio climático.....	82
Tabla 15. Clasificación preliminar del riesgo de desastres y cambio climático en niveles Bajo, Moderado o Alto	84
Tabla 16. Categorización indicativa relacionada a Consecuencias posibles por falla del Proyecto	87
Tabla 17. Categorización indicativa de vulnerabilidad.....	89
Tabla 18. Indagación sobre amenazas relevantes al que el proyecto está expuesto .	92
Tabla 19. Integración de consideraciones de Cambio climático en desarrollo del Proyecto	100
Tabla 20. Soluciones de diseño incorporadas en el Proyecto relacionadas con Amenazas a las que está expuesto.....	101
Tabla 21. Indagación sobre riesgo incremental	108
Tabla 22. Medidas estructurales de fortalecimiento	114
Tabla 23. Medidas estructurales de protección y control.	115
Tabla 24. Medidas no estructurales de planificación e institucionales	115
Tabla 25. Medidas no estructurales de educación y concientización.....	116
Tabla 26. Medidas no estructurales para la Prevención y Respuesta a la Emergencia.	116

1. Antecedentes y contexto

La Región de Magallanes y de la Antártica Chilena constituye el extremo austral del territorio nacional y abarca un 17,5% de la superficie total de Chile. Su posición geográfica —aislada, con condiciones meteorológicas extremas y una dependencia estructural de la conexión terrestre a través de Argentina— otorga al transporte marítimo un papel estratégico para la conectividad de la población (166.537 habitantes, según el Censo 2024) y para el funcionamiento de sectores productivos como la pesca y acuicultura, el turismo antártico, la investigación científica polar y, en forma creciente, la industria emergente del Hidrógeno Verde (H₂V). Esta última representa el eje central de una nueva matriz de desarrollo regional y nacional, al posicionar a Magallanes como uno de los polos energéticos renovables más relevantes del hemisferio sur.

En este contexto, el Gobierno de Chile ha identificado a Magallanes como un polo estratégico para la producción y exportación de H₂V, en el marco de la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde y el Plan de Acción H₂V 2030. Actualmente, existen más de siete iniciativas en etapa de desarrollo, con una inversión estimada de US\$60.000 millones, que proyectan la instalación de aproximadamente 19 GW de energía eólica y una producción de 8,5 millones de toneladas anuales de graneles líquidos para exportación. Estas proyecciones multiplican por cuatro el volumen marítimo actual y demandan una infraestructura portuaria robusta y resiliente y adaptada a los desafíos climáticos y operacionales del sur austral; en efecto, el crecimiento proyectado de la industria H₂V incrementa la exposición territorial a amenazas climáticas.

En este escenario, la infraestructura portuaria de la **Terminal J.S. Mardones**, ubicada en la ciudad de Punta Arenas, ha sido seleccionada como la alternativa más eficiente para atender esta demanda. La operación contempla la ampliación de 200 metros de frente de atraque, la habilitación de áreas de respaldo para carga asociada a proyectos de H₂V, así como mejoras complementarias en pavimentación, suministro eléctrico y servicios, incluyendo una prueba tecnológica de uso de H₂V en equipos portuarios. Estas intervenciones permitirán fortalecer la capacidad de recepción y operación de naves de mayor calado y equipos de gran tamaño, garantizando mayor eficiencia logística y reforzando la competitividad regional.

La presente consultoría de *“Análisis de Amenazas Naturales y de Cambio climático y Propuesta de Medidas de Mitigación para el Proyecto Magallanes H₂V: Desarrollo de la Infraestructura Portuaria Habilitante (CH-L1191)”*, se enmarca en la Metodología de Evaluación del Riesgo de Desastres y Cambio climático (MERDCC) del Banco Interamericano de Desarrollo (BID, 2019). Su propósito es aplicar las Etapas 1 a 3 de dicha metodología, con el fin de identificar, caracterizar y evaluar las amenazas naturales y climáticas que podrían afectar al puerto y sus áreas de respaldo, así como de determinar la criticidad y vulnerabilidad de la infraestructura.

En coherencia con la Política de Gestión del Riesgo de Desastres (OP-704) y con el Marco de Infraestructura Sostenible del BID (2018), el análisis se orienta a fortalecer la resiliencia climática y operativa del proyecto. En particular, se busca cumplir con los tres primeros pasos de la MERDCC: (1) la identificación y caracterización de amenazas naturales relevantes, tanto geofísicas como climáticas, considerando proyecciones de cambio climático; (2) la evaluación de criticidad mediante el cubo de criticidad para intervenciones costeras, que permite jerarquizar la importancia funcional del puerto frente a escenarios disruptivos; y (3) la elaboración de la narrativa de riesgo, que integra las dimensiones de amenaza, exposición y vulnerabilidad para estimar el nivel de riesgo asociado a eventos extremos.

Estos antecedentes constituyen la base para un diagnóstico integral del riesgo físico del proyecto portuario, en el marco de la planificación de infraestructura habilitante para el hidrógeno verde en Magallanes. La información permitirá orientar medidas de mitigación, adaptación y fortalecimiento institucional en coherencia con la Ley N° 21.364 sobre Gestión del Riesgo de Desastres, la Ley N° 21.455 sobre Cambio climático y las directrices técnicas nacionales e internacionales aplicables. Con ello, el informe busca no solo cumplir con las exigencias metodológicas del BID, sino también contribuir al diseño de un modelo portuario resiliente, capaz de enfrentar los desafíos derivados del cambio climático, las condiciones extremas del sur austral y la creciente relevancia de Magallanes como plataforma logística para la transición energética global.

2. Objetivos de la consultoría

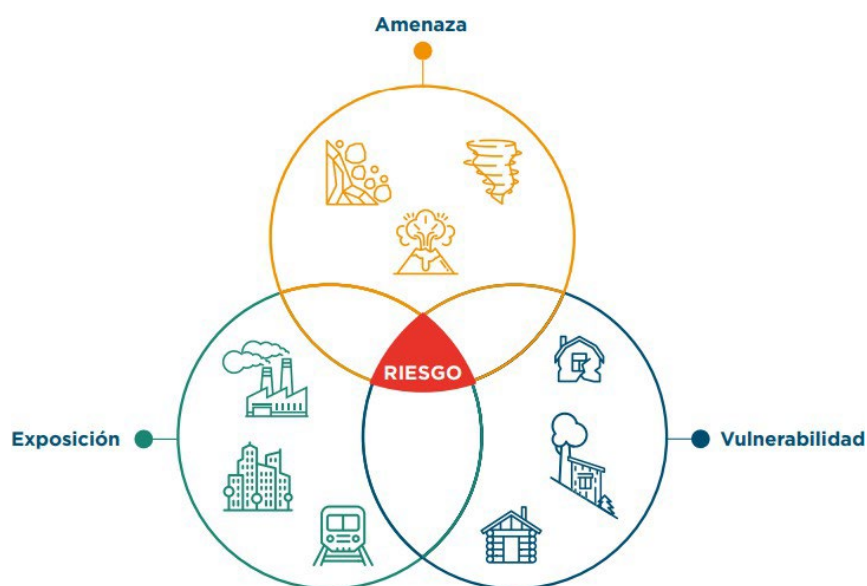
El objetivo de la consultoría es realizar un análisis y evaluación de las **amenazas naturales y de cambio climático**, tanto las geofísicas (sismos, tsunamis) como las climáticas (marejadas, ascenso del nivel del mar, vientos extremos, entre otras), que pueden afectar al Puerto de Magallanes y sus áreas de respaldo, aplicando las **Etapas 1 a 3 de la Metodología de Evaluación de Riesgo de Desastres y Cambio climático (MERDCC)** del BID.

- A. **Identificar y caracterizar las amenazas naturales relevantes** en el área de influencia del proyecto (sismos, tsunamis, marejadas, incremento del nivel del mar, vientos fuertes, entre otras), considerando escenarios de cambio climático. (Paso 1)
- B. **Evaluar la criticidad de la infraestructura portuaria** mediante el cubo de criticidad para intervenciones costeras, atendiendo a los siguientes ejes (Paso 2)
- C. **Elaborar la narrativa de riesgo (Etapa 3 de la MERDCC)**, integrando amenazas, exposición y vulnerabilidad, de manera que se pueda definir el nivel de criticidad y la vulnerabilidad del proyecto en función de las características de la infraestructura y de su contexto territorial, incluyendo la estimación del port downtime asociado a eventos extremos potencialmente exacerbados por cambio climático.

3. Definiciones y metodología

Según la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres, el riesgo de desastres se refiere a “la posibilidad de que se produzcan muertes, lesiones o destrucción y daños en activos en un sistema, una sociedad o una comunidad en un periodo de tiempo específico, determinados (...) en función de la amenaza, la exposición, la vulnerabilidad y la capacidad”. En otras palabras, el riesgo de desastres es la posibilidad que existe únicamente en la interacción de sus tres componentes y no se lo puede describir con base en uno sólo de estos factores (**Figura 1**).

Figura 1. Componentes del riesgo de desastre.



Fuente: “Metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID” (BID, 2019).

El componente de amenaza en este contexto se refiere a fenómenos de origen natural que suponen una amenaza a la población o a la propiedad y que podrían por lo tanto causar daños, pérdidas económicas, lesiones y pérdida de vidas. Se consideran tanto las amenazas geofísicas (terremotos, deslizamientos de tierra, erupciones volcánicas y tsunamis), como las relacionadas con el clima, incluidos los incendios, los huracanes, las inundaciones pluviales, fluviales y costeras, las olas de calor y las sequías.

El componente de exposición se refiere a la coincidencia espacial y temporal de personas o activos (tanto físicos como ambientales) y las amenazas naturales. Por lo tanto, las comunidades, los activos, los servicios o las poblaciones situados dentro del área de influencia de las amenazas naturales se consideran expuestos a esas amenazas y a la posibilidad de sufrir daños.

El componente de vulnerabilidad se refiere a cuán susceptible de ser perjudicada o dañada es una entidad. En el caso de activos, sistemas y personas, son sus características intrínsecas,

internas, individuales y combinadas lo que, por naturaleza, los hace proclives (o, por el contrario, resistentes) a sufrir un daño. En este contexto, la vulnerabilidad se define en términos de la posibilidad de verse afectado por amenazas naturales. Otra dimensión que caracteriza a la vulnerabilidad que puede ser útil considerar se refiere a la

capacidad de recuperación de un sistema, activo o personas/comunidad luego de sufrir un desastre. Asimismo, a más largo plazo, la capacidad de aprender de lo ocurrido (es decir, capacidad adaptativa) puede ser extremadamente beneficiosa.

Por último, cabe destacar que los desastres constituyen la materialización del riesgo (la consecuencia) y que la ausencia de desastres no implica una correspondiente ausencia de riesgo.

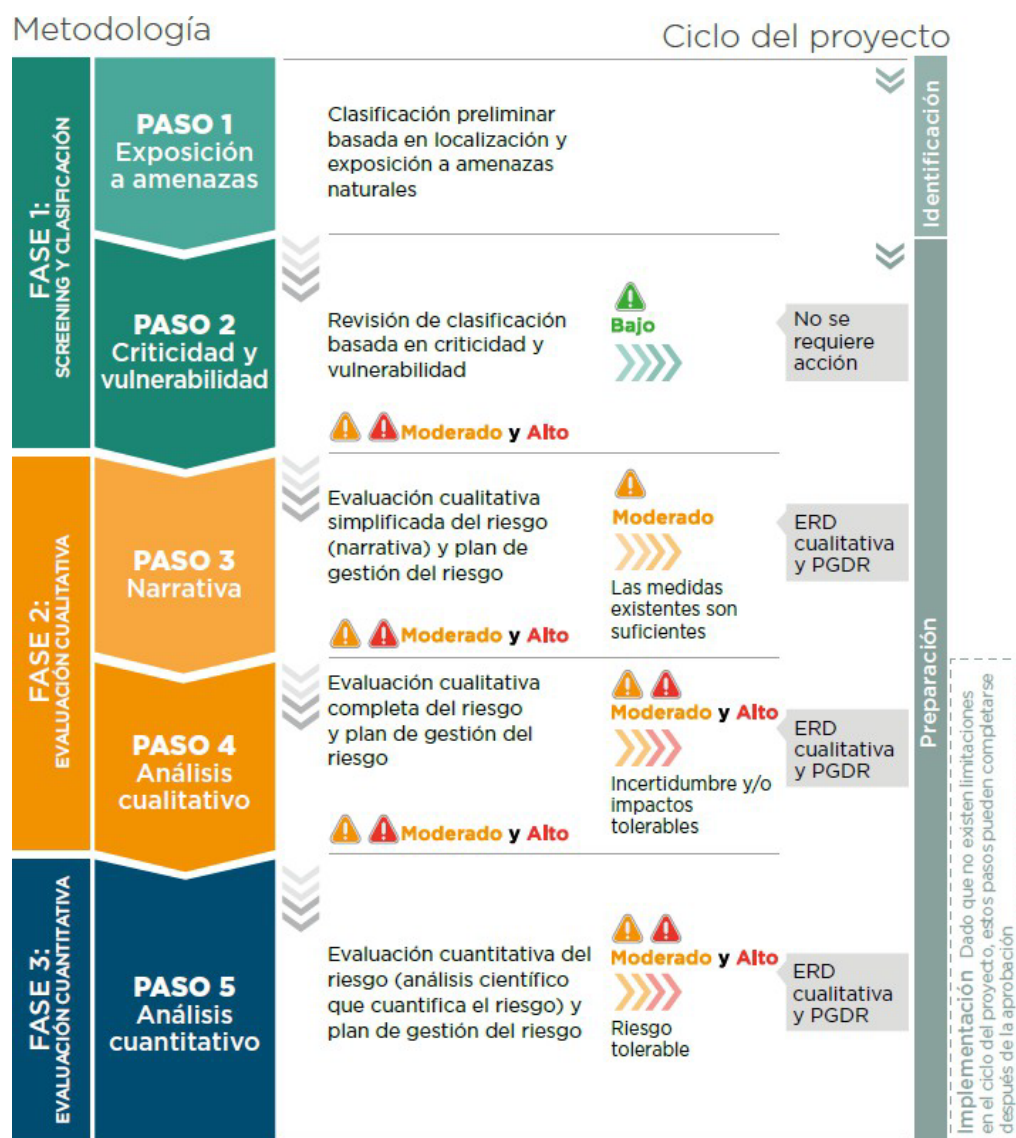
Por otra parte, el MPAS del BID define gestión de riesgo de desastres de la siguiente manera:

Gestión del riesgo de desastres: proceso sistemático que integra la identificación, reducción y transferencia de riesgos, así como la preparación ante posibles desastres, para reducir el impacto de desastres que puedan sobrevenir en el futuro. Incorpora la respuesta de emergencia, la rehabilitación y la reconstrucción para reducir los impactos de desastres ya ocurridos y evitar la reconstrucción de vulnerabilidades.

En este capítulo se aborda el análisis de riesgos de desastre en el área de influencia del proyecto mediante aplicación de la “Metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID” (BID, 2019).

La Metodología consiste en un proceso sistemático e iterativo por fases, representada de forma sintetizada en el diagrama inferior. Cada fase se adapta al nivel de información disponible sobre el proyecto y su área de influencia, agregando valor, resiliencia y sostenibilidad al concepto de proyecto. Se esquematiza en la **Figura 2**.

Figura 2. Fases de la metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID.



Fuente: “Metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID” (BID, 2019).

A continuación, se aplica la Metodología de evaluación de riesgo de desastre a este proyecto. En el marco de este documento solamente resulta evaluable el riesgo hasta el Paso 3: Evaluación cualitativa simplificada del riesgo (narrativa) y Plan preliminar (lineamientos) de gestión del riesgo.

4. Descripción del proyecto y delimitación de su área de influencia

El proyecto consiste en el mejoramiento de las instalaciones del Puerto José de los Santos Mardones, para contar con mejores condiciones de seguridad en sus operaciones marítimas en el marco del Plan de Acción Hidrógeno Verde 2023 – 2030 del Ministerio de Energía. Al respecto, el proyecto tiene como objetivo el hacer más eficientes las operaciones actuales y futuras.

4.1. Fuentes de información

La descripción del proyecto que se incluye en este capítulo ha sido realizada a partir de información extractada de las siguientes fuentes de información disponibles:

Tabla 1. Otros estándares y documentos-marco de aplicación.

Fuentes de información disponibles sobre el proyecto
Capítulo 1 – Introducción (Estudio de Impacto Ambiental y Social EIAS). PROYECTO PARA EL APOYO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO MAGALLANES: DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA HABILITANTE - CHILE - CH- L119. Consultora Mejores Prácticas
Capítulo 2 – Antecedentes generales (Estudio de Impacto Ambiental y Social EIAS). PROYECTO PARA EL APOYO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO MAGALLANES: DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA HABILITANTE - CHILE - CH- L119. Consultora Mejores Prácticas
Capítulo 3 – Descripción de Proyecto (Estudio de Impacto Ambiental y Social EIAS). PROYECTO PARA EL APOYO DE LA IMPLEMENTACIÓN DEL PROYECTO MAGALLANES: DESARROLLO DE LA INFRAESTRUCTURA PORTUARIA HABILITANTE - CHILE - CH- L119. Consultora Mejores Prácticas

4.2. Localización

Las partes, acciones y obras físicas que contempla el Proyecto se localizarán en la comuna de Punta Arenas, Provincia de Magallanes, Región de Magallanes; aquí el desarrollo portuario, se asocia a su ubicación estratégica en el Estrecho de Magallanes, un punto clave de conexión entre los océanos Atlántico y Pacífico, antes de la apertura del Canal de Panamá. Esta posición ha impulsado el desarrollo de infraestructura portuaria relevante. El Muelle J. S. Mardones, se ubica en el sector de Bahía Catalina y fue construido por el Estado de Chile entre los años 1994 y 1997. El Muelle tiene como actividad principal la transferencia de carga y los servicios a las naves portacontenedores. También realiza la atención de buques de pesca industrial, naves menores y cargueros, los que concurren con niveles menores de carga; pero con una mayor cantidad de recaladas, y en temporada turística atiende eventualmente a naves de pasajeros internacionales.

En la Figura 3 se presenta la ubicación general del Proyecto. Respecto a la planificación territorial, el Proyecto se emplaza dentro del límite urbano de Punta Arenas, específicamente en la zona ZAP-1: Zona de Actividades Productivas 1 (Zona Sector Portuario) (**Figura 3**). Por otro lado, el área de estudio se caracteriza por su condición urbana, que incluye zonas residenciales, pero que se encuentra fuertemente marcada por la presencia de grandes

empresas industriales y portuarias, así como de empresas de logística, terrenos destinados a bodegas, almacenamiento de carga, maquinaria y dependencias de la Zona Franca.

La población del área de estudio asciende a 5.126 personas total; con un índice de masculinidad de 99,6; evidenciando una leve proporción mayor de mujeres (50,1%) que de hombres (49,9%). Posee una presencia reducida de población extranjera, destacando principalmente personas provenientes de Colombia y Argentina, aunque con porcentajes inferiores al 1% del total.

La población económicamente activa del área de estudio representa aproximadamente el 61,9% del total, con predominio masculino (57,2%) sobre femenino (42,8%). Del total de la población, un 79,8% desarrolla actividades en el sector terciario, un 9,1% en el sector secundario y un 4,7% en el sector primario, mientras que un 6,4% no declaró rama de actividad.

En términos de vivienda, se encuentran un total de 1.503 viviendas en su mayoría de materialidad de tabique forrado (84,9%); dotadas de una infraestructura eléctrica con una cobertura consolidada y dependiente del sistema de distribución regional. Respecto al suministro de agua potable, presentan cobertura prácticamente universal a través de la red pública, gestionada por Aguas Magallanes S.A. Un porcentaje mínimo utiliza pozo o norias (0,1%).

El área protegida más cercana al Proyecto corresponde al Humedal Urbano Tres Puentes”, distante a 1,6 km del Muelle Mardones. Dentro de esta, se encuentra el Bien Nacional Protegido del mismo nombre. Esta área protegida se encuentra dentro del área de estudio, pero fuera del área del Proyecto. En términos de los servicios ecosistémicos, no se registran actividades productivas dependientes de la extracción o uso directo de recursos naturales, como la pesca artesanal.

Figura 3. Localización del proyecto. (A) Región de Magallanes y la Antártica Chilena. (B) Comuna de Punta Arenas. (C) Polígono proyecto.



Fuente: Elaboración propia.

El Puerto José de los Santos Mardones corresponde a un muelle de penetración de tipo transparente, conformado por una estructura principal que incluye tres sitios de atraque. El acceso al muelle se realiza mediante un puente de hormigón armado apoyado sobre pilotes de acero, con una longitud aproximada de 130 metros y un ancho de 10 metros, que conecta con un cabezo de 150 metros de largo por 20 metros de ancho, dispuesto perpendicularmente al puente y paralelo a la línea de costa, con una profundidad operativa de 14 metros. Complementariamente, el terminal dispone de cuatro boyas de apoyo que facilitan las maniobras de atraque y amarre de las embarcaciones.

El muelle cuenta con tres frentes de atraque operativos: un frente principal de 150 metros, destinado al atraque multipropósito; un sitio lateral de 60 metros; y un sitio interior de 70 metros, que permiten atender distintos tipos de naves, incluyendo portacontenedores, embarcaciones menores y cargueros. Además, el terminal dispone de una explanada de aproximadamente 240.000 m², donde se ubican las áreas pavimentadas para acopio de contenedores -con suministro eléctrico para unidades reefer-, bodegas de almacenamiento, patio de camiones y dependencias administrativas y de servicios (EPAustral, Aduanas, y otros). Asimismo, cuenta con un área adicional de 130.000 m² no pavimentada, destinada al manejo de carga sobredimensionada u otros usos operativos estratégicos.

Figura 4. Infraestructura actual Muelle J. S. Mardones.



Fuente: Epa Austral. Memoria Explicativa.

4.3. Justificación de la necesidad del proyecto

El desarrollo del proyecto se vincula fuertemente con el Plan de Acción del Hidrógeno Verde, que busca establecer las bases para el desarrollo de una industria sostenible en Chile, promoviendo la transición hacia energías limpias y la creación de empleos de calidad. El Gobierno de Chile presenta un enfoque estratégico para el hidrógeno verde, alineado con la Política Energética Nacional y la Estrategia Nacional de Hidrógeno Verde. A través del Ministerio de Energía, quien define un rol clave en el seguimiento estratégico y elaboración de hojas de ruta regionales, se destacan tres protagonistas de este desarrollo. Estas son: Biobío, Magallanes y Antofagasta. La ampliación de la capacidad del puerto José de los Santos Mardones se enmarca en el objetivo de desarrollo de infraestructura habilitante de este plan, donde se plantea la necesidad de contar con infraestructura adecuada para la industria del H2V.

El Puerto José de los Santos Mardones, ubicado en Punta Arenas y administrado por la Empresa Portuaria Austral (EPAustral), constituye una infraestructura estratégica para la conectividad marítima y logística de la Región de Magallanes. Su operación se orienta principalmente a la transferencia de carga general y a la atención de naves portacontenedores, además de embarcaciones menores y cruceros internacionales durante la temporada turística. En este

contexto, su rol resulta clave para el desarrollo del comercio regional, la integración territorial y el fortalecimiento de las actividades portuarias en el extremo sur del país.

El Proyecto Magallanes H₂V: desarrollo de la infraestructura portuaria habilitante, impulsado por EPAustral (de propiedad 100% estatal), tiene como propósito mejorar la operación del muelle Mardones, aumentando su capacidad mediante la extensión de la superficie de atraque para atender la demanda futura y mejorar las condiciones de seguridad en sus operaciones marítimas. Esta iniciativa se enmarca en un convenio entre EPAustral y el Gobierno Regional de la región de Magallanes (GORE Magallanes) orientado a fortalecer la infraestructura portuaria pública para potenciar la competitividad de Magallanes, mejorar los servicios logísticos vinculados a la industria antártica y de cruceros, y generar las condiciones necesarias para el desarrollo de infraestructura habilitante asociada a la instalación de la industria de Hidrogeno Verde.

4.4. Situación del proyecto con respecto a los requisitos del SEIA

En el caso del Proyecto, en el año 2024, el titular elevó Consultas de Pertinencia de Ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental ante SEA de la Región de Magallanes y Antártica Chilena respecto de las dos alternativas que se contemplan en la extensión del cabezo del muelle. En ambos casos el pronunciamiento del SEA regional fue *“...es dable concluir que no se configura la hipótesis de ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental prevista en el literal f) del artículo 10 de la Ley N°19.300 y en el literal f.1.) del artículo 3 del Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, ni tampoco presenta características que permitan establecer la configuración de alguna otra de las tipologías de ingreso al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental contempladas en las citadas normativas”*. Por lo tanto, se considera que las alternativas de Proyecto evaluadas no requieren el ingreso al SEIA en forma obligatoria previo a su ejecución.

4.5. Alternativas estudiadas

Tal como se ha mencionado en las secciones anteriores, se analizaron dos alternativas para la ampliación del muelle, excluyentes entre sí. La primera corresponde a la extensión del cabezo del muelle 200 metros lineales; transformando así, su configuración actual de forma de “L” a una forma en “T”, rectificando también el ancho de su actual puente de acceso en aproximadamente 5 metros. La segunda alternativa corresponde a la extensión del cabezo en 200 metros lineales e incorporando un nuevo puente de acceso en el extremo sur del cabezo proyectado, así como el estribo respectivo.

Figura 5. Alternativas consideradas.



Fuente: EIAS consultora Mejores Prácticas.

Tras el análisis técnico y económico efectuado por la consultora RFA Ingenieros y la aplicación de un análisis multicriterio, la Empresa Portuaria Austral (EPAustral) seleccionó la **Alternativa N° 2** como opción definitiva para desarrollo a nivel de ingeniería básica. No se cuenta con estimaciones desagregadas de capacidad para las dos alternativas de implementación analizadas. Sin embargo, es razonable suponer que la alternativa con dos puentes de acceso podría ofrecer una mayor eficiencia operativa que aquella con uno solo, especialmente si se considera que el terminal proyecta atender carga sobredimensionada como aspas eólicas, cuyas operaciones de descarga y transporte al interior del recinto portuario son complejas y más lentas.

4.6. Principales componentes y dimensionamiento

Las obras permanentes corresponden a la habilitación de una nueva zona de acopio, el reforzamiento de la losa existente junto a la adquisición e implementación de grúas móviles, y la ampliación del muelle. A continuación, en las siguientes secciones, se describe cada una de estas obras en detalle.

- **Habilitación de una nueva zona de acopio:** destinada a carga sobredimensionada corresponde principalmente a el mejoramiento de 13,7 no pavimentadas ha en el predio utilizado por el puerto. El proyecto contempla una explanada pavimentada para el acopio principalmente de cargas contenedorizada, un mejoramiento y habilitación del patio de acopio para cargas de proyecto eólicas y vías de circulación pavimentadas.

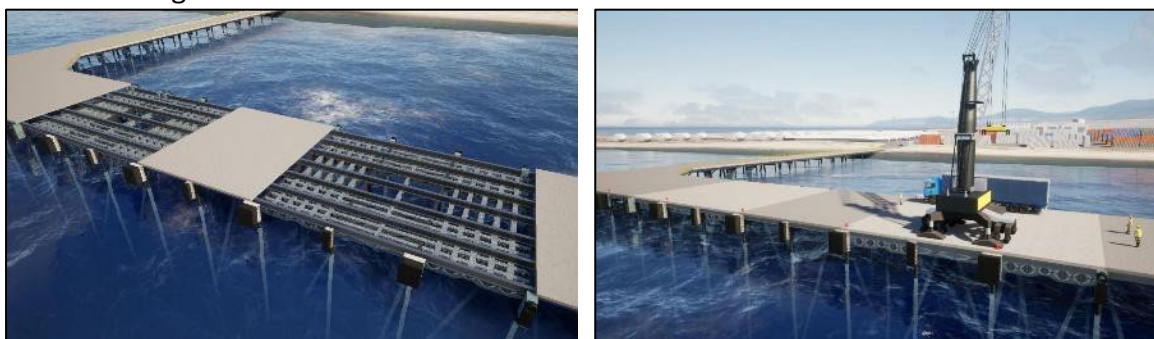
Figura 6. Zona a pavimentar.



Fuente: EIAS consultora Mejores Prácticas.

- **Reforzamiento de losa existente y adquisición de grúas móviles:** El proyecto consiste en la construcción y habilitación de obras para incrementar la capacidad estructural de la losa de rodado del muelle existente. Esto se está realizando actualmente mediante el refuerzo bajo la losa, principalmente con la instalación de vigas de acero complementarias. El objetivo principal es permitir la operación de grúas móviles para mejorar la transferencia de graneles, contenedores y carga fraccionada, de manera de disminuir los tiempos de carga y descarga, así como facilitar el desplazamiento de cargas pesadas. Este proyecto busca atender el déficit de infraestructura actual y prepararse para el aumento previsto de cargas, incluyendo graneles de la nueva planta de cementos y cargas de proyectos eólicos relacionadas con la generación de hidrógeno verde (**Figura 7**).

Figura 7. (Izquierda) Representación del reforzamiento de losas. (Derecha) Representación de las nuevas grúas en funcionamiento.



Fuente: EPAUSTRAL (2024). Mejoramiento del sistema portuario para potenciar el desarrollo de Magallanes y de la Antártica chilena, 2023-2028. Propuesta de convenio con GORE Magallanes.

Las grúas a adquirir serán de tipo Liebherr LHM 280 o similar, y cada una de ellas tendrá una capacidad de 80 toneladas y un alcance de 40 m. Se estima que éstas pesarán entre 170 y 240 toneladas.

- **Ampliación del muelle:** Extensión del cabezo del muelle en 200 metros lineales y la incorporación de un nuevo puente de acceso en el extremo sur del cabezo proyectado, así como el estribo respectivo (**Figura 8**).

Figura 8. Ampliación del muelle.



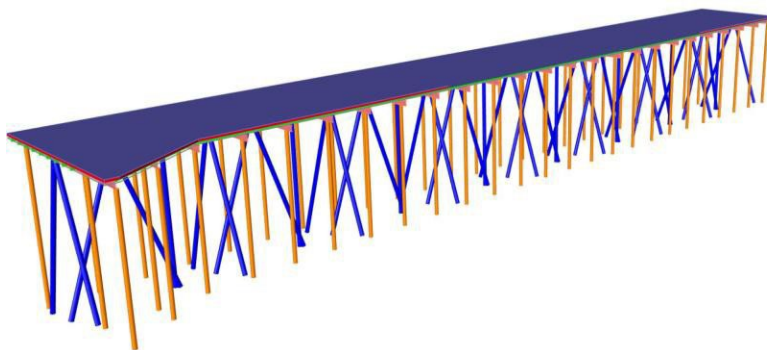
Fuente: Elaboración propia en base a información proporcionada por el titular.

Las modificaciones consisten en la ampliación del muelle existente, y, por lo tanto, las características de estos se asemejarán a la infraestructura actual. El cabezo proyectado posee unas dimensiones de su tablero de 200 [m] de largo, con un ancho de 25 m. Se encuentra apoyado en pilotes de sección tubular (diámetro exterior $\phi 24''$ a $\phi 28''$), y vigas transversales y longitudinales del tipo IE. El tablero es de hormigón armado, y tiene 40 [cm] de espesor. Posee defensas y bitas de amarre en 2 de sus caras: la frontal que da hacia el mar, y la cara lateral que se une al puente de acceso.

A continuación, se muestra una imagen esquemática con la estructuración del cabezo del muelle, donde arriba en azul se muestra el tablero, soportado por las vigas longitudinales en

verde, las que a su vez se encuentran apoyadas en las vigas transversales en rosado. A las vigas transversales van fijados los pilotes, de color azul y naranja en la imagen (ver **Figura 9**).

Figura 9. Modelo de estructuración de cabezo proyectado para ampliación del muelle.



Fuente: RFA Ingenieros (2024). Ingeniería básica ampliación muelle José de Los Santos Mardones, Punta Arenas. Memoria Explicativa.

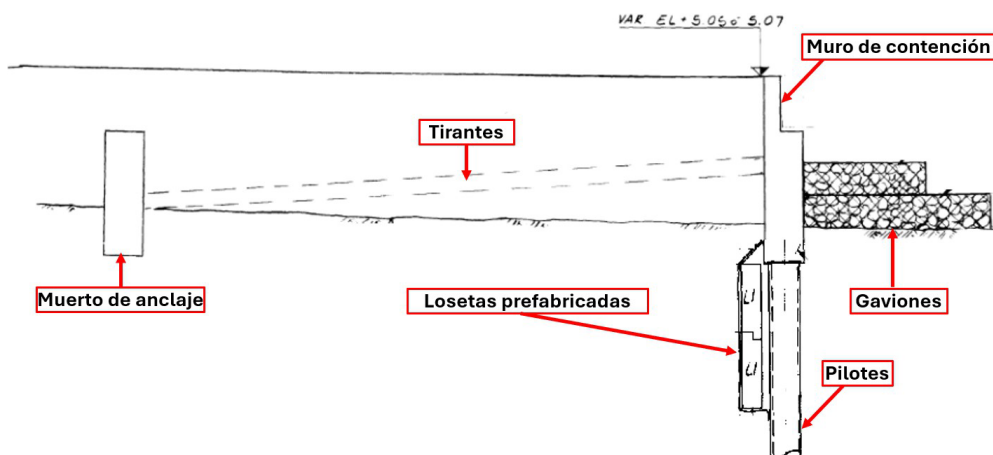
Para proteger los pilotes metálicos de la corrosión del agua salada y del estrés ambiental se considera la instalación de jackets.

Sobre la estructura metálica piloteada se dispondrán las vigas de acero (trasversales y longitudinales) anteriormente mencionadas, las que irán ancladas losas de hormigón armado. Las losas serán prefabricadas y montadas en terreno. Se consideran losas de hormigón armado prefabricado, junto a pavimentos de rodado de hormigón, elementos de bitas y defensas elastoméricas. Las defensas, correspondientes a componentes de caucho diseñados para resistir el desgaste, se instalarán en la cara frontal y una de las caras laterales del cabezo proyectado. De manera complementaria, para permitir el amarre de barcos y buques de distintas envergaduras, se agregarán bitas de 25, 70 y 120 toneladas.

Se considera además la construcción de un puente de acceso desde tierra al cabezo. Este estará construido con los mismos materiales y las mismas estructuras que el cabezo, es decir, vigas longitudinales, vigas transversales, pilotes, jackets, losa del tablero, defensas y bitas.

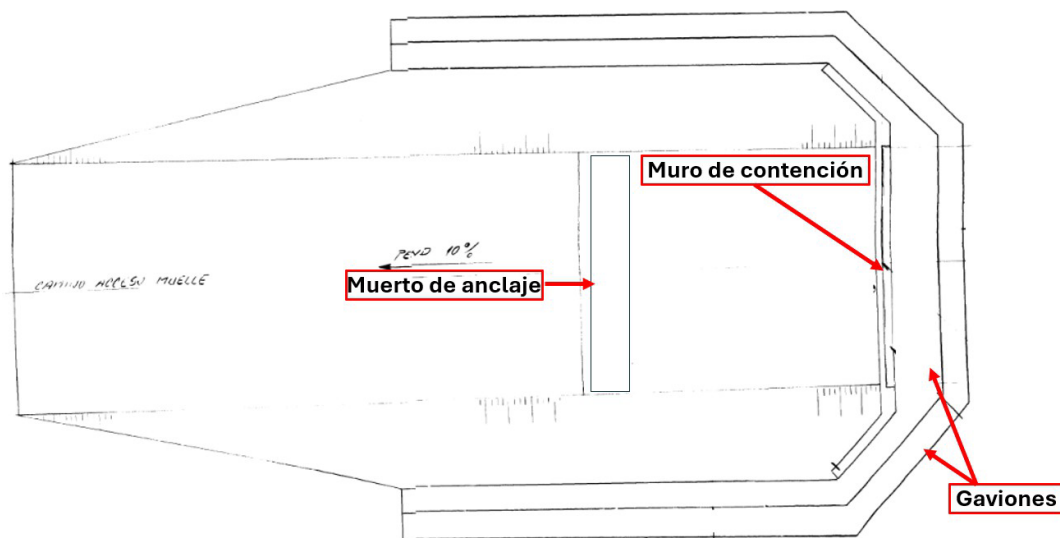
También se considera la construcción de un estribo, la cual es una estructura que tiene como función soportar la carga vertical del puente al llegar al nivel de terreno, y también soportar las cargas de los vehículos que transiten sobre este. En este caso, el estribo está conformado por un muro de contención, pilotes, losetas prefabricadas y gaviones, y un muerto de anclaje unido al muro de contención mediante tirantes de acero. Las **Figura 10** y **Figura 11** se muestra imágenes esquemáticas con la estructuración del estribo.

Figura 10. Elevación esquemática de elementos estructurales del estribo.



Fuente: RFA Ingenieros (2024). Ingeniería básica ampliación muelle José de Los Santos Mardones, Punta Arenas. Memoria Explicativa.

Figura 11. Planta esquemática (derecha) de elementos estructurales del estribo.



Fuente: RFA Ingenieros (2024). Ingeniería básica ampliación muelle José de Los Santos Mardones, Punta Arenas. Memoria Explicativa.

Figura 12. Vistas de ampliación Muelle Mardones.



Fuente: EPAUSTRAL (2024). Mejoramiento del sistema portuario para potenciar el desarrollo de Magallanes y de la Antártica chilena, 2023-2028. Propuesta de convenio con GORE Magallanes.

4.7. Instalaciones auxiliares

Las obras temporales implicadas en el proyecto consisten principalmente en una instalación de faenas típica de un proceso constructivo, con instalaciones y/o construcciones de carácter provisorio, necesarias para el adecuado funcionamiento de las actividades administrativas y del personal. Estas instalaciones provisorias consisten en:

- Cierros perimetrales provisorios, para el control de acceso a las faenas.
- Instalación de señaléticas.
- Baños químicos provisorios.

- Vestidores y comedores para el personal.
- Oficinas administrativas.
- Implementación de pañol provisorio de herramientas.
- Otros que la empresa contratista considere necesario, para el cumplimiento normativo.

Cabe señalar, que estas instalaciones cumplirán con lo establecido en el D.S. N°594/2000 “Aprueba Reglamento Sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo” del Ministerio de Salud.

El lugar definitivo donde se emplazará la instalación de faenas dependerá de la empresa contratista que se adjudique el contrato, previa aprobación del mandante, dentro de las instalaciones portuarias actuales, tomando en consideración tanto el muelle como la plataforma terrestre.

4.8. Consumo de materiales y energía

Durante la fase de construcción, el proyecto contempla el uso de diversos suministros, materiales y fuentes de energía necesarios para la ejecución de las obras en los distintos sectores del puerto. La energía eléctrica se obtendrá mediante una conexión provisoria al tendido general existente, complementada con generadores eléctricos en caso de requerirse apoyo adicional. El combustible diésel será suministrado desde la ciudad de Punta Arenas para operar el martinete, grúas y demás maquinarias, siendo almacenado en tambores adecuados o abastecido mediante camión estanque; el combustible para vehículos livianos se obtendrá desde los servicentros locales. El agua potable se conectará de forma temporal al sistema existente del puerto, mientras que el agua industrial será provista por la red pública de la empresa sanitaria local. El transporte de insumos y residuos será realizado por terceros autorizados. En cuanto a los materiales de construcción, se emplearán principalmente acero, áridos, gaviones, hormigón y pilotes, todos ellos acopiados en depósitos temporales dentro del recinto portuario. La ejecución de las obras involucrará el uso de camiones, grúas, embarcaciones y un martinete, además de pinturas y recubrimientos epóxicos anticorrosivos, clasificados como sustancias inflamables.

Durante la fase de operación, el consumo de suministros será acotado y se apoyará en las instalaciones existentes del puerto. La energía eléctrica y el agua potable se obtendrán desde las conexiones ya disponibles en el recinto, mientras que el agua industrial será suministrada por la red pública local. El uso de combustibles se destinará principalmente al funcionamiento de las grúas diésel y al suministro de rancho de combustible a las naves mediante camiones aljibes o tambores, de acuerdo con los procedimientos operativos habituales. No se contempla la habilitación de campamentos ni otras instalaciones adicionales, dado que el proyecto se integra a las operaciones portuarias regulares del Terminal J.S. Mardones.

4.9. Características técnicas de la construcción y métodos constructivos

El Proyecto se organiza en dos fases principales: Fase de Construcción y Fase de Operación, ejecutadas de manera secuencial. La primera considera la materialización de obras civiles necesarias para fortalecer y ampliar la infraestructura portuaria existente. La segunda corresponde a la entrada en régimen de operación del terminal con la infraestructura mejorada y ampliada, incrementando la capacidad logística y técnica del puerto.

4.10. Etapas del proyecto y cronograma

4.10.1. Fase de Construcción

La fase de construcción comprende tres etapas.

- La primera corresponde a la habilitación de una nueva zona de acopio de carga sobredimensionada, consistente en el mejoramiento y adecuación de aproximadamente 14,6 hectáreas del predio portuario. Las obras consideran nivelación, pavimentación, drenaje y acondicionamiento del área destinada al acopio temporal de componentes industriales de gran tamaño, como aspas eólicas y materiales pesados, dentro del perímetro del puerto.
- La segunda etapa consiste en el reforzamiento de la losa del muelle existente y la incorporación de grúas móviles portuarias. Esta intervención requiere la demolición parcial del muelle existente. Posteriormente, se realiza el refuerzo mediante la instalación de vigas de acero inferiores, para posteriormente restituir la losa de hormigón. El objetivo es permitir la operación de grúas móviles tipo Liebherr LHM 280 o similares.
- La tercera etapa corresponde a la ampliación del muelle, mediante la extensión del cabezo existente en 200 metros lineales y la construcción de un nuevo puente de acceso en el extremo sur. Las obras consideran la hinca de pilotes tubulares de acero de gran diámetro mediante martinete diésel, el montaje de vigas longitudinales y transversales, la instalación de losas prefabricadas de hormigón armado de 40 cm de espesor, defensas elastoméricas y bitas de amarre de distintas capacidades (25, 70 y 120 toneladas).

4.10.2. Fase de Operación

La fase de operación se iniciará una vez finalizadas las obras principales y contempla la puesta en funcionamiento de las nuevas instalaciones portuarias. La nueva zona de acopio permitirá el almacenamiento temporal de cargas de diversa naturaleza, destacando la industria cementera y la del hidrógeno verde, mediante la recepción de insumos asociados a la construcción y mantenimiento de parques eólicos, carreteras e instalaciones industriales. Por ejemplo, la habilitación de la nueva zona de acopio de carga sobredimensionada permitirá al puerto almacenar aspas para molinos eólicos, los cuales pueden tener una longitud de más de 80 m.

El reforzamiento de la losa existente y la habilitación de grúas móviles portuarias permitirá aumentar la capacidad de transferencia del puerto desde 580.000 toneladas a aproximadamente 1.380.000 toneladas anuales, optimizando los tiempos de carga y descarga. En esta fase, las operaciones comprenderán actividades de transferencia, estiba, desestiba, almacenamiento y abastecimiento, bajo los procedimientos y controles ordinarios establecidos por las autoridades competentes.

La ampliación del muelle permitirá movilizar 1,1 millones de toneladas adicionales por año, alcanzando una capacidad total cercana a los 2,5 millones de toneladas anuales. De este modo, el Terminal J.S. Mardones aumentará su capacidad para atender naves de mayor calado y volumen, contribuyendo a la atención de la demanda futura vinculada a los desarrollos industriales y logísticos regionales.

4.10.3. Fase de Cierre

El proyecto no contempla una fase de cierre o abandono, considerando una vida útil indefinida. Se realizarán actividades de mantenimiento y modernización de equipos para prolongar la vida útil y asegurar la continuidad operativa del Puerto J.S. Mardones.

Tabla 2. Fecha de inicio y término de las fases del Proyecto.

Fase	Etapas		Fecha Estimada
Construcción	Mejoramiento zona de acopio de carga sobredimensionada	Inicio	2026
		Término	2027
	Reforzamiento de losa existente y adquisición de grúas móviles	Inicio	Ya comenzado
		Término	2026
	Ampliación del muelle	Inicio	2025
		Término	2027
Operación	Mejoramiento zona de acopio de carga sobredimensionada	Inicio	2027
		Término	No aplica
	Reforzamiento de losa existente y adquisición de grúas móviles	Inicio	2026
		Término	No aplica
	Ampliación del muelle	Inicio	2027
		Término	No aplica

Fuente: Elaboración propia en base a RFA Ingenieros (2024). Ingeniería básica ampliación muelle José de Los Santos Mardones, Punta Arenas. Memoria Explicativa.

4.11. Mano de obra

El requerimiento de mano de obra para la fase de construcción del Proyecto se estima en 140 trabajadores, considerando mano de obra local y especializada. Para mantener la operación

portuaria se ha estimado que se requieren aproximadamente 27 funcionarios, 12 operarios y 20 personas de servicios externos como Aduana, Dirección del Territorio Marítimo, SAG y Servicio de salud, totalizando 59 trabajadores. De manera adicional, se consideran subcontrataciones para la estiba/desestiba y el transporte (camioneros).

4.12. Costo

La inversión alcanza un total de US\$86 millones.

5. Marco de actuación

5.1. Marco del BID

A continuación, se resumen los principales requisitos establecidos por el **Marco de Política Ambiental y Social (MPAS)** del BID (**Tabla 3**), el cual está alineado con las mejores prácticas internacionales y con los sistemas de salvaguardas ambientales y sociales más avanzados de la Banca Multilateral, incluyendo los del Banco Mundial.

El MPAS incluye una declaración de política que detalla el alcance del marco; además de los roles, responsabilidades y compromisos del Banco. A esta declaración de política la siguen **diez Normas de Desempeño Ambiental y Social (NDAS)** que describen los requisitos para los prestatarios y los proyectos. Se extractan a continuación.

Tabla 3. Alcance y enfoque de las NDAS.

NDAS relacionada	Principales requisitos
NDAS 1 Evaluación y gestión de los riesgos e impactos ambientales y sociales	Identificación y Evaluación de Riesgos de Desastres: Los proyectos deben identificar y evaluar los riesgos de desastres naturales, incluyendo terremotos, inundaciones, huracanes, deslizamientos de tierra, entre otros. La evaluación debe considerar cómo los desastres naturales pueden afectar el proyecto y cómo el proyecto podría influir en la vulnerabilidad al riesgo de desastres de las áreas circundantes. Preparación y respuesta ante situaciones de emergencia. El SGAS establecerá y mantendrá un sistema de preparación y respuesta ante situaciones de emergencia con el fin de que el prestatario, con la colaboración de aquellas terceras partes pertinentes que corresponda y de los organismos y autoridades gubernamentales pertinentes, esté preparado para responder de manera adecuada a situaciones accidentales y de emergencia vinculadas con el proyecto, a fin de prevenir y mitigar cualquier perjuicio para las personas o el medio ambiente.
NDAS 4 Salud y seguridad de la comunidad	Requisitos relativos a la resiliencia a amenazas naturales y el cambio climático: El prestatario identificará y evaluará los riesgos para el proyecto que puedan derivarse de amenazas naturales, como terremotos, sequías, deslizamientos o inundaciones, incluidos los causados o exacerbados por el cambio climático, en función de lo cual determinará medidas adecuadas de resiliencia y adaptación a desastres y el cambio climático que se incluirán en su diseño, construcción y

NDAS relacionada	Principales requisitos
	operación. El proyecto incluirá las medidas necesarias para reducir a niveles aceptables el riesgo relacionado con desastres y el cambio climático. El prestatario también evitará o minimizará los riesgos provocados por amenazas naturales o cambios en el uso del suelo a los que las actividades del proyecto puedan contribuir. Asimismo, el prestatario podría verse obligado a evaluar el riesgo del proyecto relacionado con amenazas naturales y el cambio climático, en función de lo cual determinará medidas adecuadas de resiliencia y adaptación a desastres y el cambio climático que se incluirán en su diseño, construcción y operación. El proyecto incluirá las medidas necesarias para reducir a niveles aceptable el riesgo relacionado con desastres y el cambio climático. El prestatario también evitará o minimizará los riesgos provocados por amenazas naturales o cambios en el uso del suelo a los que las actividades del proyecto puedan contribuir. Preparación y respuesta ante emergencias. El prestatario también brindará asistencia y colaboración a las personas afectadas por el proyecto, los organismos gubernamentales locales y otras partes pertinentes en sus preparativos para responder eficazmente a situaciones de emergencia, en especial cuando la participación y colaboración de esos grupos sean necesarias para responder a dichas situaciones de emergencia.

5.2. Marco nacional

A continuación, se presentan los principales instrumentos internacionales ratificados por el Estado de Chile (**Tabla 4**) que resultan pertinentes para la gestión del riesgo de desastres y, específicamente, para el ámbito de la salud y seguridad de la comunidad (**NDAS 4**) presentado anteriormente. Cada convenio es un marco de referencia normativo o político que orienta la formulación de políticas públicas, la planificación territorial y la implementación de medidas preventivas y de respuesta frente a amenazas naturales. Estos instrumentos establecen compromisos internacionales en materia de reducción del riesgo, protección ambiental, derechos humanos, cooperación ante emergencias y participación pública.

Tabla 4. Convenios internacionales vigentes en Chile.

NDAS relacionada	Convenios internacionales ratificados por el Estado Chileno
NDAS 4 Salud y seguridad de la comunidad	Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015-2030). Chile lo adoptó y lo implementa vía la Política Nacional para la RRD 2020-2030 (DS Interior N°434/2020) y su Plan Estratégico (Res. Exenta N°1392/2021) Convención Internacional sobre la Eliminación de todas las Formas de Discriminación Racial (1965). DS RR.EE. N°747/1971 (DO 12-nov-1971). Convención de las Naciones Unidas sobre la Diversidad Biológica (CBD). DS RR.EE. N°1.963/1994 (pub. DO 06-may-1995). 27-MAY-1989/ Decreto 326/ Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (PIDESC). DS RR.EE. N°326/1989 (DO 27-may-1989).

NDAS relacionada	Convenios internacionales ratificados por el Estado Chileno
	Convenio de Basilea sobre Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos. DS RR.EE. N°685/1992 Convención Marco de Las Naciones Unidas sobre El Cambio climático (CMNUCC/UNFCCC). DS RR.EE. N°123/1995. Convención de las naciones unidas de lucha contra la desertificación en los países afectados por sequia grave o desertificación (UNCCD). DS RR.EE. N°2.065/1998. Convenio OPRC 1990 (Cooperación, Preparación y Lucha contra la Contaminación por Hidrocarburos, OMI). DS RR.EE. N°107/1998 Protocolo de Kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático y sus anexos a y b. DS RR.EE. N°349/2005. Convenio de Rotterdam (consentimiento fundamentado previo a ciertas sustancias peligrosas). DS RR.EE. N°37/2005 Reglamento Sanitario Internacional (RSI 2005, OMS). DS MINSAL N°230/2008 (internaliza el RSI 2005). Acuerdo de París (CMNUCC), adoptado en la vigésimo primera reunión de la conferencia de las partes de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. DS RR.EE. N°30/2017 (DO 23-may-2017). Plataforma Global para la Reducción del Riesgo de Desastres (Global Platform for Disaster Risk Reduction). Es el foro mundial bienal organizado por la Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR) para discutir y promover acciones para reducir el riesgo de desastres a nivel global. Acuerdo de Escazú (Acuerdo Regional sobre Acceso a la Información, Participación Pública y Justicia Ambiental en ALC). DS RR.EE. N°209/2022 (DO 25-oct-2022).

A partir del marco anterior, se analiza la pertinencia jurídica internacional aplicable a riesgo de desastre acuerdo con la naturaleza del terminal terminal H₂V/portuario. Se han definido tres niveles de consideración: Nivel Alto, influye directamente en la gestión o evaluación de amenazas naturales (sismos, tsunamis, marejadas, temporales, precipitaciones extremas, deslizamientos, etc.) y su integración al diseño, planificación o gobernanza del proyecto terminal H₂V/portuario; Nivel medio, Incluye los instrumentos que, si bien no abordan directamente las amenazas naturales, resultan relevantes por su influencia en los riesgos en cascada o efectos secundarios derivados de eventos naturales; Nivel Bajo, agrupa los instrumentos cuyo alcance temático o sectorial no guarda relación significativa con la evaluación de amenazas naturales ni con los posibles efectos en cascada esperados en el proyecto portuario.

Tabla 5. Síntesis de pertinencia y aplicabilidad del marco internacional para el proyecto.

Instrumento	Pertinencia	Fundamentación específica para el proyecto portuario de hidrógeno verde y portuario en general	Implicancias prácticas para el estudio de riesgo
Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015-2030)	Alta	Marco rector de GRD; alinea prevención-preparación-respuesta-recuperación y la coordinación con SINAPRED/SENAPRED.	Estructurar la identificación de peligros (H ₂ : incendio/explosión; sismo/tsunami; marejadas), indicadores, gobernanza y mejora continua.
Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático (CMNUCC)	Alta	El cambio climático modula amenaza costera (nivel del mar, oleaje extremo) que afecta muelles, diques, almacenamiento y seguridad operativa.	Incorporar escenarios climáticos y criterios de diseño resiliente y de continuidad operacional para infraestructura crítica.
Acuerdo de París (CMNUCC)	Alta	Enfatiza resiliencia y adaptación a riesgos climáticos y desastres naturales.	Sustenta el análisis de vulnerabilidad ante eventos extremos y la necesidad de infraestructura portuaria resiliente al clima
Convenio OPRC 1990 (OMI)	Media	Aunque orientado a contaminación por hidrocarburos, se activa si una amenaza natural provoca rupturas o vertimientos marítimos.	Su aplicación es clave en escenarios de riesgo en cascada: tsunami o marejada que ocasiona derrames desde buques o tanques costeros. Integrar Plan de Contingencia OPRC con DIRECTEMAR/Capitanía de Puerto, medios de respuesta y simulacros.
Convenio de Basilea (desechos peligrosos)	Media	Regula manejo/movimiento de residuos peligrosos, incluyendo los generados por incidentes o mantenimiento (adsorbentes, envases, lodos). Los desastres naturales pueden generar residuos peligrosos (combustibles, aceites, materiales contaminados).	Inventario de residuos, rutas/destinos autorizados, protocolos post-emergencia y trazabilidad.
Convenio SAR 1979 (OMI)	Media	Establece obligaciones de búsqueda y rescate marítimo ante emergencias causadas por eventos naturales o sus efectos secundarios.	Debe integrarse en los procedimientos de respuesta frente a tsunamis o marejadas que afecten naves, evitando pérdida de vidas y contaminación secundaria.
Convención sobre la Diversidad Biológica (CDB)	Media	Emplazamiento/dragado y obras pueden afectar hábitats costeros y fauna marina.	Línea base ecológica, jerarquía de mitigación para desastres, compensaciones y monitoreo en construcción/operación.

Instrumento	Pertinencia	Fundamentación específica para el proyecto portuario de hidrógeno verde y portuario en general	Implicancias prácticas para el estudio de riesgo
Acuerdo de Escazú (acceso a información, participación y justicia ambiental)	Media	Determina estándares de participación significativa y transparencia, clave para licencia social en proyectos con sustancias peligrosas.	Estrategia de participación temprana, gestión de reclamos, divulgación de riesgos y trazabilidad de respuestas.
Reglamento Sanitario Internacional (RSI 2005, OMS)	Media	Puertos como Puntos de Entrada requieren capacidades básicas de salud pública; incide en continuidad operativa ante emergencias sanitarias.	Verificar capacidades RSI (vigilancia, comunicación de riesgos, coordinación SEREMI) y su interoperabilidad con emergencias tecnológicas.
Convenio de Rotterdam (PIC de sustancias peligrosas)	Media-baja	Control del comercio internacional de químicos auxiliares (solventes, pinturas, gases industriales).	Acreditar cumplimiento PIC, gestión segura de sustancias y trazabilidad de la cadena de suministro. Relevante solo si las amenazas naturales derivan en liberación accidental de sustancias peligrosas.
Convenio de Estocolmo (COPs)	Media	Previene la liberación de contaminantes orgánicos persistentes tras incendios, remociones o daños estructurales inducidos por desastres.	Aplica a riesgos en cascada (por ejemplo, incendios industriales generados por terremoto o tsunami).
Pacto Internacional de Derechos Económicos, Sociales y Culturales (PIDESC)	Media	Estándares de trabajo seguro, salud y ambiente sano (desarrollo progresivo); protección a comunidades.	Evidencias de control de riesgos a trabajadores/comunidades y mecanismos de queja y reparación.
Convención Internacional sobre la Eliminación de la Discriminación Racial (ICERD)	Media	Garantiza no discriminación en participación, empleo y acceso a información para comunidades costeras.	Necesidad de mecanismos inclusivos en comunicación de riesgos y evacuación durante emergencias naturales
Convención de Lucha contra la Desertificación (UNCCD)	Baja	Foco en suelos áridos; aplicación limitada en entorno portuario costero salvo rutas tierra adentro en zonas áridas.	Referencia general para manejo de polvo/suelos si aplica en la logística terrestre asociada.
Protocolo de Kioto (CMNUCC)	Baja	Vigente pero reemplazado operativamente por París; valor histórico.	Referencia contextual, sin implicancias técnicas actuales.
Plataforma Global para la Reducción del Riesgo de Desastres (UNDRR, foro)	Baja	Instancia no vinculante; útil para buenas prácticas.	Referencia metodológica opcional para alinear con tendencias internacionales.

El marco normativo nacional se articula de manera transversal a lo largo de todas las fases del ciclo de vida del terminal portuario en relación con el riesgo de desastre, en coherencia con los estándares nacionales de gestión del riesgo de desastres y las directrices de la Ley N° 21.364 y la Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres 2020-2030. Durante el emplazamiento, las disposiciones sobre concesiones marítimas (DFL N° 340/1960), uso y compatibilidad del borde costero (DS (M) N° 475/1994, Política Nacional de Uso del Borde Costero) y ordenamiento territorial (LGUC y OGUC, art. 2.1.17) condicionan la localización del proyecto en función de su exposición a amenazas naturales y riesgos costeros, imponiendo, cuando corresponda, la realización de estudios fundados de riesgo y la incorporación de medidas de mitigación y adaptación.

En la fase de diseño para la construcción (foco de este estudio), las normas técnicas (NCh 2369:2025, NCh 3363:2015 y la Guía de Planificación y Diseño de Obras Marítimas y Costeras del MOP) establecen lineamientos para orientar el diseño sísmico, estructural y frente a sismos y tsunamis, garantizando la estabilidad, resistencia y durabilidad de las obras ante los principales forzantes naturales (sismos, oleaje, marea y socavación). Durante la operación y respuesta, las leyes y reglamentos sectoriales (Ley N° 21.364/2021, DS N° 26/1966 y DS N° 68/2009) establecen los mecanismos de coordinación institucional con SENAPRED, OTMAS y DIRECTEMAR, asegurando la vigilancia, alerta temprana y comunicación efectiva ante emergencias. Complementariamente, el marco operativo definido por el Plan Nacional de Protección Civil (DS N° 156/2011) y los planes regionales y comunales de emergencia regulan los procedimientos de los Comités de Emergencia. Los planes de emergencia deberán estar alineados con instrumentos de jerarquía mayor de acuerdo con su nivel respectivo.

Tabla 6. Normativa y legislación nacional.

NDAS relacionada	Convenios internacionales ratificados por el Estado Chileno
NDAS 4 Salud y seguridad de la comunidad	<u>Normas con rango de Ley</u> Ley N°21.364 (2021), que establece el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED) y crea el Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED). Marco vigente en materia de gestión del riesgo de desastres. Regula la coordinación intersectorial, las fases de prevención, preparación, respuesta y recuperación, e integra los instrumentos de planificación y los comités de emergencia a distintos niveles. Ley N° 18.415 (1985), Orgánica Constitucional sobre Estados de Excepción Constitucional. Establece el régimen jurídico para decretar estados de catástrofe, emergencia o calamidad pública, otorgando facultades extraordinarias al Presidente de la República y a las autoridades competentes en casos de desastre. Ley N° 19.300 (1994), Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente, y su Reglamento del SEIA (DS N° 40/2012, publicado 2013). Referente a proyectos que puedan verse afectados por amenazas naturales (riesgo a la población, alteración de ecosistemas, ubicación en áreas de riesgo), integrando medidas de prevención, mitigación y adaptación.

NDAS relacionada	Convenios internacionales ratificados por el Estado Chileno
	Ley 21.455 (2022). Ley Marco de cambio climático (Ministerio del Medio Ambiente). Establece las bases para la acción climática nacional, la adaptación a los efectos del cambio climático y la reducción de riesgos derivados de amenazas naturales e hidrometeorológicas, vinculando la política climática con la gestión del riesgo de desastres. Decreto con Fuerza de Ley N° 725 (1968), Código Sanitario (Ministerio de Salud). Regula las competencias sanitarias y de salud pública, incluyendo la intervención de la autoridad sanitaria en emergencias derivadas de desastres naturales, contaminación ambiental o riesgo para la salud de la población. <u>Normas reglamentarias de rango inferior a ley</u> DS N° 26 (1966) del Ministerio de Defensa Nacional. Designa al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) como organismo representante de Chile ante el Pacific Tsunami Warning Center (PTWC) y dispone la creación del Sistema Nacional de Alarma de Maremotos (SNAM), vigente como fundamento jurídico del sistema nacional de alerta de tsunamis. DS N° 68 (2009), del Ministerio del Interior que establece un Sistema de Coordinación Permanente de procesos de Monitoreo Sísmico y Volcánico. DS N°156 (2011) aprueba Plan Nacional de Protección Civil, y deroga Decreto N° 155, de 1977, que aprobó el Plan Nacional de Emergencia. Aprueba el Plan Nacional de Protección Civil, norma que orienta la organización, roles y procedimientos del Estado frente a emergencias o desastres naturales, actualmente armonizada con la Ley N° 21.364. DS N°38 de 2011, que determina la constitución del Comité de Operaciones de Emergencia (COE). Órgano de coordinación interinstitucional durante situaciones de emergencia o desastre, actualmente integrado en la estructura del SINAPRED. Decreto Supremo (M) N° 475 (1994), que aprueba la Política Nacional de Uso del Bordo Costero (PNUBC). Define los principios, criterios y zonificación del uso del litoral, estableciendo la base regulatoria para el emplazamiento de infraestructuras portuarias y la compatibilización de usos. <u>Normativa de carácter operativo, técnico y complementario</u> Guía/Planificación y diseño de obras marítimas y costeras (Dirección de Obras Portuarias, MOP): Vigente como referencia técnica oficial. Estandariza criterios de diseño, operación y conservación de obras marítimo-portuarias considerando acciones ambientales y forzantes del oleaje, sismo y tsunamis. NCh 3363:2015, Diseño estructural para edificaciones en áreas de riesgo de inundación por tsunami o seiche; y NTM 007 (MINVU). Útiles para edificaciones de apoyo/auxiliares portuario (ej. Bodegas, oficinas), refugios de evacuación y criterios de diseño por acciones de tsunamis. NCh 2369:2025, Diseño sísmico de estructuras e instalaciones industriales: Vigente (actualización 2025).

NDAS relacionada	Convenios internacionales ratificados por el Estado Chileno
	<u>Instrumentos sublegales y planes operativos</u> Planes de emergencia o de reducción de riesgo de desastres. Instrumentos sublegales dictados en virtud de las normas precedentes. Su vigencia es caso a caso, dependiendo de la autoridad emisora (SENAPRED, gobiernos regionales, municipalidades, servicios sectoriales). Deben alinearse con la Ley N° 21.364 y los planes regionales y comunales de gestión del riesgo de desastres.

Tabla 7. Institucionalidad.

Institución	Características
NDAS 4 Servicio Nacional de Prevención y Respuesta Ante Desastres (SENAPRED)	Dependiente del Ministerio de Interior y seguridad pública, es el organismo técnico del Estado a cargo de planificar y coordinar los recursos públicos y privados destinados a la prevención y atención de emergencias y desastres de origen natural o provocados por la acción humana, proporcionando a los ministerios, gobiernos regionales, municipios y organismos de Protección Civil de nivel nacional, Regional, provincial y comunal, modelos y planes de gestión permanente para la prevención y manejo de emergencias, desastres y catástrofes. Asimismo, corresponde a SENAPRED movilizar, dentro de los parámetros establecidos por el Estado, los recursos disponibles tanto del ámbito público como privado para evitar o mitigar el potencial impacto de ocurrencia de una situación riesgo, emergencia o catástrofe.

5.3. Brechas marco del BID y el marco nacional

El marco chileno vigente -en especial la Ley N°21.364 (SINAPRED) y la Ley N°21.455 (Cambio climático), complementadas por el SEIA (Ley N°19.300 y DS N°40)- reconoce e incorpora la gestión del riesgo y la adaptación climática como principios transversales, establece gobernanza, responsabilidades y coordinación, y exige estudios fundados en zonas de riesgo (LGUC/OGUC) junto con criterios técnicos de diseño (NCh 2369, NCh 3363 y Guía DOP). Sin embargo, en el nivel de proyecto persiste una brecha con los estándares del BID, que demandan un Análisis de Riesgo de Desastre (ARD) y un Plan de Gestión de Riesgo de Desastre (PGRD) sensibles al cambio climático. En Chile, tales instrumentos no son mandatos uniformes y obligatorios para toda infraestructura crítica, su exigibilidad depende del cauce procedimental (p. ej., SEIA) o de lineamientos sectoriales, lo que genera heterogeneidad metodológica, asimetrías de alcance y menor comparabilidad interproyectos.

Para cerrar la brecha sin esperar reformas, los proyectos portuarios pueden operacionalizar los requerimientos BID dentro del marco nacional: (i) elaborar un ARD que integre amenazas naturales costeras (sismo, tsunami, marejadas, ascenso del nivel del mar) con insumos oficiales (CITSU/SHOA, DS 26 y DS 68), modelación de peligros y evaluación de vulnerabilidad/criticidad. Desarrollar un PGRD con objetivos de desempeño y continuidad operacional alineados a NCh 2369 (componentes industriales), NCh 3363/NTM 007 (edificaciones en zona de tsunami) y Guía DOP (muelles/pilotes), incorporando medidas de adaptación conforme a la Ley N°21.455. Finalmente,

anclar la gobernanza de emergencia al SINAPRED (Ley N°21.364), con protocolos de coordinación Comités de Emergencia, umbrales de alerta y rutas de evacuación.

5.4. Otros estándares y documentos de aplicación

También resultan aplicables al proyecto, a modo de referencia complementaria, diversos estándares internacionales, metodologías y buenas prácticas reconocidas que orientan la gestión ambiental, social y de riesgo en proyectos de inversión, con el propósito de garantizar su sostenibilidad, resiliencia y conformidad con los marcos globales de desempeño.

Tabla 8. Otros estándares y documentos-marco de aplicación.

Tipologías	Documentos
Buenas Prácticas internacionales	Guías Generales sobre Medio Ambiente, Salud y Seguridad de la IFC https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/2000/2007-general-ehs-guidelines-es.pdf
	Guías Sectoriales sobre Medio Ambiente, Salud y Seguridad de la IFC Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para puertos, zonas portuarias y terminales. https://www.ifc.org/content/dam/ifc/doc/
	Riesgo climático y puertos. Guía práctica sobre fortalecimiento de la resiliencia https://idbinvest.org/es/publicaciones/riesgo-climatico-y-puertos-guia-practica-sobre-el-fortalecimiento-de-la-resiliencia
Metodologías	Metodología de evaluación del riesgo de desastres y cambio climático para proyectos del BID: Documento técnico de referencia para equipos a cargo de proyectos del BID https://publications.iadb.org/es/metodologia-de-evaluacion-del-riesgo-de-desastres-y-cambio-climatico-para-proyectos-del-bid

6. Fase 1: Screening y Clasificación

6.1. Identificar y caracterizar las amenazas naturales

A. Amenazas geológicas o geofísicas

6.1.1. Sismos

Esta sección caracteriza la amenaza sísmica en el extremo sur de la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena, particularmente en el sector de Punta Arenas y su entorno geográfico inmediato, donde se desarrollará el proyecto portuario “Magallanes H2V”. El análisis se delimita al sector sur de la Patagonia austral, específicamente al área ubicada al sur de la península de Taitao, excluyendo expresamente la zona de influencia directa de la Falla Liquiñe-Ofqui, que domina la sismicidad más septentrional de la región. El área de estudio considera eventos ocurridos dentro del radio de influencia del sistema de falla Magallanes-Fagnano y otras estructuras subsidiarias ubicadas en la península Brunswick, en Tierra del Fuego y en el sector marítimo del Estrecho de Magallanes. La zona de estudio, aunque históricamente considerada de sismicidad moderada en el contexto nacional, presenta evidencia instrumental, histórica y geológica que indica la ocurrencia de eventos sísmicos significativos, así como la existencia de estructuras activas que configuran un contexto tectónico complejo.

Desde el punto de vista geodinámico, la zona de estudio se ubica en un contexto tectónico dominado por la interacción entre tres grandes placas: la placa Sudamericana, la placa de Scotia y, más hacia el oeste, la placa Antártica. En el sector de Tierra del Fuego y el estrecho de Magallanes, la placa de Scotia se desplaza en dirección Este a una velocidad de aproximadamente 7 a 9 mm/año con respecto a la placa Sudamericana, generando un régimen transcurrente activo que se manifiesta en el sistema de falla Magallanes-Fagnano (MFFS) (Ammirati et al., 2020). Esta velocidad es considerablemente menor que la registrada en el margen convergente del norte de Chile, donde la placa de Nazca subduce bajo la placa Sudamericana a tasas de entre 66 y 80 mm/año, generando un contexto de sismicidad mucho más intensa y frecuente. En contraste, el sur de Patagonia representa un margen de deformación lateral activa de menor velocidad, pero con potencial para generar eventos sísmicos significativos, como se ha documentado en el terremoto de magnitud 7,7 en 1949. Adicionalmente, hacia el sur del continente, la interacción entre la placa Antártica y la de Scotia también contribuye a la complejidad tectónica del extremo austral de Sudamérica, aunque con velocidades relativas más bajas (<10 mm/año), lo que condiciona la distribución espacial y frecuencia de la sismicidad en la región. Otras estructuras activas relevantes incluyen fallas neotectónicas identificadas en la península Brunswick y el entorno de Punta Arenas, cuya actividad ha sido interpretada a partir de rasgos geomorfológicos, análisis morfotectónicos y alineamientos sísmicos recientes (Onorato et al., 2021). Estas fallas menores podrían estar asociadas a la redistribución de esfuerzos a lo largo del borde de la placa Sudamericana o a procesos de rebote isostático postglacial, tal como se ha propuesto para el sector cordillerano más oriental (Perucca et al., 2016)

El evento sísmico históricamente más antiguo registrado en el extremo sur de la Patagonia corresponde al terremoto del 1 de febrero de 1879, el cual afectó extensamente el sector del

estrecho de Magallanes, incluyendo Punta Arenas y zonas del norte de la isla Grande de Tierra del Fuego. Si bien no existían estaciones sismológicas en funcionamiento en la región en esa época, los reportes históricos recopilados indican una intensidad estimada entre VII y VIII en la escala de Mercalli Modificada, lo que sugiere una magnitud probable superior a M 6,5 (Cisternas & Vera, 2008). El sismo provocó daños estructurales menores en edificaciones de la ciudad de Punta Arenas, caídas de objetos, fisuras en el suelo y generó gran alarma en la población, siendo ampliamente reportado por medios de prensa locales y por autoridades marítimas de la época. Este evento constituye la primera evidencia histórica documentada de actividad sísmica significativa en la región, y ha sido interpretado como resultado de la liberación de esfuerzos a lo largo del sistema de falla Magallanes-Fagnano, confirmando su carácter sismogénico activo ya desde el siglo XIX.

El evento sísmico más significativo registrado instrumentalmente en la zona sur de la Patagonia corresponde al terremoto del 17 de diciembre de 1949, ocurrido en el sector oriental del lago Fagnano, en la isla Grande de Tierra del Fuego. Este evento se originó a lo largo del sistema de falla Magallanes-Fagnano, una estructura transcurrente activa que delimita la interacción entre la placa Sudamericana y la microplaca de Scotia. De acuerdo con múltiples estudios geofísicos y paleosísmicos, el sismo alcanzó una magnitud estimada de Mw 7,7, con una profundidad superficial estimada en menos de 15 km, lo que favoreció una ruptura cosísmica visible en superficie. Los desplazamientos horizontales medidos superaron los 4 metros en el sector occidental del lago y alcanzaron hasta 6,5 metros en su porción oriental, evidenciando una deformación importante en el terreno y afectando parcialmente la infraestructura vial y forestal de la época (Ammirati et al., 2020). Cabe destacar que esta secuencia sísmica no consistió en un único evento, sino en dos terremotos de gran magnitud, uno de magnitud Mw 7,7 y otro de magnitud Mw 7,4 (o Mw 7.58 según catálogo del USGS), los cuales ocurrieron con pocos minutos de diferencia. Esta secuencia ha sido interpretada como la ruptura casi simultánea de dos segmentos del sistema de falla Magallanes-Fagnano. Esta condición enfatiza la complejidad sismotectónica del área y refuerza la necesidad de considerarla como una fuente activa de eventos de gran magnitud en evaluaciones de amenaza sísmica. Este evento no provocó víctimas fatales, pero dejó registros importantes en la morfología del paisaje, y constituye la prueba más clara del carácter sismogénico mayor de esta falla en tiempos históricos. Además, ha sido utilizado como evento de calibración para modelos de amenaza sísmica regional y para la identificación de estructuras activas en sectores cercanos a Punta Arenas (Perucca et al., 2016).

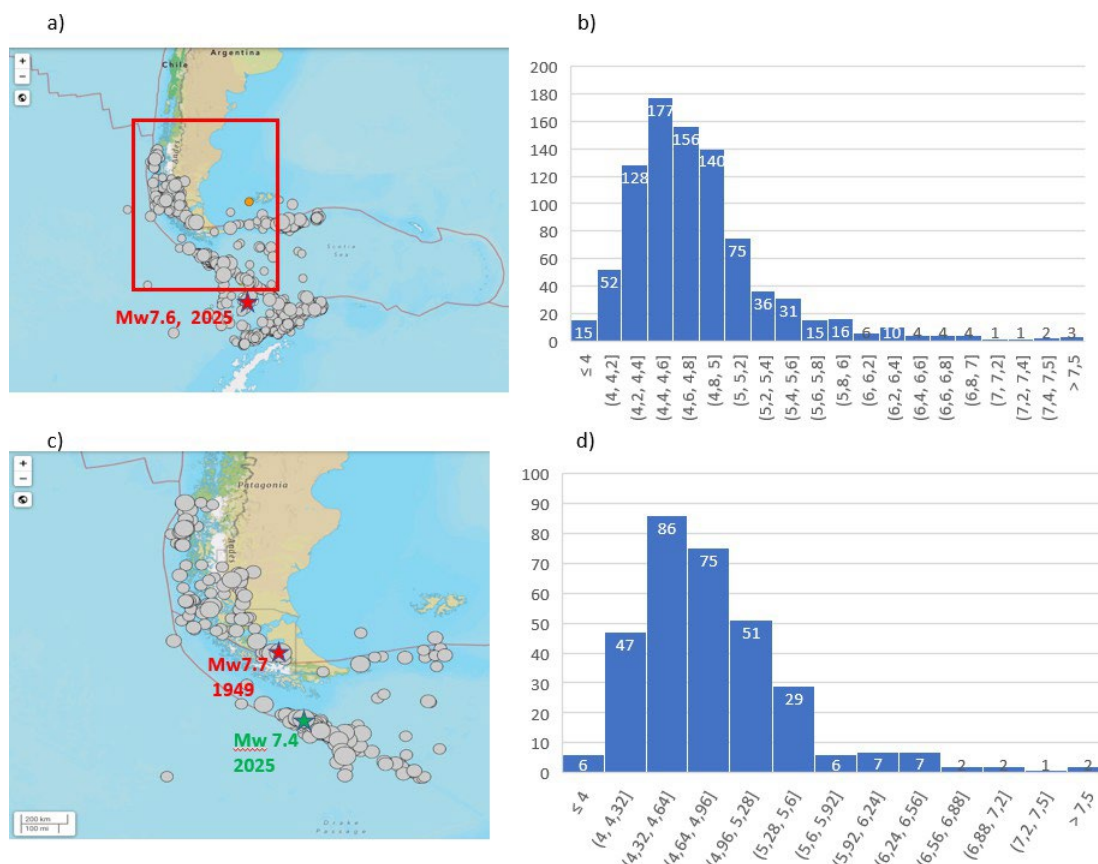
Para realizar un análisis más completo de la sismicidad en la zona de estudio, se revisó el catálogo sísmico del *United State Geological Survey (USGS)*¹. Este catálogo contiene eventos sísmicos desde 1907 hasta la actualidad. La **Figura 13** muestra una representación gráfica de la sismicidad en la Región de Magallanes y la Antártica a partir de los 876 eventos sísmicos disponibles en el catálogo del USGS. En la **Figura 13-a** se observa un mapa general de los eventos sísmicos, donde se observa que ocurren principalmente a lo largo de las zonas de contacto de las placas tectónicas. En esta figura se destaca también la ubicación del evento sísmico más importante ocurrido en octubre de 2025, con una magnitud Mw 7,6. Este evento ocurrió en la zona de convergencia entre la placa Antártica y la microplaca de Scotia; si bien no se registraron daños en territorio chileno, el evento fue

¹ <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/search/>

detectado por centros sismológicos internacionales y generó una alerta de tsunami menor, que fue posteriormente cancelada (N+Ciencia, 2025).

La **Figura 13-b** muestra la cantidad de eventos según rangos de magnitudes para la zona general mostrada en el mapa de la **Figura 13-a**. Se puede observar que sólo 15 eventos tienen magnitud inferior a Mw 4, mientras que un total de 601 eventos, correspondientes al 68.6%, están comprendidos entre las magnitudes Mw 4,2 y 5,0. Además, se observa que sólo 3 eventos sobrepasan la magnitud Mw 7.5, que justamente corresponden a los 2 eventos de 1949 y al evento de 2025. La **Figura 13-c** muestra un mapa de detalle de la zona mostrada en el recuadro rojo. En esta figura se observa la ubicación de los eventos de mayor magnitud, que corresponden al del 17 de diciembre de 1949 (Mw 7.7) y al del 2 de mayo de 2025 (Mw 7.4). Este sismo fue denominado el Terremoto del Paso Drake de 2025, con epicentro a 218 km al sur de Puerto Williams y profundidad de 10 km. El evento se generó por una falla inversa localizada en el estrecho de Drake, asociada a la interacción entre la Placa de Scotia y la Placa Antártica, y representa el sismo de mayor magnitud documentado en el extremo austral de Chile y Argentina desde 1949. Aunque no se registraron víctimas fatales en Chile ni Argentina, se percibió en la comuna de Timaukel (Región de Magallanes) con intensidad máxima estimada de V (Escala de Mercalli), y III en Punta Arenas, y además el SHOA emitió una alerta de tsunami que luego fue degradada a “precaución” en Chile (Wikipedia, 2025). La **Figura 13-d** muestra un histograma de eventos en el mapa de detalle indicado en la figura **Figura 13-c**, la que tiene mayor relevancia para la zona de Punta Arenas. Se puede ver que sólo 4 eventos tienen magnitud inferior a Mw 4.0 y 259 sismos (80,7%) están comprendidos en el rango de magnitudes Mw 4.0-5.28. Mientras que sólo 2 eventos sobrepasan la magnitud Mw 7.5.

Figura 13. Sismicidad en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena².



Fuente: Elaboración propia a partir de Catálogo del USGS

6.1.2. Tsunami

Hasta la fecha, no se dispone de evidencia directa ni registros históricos verificables de tsunamis ocurridos en la región de Magallanes, tanto en el estrecho homónimo como en los sectores costeros de Punta Arenas y Tierra del Fuego. La naturaleza predominantemente transcurrente del sistema de falla Magallanes-Fagnano, principal fuente tectónica activa en la zona, limita la generación de tsunamis por desplazamientos verticales del lecho marino. Sin embargo, la morfología de fiordos, canales estrechos y laderas inestables en sectores costeros del estrecho de Magallanes configura un entorno susceptible a la generación de tsunamis secundarios, inducidos por deslizamientos costeros o submarinos, ya sea espontáneos o gatillados por sismos. Asimismo, la reciente activación de alertas de tsunami tras los sismos del 2 de mayo y 10 de octubre de 2025 en el Paso Drake, aunque sin consecuencias para las costas chilenas, demuestra que eventos lejanos de gran

² a) Mapa de los eventos sísmicos registrados en toda la zona de Magallanes y Antártica según el Catálogo del USGC. La estrella roja indica el evento de magnitud Mw 7.6 registrado en el sector de Pasaje Drake en el año 2025. El recuadro rojo indica la zona de detalle mostrado en la figura c). b) Histograma que muestra número de eventos según magnitud en toda la región mostrada en la figura a). c) Mapa de eventos sísmicos en el área más cercana a la zona de estudio según el recuadro rojo de la figura a). La estrella roja indica la ubicación del evento de mayor magnitud registrado en esta zona, mientras que la estrella verde indica el evento de mayor magnitud registrado en el 2025. d) Histograma que muestra cantidad de eventos registrados en la zona de detalle según recuadro rojo de la figura a).

magnitud también pueden representar una amenaza regional latente. Por tanto, se recomienda considerar esta amenaza en los planes de ordenamiento territorial y protección costera, e impulsar estudios de paleotsunamis, modelación hidrodinámica y caracterización de zonas potenciales de deslizamiento, a fin de mejorar la comprensión del riesgo en contextos de baja recurrencia, pero alta exposición crítica.

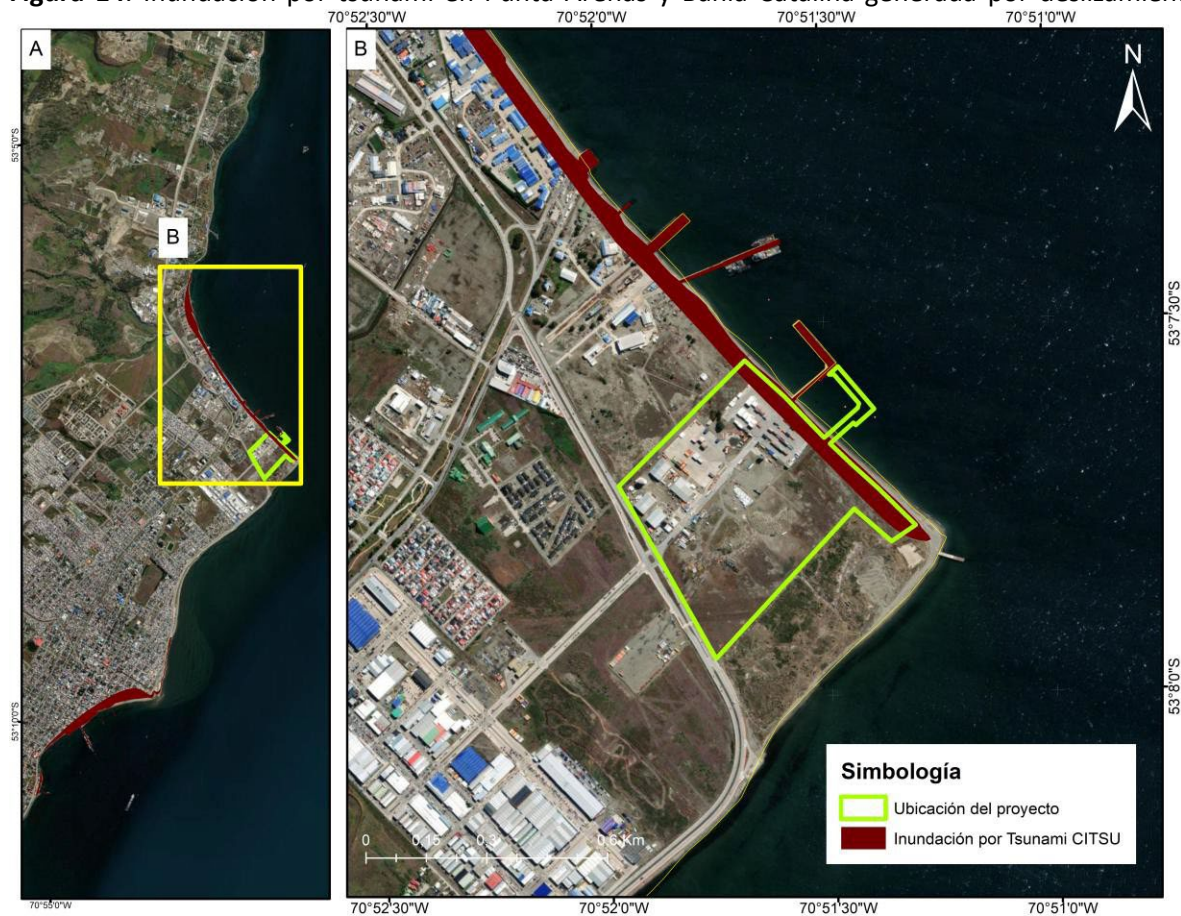
Investigaciones recientes han documentado la ocurrencia de movimientos en masa subacuáticos postglaciares en el canal Beagle, particularmente en la bahía de Ushuaia, asociados a inestabilidades de sedimentos glaciofluviales inducidas por sismos. Al menos once eventos han sido identificados, cuatro de ellos de gran magnitud, con volúmenes estimados entre 12 y 57 millones de m³, capaces de generar tsunamis locales con alturas de hasta 2 metros en el puerto de Ushuaia y run-ups de hasta 8 m mediante modelaciones numéricas (Bran et al., 2023). Estos hallazgos indican una recurrencia mayor a la previamente asumida para fenómenos de remoción en masa con potencial tsunamigénico en fiordos y canales de la región. Asimismo, simulaciones realizadas por Dragani et al. (2008) muestran que sismos mayores en el Arco de Scotia podrían generar tsunamis con amplitud atenuada pero detectable en sectores costeros patagónicos, dependiendo de la batimetría y la morfología del talud continental.

Dado que los sismos submarinos tienen poco potencial tsunamigénico en la Región de Magallanes, en la carta de inundación por tsunami de Punta Arenas se consideraron otras fuentes, tales como deslizamientos (SHOA, 2016). Para ello, el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) en conjunto con el Gobierno Regional de Magallanes realizaron un estudio para identificar evidencias de remociones en masa (SHOA, 2016), con el objetivo de determinar las características, condiciones geológicas y geomorfológicas que favorecen la ocurrencia de deslizamientos. La carta de inundación por tsunami de Punta Arenas se confeccionó mediante simulación numérica y los deslizamientos subaéreos y sus parámetros utilizados en el modelo fueron estimados por SERNAGEOMIN. Para ello, se modeló el área del Estrecho de Magallanes comprendida entre Bahía Gente Grande por el norte e Isla Dawson por el sur (SHOA, 2016). La **Figura 14** muestra las áreas de inundación por tsunami generado por deslizamientos en las zonas de Punta Arenas y Bahía Catalina en general, se puede observar que las inundaciones generadas por deslizamientos son moderadas, donde la penetración máxima en Punta Arenas puede alcanzar 220m desde la línea de costa. La carta de inundación muestra el área total de inundación, sin identificar diferentes niveles de profundidad.

Por último, se ha demostrado que la región austral de Chile presenta condiciones geomorfológicas y climáticas que favorecen la ocurrencia de tsunamis originados por deslizamientos, tanto en cuerpos lacustres como en canales y fiordos. Este tipo de eventos puede ser gatillado por sismos moderados (por ejemplo, el caso del fiordo de Aysén) o intensas precipitaciones, como ha sido demostrado en estudios recientes para el lago Todos los Santos en la Región de Los Lagos (Aránguiz et al., 2023). Este caso refleja un fenómeno de eventos en cascada, donde las lluvias extremas generan inestabilidad de laderas, la cual produce un deslizamiento que, al impactar el cuerpo de agua, desencadena un tsunami local. Por su parte, investigaciones en el canal Beagle (Bran et al., 2023) también han demostrado que deslizamientos submarinos postglaciares pueden generar perturbaciones significativas del nivel del mar, con alturas de ola de hasta 8 m en zonas costeras.

Por lo tanto, considerando el régimen climático del sur de Chile, caracterizado por episodios de lluvias intensas y escasa cobertura vegetal en sectores glaciares o periglaciares, se recomienda incorporar este tipo de amenazas en los sistemas de monitoreo temprano y en la planificación territorial de zonas costeras y lacustres, a través de mapas de susceptibilidad a deslizamientos y modelación integrada de amenazas en cascada.

Figura 14. Inundación por tsunami en Punta Arenas y Bahía Catalina generada por deslizamientos.



Fuente: Modificada de CITSU SHOA 2016.

6.1.3. Deslizamientos (remociones en masa)

Geomorfología y geología

La geomorfología de la Región de Magallanes ha sido fuertemente marcada por la dinámica glacial del Pleistoceno, seguida por procesos fluviales, litorales y neotectónicos postglaciales.

La deglaciación, particularmente del Lóbulo Magallánico, fue fundamental en la formación de formas fluvio-glaciares y fluviales (Vásques, 2012; Sandoval and De Pascale, 2020). El retroceso glacial dejó extensos depósitos fluvio-glaciares. Las planicies de lavado o *sandur* se componen de gravas y arenas limpias y estratificadas. Estos depósitos pueden formar abanicos o estar confinados en valles, y su morfología puede incluir hoyos glaciares (*kettles*) formados por el enterramiento de bloques de hielo residual. La zona de Punta Arenas y sus alrededores presenta una geomorfología

glacial que incluye canales de deshielo laterales y marginales, los cuales se alinearon de norte a sur subparalelamente a los antiguos márgenes glaciares. Al noroeste de Punta Arenas se encuentran campos de *drumlins* y lineamientos glaciares, evidenciando el flujo de un glaciar de base húmeda (*wet-based*).

En la Península de Brunswick la compleja red fluvial modeló y depositó sedimentos granulares y materiales finos en las plataformas de inundación. La densificación urbana de Punta Arenas se desarrolló sobre la llanura aluvial del río Las Minas, terrazas marinas, y el cauce caótico del río La Mano. Antiguos cauces, como una depresión elongada al oeste del Regimiento Pudeto (Punta Arenas), retienen características de turba (suelos orgánicos con baja capacidad de soporte y alta compresibilidad). En la población Mardones, se observan aterrazamientos que evidencian sucesivos eventos de socavación y depositación.

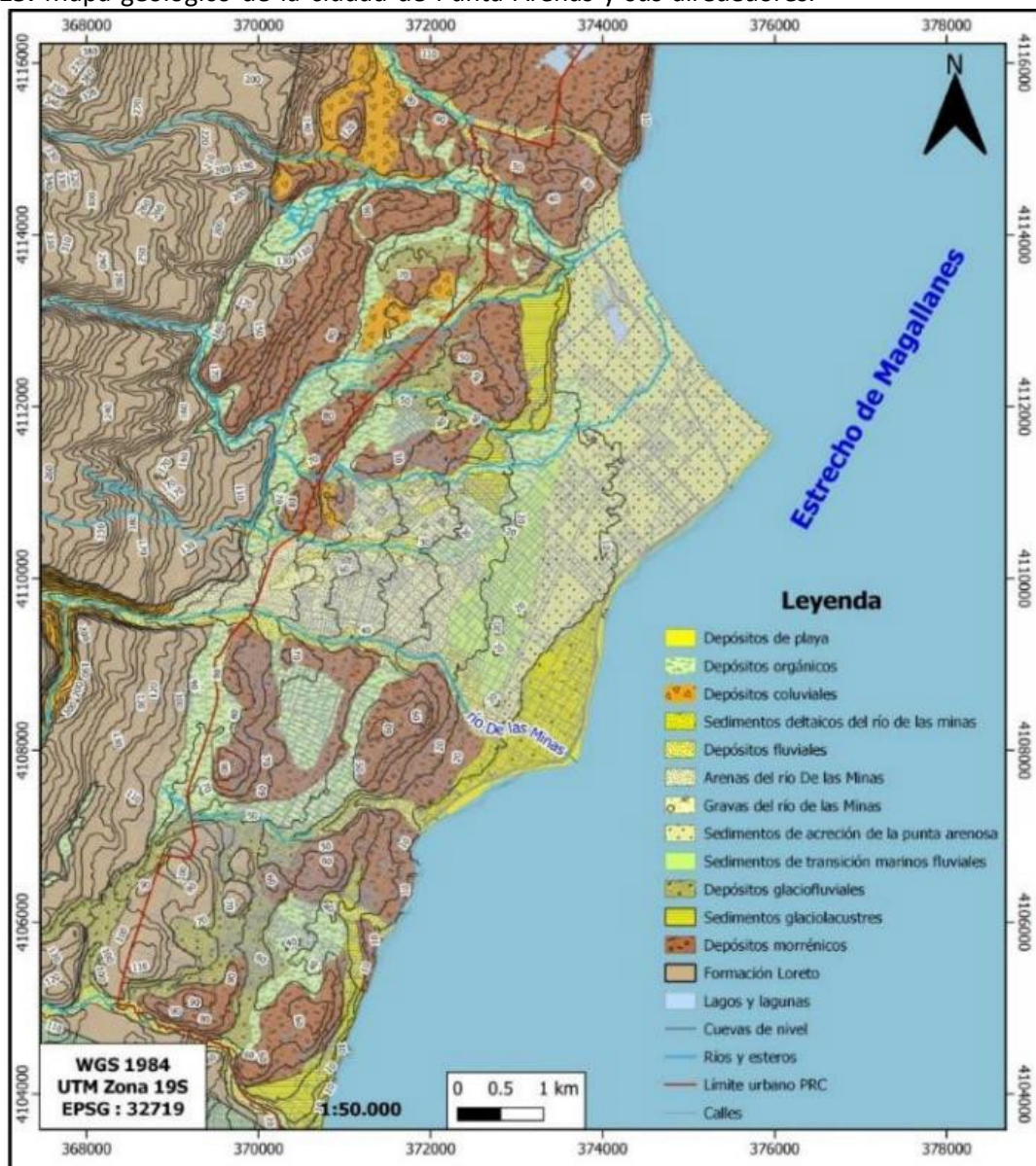
En el borde costero de Punta Arenas, las arenas de playa presentan rasgos microtexturales predominantemente mecánicos y evidencias de transporte glaciar y acuoso, consistentes con condiciones litorales energéticas impulsadas por oleaje y viento; esto respalda la presencia de planicies y cordones litorales arenosos jóvenes y poco consolidados (Kim et al., 2022).

Las transgresiones y regresiones marinas postglaciales dejaron distintos niveles de terrazas marinas con sedimentos retrabajados por el oleaje. Un nivel de paleocosta a unos 30 metros sobre el nivel del mar (msnm) es notable en la Isla Dawson y en la zona suburbana de Punta Arenas, interpretado como el relicto del borde del gran lago proglacial que se formó en el Estrecho de Magallanes (Vásquez, 2012). Hacia el norte de Punta Carreras (Península de Brunswick), las paleocostas elevadas (30 a 60 msnm) se inclinan hacia el norte, sugiriendo la influencia de una prominente ruptura tectónica en esa área (Bentley and McCulloch, 2005).

Unidades litoestratigráficas locales

La ciudad de Punta Arenas adopta su nombre de la denominación “sandy point” o punta arenosa, por su composición en el sector costero y norte de la ciudad. Se trata de una punta de acreción costera de tipo constructivo modelada por la acción del oleaje y compuesta principalmente por arenas sueltas y saturadas. La zona urbana se asienta sobre una compleja mezcla de depósitos cuaternarios (till, arcillas glaciolacustres, turba) y depósitos fluviales/aluviales. Los depósitos glaciolacustres suelen ser arcillas blandas denominadas localmente “mazacote” (Vásquez, 2012; Villarroel y Carrasco, 2022). Debido a su baja compacidad y saturación por la napa freática superficial, estas unidades se consideran potencialmente licuables ante un evento sísmico (Vásquez, 2012; Villarroel et al., 2024; Villarroel y Carrasco, 2022). La **Figura 15** muestra la distribución de estas unidades.

Figura 15. Mapa geológico de la ciudad de Punta Arenas y sus alrededores.



Fuente: Villarroel et al., 2024

Hacia el poniente de la ciudad, se observa el afloramiento de la Formación Loreto (de edad Eoceno Tardío), que constituye el basamento rocoso de la zona. Estas áreas presentan pendientes altas y sufren procesos recurrentes de remociones en masa (Vásquez, 2012; Muñoz et al., 2021). La Formación Loreto en la cuenca alta del río Las Minas aflora en relieves >100 m s.n.m. como una secuencia estratificada de ~800 m de espesor, compuesta principalmente por areniscas, limolitas y lutitas, con alternancia de arenas gruesas poco consolidadas, limolitas y arcillolitas fisibles. Destaca el Miembro Loreto Carbonoso, con lutitas, limolitas, areniscas carbonosas y varios mantos de lignito (minas Loreto y Esperanza). La fauna y flora fósil, improntas de hojas y madera (incl. Nothofagus) y elasmobranquios, sugieren una génesis en un ambiente deltaico-estuarino somero, de aguas frías a templadas. Estructuralmente, los estratos presentan un monoclinal con buzamiento suave (0–10°) hacia el NE y una flexura/anticlinal kilométrica de rumbo ~N40°O. La

combinación de fracturas subverticales y planos de estratificación genera planos de debilidad que aumentan la susceptibilidad a remociones en masa (Muñoz et al., 2020; Muñoz et al., 2021).

Características geotécnicas de los suelos: licuación

La ciudad de Punta Arenas presenta una gran heterogeneidad en sus suelos de fundación, modelados por procesos glaciares y post-glaciares. La información sobre las ondas de corte (V_{s30}) y otras características geotécnicas se ha obtenido principalmente mediante estudios de microzonificación sísmica, penetrometría dinámica y ensayos de laboratorio (Vásquez, 2012; Villarroel et al., 2024).

El V_{s30} (velocidad de onda de corte promedio en los primeros 30 metros) es un parámetro clave para la clasificación sísmica de los suelos según la normativa chilena. Los valores estimados en Punta Arenas varían significativamente de acuerdo con la unidad geológica subyacente (**Tabla 9**). En general, las velocidades más altas se encuentran en el sector sur y poniente (donde la roca está más cerca de la superficie), mientras que las más bajas se ubican en el sector costero y en zonas con suelos orgánicos (**Figura 16**) (Villarroel et al., 2024).

Tabla 9. V_{s30} (Velocidad de Onda de Corte) en diferentes suelos de Punta Arenas.

Unidad Geotécnica	V_{s30}	Clasificación Sísmica (NCh 433, 2023)
Afloramientos de la Formación Loreto (Areniscas)	Superiores a 600 m/s.	Típicamente Suelo Tipo B (≥ 500 m/s) o C (≥ 350 m/s).
Depósitos Morénicos	Superiores a 400 m/s.	Suelo Tipo C (≥ 350 m/s).
Unidades Arenosas (Punta Arenosa) y Delta del Río Las Minas	Entre 180 m/s y 250 m/s.	Suelo Tipo D (≥ 180 m/s), pero susceptible a ser clasificado como Suelo Tipo F debido a la licuación.
Depósitos Orgánicos (Turbales) / Esteros	Del orden de 150 m/s.	Suelo Tipo E (< 180 m/s), o Suelo Tipo F (requiere estudios especiales).

Fuente: Villarroel et al., 2024.

Figura 16. Estimación de valores de Vs30 para la ciudad de Punta Arenas.



Fuente: Villarroel et al., 2024

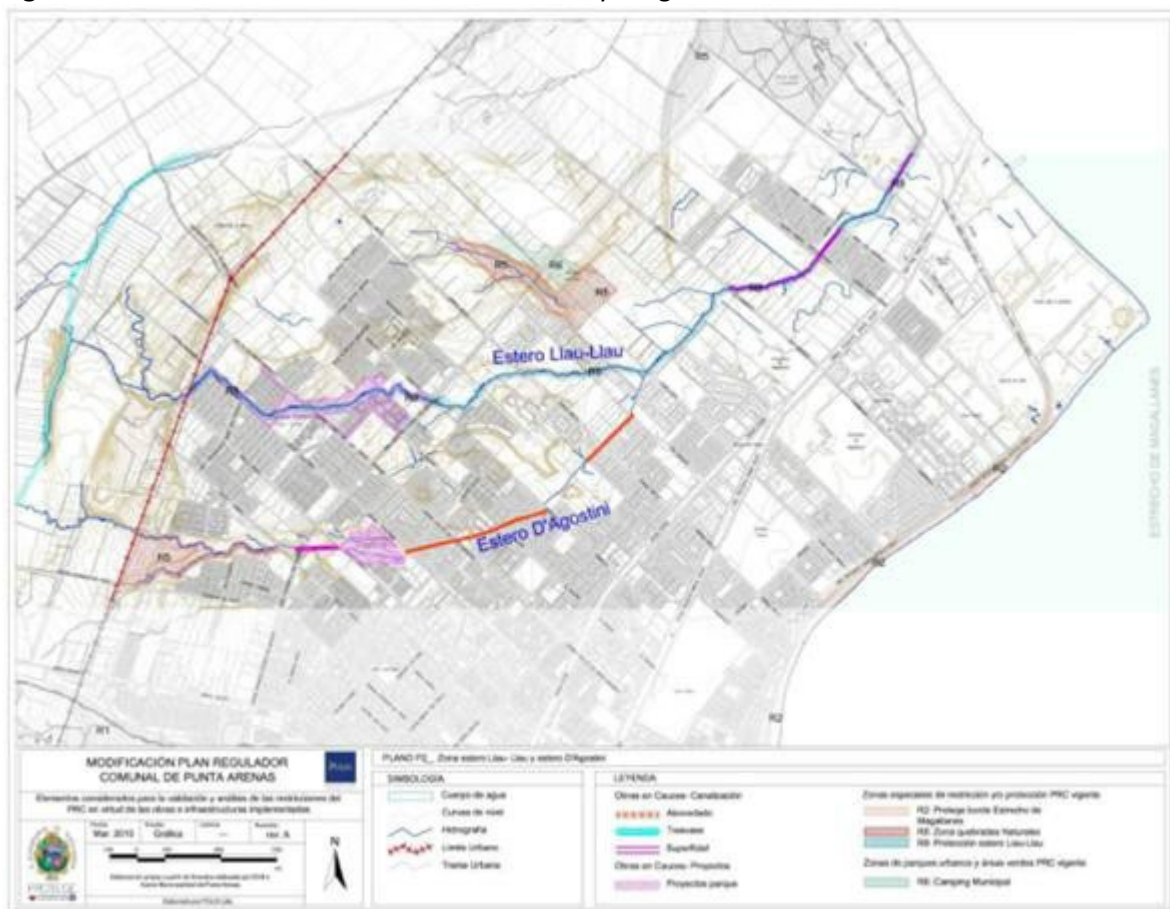
Se identifica un alto potencial de licuación en las unidades arenosas recientes del borde costero norte (sector de Punta Arenosa) y en la desembocadura del Río de Las Minas. Estos depósitos son de origen reciente, de baja compacidad y se encuentran saturados por una napa freática superficial (a 1,5 a 2,5 m de profundidad) (Vásquez, 2012; Villarroel y Carrasco, 2022). Se ha sugerido que los efectos del terremoto de 1949 en Punta Arenas (calles cubiertas de arena y hundimientos) podrían haber sido causados por la licuación de suelos (Villarroel et al, 2024). Los suelos orgánicos y los suelos potencialmente licuables que presentan un inferior a 180 m/s deben ser clasificados como suelo Tipo F según la norma, requiriendo estudios especiales para el diseño sísmico.

En general, la baja capacidad de soporte y la alta compresibilidad de los suelos de origen acuático (arcillas blandas y turba), sumada a la susceptibilidad a la licuación de las arenas costeras, representan condiciones desfavorables para el diseño de fundaciones en grandes sectores de la ciudad.

Análisis de remociones en masa:

El estero Llau-llau, cuenca en la que se inserta el actual proyecto, es el segundo cauce más importante en la ciudad de Punta Arenas, tiene una dirección hacia el este y noreste, y desemboca en el sector Tres Puentes, al noroeste de la zona de estudio (**Figura 17**). La parte alta de su cuenca colinda con la cuenca del río Las Minas, donde las pendientes alcanzan en promedio los 10-20 grados. No se reconocen remociones en masa que ocurrieran en la cabecera de este estero, y que pudiera afectar considerablemente su caudal.

Figura 17. Estero Llau-liau con dirección al este y luego al noreste.



Fuente: Plan Regulador Comunal, 2011

A partir de la cartografía e inventarios disponibles, las remociones en masa que controlan la generación de aluviones en Punta Arenas se desarrollan principalmente en la cuenca del río Las Minas, pudiendo originar flujos que alcanzan y atraviesan la zona urbana de la ciudad (Muñoz et al., 2021; Tala Campos, 2021). En el área específica del proyecto no se han documentado remociones en masa históricas que la hayan afectado de manera directa ni se reconocen evidencias geomorfológicas recientes que sugieran actividad local. En consecuencia, desde el punto de vista geológico, la amenaza principal para la zona del proyecto se asocia a la respuesta del subsuelo frente a esfuerzos naturales o antrópicos; en particular, potencial de licuación y/o asentamientos diferenciales.

6.1.4. Sedimentación

Respecto a la amenaza de sedimentación en el área marina, los antecedentes se derivan del Estudio de Impacto Ambiental del proyecto "Ampliación Nuevo Puerto de Punta Arenas II y III Etapas" del año 1997. De dicha información se concluye que la sedimentación en el área de estudio se explica por fuertes pendientes, baja infiltración y tormentas intensas, agravadas por deforestación y remociones por actividad minera. Sus efectos incluyen pérdida de suelo, colmatación del puerto (dragados costosos) y menor capacidad de conducción fluvial, elevando el riesgo de desbordes.

En el medio marino, los ríos Las Minas y Tres Puentes aportan la mayor carga. Los sedimentos corresponden a arena fina y mediana en la escala de Wenworth, con presencia de hidrocarburos, posiblemente asociado a eventos anteriores de derrames y muy contaminados con metales Pesados especialmente Cu y Pb. Dado que el informe fue realizado en 1997 sería pertinente contar con información actualizada sobre procesos de dragados realizados en los últimos años, a fin de dimensionar el nivel de la amenaza.

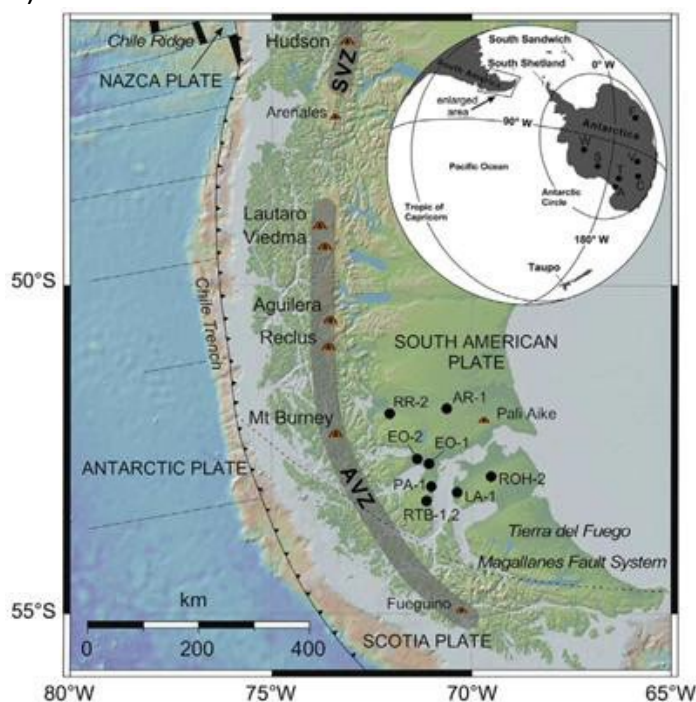
6.1.5. Erupciones volcánicas

Siete centros volcánicos activos, con erupciones documentadas en el Holoceno, se encuentran en la Región de Magallanes (Chile) o en sus cercanías (Zona Volcánica Austral, AVZ, y el extremo sur de la Zona Volcánica Sur, SVZ) (**Figura 18**). A continuación, se presenta una descripción de cada uno de ellos en base a los trabajos de Martinic (1998), Stern (2008), Martinic (2008), Stern et al. (2011), Fontijn et al. (2014), Del Carlo et al. (2018), Klaes et al. (2022), Panaretos et al. (2025).

- Monte Burney (AVZ; 52.33°S, 73.40°O): Estratovolcán en la península Muñoz Gamero. El Holoceno registra dos erupciones mayores: MB1 (8.851–9.949 años cal AP) y MB2 (3.818–4.711 años cal AP). Sus volúmenes de tefra, recalculados con parámetros estándar, son >3 km³ (MB1) y >2,8 km³ (MB2), con magnitudes equivalentes a VEI ~5. La dispersión muestra máximos de espesor para MB2 de 13–15 cm en la península Muñoz Gamero, y <3 cm en Tierra del Fuego; para MB1 hay 4 cm en Bahía Inútil y espesores >10–12 cm hacia Seno Skyring y Río Rubens. Se reconocen además tefras menores tardías.
- Reclus (AVZ; 51.03°S, 73.50°O): El evento R1, tardiglacial, es una de las mayores erupciones explosivas conocidas en la AVZ (VEI 6), con edad calibrada ~14,9 ka y volumen >5 km³. Los mayores espesores superan 40 cm cerca del seno Última Esperanza; >10 cm a ~150 km de la fuente, y >5 cm en Tierra del Fuego. En el Holoceno también se reconocen R2 (~1.789 años cal AP) y R3 (~1.035 años cal AP).
- Aguilera (AVZ; 50.33°S, 73.75°O): Fuente de la tefra A1, holocena, datada clásicamente entre 3.067–3.339 años cal AP, con volumen estimado entre 4–9 km³. Los mayores espesores (>10 cm) se registran en el entorno de Lago Argentino (El Calafate–Lago Roca), disminuyendo hacia el este. Estudios distales recientes proponen además un evento del Aguilera más antiguo (~4.39–4.15 ka cal AP).
- Cerro Hudson (SSVZ; 45.90°S, 72.97°O). En el Holoceno destacan H1 (~7.75 ka cal AP) y H2 (~3.9 ka cal AP). H1 dejó >10–15 cm de caída de ceniza en Tierra del Fuego y >20 cm en la Patagonia continental; H2 es de edad media holocena. En 1991 (H3) ocurrió una erupción histórica con volumen aproximado de ~4,3 km³, cuyo depósito fue ampliamente dispersado.
- Lautaro (AVZ; 49.02°S, 73.55°O). Estratovolcán glaciar activo desde el Cuaternario Tardío. Registra actividad histórica con un episodio eruptivo entre fines de 1959 e inicios de 1960 (pluma el 19 de enero de 1960) y actividad en 1979. No se han atribuido capas de tefra preservadas en SPTF a Lautaro.
- Viedma (AVZ; 49.36°S, 73.28°O). Estratovolcán del sector norte de la AVZ. La actividad histórica incluye evidencias de una erupción freatomagmática al sur del nunatak Viedma en 1988. No se han asignado tefras en SPTF a Viedma.

- Fueguino o “Cook” (AVZ; 54.95°S, 70.25°O). Conjunto holoceno de pequeños conos piroclásticos (<150 m) y domos con disyunción columnar. Se caracteriza por actividad explosiva de baja a moderada energía y depósitos de dispersión limitada. Hay registro histórico en 1820 (observación del capitán Basil Hall) y evidencias de domos/conos posglaciales en Isla Cook (1978).

Figura 18. Distribución de los centros volcánicos Holocenos en la Zona Volcánica Sur (SVZ) y Zona Volcánica Austral (AVZ).



Fuente: Del Carlo et al. (2018)³.

Caída de tefra en la península de Brunswick

Basándose en estudios tefrocronológicos en la Región de Magallanes, especialmente en la Península de Brunswick, donde se encuentra Punta Arenas, se han identificado depósitos de ceniza de grandes erupciones explosivas provenientes de tres volcanes activos de la Zona Volcánica Austral (AVZ) y uno de la Zona Volcánica Sur (SVZ). Debido a la lejanía con los centros eruptivos activos, en la península de Brunswick no se encuentran depósitos de otro tipo de fenómenos volcánicos.

- **Tefras del Volcán Reclús**

Erupción R1 (Tardiglacial): La tefra **R1** fue la erupción explosiva Holocena más grande de los centros AVZ. Se ha encontrado en Punta Arenas (sitio #13) con un espesor de 4 cm, y en Río Tres

³ Abreviaciones: AR, Arroyo Robles; RR, Río Rubens; EO, Estancia Otway; ROH, Río O'Higgins; PA, Punta Arenas; LA, Laguna de los Cisnes; RTB, Río Tres Brazos. Abreviaciones en el inserto: F, Dome Fuji; V, Vostok Station; C, Dome C; T, Taylor Dome; A, Andrill; S, Siple Dome; W, WAIS Divide.

Brazos, Península de Brunswick (sitio #17), con 3 cm. En un testigo de Puerto del Hambre (Península de Brunswick, sitio #17) se ubicó a 230 cm de profundidad. Esta tefra R1 es de composición riolítica, de color blanco, y su edad promedio (no calibrada) es de 12.685 ± 260 años AP (aproximadamente 14.373 – 15.260 años cal AP). Es la tefra holocena conocida más antigua en el área (Stern, 2008; Stern et al., 2011).

- **Tefras del Volcán Monte Burney**

Erupción MB2 (Holocena tardía): Se ha identificado la tefra MB2 en Punta Arenas con 5 cm de espesor, en Puerto del Hambre (sitio #17, Península de Brunswick) con 3 a 4 cm, y se ha correlacionado una capa de 1 cm en un testigo de Cabo Gajardo (Península Muñoz Gamero) como MB2. Es de composición riolítica, de color blanco. Su edad promedio (no calibrada) es de 3.830 ± 390 años ^{14}C AP (aproximadamente 3.818 – 4.711 años cal AP). En un estudio posterior, un depósito del Monte Burney (posiblemente MB2) en una estalagmita en una cueva cercana al volcán se dató con mayor precisión en 4.216 años cal AP (Stern, 2008; Kilian et al., 2003; Klaes et al., 2022).

Erupción MB1 (Holocena media): También se ha encontrado la tefra **MB1** en Puerto del Hambre (sitio #17, Península de Brunswick) con 2 cm de espesor. Es de composición riolítica. Su edad promedio (no calibrada) es de 8.425 ± 500 años ^{14}C AP (aproximadamente 8.851 – 9.949 años cal AP) (Stern, 2008).

- **Tefras del Volcán Hudson**

Erupción H1 (Holocena media): Se ha identificado la tefra H1 en Punta Arenas (sitio #13) con 2 cm de espesor, y en Puerto del Hambre (sitio #17, Península de Brunswick) con 3 cm. La tefra H1 se distingue por ser de color verdoso, con vidrio de composición andesítica. Su edad promedio (no calibrada) es de 6.850 ± 160 años AP (aproximadamente 7.571 – 7.849 años cal AP) (Stern, 2008).

- **Tefras del Volcán Aguilera**

Erupción A1 (Holocena tardía): Se ha encontrado un depósito de 1 cm de tefra A1 en Río Tres Brazos, Península de Brunswick (sitio #17). Es una tefra de composición riolítica. Su edad se estima en aproximadamente 3.000 ± 100 años ^{14}C AP (o 3.067 – 3.339 años cal AP). El vidrio de la tefra de Aguilera es notablemente más rico en K_2O y Rb en comparación con otras tefras de la AVZ (Stern, 2008).

Depósito de edad histórica (incierto/Hudson)

En un testigo de turba de Punta Arenas (sección PA-1) se identificó un depósito de tefra de 2 a 5 cm de espesor, de color gris-blanco (Kilian et al., 2003). Este depósito (PA-1B) mostró características composicionales del Grupo Rh1 (Del Carlo et al., 2018), que se correlaciona con el Monte Burney. Sin embargo, la datación proporcionó solo una edad mínima de 1.259 ± 32 años cal AP. Del Carlo et al. (2018) sugieren su correlación con la erupción MB2 del Monte Burney (**Tabla 10**).

Tabla 10. Resumen de los depósitos de tefra de los volcanes revisados.

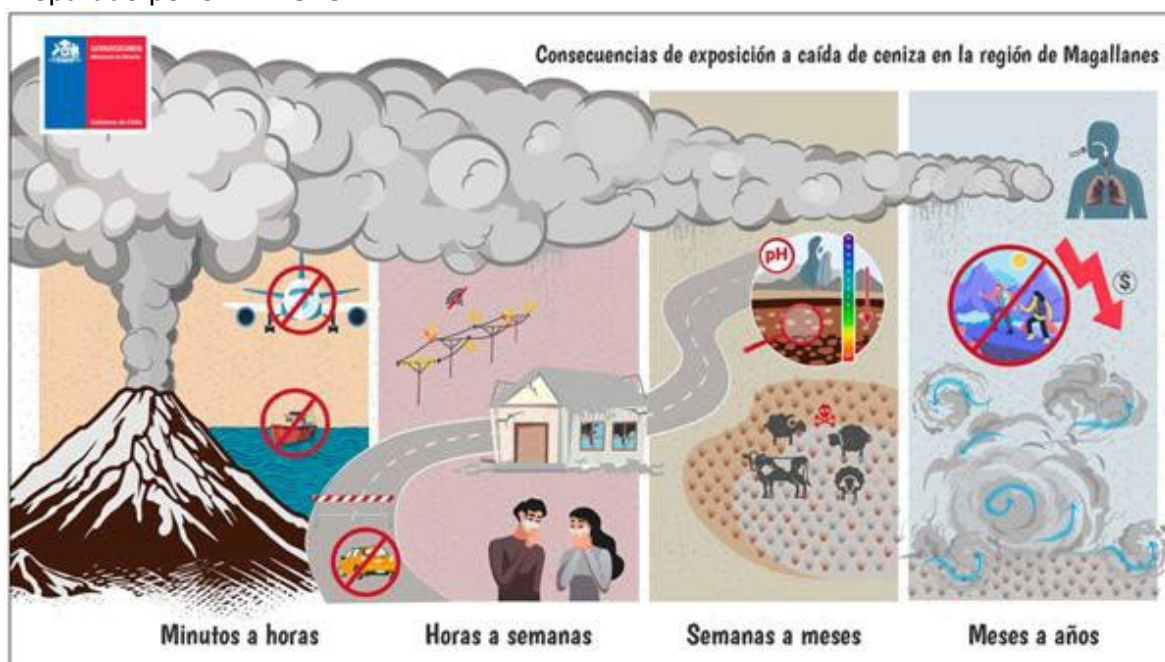
Volcán	Erupción	Ubicación	Espesor (cm)	Composición/Color	Edad (cal AP)
Viedma (AVZ)	1988 (Histórica)	No se han atribuido capas de tefra dispersas en el sur de Patagonia. Rastros de erupción freatomagmática al sur del nunatak Viedma.	N/A	No determinada	1988 (Histórica)
Lautaro (AVZ)	1979/1959-1960 (Históricas)	No se han atribuido capas de tefra dispersas en el sur de Patagonia.	N/A	No determinada	1979 (Histórica)
Fueguino (AVZ)	1820 (Histórica)	Centro volcánico más austral de los Andes.	N/A	Tendencia toleítica baja en K (Lineaje 6)	1820 (Histórica)
Monte Burney (AVZ)	MB4	Stalagmita MA1 (cercana al volcán).	Pocos milímetros	No determinada	853⁺⁴¹/₋₆₀ yrs BP
Reclús (AVZ)	R3 (Holoceno)	Torres del Paine/Sur de Patagonia.	Muy delgadas	Químicamente compatible con Reclús	1.035 cal años AP
Reclús (AVZ)	R2 (Holoceno)	Torres del Paine/Sur de Patagonia.	Muy delgadas	Químicamente compatible con Reclús	1.789 cal años AP
Monte Burney (AVZ)	MB3	Península Muñoz Gamero; Stalagmita MA1 (cercana al volcán).	Capa delgada	No determinado	2.291 ± 33 yrs BP
Aguilera (AVZ)	A1 (U/Th, MA1)	Stalagmita MA1 (cercana al volcán).	En stalagmita (sin espesor macroscópico)	Riolítico (Alto K)	2.978⁺⁹¹/₋₁₀₄ yrs BP
Hudson (SVZ)	H2 (Late Holocene)	Islas Malvinas, Inglaterra.	N/A	Andesítico/Dacítico (Grupo Tr)	4.235–3.775 cal yr BP (Median integrada)
Monte Burney (AVZ)	MB2 (Late Holocene)	Punta Arenas (5 cm); Puerto del Hambre (Pen. Brunswick) (3–4 cm).	3 a 15	Riolítico/Blanco (Grupo Rh1)	3.818–4.711 cal yr BP
Aguilera (AVZ)	A1/AF1 (Revised Age)	Río Tres Brazos (Pen. Brunswick) (1 cm); Islas Malvinas.	1 a 10	Riolítico/Blanco (Alto K)	4.390–4.150 cal yr BP

Volcán	Erupción	Ubicación	Espesor (cm)	Composición/ Color	Edad (cal AP)
Hudson (SVZ)	H1 (Mid-Holocene)	Punta Arenas (2 cm); Puerto del Hambre (Pen. Brunswick) (3 cm).	1 a 20	Andesítico/ Verdoso/Verde (Grupo Tr)	7.571–7.849 cal yr BP
Monte Burney (AVZ)	MB1 (Mid-Holocene)	Puerto del Hambre (Pen. Brunswick) (2 cm).	1 a 12	Riolítico/ Blanco (Grupo Rh1)	8.851–9.949 cal yr BP
Monte Burney (AVZ)	MBK3 (Possible, Early Holocene)	Pen. Muñoz Gamero	1 mm en testigo de sedimento	Riolítico (Presumido)	>4.96 ± 0.09 ka BP
Reclús (AVZ)	R1 (Tardiglacial)	Punta Arenas (4 cm); Puerto del Hambre (Pen. Brunswick) (3 cm).	3 a >40	Riolítico/ Blanco (Grupo Rh2)	14.800–14.060 cal yr BP

Potencial impacto de la caída de ceniza

En la Península de Brunswick se han documentado capas de ceniza con espesores de pocos centímetros (**Tabla 10**), generadas por erupciones explosivas de volcanes cercanos, como el Monte Burney. Además de la caída directa de ceniza, esas capas delgadas pueden ser removilizadas por viento y seguir causando impactos tiempo después del evento eruptivo principal. Las consecuencias potenciales que se pueden esperar de la caída de ceniza en Punta Arenas son (Figura 2) (Wilson et al., 2011; Fontijn et al., 2014; Véliz and Vera, 2024)

Figura 19. Esquema con las posibles consecuencias de la caída de Ceniza en Punta Arenas. Preparado por SERNAGEOMIN.



Fuente: Véliz y Vera, 2024.

- Interrupciones del transporte: reducción marcada de visibilidad durante y después de la erupción por removilización eólica, con suspensión/alteraciones de vuelos y afectación de rutas terrestres. Estos episodios pueden prolongarse por semanas, y hasta meses, en climas ventosos y semiáridos como Patagonia.
- Impactos urbanos persistentes: necesidad de limpieza municipal sostenida más allá del evento principal; formación y migración de acumulaciones de ceniza en áreas abiertas y exposición recurrente de la población a polvo fino.
- Salud pública: episodios de mala calidad del aire y exposición a partículas finas durante removilización eólica de las cenizas, con impactos reportados en la salud humana (irritación ocular y respiratoria) en zonas afectadas.
- Ganadería y entorno rural regional: abrasión de vegetación, contaminación de forraje y efectos en el ganado (p. ej., problemas gastrointestinales y oculares), lo que en 1991 condujo a deterioro prolongado del sector agropecuario y relocalización de población en Patagonia con la erupción del volcán Hudson.
- Sistemas de agua y suelos: sedimentación en canales y drenajes, erosión eólica y fluvial de los depósitos, y, en turberas, alteraciones de la acumulación de turba y de la biogeoquímica de poros (efectos ambientales en humedales locales).
- Infraestructura y servicios: afectación general de infraestructura, actividades económicas y turismo regional ante erupciones explosivas del AVZ.

En conjunto, estos antecedentes indican que en Punta Arenas se debe planificar la gestión de ceniza (recolección temprana, estabilización de depósitos, protección de salud y continuidad de operaciones críticas) para casos de ser afectados por este fenómeno.

B. Amenazas hidrometeorológicas que consideran el cambio climático

6.1.6. Inundación fluvial

Punta Arenas presenta una **alta susceptibilidad** a inundaciones debido a su topografía de baja pendiente, suelos con escasa permeabilidad y la limitada capacidad de los cauces naturales. Las lluvias intensas, combinadas con la obstrucción de cauces y acumulación de sedimentos, provocan desbordes y anegamientos en sectores urbanos. Entre los principales cursos de agua que cruzan la ciudad se encuentran el estero La Mano, río Las Minas, el estero Llau-Llau y el estero D'Agostini, siendo el Río Las Minas el cauce de mayor relevancia en la comuna de Punta Arenas. El proyecto se ubica dentro de la cuenca del Estero Llau-Llau, el cual drena hacia el Estrecho de Magallanes al norte del actual Terminal Marítimo José Santos Mardones. De acuerdo con la "MODIFICACIÓN PLAN REGULADOR COMUNAL DE PUNTA ARENAS, 2011" el caudal de crecida del Estero Llau-Llau en desembocadura es de 12 m³/s para un periodo de retorno de 5 años, de 15 m³/s para un periodo de retorno de 10 años y de 31 m³/s para un periodo de retorno de 100 años.

El estudio de riesgos y protección ambiental del PRC de Punta Arenas presenta estimaciones de caudales máximos instantáneos para el Estero Llau-Llau y proyecciones futuras luego de la construcción de obras de protección y colectores de aguas lluvias en el Estero Llau-Llau basadas en el estudio "Análisis regulación uso del cauce, fijación deslindes y zonas de riesgos del río Las Minas

y Estero Llau-Llau, Punta Arenas”, DOH 2002. Estos valores se presentan en la **Tabla 11** tanto para el límite urbano del cauce y desembocadura.

Tabla 11. Caudales de crecida para río estero Llau-Llau para distintos periodos de retorno en m³/s.

Ubicación	Escenario	Periodo de retorno en Años					
		2	5	10	25	50	100
Limite Urbano	Actual (m ³ /s)	4	6	7	10	12	15
Desembocadura	Actual (m ³ /s)	9	12	15	21	25	31
Limite Urbano	Futuro (m ³ /s)	0	0	0	0	0	0
Desembocadura	Futuro (m ³ /s)	4	6	7	9	11	13

Fuente: Modificación Plan Regulador Comunal de Punta Arenas, 2011

De acuerdo con el documento “Modificación Plan Regulador Comunal de Punta Arenas, 2011”, se han definido áreas de inundación para los esteros Bitsch, Llau-Llau, D’Agostini, y los ríos De La Mano y Los Ciervos para caudales de 10 años de periodo de retorno. El estudio “Análisis regulación uso del cauce, fijación deslindes y zonas de riesgos río Las Minas y Estero Llau - Llau, Punta Arenas”, DOH 2002 explora y define medidas no estructurales dirigidas a mitigar los problemas que se generan durante las crecidas del río Las Minas y el estero Llau-Llau en la ciudad de Punta Arenas.

Para el estero Llau-Llau las crecidas con periodo de retorno de 10 años, las áreas de inundación se producen principalmente desde la confluencia del estero D’Agostini hasta la desembocadura, pasando por sectores de uso residencial, industrial, vialidad y bodegaje, como se observa en la **Figura 20**, donde parte del polígono portuario ya se ve afectado con este período de retorno.

Figura 20. Mapa de inundación por desborde de Estero Llau-Llau (T=10 años).



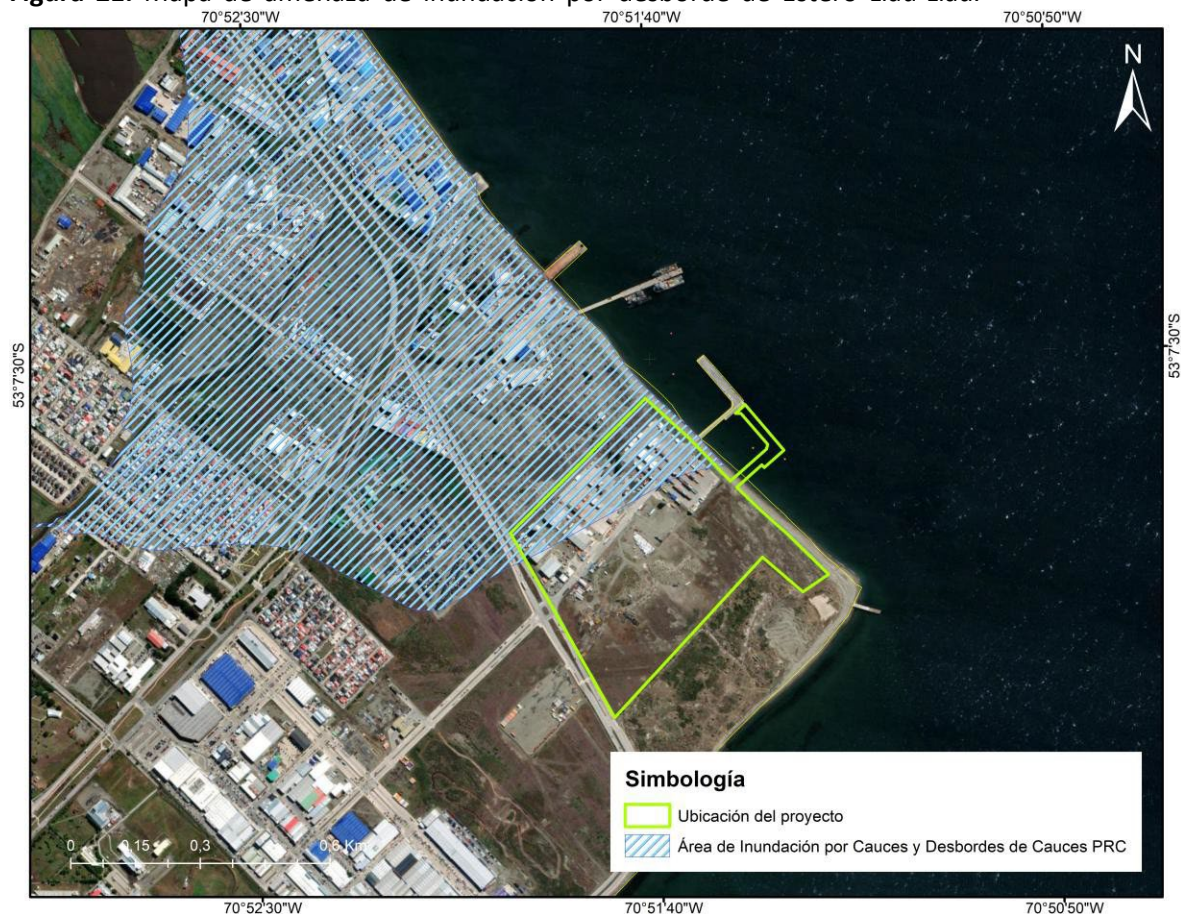
Fuente: Modificación Plan Regulador Comunal de Punta Arenas, 2011.

De acuerdo con el estudio “Plan de Acción Regional de Cambio climático de Magallanes” (PARCC, 2023), se prevé un aumento de caudales máximos anuales del 40% para el Río Minas entre 2020 y 2060, sin embargo, el estudio no hace alusión al Estero Llau-Llau.

La actualización del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de Punta Arenas (DOH, 2018) indica la existencia de obras hidráulicas orientadas a la disminución del riesgo de inundaciones en la comuna. En el año 2013 se construyó el Parque Inundable Ramón Rada con el objetivo de reducir el caudal de crecida y retardar el ingreso del caudal del Estero D’Agostini hacia el Estero Llau-Llau y posterior descarga al Estrecho de Magallanes. Luego del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de 1999 se construyó un canal de trasvase para desviar las aguas de la parte alta de las cuencas de los esteros D’Agostini y Llau-Llau hacia el estero Bitsch. Esto aumentaría la capacidad de ambos cauces en su parte baja para evacuar aguas lluvias urbanas, la cual ha experimentado un aumento en la impermeabilidad incrementando la potencial escorrentía superficial. Es importante destacar que el Estero Llau-Llau recibe aguas lluvias de al menos 8 colectores de aguas lluvias (Proyecto de Modificación N° 1, Plan Regulador Comunal de Punta Arenas, Memoria Explicativa, 2021).

Además, en la **Figura 21** se observa la extensión de la zona con riesgo de inundación por el desborde de cauce obtenido del plan regulador vigente de Punta Arenas.

Figura 21. Mapa de amenaza de inundación por desborde de Estero Llau-Llau.

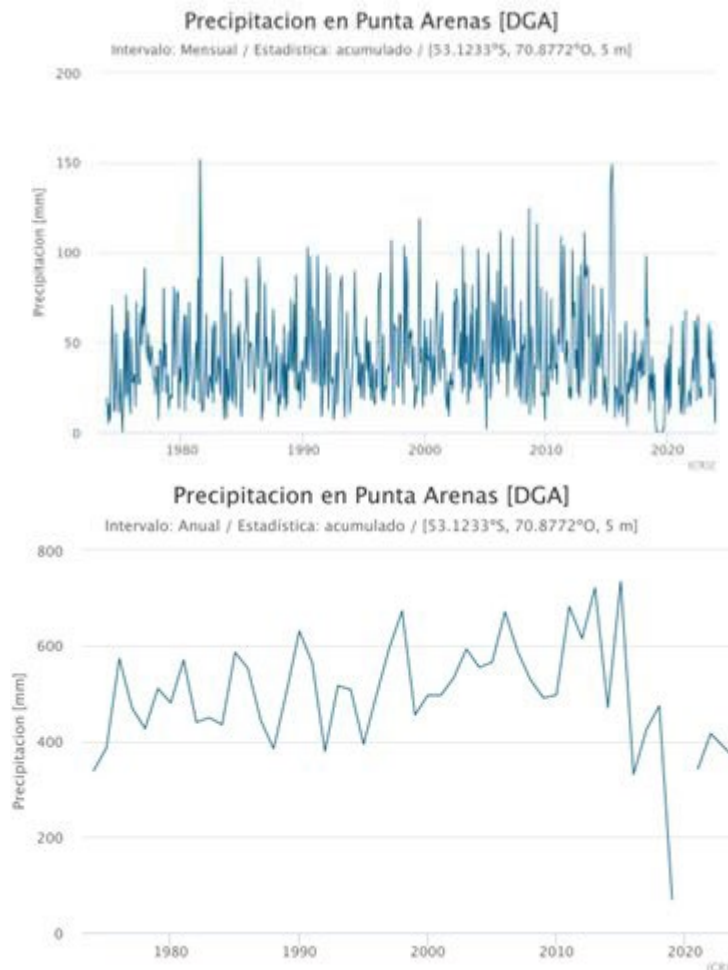


Fuente: Elaboración propia a partir de PRC de Punta Arenas.

6.1.7. Inundación pluvial

Punta Arenas presenta un régimen de precipitaciones frío oceánico, con lluvias distribuidas a lo largo de todo el año. Los registros históricos muestran un promedio anual de entre 500 y 700 mm para la estación Punta Arenas de la DGA. Las lluvias son frecuentes, pero de baja intensidad, con presencia de nieve y aguanieve entre mayo y octubre. En la **Figura 22** el registro de precipitaciones acumuladas mensuales y anuales de la estación Punta Arenas (DGA, Explorador Climático CR2) entre 1960 y 2025, se observan fluctuaciones mensuales y anuales, pero sin una tendencia clara de aumento o disminución a largo plazo.

Figura 22. Precipitación acumulada mensual y anual para la estación meteorológica Punta Arenas (DGA).

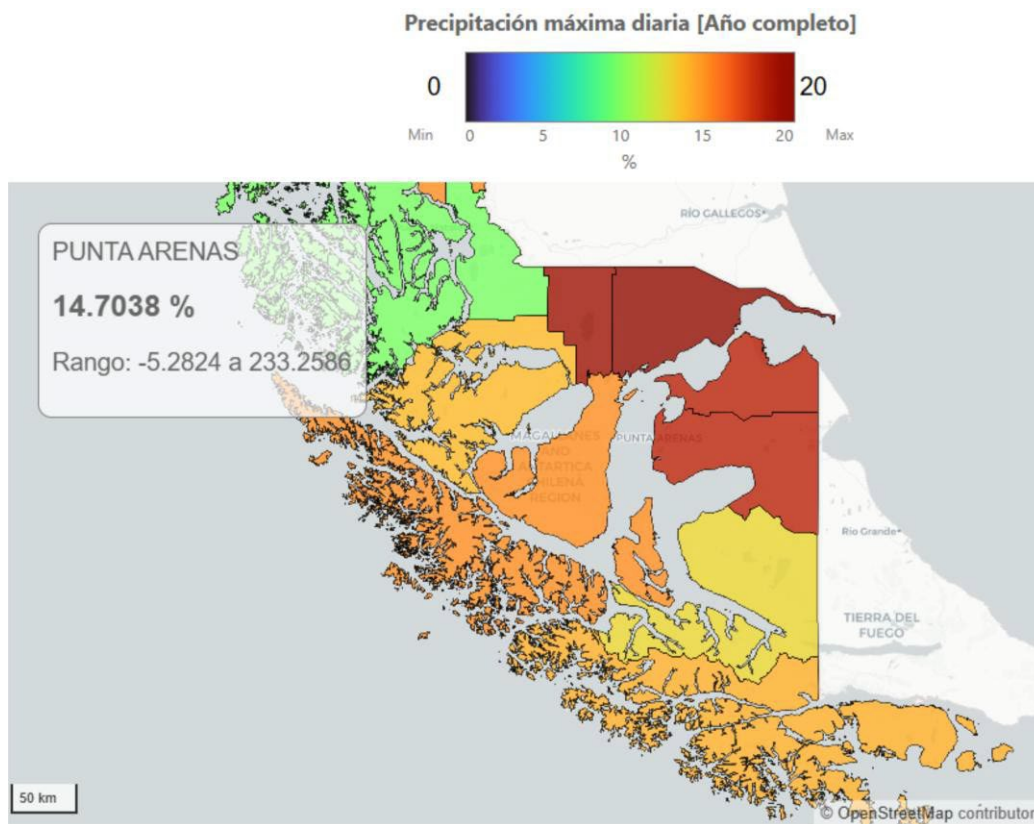


Fuente: Explorador Climático (<https://explorador.cr2.cl/>)

El Plan de Acción Regional de Cambio climático de Magallanes (PARCC, 2023) proyecta un aumento de la precipitación anual acumulada para toda la comuna de Punta Arenas de 1.185 mm a 1.239 mm, equivalente a un incremento del 4,51 %. Este aumento es más pronunciado en invierno y menor en verano (PARCC, 2023).

De acuerdo con los datos disponibles en la plataforma ARClím del Ministerio de Medio Ambiente de Chile las precipitaciones máximas diarias en Punta Arenas son en promedio de 23.36 mm/día para el periodo de 1980-2010. Las proyecciones de cambio climático para el periodo de 2035-2065 estiman un aumento de la precipitación máxima diaria a 26,8 mm/día, lo que significa un aumento relativo del 15%, incrementando el riesgo de inundaciones urbanas y escorrentía superficial. Las proyecciones indican que el mayor aumento se daría en invierno. El mapa de la **Figura 23** muestra el cambio en la precipitación máxima diaria para la Región de Magallanes y la comuna de Punta Arenas (ARClím, 2022). Esto sugiere una intensificación de los eventos de precipitación extrema, particularmente durante la temporada invernal (PARCC, 2023).

Figura 23. Porcentaje de cambio entre el escenario histórico y futuro para la Precipitación máxima diaria en Punta Arenas.



Fuente: ARClím, 2022.

Las proyecciones de cambio climático para Punta Arenas también sugieren una transición de precipitaciones sólidas a líquidas producto de los aumentos de temperatura, lo que sugiere un aumento en la escorrentía superficial en los cauces de la comuna, potencialmente aumentando el riesgo de inundación (PARCC, 2023). De acuerdo con la información disponible en la plataforma ARClím (2022), la comuna de Punta Arenas presenta un nivel alto de amenaza por desborde de colectores en los escenarios presente y futuros.

La Actualización del Plan Maestro de Evacuación y Drenaje de Aguas Lluvias de Punta Arenas (DOH, 2018) recopila información histórica de inundaciones fluviales y pluviales en la Comuna de Punta Arenas. Dentro de las inundaciones pluviales se toman en cuenta aquellas en que las precipitaciones superaran los 15 mm en 24 horas identificándose más de 30 eventos de inundación en dichos casos entre 1990 y 2015. Entre los eventos recientes de mayor magnitud destacan el evento del 11 y 12 de marzo de 2012, en que precipitaron aproximadamente 85 mm, generándose una crecida del Río Minas, mientras que no se registraron desbordes en el Estero Llau-Llau. En la **Tabla 12**, se observan algunos otros eventos recientes de precipitación que causaron inundaciones en Punta Arenas.

Tabla 12. Extracto de los eventos de inundación registrados en la prensa local.

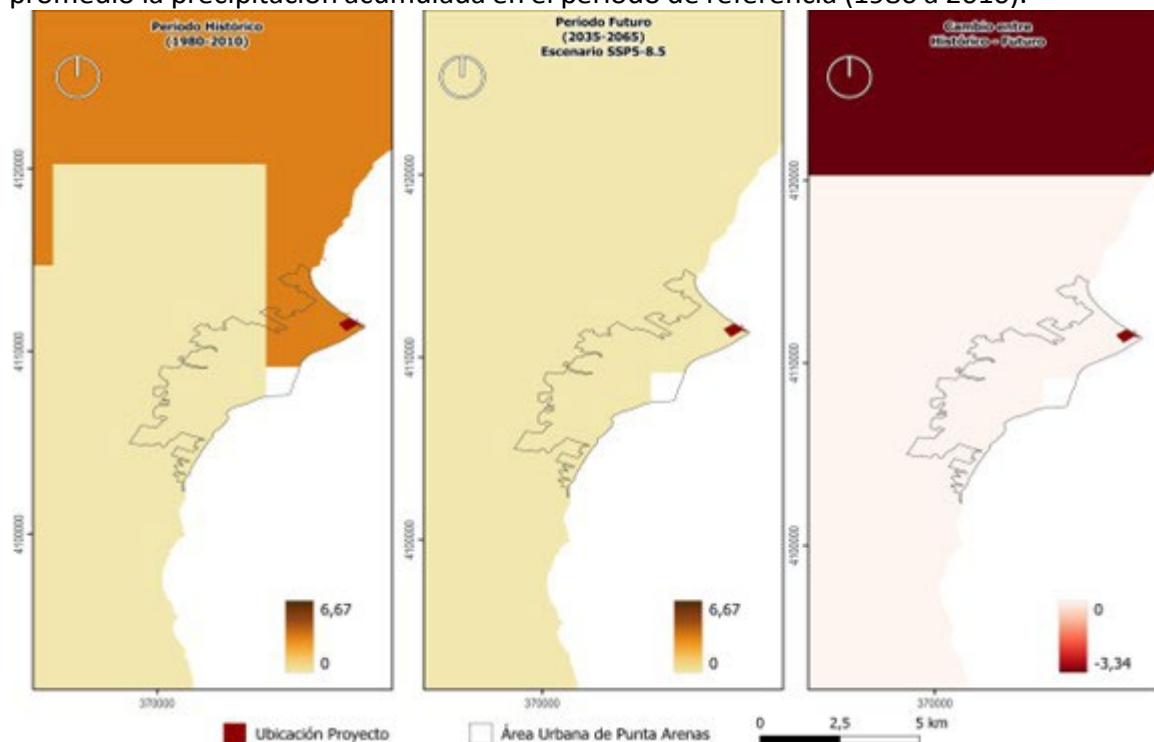
Fecha	Precipitación en 24 hrs (mm)	Resumen
11 marzo 2012	50,8	Desborde de río Las Minas
12 marzo 2012	34,1	Desbordes de ríos
8 agosto 2011	16,2	Desborde estero Llau-Llau
5 junio 2015	73,7	Esteros Llau-Llau y parque inundable presentaron inundaciones
23-24 julio 2015	56,2	Deshielos y marea alta afectaron la evacuación normal de las aguas lluvias

Fuente: Plan Regulador Comunal, 2011

6.1.8. Sequía

La frecuencia de sequía en el área es baja dentro del periodo histórico, y disminuye a cero en el periodo futuro, es decir no se proyectan sequías (**Figura 24**). No es una amenaza relevante según las proyecciones climáticas.

Figura 24. Frecuencia de periodos en que la precipitación acumulada es menor al 75% del promedio la precipitación acumulada en el periodo de referencia (1980 a 2010).



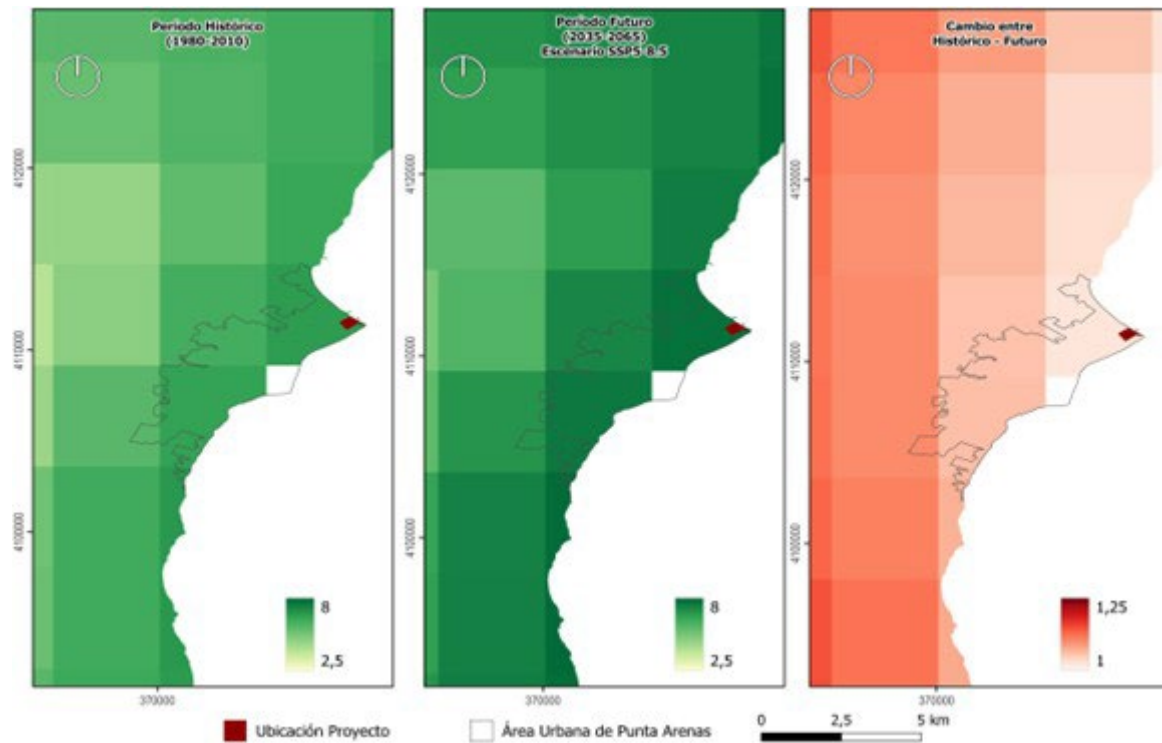
Fuente: Atlas de Riesgos Climáticos (ARClím).

6.1.9. Ola de calor/ola de frío

Las proyecciones climáticas muestran aumentos en las variables asociadas al incremento del calor que son leves (+14% en temperatura media, **Figura 25**) y muy relevantes (+116% en días cálidos, **Figura 26** y +258% en duración de episodios cálidos >3, **Figura 27**). A su vez la disminución de episodios fríos es relevante (-75% en duración de episodios fríos, **Figura 28** y -50% en grados-día bajo 0, **Figura 29**). De estos cambios sólo el aumento de días cálidos y su duración >3 podría llegar

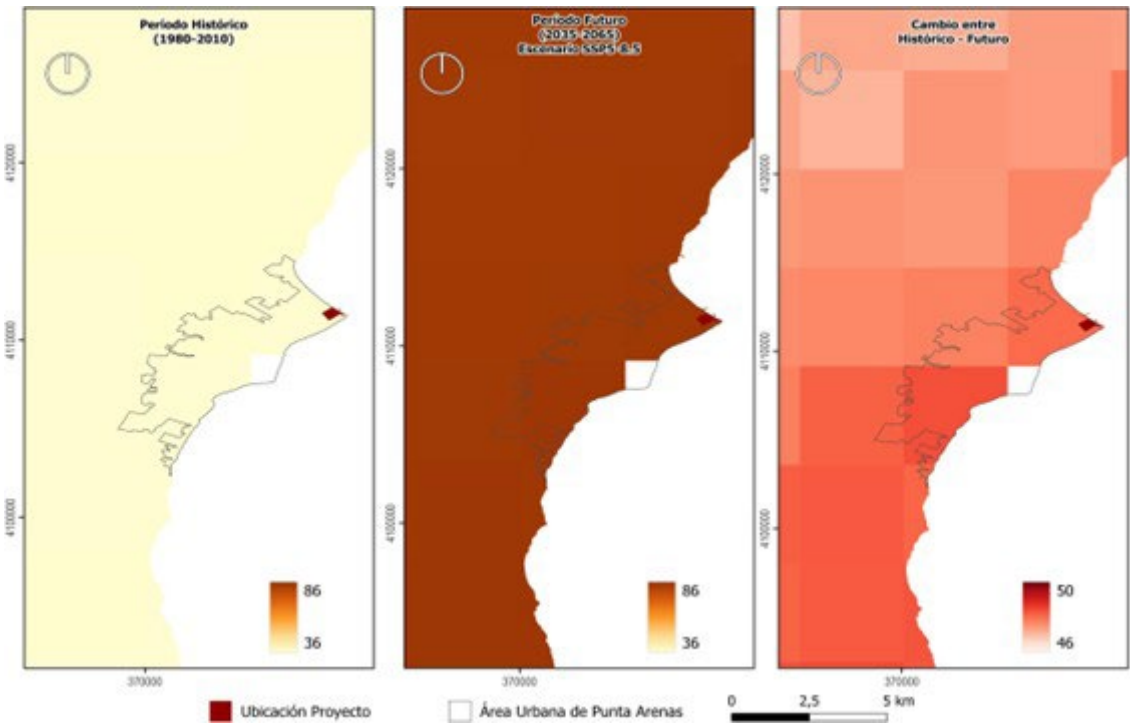
a generar situaciones ambientales complejas que amenacen en forma directa el funcionamiento del proyecto y el bienestar de sus trabajadores, para lo cual se debería revisar la adaptación de las instalaciones frente a las máximas temperaturas proyectadas.

Figura 25. Temperatura Media: Valor medio de la temperatura media diaria, calculado como $0.5 \cdot (T_{\max} + T_{\min})$.



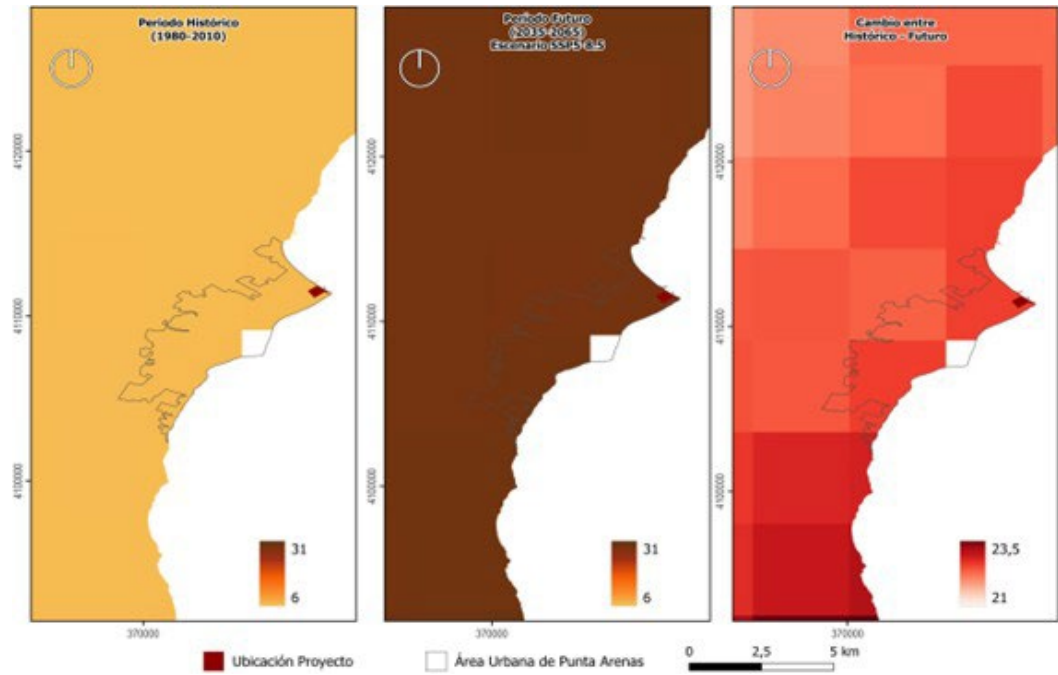
Fuente: ARCLim.

Figura 26. Días cálidos: Número de días en que la temperatura supera el umbral definido como el percentil 90 de la temperatura diaria en el periodo de referencia (1980 a 2010).



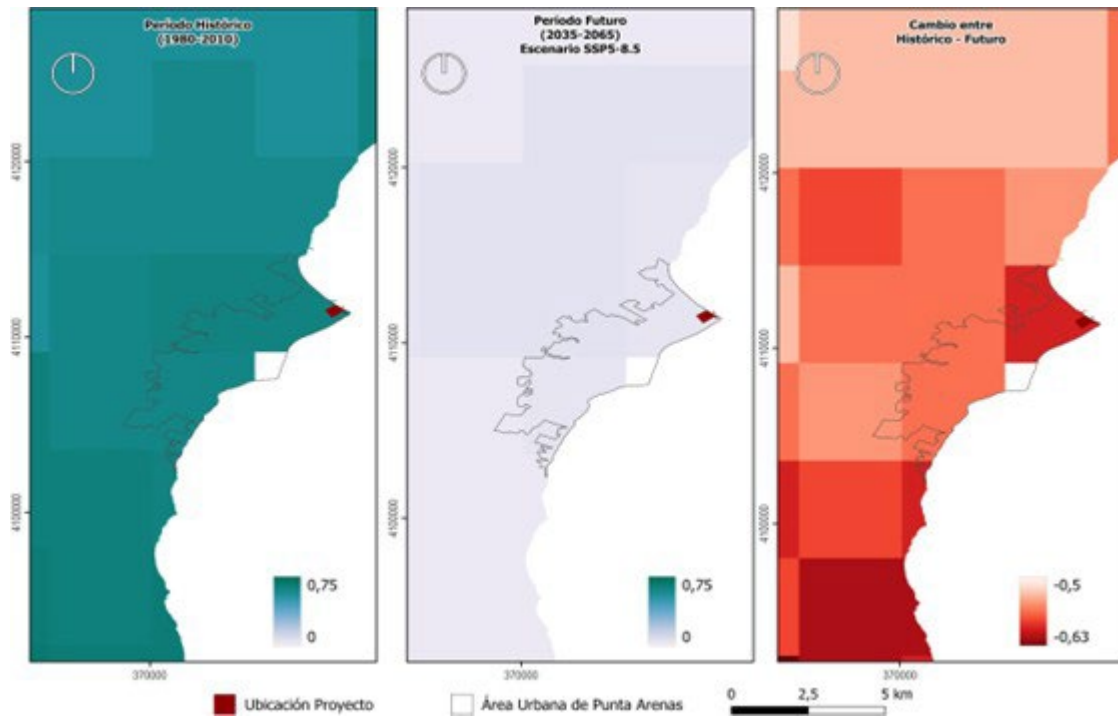
Fuente: ARClím

Figura 27. Duración de episodios cálidos (>3): Número de días con al menos 3 días consecutivos en que la temperatura máxima supera el percentil 90.



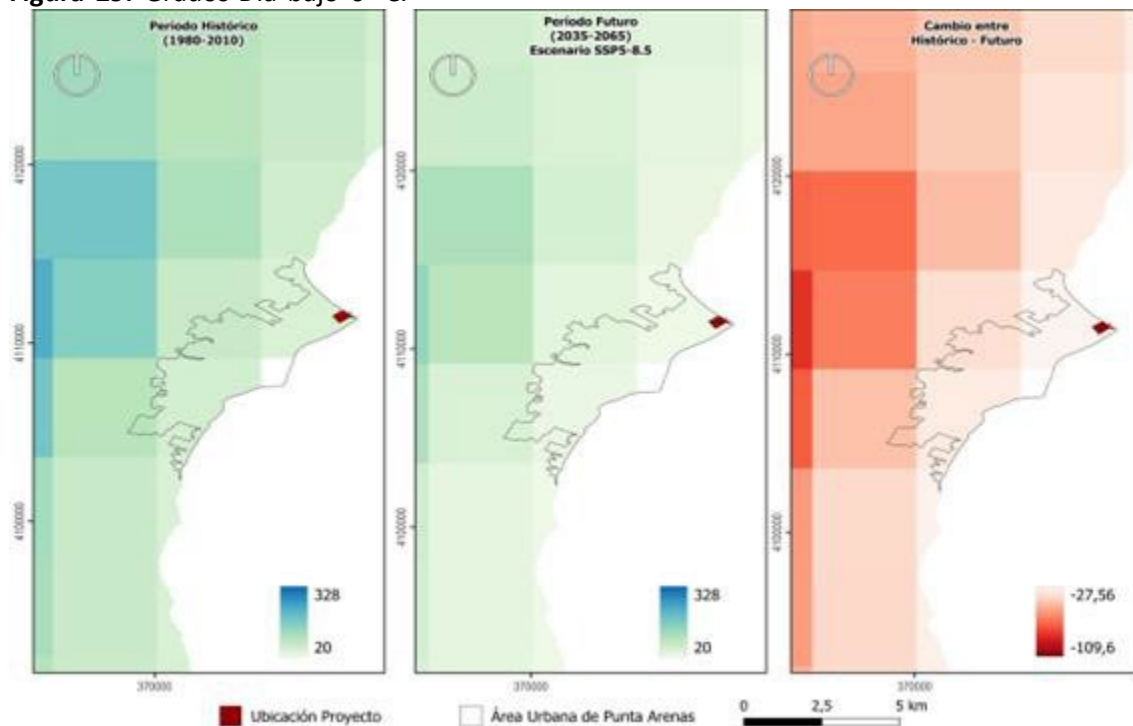
Fuente: ARClím

Figura 28. Duración de episodios fríos (> 6 días): Número de días con al menos 6 días consecutivos en que la temperatura mínima no supera el percentil 10 de la temperatura mínima diaria en el periodo de referencia (1980 a 2010).



Fuente: ARClím.

Figura 29. Grados-Día bajo 0 °C.

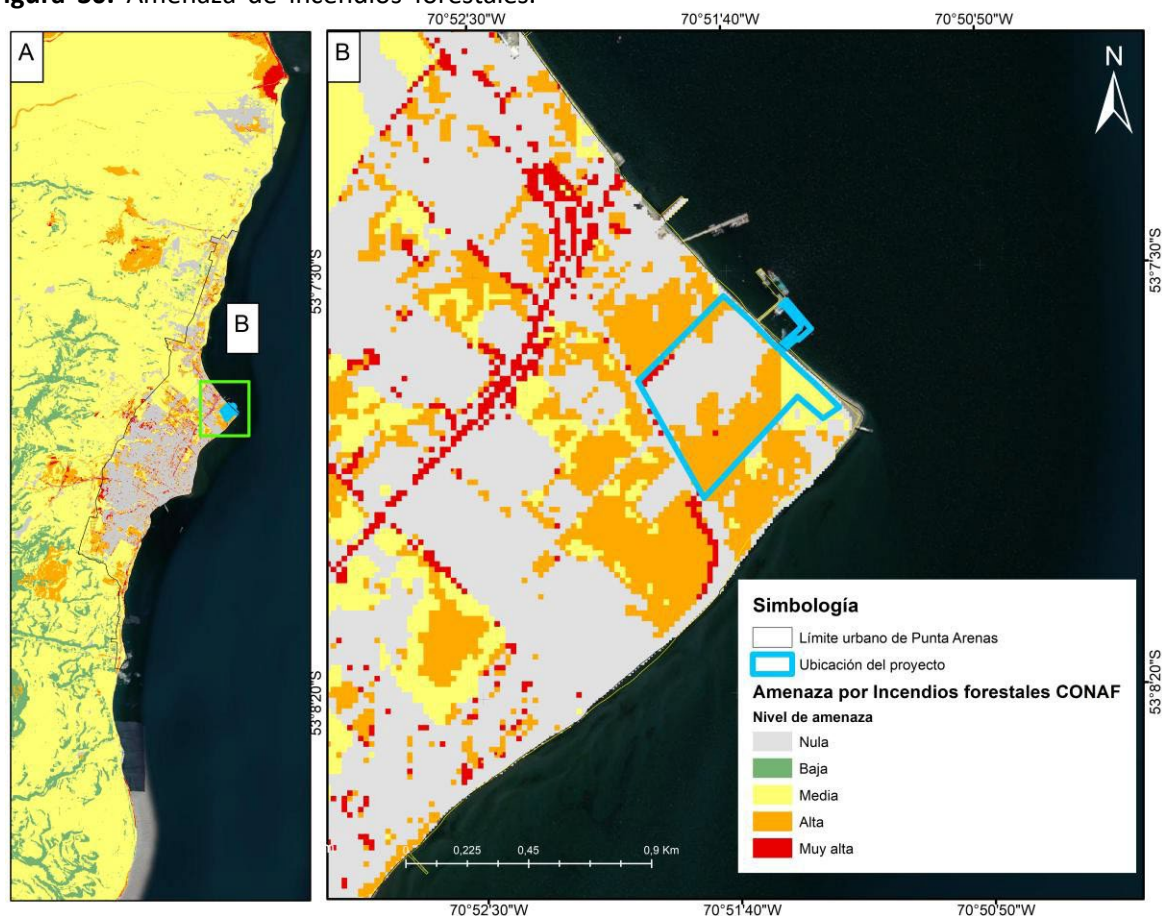


Fuente: ARClím.

6.1.10. Incendios forestales

La amenaza de incendios forestales es alta en el área del proyecto, y es bajo y medio en el entorno rural (**Figura 30**). El incremento proyectado de la temperatura puede incrementar la amenaza por lo que es necesario tomar precauciones en la operación del proyecto.

Figura 30. Amenaza de incendios forestales.



Fuente: Corporación Nacional Forestal (CONAF)

6.1.11. Viento y viento máximo diario (tormentas)

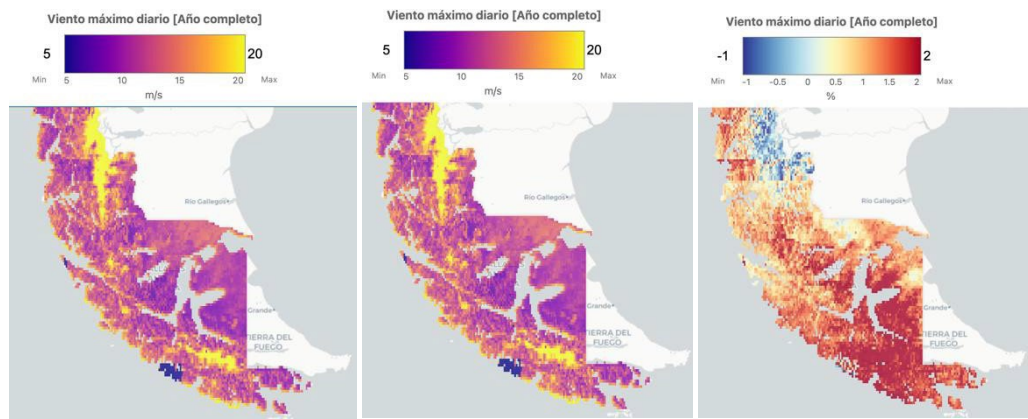
La Región de Magallanes se caracteriza por un régimen de viento de alta intensidad. Las velocidades medias oscilan entre los 25 y 35 km/h (7 a 10 m/s aproximadamente). La dirección predominante del viento Oeste-Noroeste. Para el año 2024 se registraron vientos de hasta 95 km/h en la estación meteorológica Carlos Ibáñez (Punta Arenas, Aeropuerto), y una media anual de 30 km/h.

Los vientos máximos diarios en la Región de Magallanes alcanzan los 30 m/s, observándose los valores más altos en la zona de Campos de Hielo Sur.

De acuerdo con los datos disponibles en la plataforma ARClím (2022), se observa que para el periodo de 1980-2010 el promedio anual de la velocidad del viento máximo diario es de 11,37 m/s, mientras que para el periodo de 2035-2065 se estima que el promedio anual aumente a 11,67 m/s,

lo que significa un aumento leve del 2,6%. Las estimaciones de viento histórico, futuro (Escenario SSP5-8.5) y el cambio para la Región de Magallanes se muestran en la **Figura 31**.

Figura 31. Viento máximo diario (m/s) en el periodo actual (1980-2010), periodo futuro (2035-2065) para escenarios de Cambio climático, y cambio del viento máximo (m/s) en la región de Magallanes.



Fuente: ARClím (2022).

La **Figura 32** muestra la distribución de la magnitud del viento máximo diario para los periodos 1980-2010 (pasado) y 2035-2065 tomados de la plataforma ARClím (2022). El viento máximo diario más frecuente corresponde a 10,88 m/s (15% del tiempo), mientras que para escenarios de cambio climático (SSP5-8.5) se prevé un aumento del viento máximo más frecuente a 11,88 m/s (el 20% del tiempo).

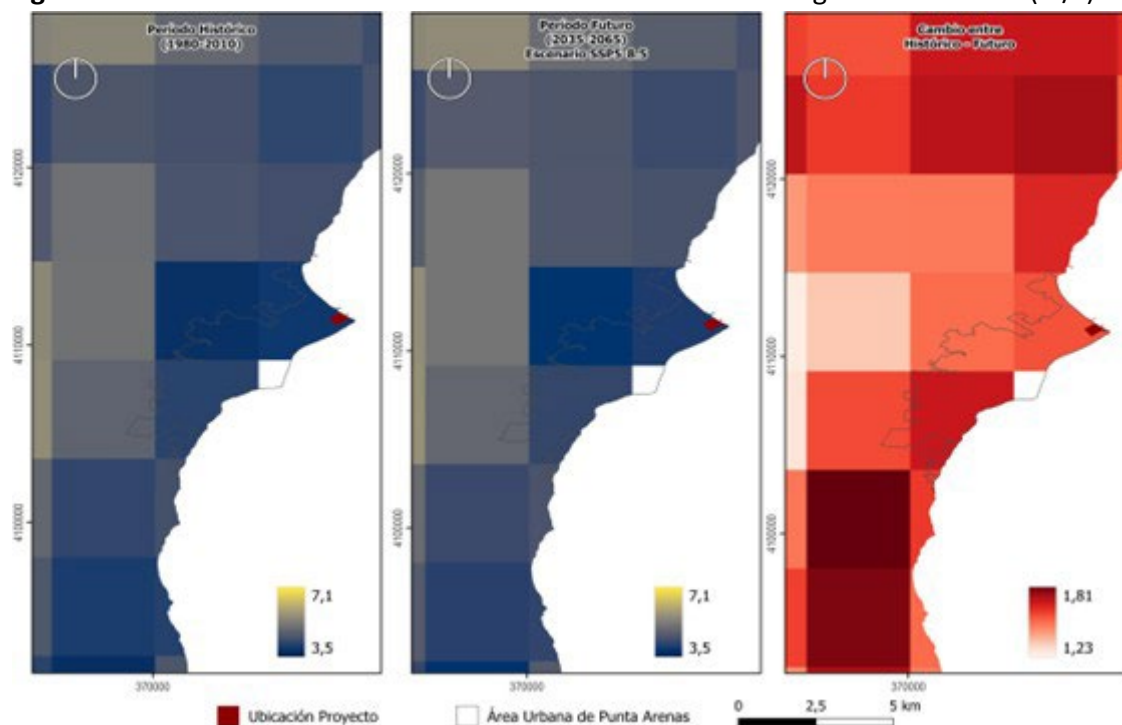
Figura 32. Frecuencia de ocurrencia de magnitud de Viento máximo diario (m/s) en el periodo actual (1980-2010) y periodo futuro (2035-2065) para escenarios de Cambio climático en Punta Arenas.



Fuente: ARClím (2022)

El cambio del viento medio no muestra evidencias para una consideración especial de la amenaza con esta variable (**Figura 33**), sin embargo, esto no descarta la posibilidad de ráfagas de viento que puedan representar una amenaza de consideración.

Figura 33. Viento medio: Valor medio del máximo diario de la magnitud del viento (m/s).



6.1.12. Oleaje

Los estudios de oleaje disponibles se enfocan principalmente en la costa chilena del Océano Pacífico, encontrándose escasa información de oleaje para el Estrecho de Magallanes.

El estudio “Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile, Volumen 1: Amenazas” (MMA, 2019) provee información histórica de oleaje (1980-2015) y proyecciones de cambio climático bajo el escenario RCP 8.5 del IPCC (2026-2045) en base a simulaciones numéricas de oleaje utilizando el modelo Wave Watch III. El “Estudio del desempeño y co-beneficios de las áreas marinas protegidas a la mitigación y adaptación al cambio climático” (Dinámica Costera, 2022) expande las proyecciones de cambio climático de oleaje hasta 2100.

El clima de oleaje del extremo sur de Chile (región de Magallanes y sector de canales y fiordos australes, latitudes superiores a 50°S) en la costa del Océano Pacífico está dominado por oleaje de fondo proveniente principalmente desde el Oeste-Suroeste. Durante el período 1980–2015, la altura significativa promedio fue de 3 a 4 m, con máximos invernales entre los 6 y 7 m. Se detectó una tendencia leve al aumento ($\sim 0.01\text{--}0.02$ m/año). En aguas profundas, los valores típicos de periodo peak del oleaje se sitúan entre los 10 y 12 s, con eventos extremos sobre los 14 s. Se observa un incremento marginal del período ($\sim 0,1$ s por década). Respecto a la dirección media se observa oleaje predominantemente Oeste-Suroeste ($240^{\circ}\text{--}260^{\circ}$), con un ligero giro hacia el sur.

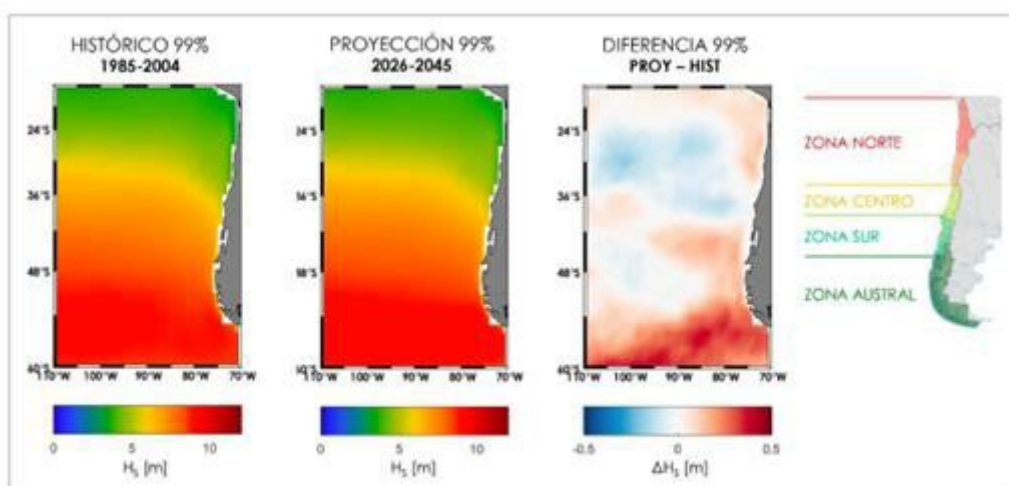
Las proyecciones de cambio climático indican un incremento leve de la altura significativa del oleaje entre los 0,05 m y los 0,15 m para 2045, y hasta los 0,2 m para 2100 (Dinámica Costera, 2022). En el Paso Drake y Tierra del Fuego el aumento podría ser de hasta 0,3 m. Las proyecciones indican un

aumento generalizado de 0,2 a 0,5 s del periodo peak hacia 2045 y de hasta 1,0 s hacia fines de siglo. Ambos estudios sugieren una rotación hacia el sur de entre 5° y 10° en la dirección media del oleaje, lo que modificará la exposición costera en canales y fiordos australes. La **Figura 34** muestra mapas de altura significativa del oleaje para el percentil 99% para los escenarios históricos (1985-2004), proyección (2026-2045) y la diferencia entre ambos escenarios. Se observa que la zona austral es la que muestra mayor aumento de la altura significativa del oleaje, alrededor de 0,5 m.

En términos de frecuencia, se prevé un aumento en los percentiles 50% y 99% de altura significativa y periodo del oleaje, y un giro hacia el sur de la dirección media del oleaje.

Es importante mencionar que el estudio “Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile, Volumen 5: Vulnerabilidad y riesgo en puertos” no considera los puertos ubicados en Punta Arenas.

Figura 34. Mapas de altura significativa del oleaje para el percentil 99% para los escenarios históricos (1985-2004), proyección (2026-2045) y la diferencia entre ambos escenarios.



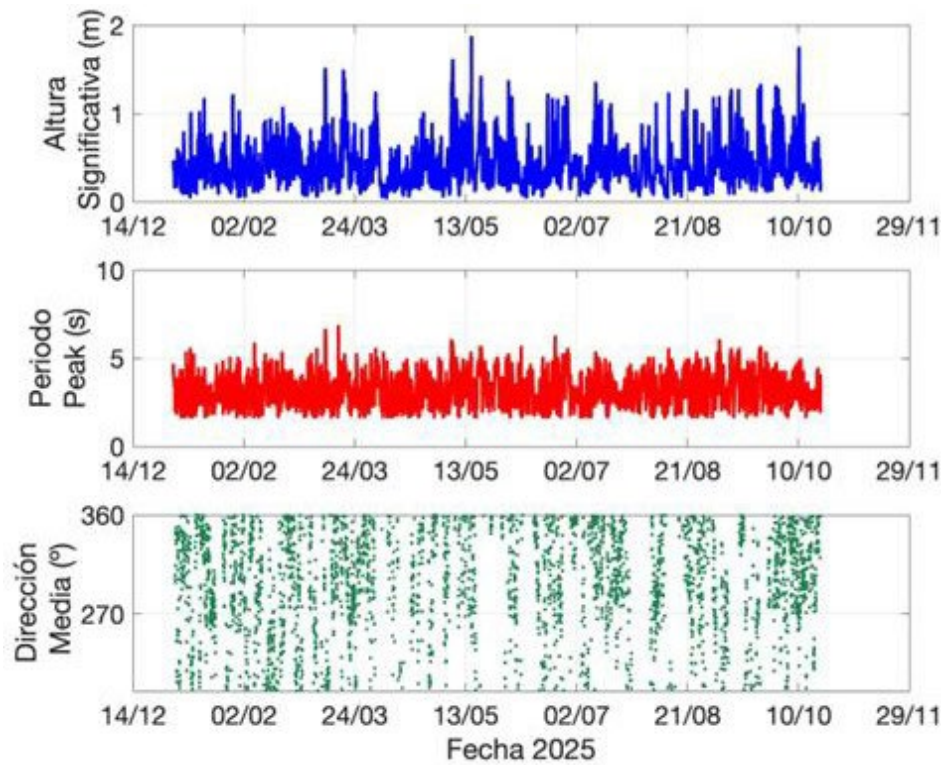
Fuente: Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile, Volumen 5: Vulnerabilidad y riesgo en puertos, 2019

El clima de oleaje en el Estrecho de Magallanes y en la costa de Punta Arenas responde a las condiciones de viento local. Observaciones históricas de oleaje reportadas en el Estudio de Impacto Ambiental Proyecto Nuevo Puerto de Punta Arenas (DOP, 1997) muestran olas de periodo corto (inferior a los 5,4 s) y altura significativa media de 0,3 m y altura significativa máxima de 1,3 m medidas en septiembre de 1996. El mismo estudio indica que el oleaje se aproxima a la costa de Punta Arenas desde el N y NE, y que su generación y crecimiento es limitado por fetch. El mismo estudio reporta que la Capitanía de Puerto indica olas de altura significativa máxima de 1,5 m y periodos de 5 segundos en un periodo de 18 meses de observación.

Actualmente, el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada opera una boya de oleaje frente a Punta Arenas, ubicada en una profundidad de 122 m (53.097°S; 70.713°W). La **Figura 35** muestra registros de oleaje de 2025 en donde se observa que las olas no superan los 2 m y su periodo es siempre bajo los 7 s, y la dirección es altamente variable al ser oleaje generado por viento local. La

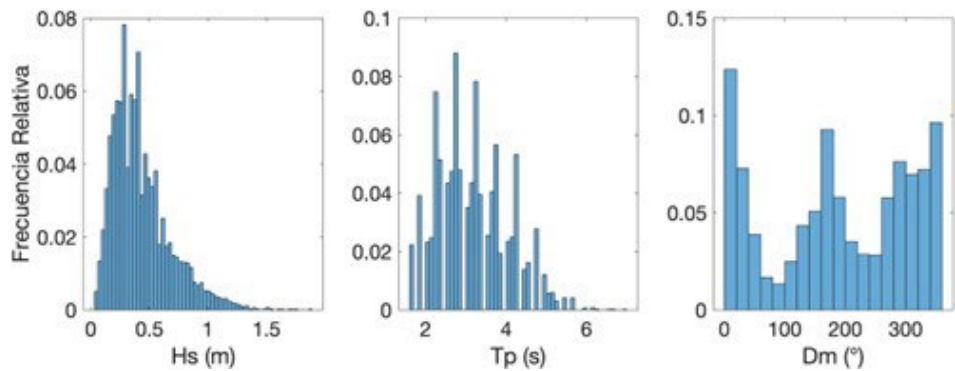
Figura 36 muestra la distribución de altura, periodo y dirección del oleaje para el año 2025 en Punta Arenas. Los cambios asociados al oleaje local en Punta Arenas estarían directamente relacionados con el aumento de los vientos máximos instantáneos.

Figura 35. Registros de oleaje en la boya de Punta Arenas 2025.



Fuente: Elaboración propia, datos SHOA.

Figura 36. Histograma de frecuencia de Altura significativa, Periodo peak y dirección media medidas por la boya del SHOA durante 2025.



Fuente: Datos SHOA, 2025.

6.1.13. Marejadas y erosión costera

Marejadas

El estudio “Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile, Volumen 1: Amenazas” (MMA vol1, 2019) define una marejada como eventos extremos de oleaje cuya altura significativa sobrepasa cierto umbral y cuyas perturbaciones de las condiciones locales de oleaje pueden alterar significativamente la morfología local y exponer la costa al oleaje, las corrientes, y /o la inundación. Las marejadas se asocian al paso de ciclones tropicales o extra tropicales, y pueden coincidir con vientos fuertes y/o precipitaciones, contribuyendo a la severidad de una tormenta (MMA vol1., 2019).

El estudio de Campos-Caba (2016), identifica 117 eventos de marejada ocurridos entre 1924 y 2015 que generaron algún daño en las costas de Chile. Sin embargo, el estudio considera marejadas ocurridas entre las regiones de Arica y Parinacota y Los Ríos, excluyendo la zona austral de Chile (**Figura 37**).

Del estudio de amenazas (MMA vol1., 2019) se desprende que en todo Chile se ha observado un aumento sostenido en la cantidad de marejadas de 0,1 a 0,3 eventos por año y en su intensidad. Como se menciona en el apartado anterior, el clima de oleaje tanto medio (percentil 50%) como extremo (99%) tiende a aumentar.

Para evaluar el impacto de las marejadas en puertos, el mismo estudio prevé estimaciones del aumento de la altura significativa del oleaje asociada a distintos periodos de retorno para puertos de la zona central de Chile. Se indica, por ejemplo, que para Valparaíso la altura significativa de 100 años de periodo de retorno es de 3,4 m para el periodo histórico y de 4,8 m para el periodo futuro (aumento de un 41%).

La frecuencia de eventos extremos como marejadas podría aumentar entre 5% y 15% hacia mediados de siglo. Las alturas significativas de oleaje de 100 años de periodo de retorno tendrán un incremento de hasta 0,3 m (aumento inferior al 5%) bajo el escenario SSP5-8.5 para la zona sur de Chile expuesta al Océano Pacífico (MMA vol1., 2019).

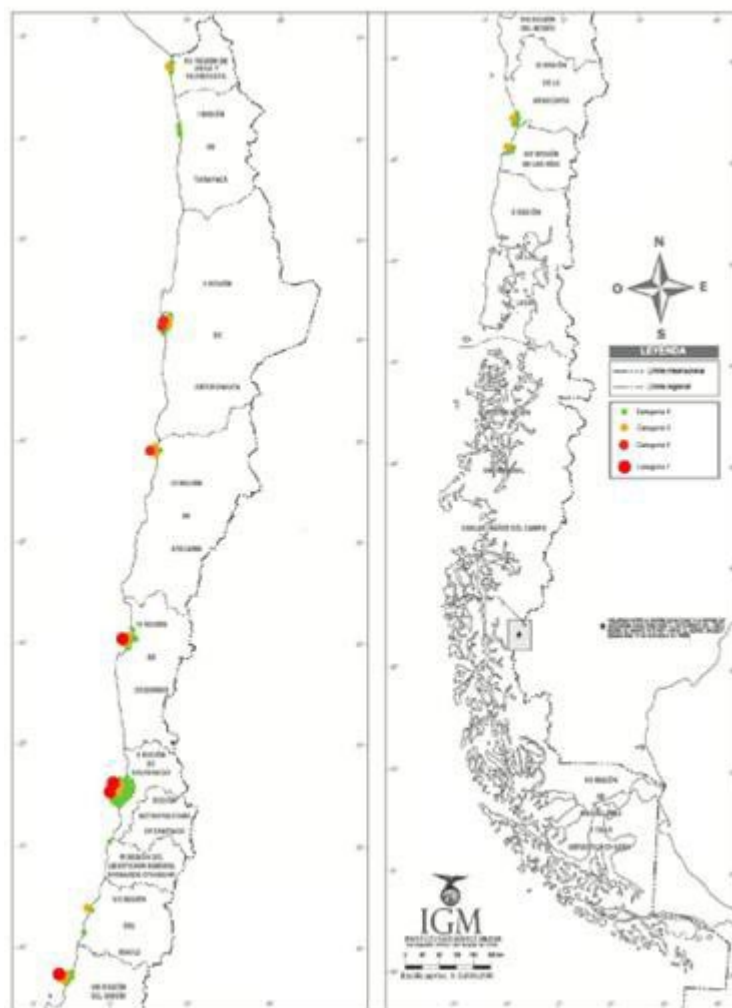
La ocurrencia de marejadas impacta directamente las operaciones portuarias en las costas expuestas al Océano Pacífico. Entre 2008 y 2017 se identificaron 9097 cierres de puerto, siendo los puertos con mayor cantidad de cierre Arica, Tocopilla, y Quintero (MMA vol1., 2019). Punta Arenas no se incorpora en el estudio mencionado.

Tal como se puede observar en la **Figura 35**, se extrajeron los datos de oleaje de la boya del SHOA ubicada en el Estrecho de Magallanes frente a Punta Arenas (53.097°S, 70.713°W). La boya mide oleaje desde 2023 hasta la fecha y son los únicos datos públicos de oleaje disponibles para la zona de estudio. Desde 2023 a la fecha se observa que la altura significativa del oleaje se encuentra en el rango de los 0,3-0,8 m y en algunas ocasiones se alcanzan los 2 m de altura. Además, no se evidencian periodos prolongados con alturas elevadas de oleaje que podrían generar marejadas anormales. El periodo peak se mantiene estable entre 3 y 6 s, lo cual corresponde a oleaje local o generado por viento y no corresponde a mar de fondo que es el responsable de las marejadas en la costa abierta del Pacífico que generan inundaciones. Por lo tanto, no se evidencia una gran

recurrencia de marejadas extremas y los eventos de alturas altas de oleaje son ocasionales y de periodo corto, los cuales no deberían generar inundación. Sin embargo, el oleaje de periodo corto y de gran altura si puede contribuir al aumento del nivel del mar durante condiciones de tormenta y mareas de sicigia. En la **Figura 35** se presentan datos de oleaje de 2025: altura significativa del oleaje, periodo y dirección. En la **Figura 36** se presentan histogramas de altura, periodo y dirección del oleaje, confirmando que alturas altas de oleaje superiores a 1.5 son muy poco frecuentes, y que el periodo del oleaje no supera los 6 segundos. Siendo el oleaje de baja potencia o energía.

Se recomienda realizar un análisis armónico de datos de nivel del mar medidos por mareógrafos para determinar si se han observado aumentos esporádicos de nivel del mar durante tormentas y periodos de oleaje de mayor altura que podrían generar inundación.

Figura 37. Cantidad de eventos de marejada por región.



Fuente: Campos-Caba (2016) ⁴.

⁴ Escala de colores indica intensidad de la marejada. El estudio sólo considera marejadas ocurridas entre las regiones de Arica y Parinacota y Los Ríos.

Erosión costera

Luijendijk et al. (2018) desarrollaron un análisis global de tasas de cambio en costas arenosas para apoyar la planificación espacial y la gestión costera sostenible, así como la mitigación de impactos del cambio climático en litorales de alto valor. El estudio se basó en una serie histórica continua de imágenes satelitales procesadas en Google Earth Engine (GEE), con validación de líneas de costa detectadas automáticamente, cubriendo 33 años (1984–2016) y con estimaciones cada 500 m de costa. La clasificación del nivel de erosión siguió los rangos propuestos por Esteves y Finkl (1998) (véase **Figura 38**).

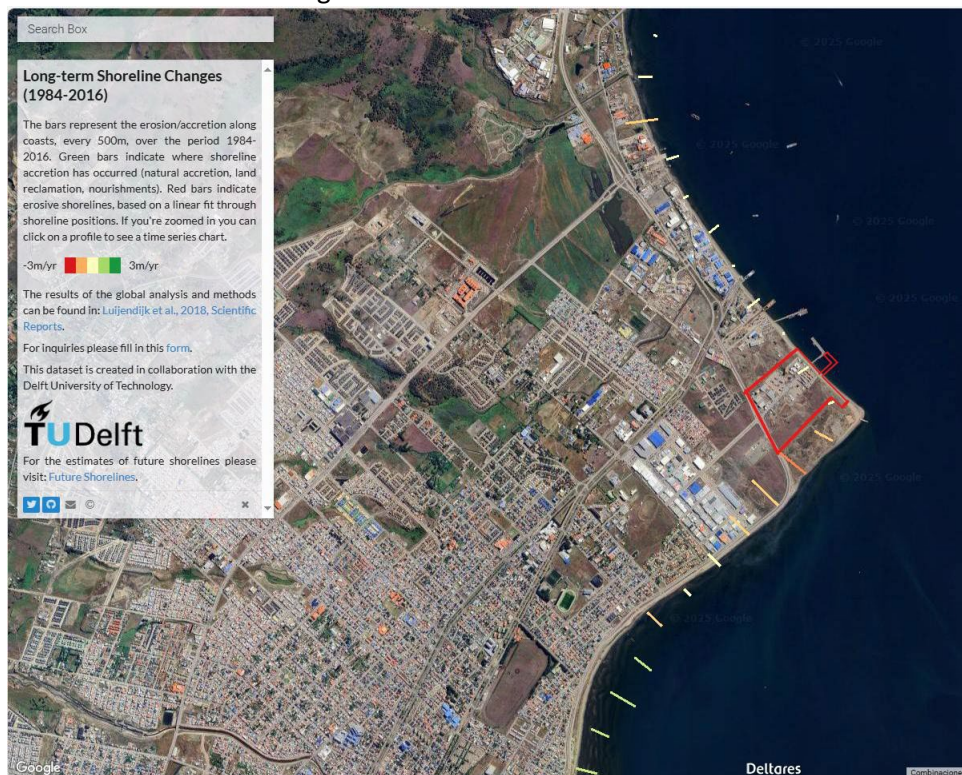
Figura 38. Rangos y niveles erosión costera.

Nivel de erosión	Rangos
Acreción	>0,5 m/año
Estable	-0,5 a 0,5 m/año
Erosión	-1 a -0,5 m/año
Erosión intensa	-3 a -1 m/año
Erosión severa	-5 a -3 m/año
Erosión extrema	<-5 m/año

Fuente: Esteves y Finkl, 1998 en Luijendijk et al. 2018.

Para el área de estudio, se estima una pérdida de $-0,6 \text{ m/año} \pm 0,6$, lo que ubica el tramo en condición de erosión (**Figura 39**).

Figura 39. Visor de erosión a escala global.

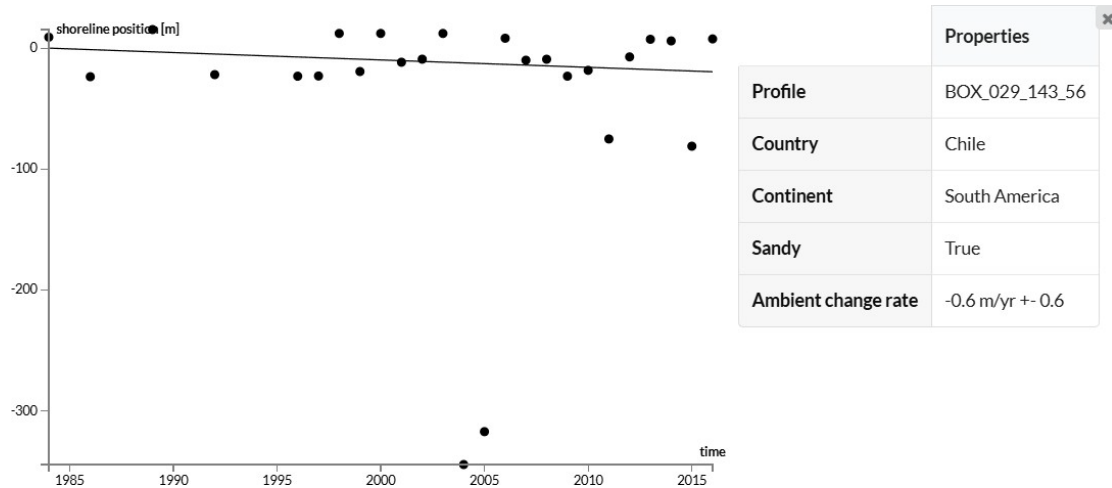


Fuente: Luijendijk et al., 2018⁵.

⁵ <https://aqua-monitor.appspot.com/?datasets=shoreline>

Este resultado se corrobora con la evolución anual (1984–2016) de la posición de la línea de costa para el transecto BOX_029_143_56: la regresión lineal arroja $-0,6 \text{ m/año}$ ($\pm 0,6$), señal de retroceso cuyo intervalo de incertidumbre incluye cero, por lo que es marginal a 1σ . La mayoría de los años se agrupan entre 0 y -30 m , con valores atípicos en 2004–2006 (≈ -300 a -330 m) y otro episodio en 2011–2015 (≈ -70 a -100 m), probablemente vinculados a condiciones de marea y oleaje (**Figura 40**).

Figura 40. Gráfico de la evolución de línea de costa emplazamiento proyecto portuario.



Fuente: Luijendijk et al., 2018.

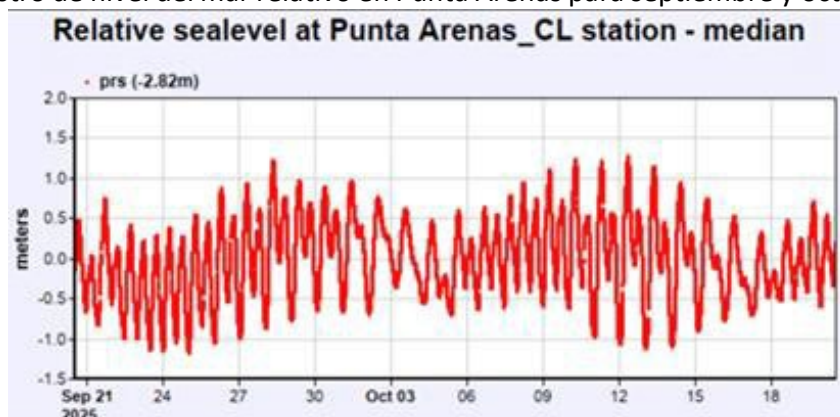
Respecto de fuentes nacionales, no se dispone de información específica para el área en ARClím; asimismo, informes técnicos sobre riesgo climático en costas, como “Determinación del Riesgo de los Impactos del Cambio climático en las Costas de Chile” focalizan su análisis en playas entre Antofagasta y Biobío, sin cubrir Punta Arenas.

6.1.14. Aumento del nivel del mar

El nivel del mar se compone de distintos fenómenos hidrometeorológicos, el estudio MMA vol1 (2019) define por ejemplo la cota de inundación o nivel del mar como la suma del nivel de reducción de sondas (plano determinado por la mayor bajamar), la marea astronómica, la marea meteorológica (generada por viento y presión), el set-up del oleaje, y las ondas de infra gravedad, entre otros. De todos estos fenómenos, solo la marea astronómica no es afectada por el cambio climático.

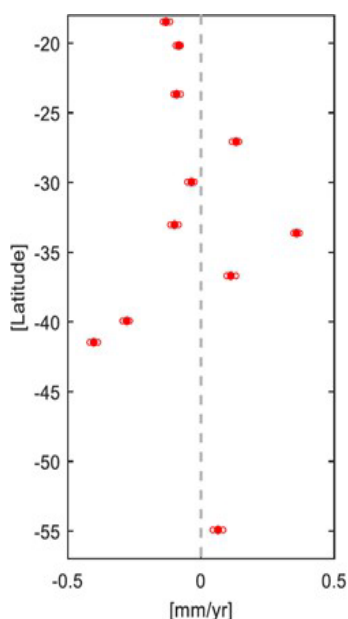
El nivel del mar en Punta Arenas está fuertemente condicionado por las oscilaciones asociadas a la marea astronómicas. El régimen de mareas en Punta Arenas es de carácter semi-diurno con rango aproximado de 2 m en mareas de sicigia. El mareógrafo de Punta Arenas (53,124 S; 70,862° W), operado por el SHOA reporta datos de nivel del mar cada 1 minuto. La **Figura 41** muestra un registro de nivel del mar relativo de mareógrafo de Punta Arenas para los últimos 30 días. Se observan las variaciones diurnas y semi-diurnas, así como la marea de cuadratura (octubre 3), y la marea de sicigia (octubre 12).

Figura 41. Registro de nivel del mar relativo en Punta Arenas para septiembre y octubre de 2025.



Un análisis de los registros históricos de mareógrafos operados por el SHOA a lo largo de la costa de Chile muestra tasas de cambio del nivel medio del mar relativo (NMMR) entre -0,5 y 0,5 mm/año sin una tendencia uniforme de acuerdo con la latitud (MMA vol1., 2019). El NMMR es con referencia a la cota del terreno e incluye tanto a variaciones del nivel del mar y deformaciones de la corteza terrestre provocadas por el ciclo sísmico. El análisis no incluye el mareógrafo de Punta Arenas debido a baja calidad de los datos, pero reporta un aumento relativamente pequeño para Puerto Williams (**Figura 42**). El PARCC (2023), reporta que en Puerto Williams el nivel medio del mar a aumentado alrededor de 90 mm en 41 años, correspondiente a una tasa de 2,2 mm/año.

Figura 42. Tasa anual de cambio del NMMR para 11 mareógrafos ubicados en las costas de Chile, análisis considera series de tiempo de entre 32 y 73 años de duración.



Fuente: MMA vol1, 2019.

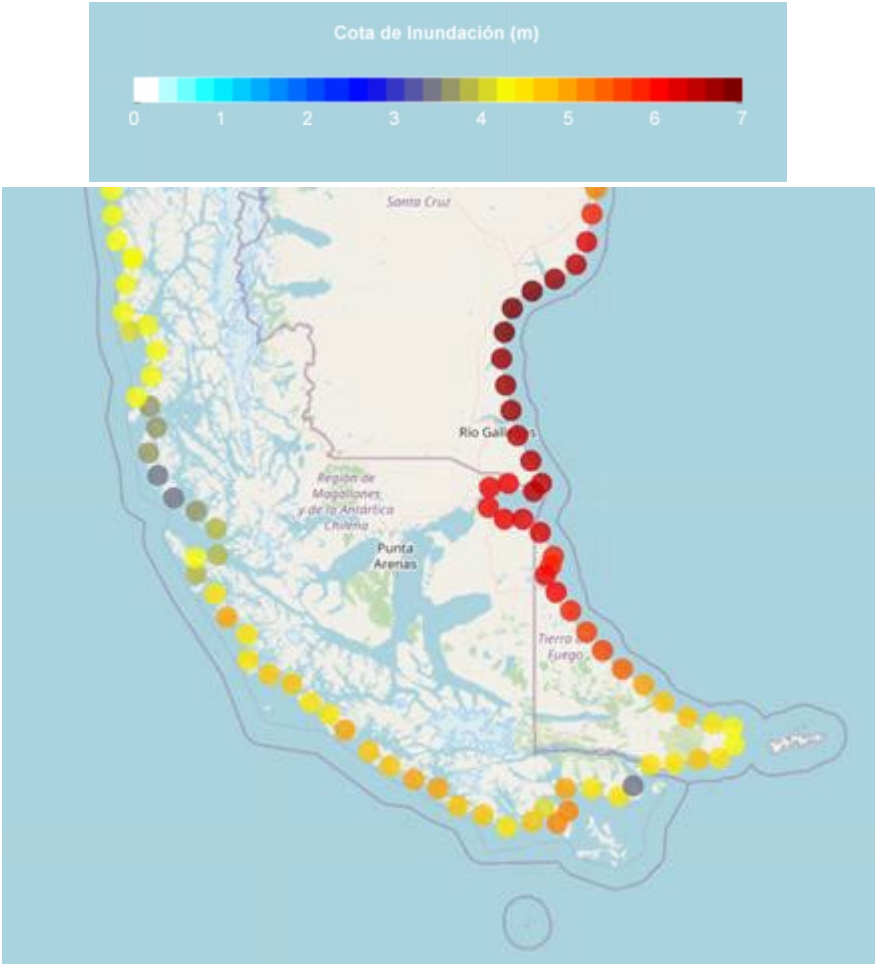
Respecto de las proyecciones de aumento del nivel del mar, el estudio del Ministerio de Medio Ambiente (MMA vol1., 2019), reporta que el trabajo de Albrecht & Shaffer (2016) proyecta un ascenso total del nivel del mar a lo largo de la costa de Chile entre 46 y 74 (cm) para el escenario más

desfavorable de cambio climático (RCP 8.5), junto con una disminución modesta pero constante de norte a sur de este aumento. El estudio de Hamlington et al. (2014) estima una tasa de aumento del nivel del mar de 1 mm/año para el Pacífico Sur (MMA vol1., 2019).

El estudio de Cambio climático del Ministerio del Medio Ambiente (MMA vol1., 2019), ofrece proyecciones sobre las costas de Chile y en particular del nivel del mar para escenarios de cambio climático considerando componentes de hielo (Groenlandia, Antártico, y Glaciares), componentes oceánicas (NMMR, temperatura, y barómetro invertido), almacenamiento de agua en tierra y ajuste isostático glacial). La proyección abarca 94 años entre 2007 y 2100 y utiliza el escenario RCP 8.5. Los escenarios climáticos presentados para la zona austral en el estudio de cambio indican un aumento de la elevación del nivel del mar de entre 0,03 y 0,2 m para 2040 y de hasta entre 0,3 m y 0,8 m para 2100. Se reporta que los rangos de incertidumbre son del orden de 0,1 m (MMA vol1., 2019).

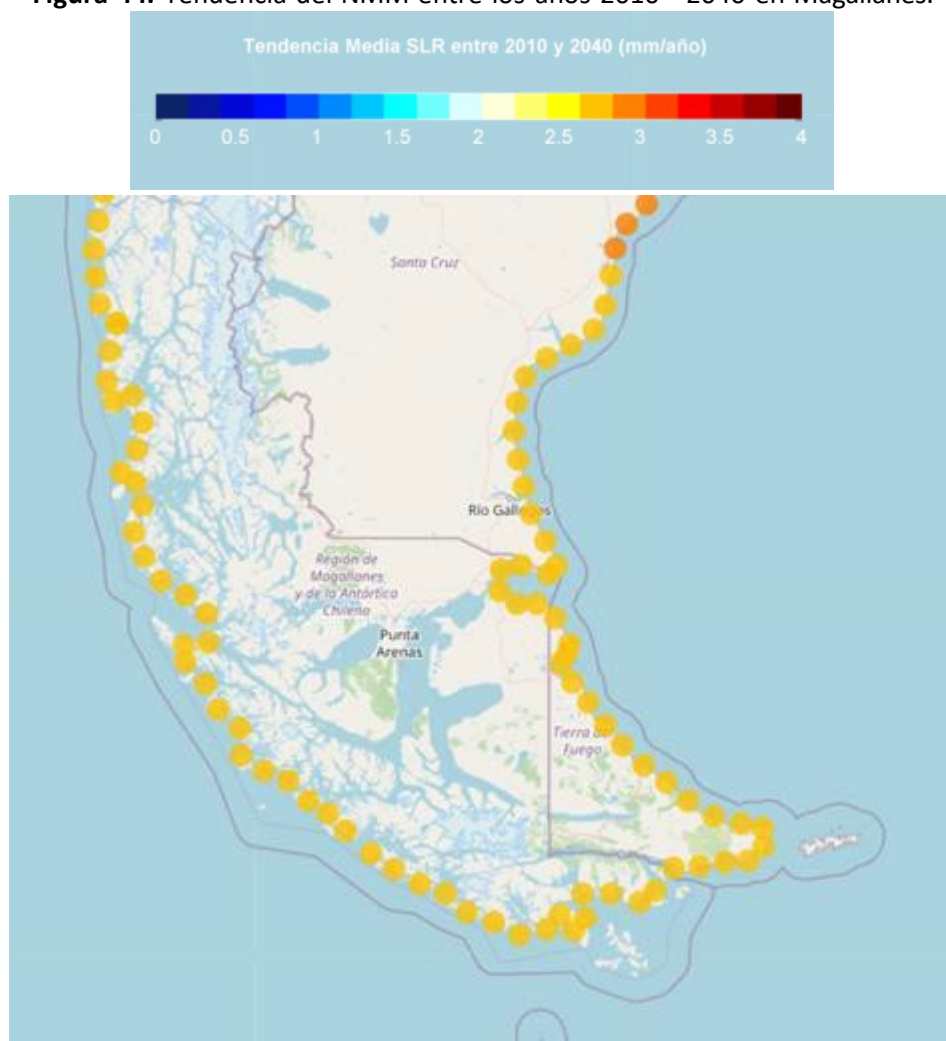
De acuerdo con el PARCC (2023), las proyecciones de cambio climático del nivel medio del mar indican aumentos intensos y homogéneos para toda la región de Magallanes, con valores entorno a los 85 mm para 2040. Por otra parte, del estudio DINÁMICA COSTERA (2022). Estudio del desempeño y co-beneficios de las áreas marinas protegidas a la mitigación y adaptación al cambio climático (Proyecto FIPA 2021-22) proyecta un aumento en el nivel del mar para las costas de Chile que crecerá exponencialmente a medida que avance el siglo, para llegar a valores de ~0.6 m (escenario SSP5-8.5, en el horizonte 2081-2100). (El estudio PARCC no hace proyecciones a 2100) Finalmente, el estudio de cambio climático de la CEPAL, y mencionadas en PARCC (2023) de la **Figura 43** muestra la tendencia del aumento del nivel medio del mar de 2010 a 2040 reportado por el mismo estudio.

Figura 43. Variación de la cota de inundación para el año 2040 en Magallanes.



Fuente: CEPAL (<https://c3a.ihcantabria.com/>)

Figura 44. Tendencia del NMM entre los años 2010 - 2040 en Magallanes.



Fuente: CEPAL (<https://c3a.ihcantabria.com/>)

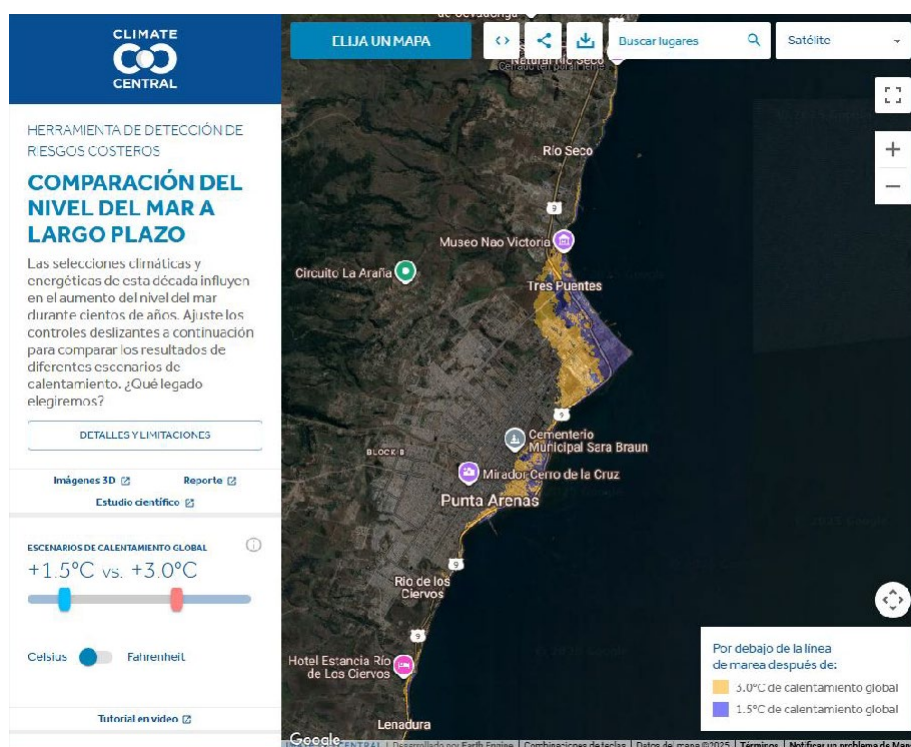
Tabla 13. Resumen de los escenarios de proyección Intermedio (2010-2040) y de Largo plazo (2040-2100) para el aumento del NMM.

Periodo	Fuente / Escenario	Escenario Climático (RCP)	Aumento proyectado del nivel del mar
2010 – 2040	MMA Vol. 1 (2019)	RCP 8.5	+0,03 m – 0,20 m
2010 – 2040	PARCC (2023)	No específica (basado en modelos CMIP6)	≈ +85 mm (0,085 m)
Fines de siglo (2100)	Albrecht & Shaffer (2016) (cit. en MMA 2019)	RCP 8.5	+0,3 m – 0,4 m
Tendencia general (promedio 20.° S – 55.° S)	Hamlington et al. (2014) (cit. en MMA 2019)	–	≈ +1 mm/año

Las proyecciones de incremento del nivel del mar con estimaciones de 1,5 °C versus 3,0 °C (**Figura 45**) y para el 2050 según modelos de IPCC (**Figura 46**) muestran que el área en que se localiza el proyecto está entre aquellas que quedarían debajo del agua. Frente a esto se necesitan estudios más detallados y considerar obras que reduzcan la vulnerabilidad frente a esta amenaza.

La comparación del nivel del mar a largo plazo con estimaciones de 1,5° versus 3,0 °C se basa en un modelo que combina las proyecciones del nivel del mar contempladas en el Sexto Informe de Evaluación (IE6) del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático (IPCC), y un modelo de elevación global propio de la plataforma (CoastalDEM), con resolución de 30 metros, con un sesgo vertical (provocado por edificios, vegetación, pendiente del terreno) corregido. La vulnerabilidad se define a través de la relación entre la elevación del terreno y el nivel de agua de la costa. Los escenarios se definen por el aumento de la temperatura media (1,5 °C versus 3,0 °C) de la superficie global por encima de los niveles preindustriales.

Figura 45. Áreas que estarían debajo del agua si aumenta un 1,5 °C o 3 °C la temperatura global.

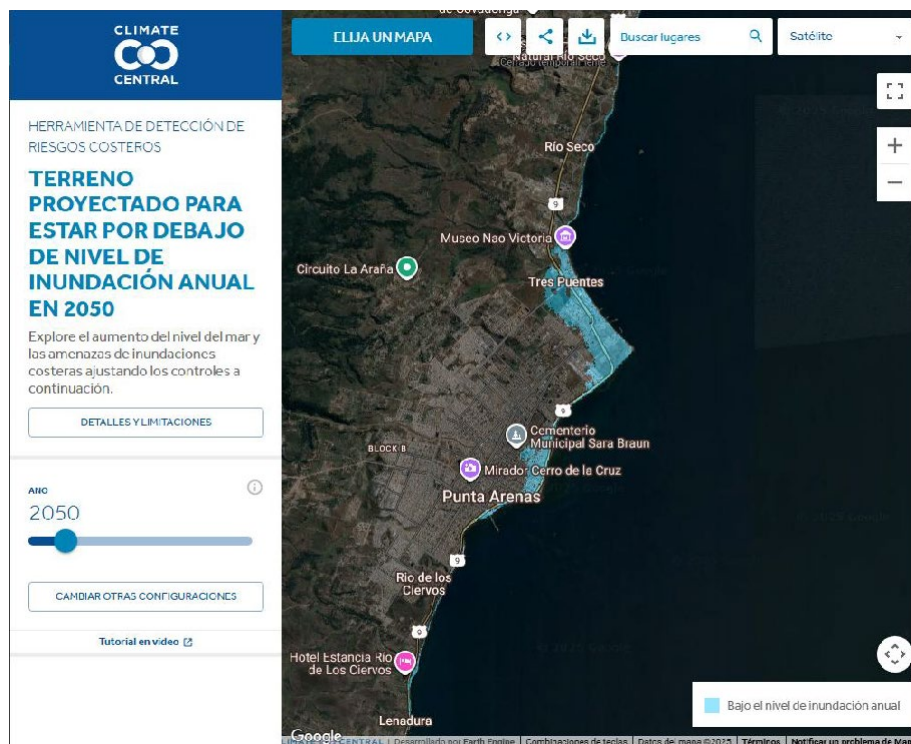


Fuente: Estimaciones el Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio climático (IPCC 2021).

A su vez, las áreas que se encontrarían por debajo del nivel de agua para el período 2050, bajo un escenario de emisiones SSP5-8.5), se obtienen de un modelo que considera como nivel de agua la proyección del nivel del mar local más la altura adicional de una inundación anual local y se enfoca en áreas conectadas al océano, excluyendo aquellas potencialmente protegidas por diques, crestas naturales u otras características. Estadísticamente, se espera que una inundación anual ocurra una vez al año, pero algunos años podrían tener más incidentes y otros ninguno. Las proyecciones de la altura de las inundaciones costeras se basan en las alturas históricas medidas del nivel medio del

mar local, más las proyecciones locales de aumento del nivel del mar y la altura sobre el nivel del mar de los tipos de inundación locales definidos, como las anuales o las de probabilidad del diez por ciento. Los niveles históricos de agua observados y reconstruidos se utilizan para establecer una relación entre la probabilidad de una inundación y su altura, es decir, en que las inundaciones más altas son menos frecuentes.

Figura 46. Áreas que se proyectan para estar por debajo del nivel de inundación anual para el año 2050.



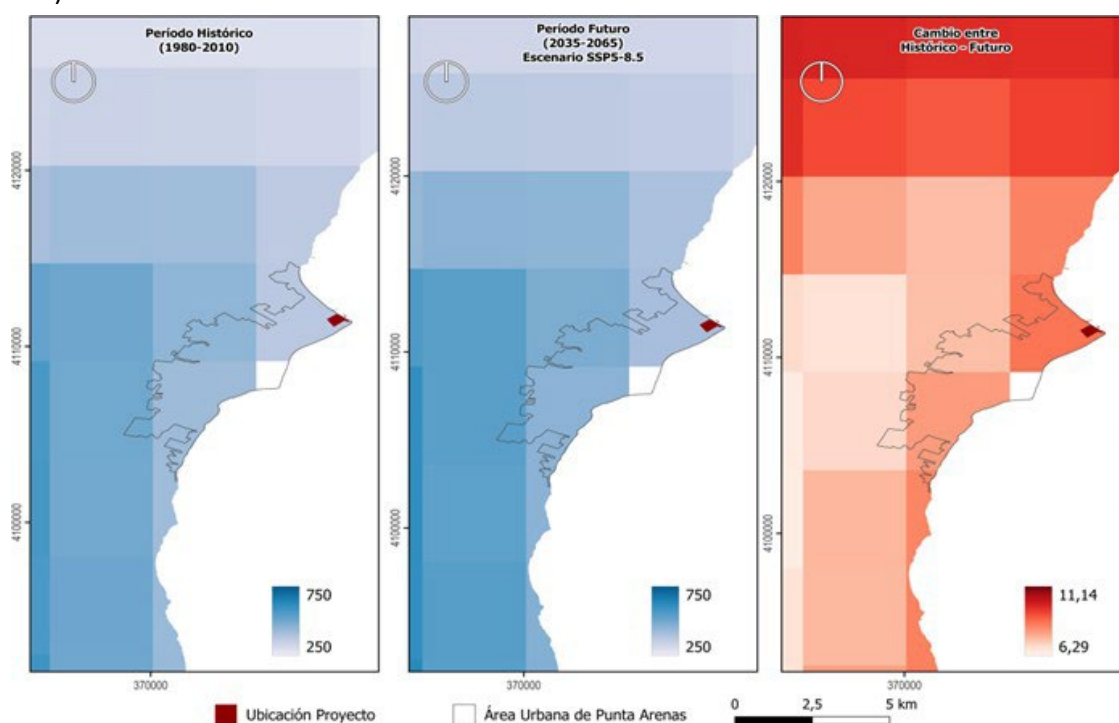
Fuente: Estimaciones del Sexto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre Cambio climático (IPCC 2021).

Los resultados de las modelaciones de esta plataforma deben considerarse sólo como referenciales ya que pueden sobreestimar los efectos del incremento en el nivel del mar sobre la generación de terrenos proyectados para estar por debajo del nivel de inundación, dada la resolución del modelo de elevación digital (30 m). Como precaución, la plataforma señala que estos datos no deberían ser utilizados para evaluar peligros costeros, necesidades de seguros o el valor de las propiedades. En este caso existe información con mayor resolución, que debe considerarse por sobre la modelación de esta plataforma.

6.1.15. Cambios en las precipitaciones por efecto de cambio climático (anuales e intensas)

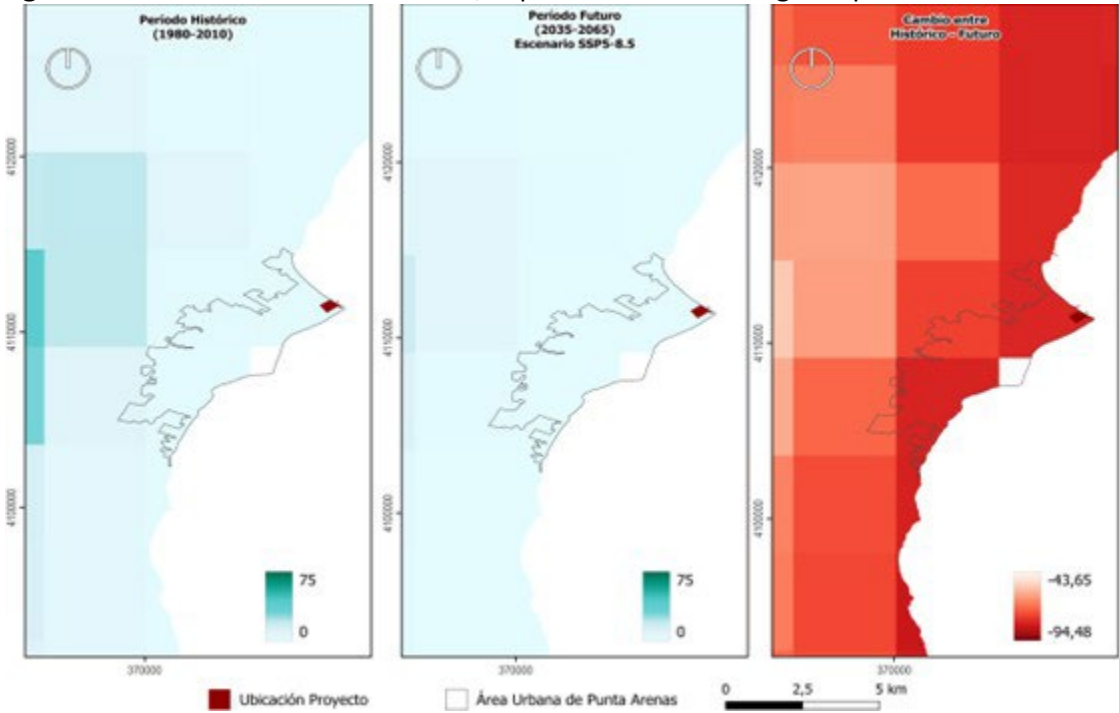
La precipitación acumulada anual no muestra un cambio relevante (**Figura 47**), y no se evidencia una disminución (incluso aumenta un 4%). No obstante, la nieve acumulada disminuye de forma relevante (-72% de nieve acumulada, lo que probablemente no afectaría la operación del proyecto, aunque sí a otros aspectos del entorno regional, lo que podría repercutir en el funcionamiento del proyecto. La lluvia acumulada no disminuye, y tampoco aumenta en forma relevante (+4%). Los días de precipitación intensa (**Figura 48**) y los días de precipitación muy intensa (**Figura 49**) aumentan de forma relativa moderada y absoluta leve (+23% y +33% respectivamente).

Figura 47. Precipitación acumulada: Cantidad de precipitación (lluvia y nieve) acumulada (unidad mm).



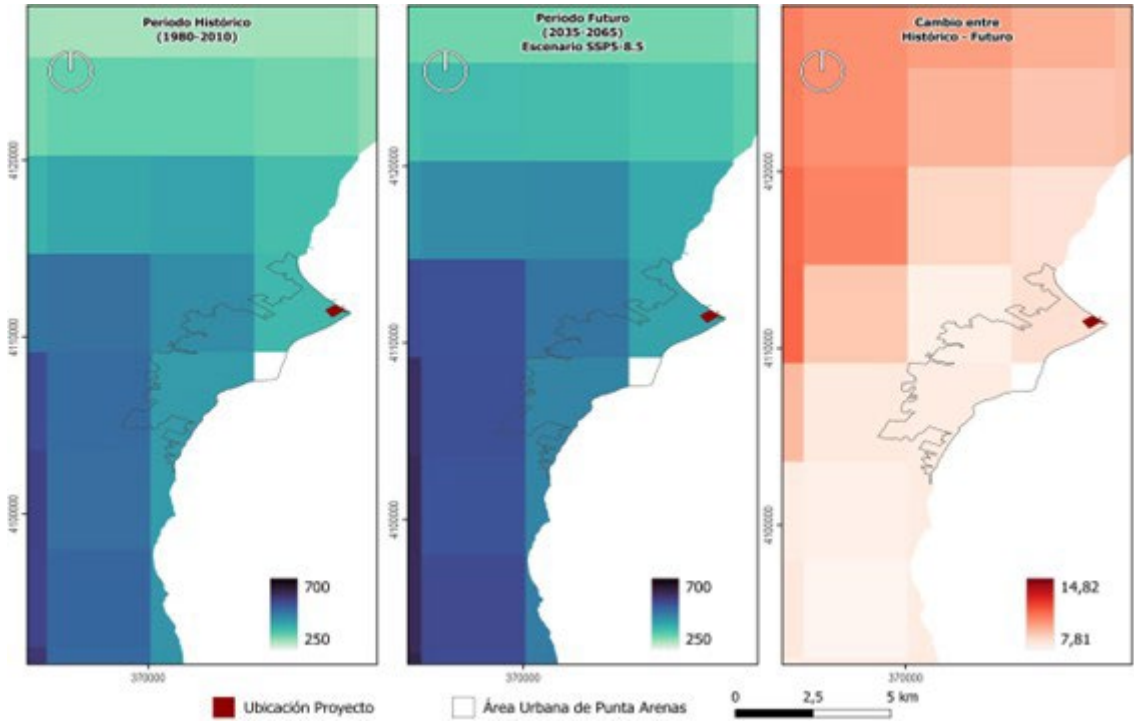
Fuente: ARClím

Figura 48. Nieve acumulada: cantidad, expresada en mm de agua equivalente.



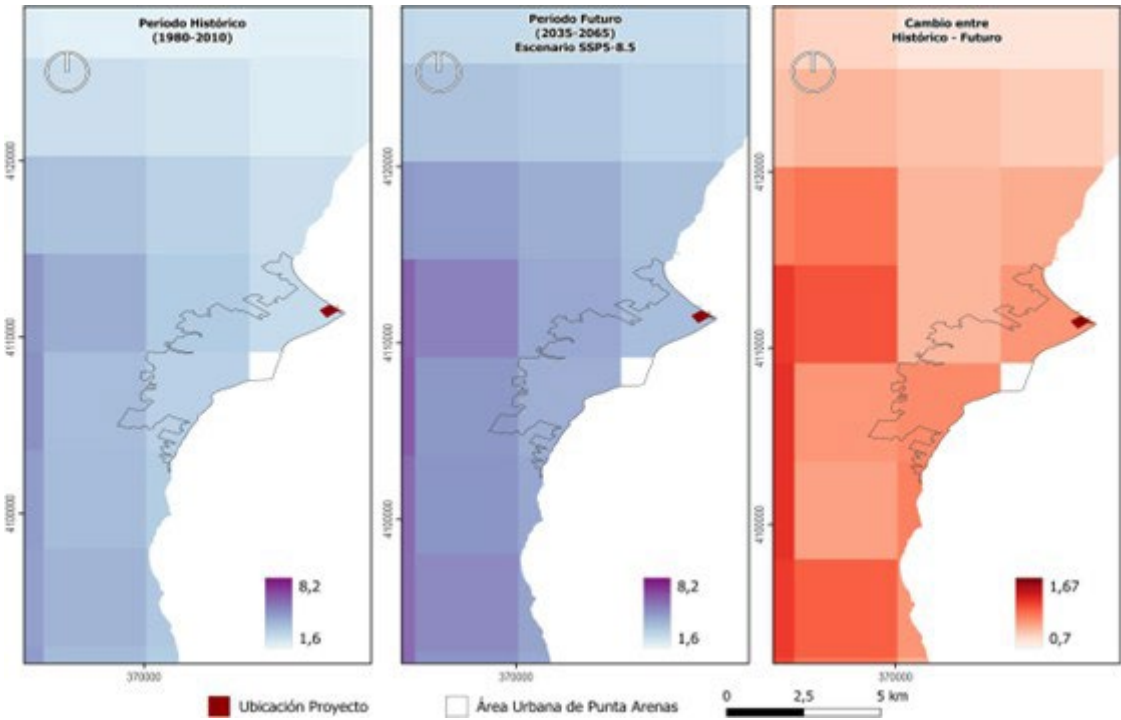
Fuente: ARClím

Figura 49. Lluvia acumulada: Cantidad de lluvia (agua líquida) acumulada en milímetros durante el período (año, estación, o mes).



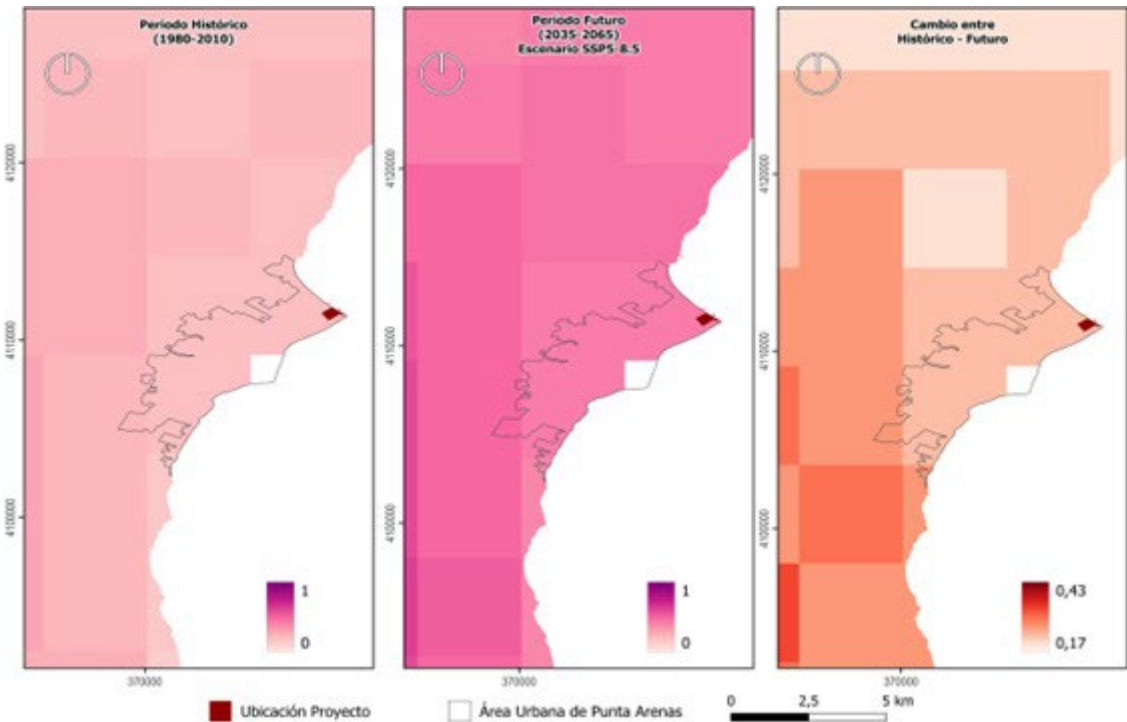
Fuente: ARClím

Figura 50. Días de precipitación intensa: Número de días en que la precipitación diaria supera 10 mm.



Fuente: ARClím

Figura 51. Días de precipitación muy intensa: Número de días en que la precipitación diaria supera 20 mm.

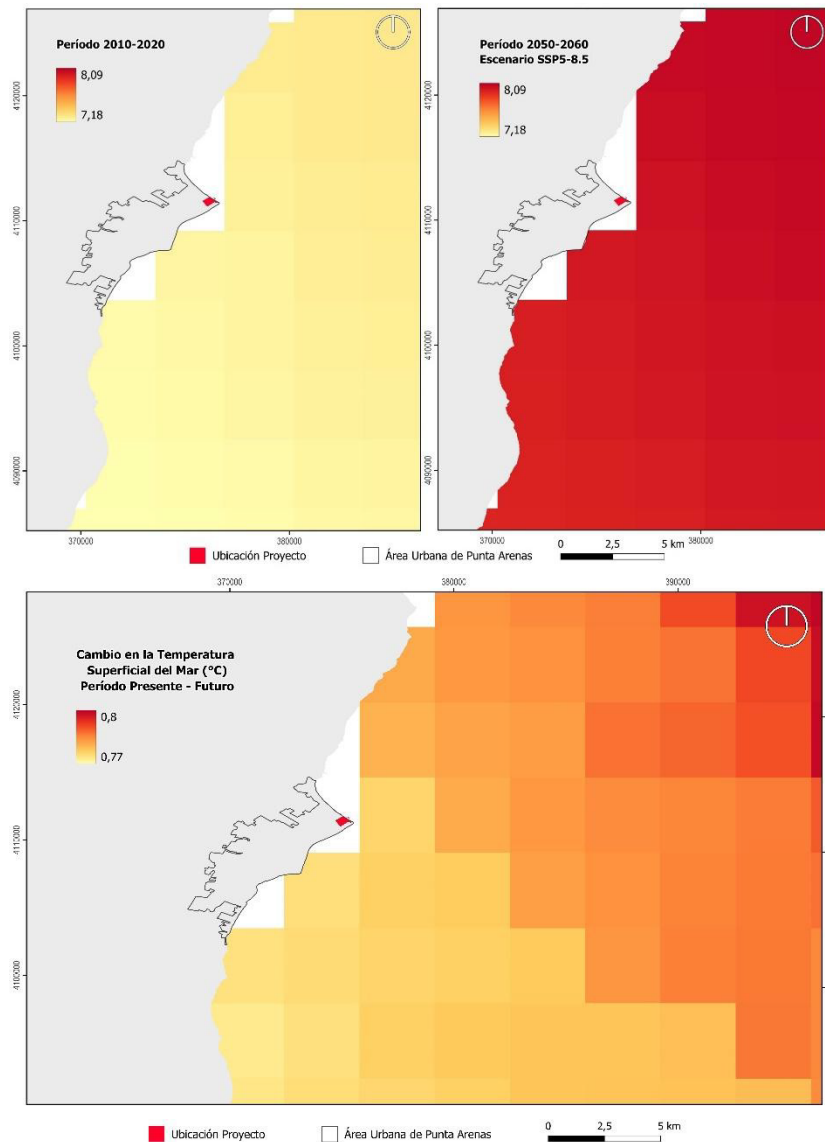


Fuente: ARClím

6.1.16. Aumento de la temperatura del mar

El cambio en la temperatura superficial del mar es relevante de forma relativa (+11%, **Figura 52**) representando un incremento de 0,79 °C. En forma preliminar podría no ser un aspecto de preocupación para la operación del proyecto.

Figura 52. Temperatura superficial del mar.

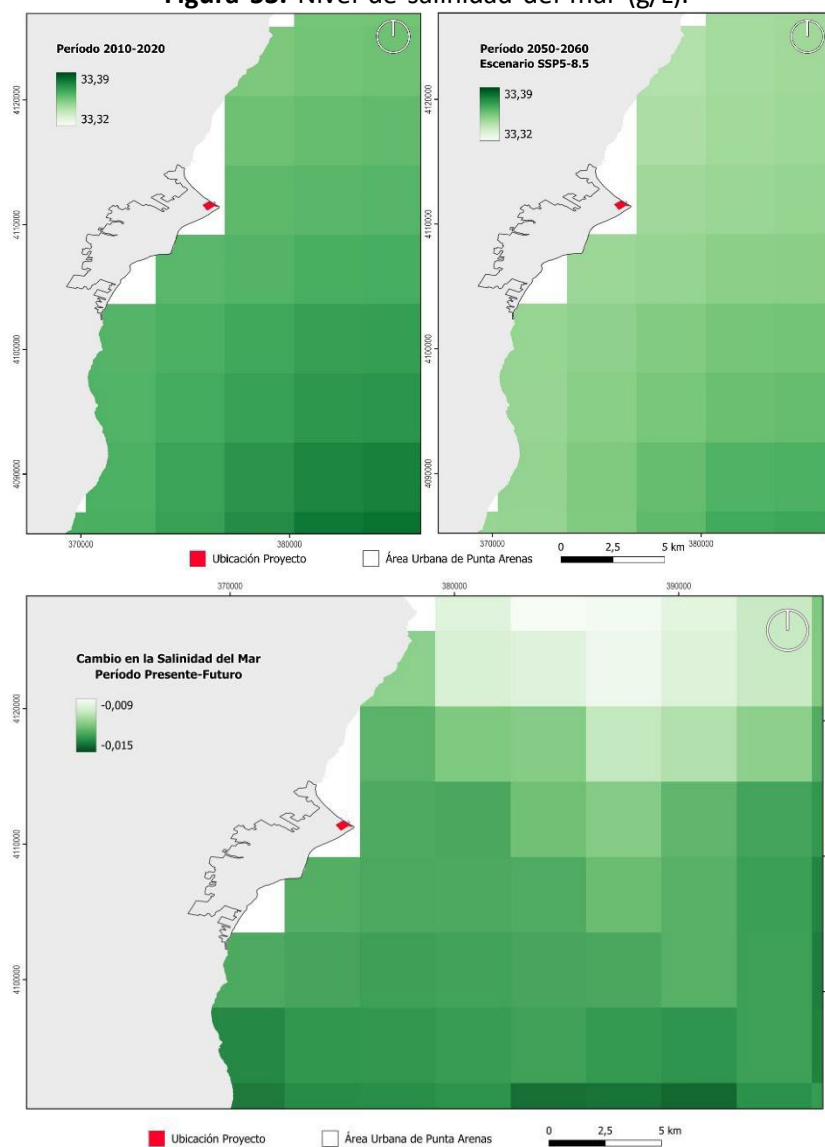


Fuente: Herramienta de Detección de Riesgos Costeros.

6.1.17. Aumento salinidad del mar

La salinidad del mar no aumenta ni se modifica en forma relevante, disminuyendo en 0,01g/L (**Figura 53**).

Figura 53. Nivel de salinidad del mar (g/L).

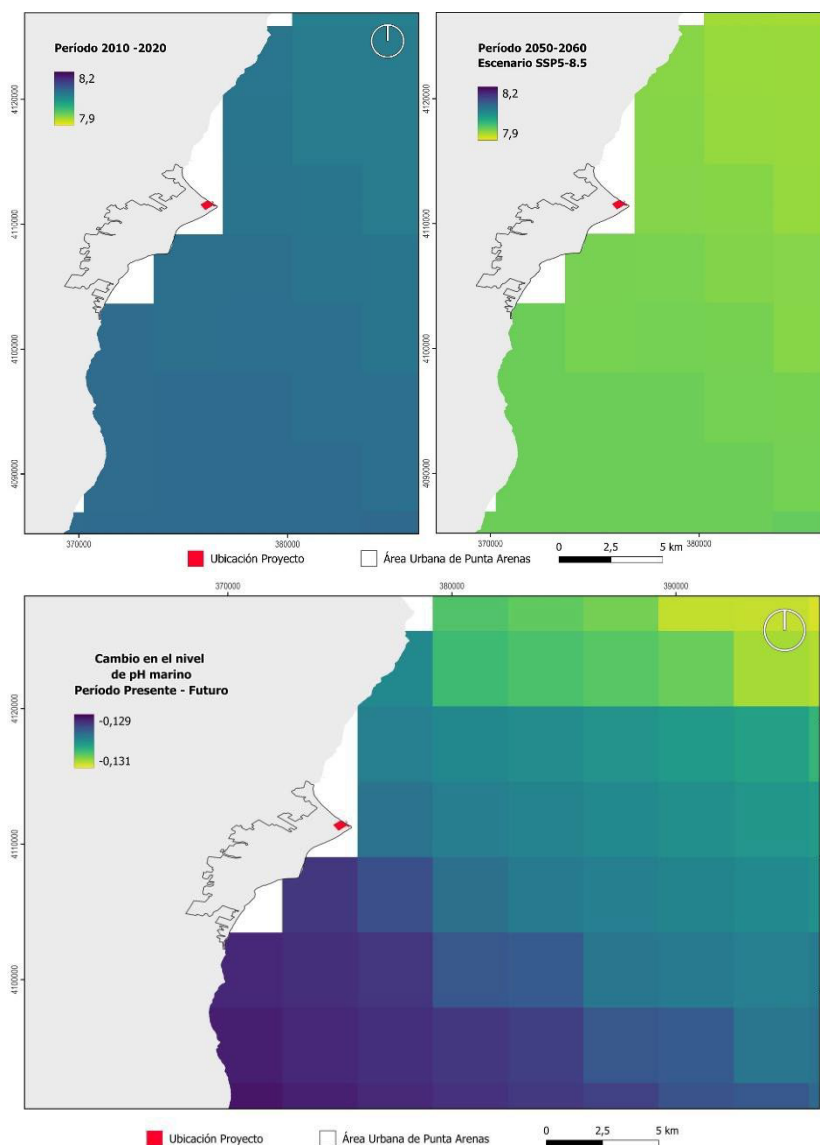


Fuente: BioOracle.

6.1.18. Acidificación del mar

La acidificación del mar aumenta (**Figura 54**), cambiando en -0,13 (-2%), representando un pH más ácido, siendo relevante, considerando que el rango de pH es estrecho (0,14) y avanza hacia en el rango de acidez (<7).

Figura 54. Nivel de pH del mar.



Fuente: BioOracle.

6.2. Síntesis proyecciones de cambio climático

La **Tabla 14** sintetiza las principales amenazas climáticas proyectadas para Punta Arenas bajo dos escenarios (2035-2065): SSP2-4.5 de emisiones moderadas y SSP5-8.5 de altas emisiones, expresando solo la magnitud relativa del cambio climático esperado respecto del período histórico 1980-2010. Para efectos de la hipótesis de cambio relativo con cambio climático se utilizó solo el escenario SSP5-8.5. Las hipótesis no representan impactos directos sobre el territorio o la infraestructura, sino la intensidad relativa del cambio en cada variable climática. En términos generales, los mayores incrementos se observan en los parámetros térmicos, con un aumento leve de la temperatura media (+14%), un fuerte incremento de los días cálidos (+116%) y una prolongación muy relevante de los episodios cálidos (+285%), acompañados por una reducción moderada de los episodios fríos y relevante en los grados-día bajo cero. Las precipitaciones y el

viento muestran variaciones no relevantes en su magnitud anual, aunque se registran aumentos leves en los días con precipitaciones intensas y muy intensas, junto con una disminución relevante de la nieve acumulada (-72%), lo que es coherente con una pérdida de condiciones nival-invernales.

En el componente oceánico, se proyecta un aumento leve de la temperatura superficial del mar (+11 %), sin cambios en salinidad y con una acidificación relevante del pH. Respecto de las amenazas asociadas, las inundaciones fluviales y pluviales se mantienen sin cambios relevantes en su ocurrencia actual, dado que la frecuencia de precipitaciones intensas no varía significativamente. En contraste, el nivel medio del mar muestra un aumento moderado, lo que implica mayor exposición a inundaciones costeras en zonas bajas y portuarias. Se suman cambios moderados en la erosión costera y un aumento relevante del peligro de incendios forestales por la extensión de periodos cálidos.

Tabla 14. síntesis de amenazas vinculadas al cambio climático.

Amenaza	Variable	Unidad	Valor Histórico (1980 – 2010)	Escenario SSP2-4.5		Escenario SSP5-8.5		
				Valor Futuro (2035 – 2065)	Cambio	Valor Futuro (2035 – 2065)	Cambio	Hipótesis de cambio relativo con Cambio climático
Sequía	Frecuencia de sequía	%	3,30	0,00	0,00	0,00	-3,30	No relevante
Cambios en la temperatura: Aumento de temperatura (Olas de calor), disminución de episodios fríos (olas de frío)	Temperatura media	°C	6,80	7,56	0,76	7,76	0,96 (+14%)	Aumento leve
	Días cálidos	días	37,00	69,28	32,28	79,80	42,80 (+116%)	Aumento muy relevante
	Duración de episodios cálidos >3		7,33	20,48	13,15	26,23	18,90 (+258)	Aumento muy relevante
	Duración de episodios fríos >6		0,65	0,12	-0,53	0,17	-0,49 (-75%)	Disminución moderada
	Grados-Día bajo 0 °C		52,04	25,49	-26,55	26,28	-25,76 (-50%)	Disminución relevante
Aumento de tormentas	Viento medio	m/s	3,92	3,94	0,02	3,95	0,03 (+1%)	No relevante
Cambio en las precipitaciones: disminución de las precipitaciones, aumento de	Precipitación acumulada	mm	380,33	393,16	12,82	394,82	14,49 (+4%)	No relevante
	Nieve acumulada	mm	1,96	0,35	-1,62	0,56	-1,4 (-72%)	Disminución relevante
	Lluvia acumulada	mm	378,17	395,47	17,30	394,72	16,55 (+4%)	Disminución relevante

precipitaciones intensas	Días de precipitación intensa	días	2,63	3,07	0,43	3,23	0,60 (+23%)	No relevante
	Días de precipitación muy intensa	días	0,20	0,23	0,03	0,27	0,07 (+33%)	Aumento leve
Aumento temperatura del mar	Temperatura Superficial del Mar	°C	7,25	7,78	0,54	8,03	0,79 (+11%)	Aumento leve
Aumento salinidad del mar	Salinidad Superficial del Mar	g/L	33,36	33,36	0,001	33,35	-0,01 (-0,04%)	Aumento leve
Acidificación del mar	pH	-	8,08	8,00	-0,08	7,95	-0,13 (-2%)	No relevante
Amenazas	Proxis de cambio con indicadores climáticos							Hipótesis de cambio relativo con Cambio climático
Inundación fluvial	Inundaciones con T=10 años afectan potencialmente a sector portuario actual. Días con precipitación intensa mantienen frecuencia similar.							No relevante
Inundación pluvial	Días con precipitación intensa o muy intensa mantienen frecuencia similar.							No relevante
Oleaje	Las alturas significativas de oleaje de 100 años de periodo de retorno tendrán un incremento de hasta 0,3 m (aumento inferior al 5%) bajo el escenario SSP5-8.5 para la zona sur de Chile expuesta al Océano Pacífico (MMA vol1., 2019).							Cambios moderados
Marejadas	Con los datos disponibles no se evidencia una gran recurrencia de marejadas extremas y los eventos de alturas altas de oleaje son ocasionales y de periodo corto, los cuales no deberían generar inundación. Sin embargo, la data es limitada, por lo que se requiere de estudios adicionales para su verificación.							Cambios moderados
Aumento nivel medio del mar	Los escenarios climáticos para la zona austral indican un aumento de la elevación del nivel del mar de entre 0,03 y 0,2 m para 2040 y de hasta entre 0,3 m y 0,4 m para 2100.							Aumento moderado
Erosión costera	Se estima una pérdida de -0,6 m/año $\pm$ 0,6, lo que ubica el tramo en condición de erosión. De acuerdo con datos de marejada y oleaje no debería experimentar cambios abruptos.							Cambios moderados
Incendios forestales	El nivel de amenaza es alto actualmente Se proyecta aumento de duración de episodios cálidos >3							Aumento relevante

Nota: Muy relevante: cambio $\geq \pm 100$ %; Relevante: $50 \% \leq |\Delta| < 100$ %; Moderado: $25 \% \leq |\Delta| < 50$ %; Leve: $10 \% \leq |\Delta| < 25$ %; No relevante: $|\Delta| < 10$ %

6.3. Síntesis amenazas a las que el Proyecto está expuesta y calificación inicial del Riesgo

El análisis de amenazas se desarrolló a partir de una revisión integrada de información secundaria climática, geotécnica e hidrodinámica para el área de Punta Arenas, complementada con los resultados de proyecciones regionales de cambio climático (escenario SSP5-8.5) y antecedentes técnicos del proyecto portuario. La evaluación se estructuró en torno consideraciones: (a) la exposición y vulnerabilidad de la operación frente a desastres y su potencial de adaptación al cambio climático; (b) la identificación de amenazas específicas relevantes para las obras proyectadas (explanadas, muelle, losa y grúas móviles); y (c) la estimación de impactos esperables y la posibilidad de que las intervenciones exacerben o mitiguen los riesgos existentes. Cada amenaza fue analizada en términos de su probabilidad de ocurrencia, magnitud del impacto y relación con las condiciones locales del emplazamiento, clasificándose en niveles alto, moderado o bajo según su relevancia relativa para el proyecto. Este enfoque permitió jerarquizar las amenazas con base en su efecto potencial sobre la estabilidad estructural, la continuidad operativa y la sostenibilidad de largo plazo.

Tabla 15. Clasificación preliminar del riesgo de desastres y cambio climático en niveles Bajo, Moderado o Alto.

Nivel de amenaza	Amenaza	Breve justificación
Alta	Sismicidad	Aunque la recurrencia es baja, el puerto se emplaza sobre suelos blandos y saturados, con alta susceptibilidad a amplificación sísmica.
	Licuación	Los suelos saturados y arenosos del borde costero ($V_{s30} < 250$ m/s) tienen alta susceptibilidad a experimentar licuación bajo aceleraciones sísmicas moderadas.
	Inundación fluvial y pluvial	La explanada y el muelle están dentro del radio de influencia del Estero Llau-Llau ($T=10$ años) y zonas bajas del litoral. Adicionalmente, la impermeabilización del área de acopio y la escasa pendiente aumentan la exposición a inundaciones pluviales.
	Sedimentación	Riesgo de arrastre fluvial y costero que puede reducir el calado y puede afectar la operatividad.
	Aumento del nivel del mar	Ascenso proyectado entre 0,3-0,4 m hacia 2100, con potencial de anegamiento progresivo.
	Tsunami	Aunque la probabilidad de ocurrencia es baja debido al efecto amortiguador del Estrecho de Magallanes, el impacto potencial sería alto sobre instalaciones críticas; se justifica su clasificación como amenaza moderada bajo criterio precautorio.
Moderada	Oleaje	Incremento leve ($<5\%$) de alturas significativas. Puede afectar maniobras portuarias y puede generar fatiga en defensas costeras.
	Marejadas	Aparente escasa frecuencia e intensidad (eventos ocasionales de corta duración).
	Erosión costera	Retroceso estimado de $0,6 \pm 0,6$ m/año en rellenos portuarios; riesgo de socavación de estructuras, especialmente en bordes sin protección.
	Viento máximo diario	Vientos frecuentes >11 m/s afectan la operación de grúas móviles y el movimiento de cargas sobredimensionadas.

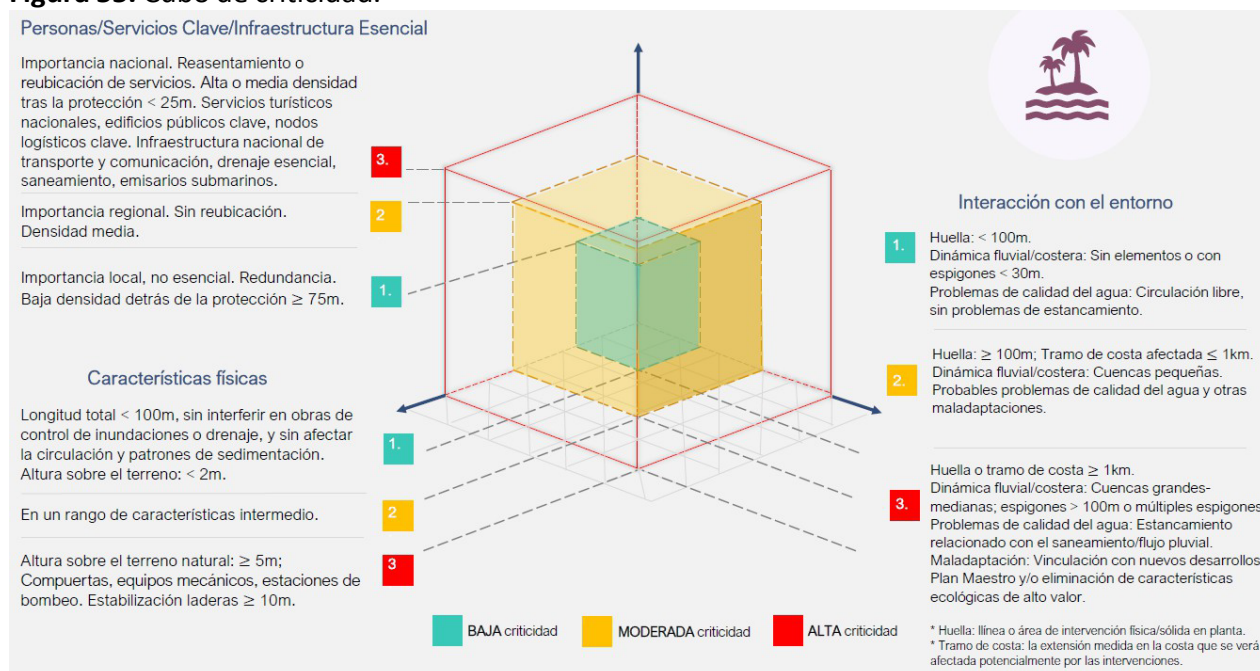
Nivel de amenaza	Amenaza	Breve justificación
Baja	Olas de calor	Incremento de +116% en días cálidos y +285 % en episodios prolongados; afecta al personal y materiales en superficie.
	Incendios forestales	Aumento de temperatura y calor prolongado incrementan riesgo de ignición en zonas con maquinaria y combustibles.
	Volcanismo	Afectación menor por caída de ceniza fina; interrupciones temporales sin daño estructural.
	Remociones en masa	El puerto está lejos de zonas de pendiente y de origen de remociones en masa que se han detectado.
	Sequía	Nivel bajo. No afecta la operación portuaria; sin dependencia de recursos hídricos naturales.
	Olas de frío / nieve	Disminución proyectada (-28 % y -97 % respectivamente); impacto marginal en faenas invernales.
	Aumento temperatura, salinidad y acidificación del mar	Cambios graduales de largo plazo; impacto ambiental más que operativo o estructural.

Nota: **Nivel alto:** amenazas tienen capacidad de generar daños estructurales o pérdida temporal de operatividad, y su control exige soluciones de ingeniería. **Moderado:** amenazas frecuentes o graduales, que afectan principalmente la operación y mantenimiento, más que la estabilidad estructural. Su control se logra mediante protocolos, refuerzos menores y medidas de gestión climática. **Nivel Bajo:** Amenazas de baja recurrencia o con efectos marginales sobre las obras, se controlan mediante mantenimiento rutinario o monitoreo ambiental.

7. PASO 2: Evaluación de la criticidad y vulnerabilidad

La evaluación de criticidad y vulnerabilidad se realizó de acuerdo con las características físicas, nivel del servicio provisto y magnitud de posibles efectos negativos sobre terceros, mediante la aplicación del cubo de criticidad (**Figura 55**). Las siguientes secciones aportan los antecedentes clave y el punto 7.3 expone las conclusiones del análisis.

Figura 55. Cubo de criticidad.



Fuente: BID (2019)

7.1. Evaluación de la criticidad

Infraestructura Crítica: La infraestructura crítica comprende el conjunto de instalaciones, sistemas físicos o servicios esenciales y de utilidad pública, así como aquellos cuya afectación cause un grave daño a la salud o al abastecimiento de la población, a la actividad económica esencial, al medioambiente o a la seguridad del país. Se entiende por este concepto la infraestructura indispensable para la generación, transmisión, transporte, producción, almacenamiento y distribución de los servicios e insumos básicos para la población, tales como energía, gas, agua o telecomunicaciones; la relativa a la conexión vial, aérea, terrestre, marítima, portuaria o ferroviaria, y la correspondiente a servicios de utilidad pública, como los sistemas de asistencia sanitaria o de salud”.

Fuente: Constitución Chilena

Tipología de Proyecto	Construcción y operación de Infraestructura Portuaria
Alcance del Proyecto	Alcance nacional y regional. El proyecto habilita capacidad portuaria indispensable para la conexión logística de la Región de Magallanes, el abastecimiento productivo de Punta Arenas y el soporte a cargas sobredimensionadas vinculadas al desarrollo de proyectos de hidrógeno verde y actividades industriales. No existe infraestructura equivalente en la región que permita sustituir su función sin generar pérdidas de continuidad logística y aumento significativo de costos y tiempos de operación.

Vida útil Proyecto	Indefinida
Consecuencias posibles por falla del Proyecto	La falla o indisponibilidad del proyecto genera un impacto operativo y económico de nivel alto, dado que interrumpe la continuidad de la cadena logística regional y del flujo de cargas sobredimensionadas necesarias para proyectos energéticos e industriales. La ausencia de puertos alternativos con igual capacidad implica baja redundancia y deriva en retrasos, sobrecostos de transporte y disminución de la competitividad territorial.

Tabla 16. Categorización indicativa relacionada a Consecuencias posibles por falla del Proyecto.

Características clave	Baja	Moderada	Alta
¿El proyecto es considerado una infraestructura crítica?			El Proyecto califica como infraestructura crítica al cumplir la definición de la Ley N.º 21.542, al tratarse de un activo portuario esencial cuya afectación comprometería el abastecimiento, la actividad económica y la logística. Su rol estratégico en la implementación del Plan de Acción de Hidrógeno Verde, su capacidad para movilizar hasta 2,5 Mt/año y su función habilitante para cargas sobredimensionadas refuerzan su carácter estructural. Además, es el único terminal portacontenedores de Magallanes, condición que lo convierte en un activo no redundante y, por tanto, indispensable para la continuidad operativa del territorio.
Si fallase el proyecto ¿Cuántas personas perderían un servicio crítico?			Aunque el número de trabajadores directos es acotado, la función portuaria sostiene el abastecimiento y la actividad industrial/logística de Punta Arenas y del desarrollo hidrógeno Verde (cargas eólicas, sobredimensionadas). La pérdida del servicio interrumpe operaciones

Características clave	Baja	Moderada	Alta
			productivas y logísticas a escala regional con externalidades amplias.
Si el proyecto falla, ¿existe la posibilidad de pérdidas de vida asociadas a la falla?	El cierre/indisponibilidad del terminal no genera per se exposición letal comunitaria. El riesgo a la vida (principalmente operarios que trabajan en el puerto) se circunscribe a contingencias operacionales durante eventos extremos (tsunami con área de evacuación y emergencias marítimas), mitigables mediante protocolos		
¿Hay infraestructura redundante que puede utilizarse en caso de falla de proyecto			El terminal incorpora capacidades para cargas sobredimensionadas (p. ej., aspas >80 m) y ampliación de muelle/grúas que no son fácilmente sustituidas en la ciudad, la indisponibilidad no tiene reemplazo equivalente en la región sin costos o tiempos muy altos.
¿Se produciría una pérdida significativa de servicios ecosistémicos?	El proyecto no elimina ni interviene servicios ecosistémicos relevantes. El área donde se desarrolla el proyecto corresponde a un área industrial altamente intervenida, la cual no está legalmente protegida ni reconocida por su alto valor en biodiversidad		

Características clave	Baja	Moderada	Alta
¿La construcción o existencia del proyecto podría exacerbar el riesgo asociado a cualquiera de las amenazas para las comunidades aledañas?	La construcción y operación del proyecto no incrementan de forma directa el riesgo para comunidades, dado que no existe población residencial inmediata en el área de influencia directa de las obras, ni viviendas adyacentes que pudieran verse mayormente afectadas. Los posibles efectos sobre el drenaje y la escorrentía se mantienen acotados al interior del recinto portuario, sin transferencia de amenazas hacia zonas habitadas.		

7.2. Evaluación de la vulnerabilidad

Tabla 17. Categorización indicativa de vulnerabilidad.

Características clave	Bajo	Moderado	Alto
Tamaño de la infraestructura (hectáreas)		La infraestructura intervenida corresponde a un área portuaria de alta relevancia operacional. De acuerdo con el EIAS la infraestructura terrestre existente tiene una superficie total de 240.000 m ² (24 ha), compuesta por aproximadamente 9,4 ha pavimentadas y 14,6 ha no pavimentadas, mientras que el muelle principal considera una explanada asociada de 4.500 m ² .	
Cantidad de personal de la infraestructura crítica activo durante el fenómeno	Según el EIAS, la operación requiere aproximadamente 59 trabajadores en total,		

Características clave	Bajo	Moderado	Alto
	incluyendo funcionarios portuarios, operarios y servicios externos (Aduanas, SAG, Autoridad Marítima). No existen servicios esenciales que exijan permanencia de personal en caso de evento extremo, facilitando la evacuación y reduciendo la exposición humana		
El edificio cuenta con Sistema de respaldo para suministro eléctrico		El proyecto depende principalmente del suministro eléctrico externo. El EIAS no declara sistemas permanentes de respaldo energético para la operación, por lo que la continuidad ante cortes prolongados sería parcial. Durante la fase de construcción pueden existir equipos de apoyo temporal (faenas), pero no se acreditan respaldos permanentes en operación.	
El edificio cuenta con más de una vía de evacuación para casos de emergencias		El recinto cuenta con vías de evacuación señalizadas y zonas de seguridad definidas, según el Plan de Gestión de Riesgos y Desastres. La evacuación se dirige hacia las áreas externas designadas como zonas seguras, siguiendo un procedimiento estandarizado con roles asignados (Director de Emergencia, Monitores de Apoyo y	

Características clave	Bajo	Moderado	Alto
		Coordinadores de Área). Sin embargo, para eventos que requieran salida del recinto, la evacuación se canaliza principalmente mediante el mismo acceso operativo, lo que limita la redundancia de rutas.	
El diseño del edificio incorpora sistemas para mitigar impacto de Amenaza			A la fecha se evidencian que las amenazas no se han abordado explícitamente en la documentación del proyecto. Del mismo modo, no ha sido evaluada la componente de cambio climático.

7.3. Resultados y conclusión de los Pasos 1 y 2: Exposición, Criticidad y Vulnerabilidad

Como resultado del análisis de exposición (Paso 1), y de la evaluación de la criticidad y vulnerabilidad del proyecto (Paso 2), el Proyecto Puerto Mardones se clasifica globalmente como de **RIESGO ALTO**, dado que corresponde a infraestructura crítica con baja redundancia, expuesta a amenazas relevantes tales como licuación, tsunamis, inundación fluvial y pluvial, viento extremo y aumento del nivel del mar. La vulnerabilidad operacional es moderada y controlable, pero la alta criticidad del servicio determina el nivel de riesgo dadas las condiciones geográficas de la zona austral. Se recomienda avanzar al Paso 3 de la metodología para desarrollar la evaluación cualitativa del riesgo y las medidas de mitigación.

8. PASO 3: Evaluación cualitativa simplificada del riesgo

En esta sección se analiza cómo y en qué medida ya se han tenido en cuenta cuestiones de gestión del riesgo de desastres y cambio climático en la formulación del proyecto. Para ello se sintetiza a continuación la información sobre consideraciones de diseño que ya existen y se han aplicado o se pretenden aplicar al proyecto. Se compone de los siguientes elementos:

- Indagación sobre las amenazas relevantes identificadas (tabla cuestionario)
- Indagación sobre consideraciones de diseño
- Indagación sobre riesgo incremental

- Narrativa del Riesgo, síntesis de la información recopilada y hallazgos realizados, indicando lo realizado y aspectos que requieren mayor profundización

Los análisis se construyen de acuerdo con los siguientes antecedentes:

- MEMORIA EXPLICATIVA MEJORAMIENTO CAPACIDAD DE ATRAQUE MUELLE JOSE DE LOS SANTOS MARDONES, PUNTA ARENAS
- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS ESPECIALES CONSTRUCCIÓN REFUERZO ESTRUCTURAL MUELLE JOSÉ DE LOS SANTOS MARDONES, PUNTA ARENAS
- ESPECIFICACIONES TÉCNICAS GENERALES CONSTRUCCIÓN REFUERZO ESTRUCTURAL MUELLE JOSÉ DE LOS SANTOS MARDONES, PUNTA ARENAS
- DISEÑO ELEMENTOS DE REFUERZO MUELLE JOSE DE LOS SANTOS MARDONES, PUNTA ARENAS MEMORIA EXPLICATIVA – INGENIERÍA DE DETALLE
- MATRICES DE RIESGO EN INFRAESTRUCTURA-OPERACIONES DE TERMINAL EPA
- PLAN DE GESTION DE RIESGOS Y DESASTRES
- 8841-MCA-ES-001 MEMORIA DE CÁLCULO PUENTE DE ACCESO PROYECTADO
- 8841-MCA-ES-002 MEMORIA DE CÁLCULO ESTRIBO PROYECTADO
- 8841-MCA-ES-003 MEMORIA DE CÁLCULO CABEZO PROYECTADO
- INFORME TÉCNICO CLASIFICACIÓN SÍSMICA DEL SUELO DE ACUERDO A LA NORMA NCH2369-2003

8.1. Indagación sobre las amenazas relevantes identificadas

A partir de la información recopilada se han generado una serie de consideraciones con respecto a los análisis realizados y sobre el diseño del Proyecto.

Tabla 18. Indagación sobre amenazas relevantes al que el proyecto está expuesto

Amenaza	¿Cómo fueron evaluadas las amenazas?	Respuesta	¿A que parámetros debe ajustarse el diseño del proyecto?	Respuesta
Licuación	¿Se identificaron los tipos de suelo? ¿Se determinó el potencial de licuación en el proyecto?	En el documento 8841-MCA-ES-002 se menciona un informe de investigación geotécnica de 1989 (Geovenor) como antecedente geotécnico. Además, el diseño estructural utiliza el informe técnico de MasGeotecnia con la clasificación sísmica del suelo según norma NCh2369-2003. Estudio de Govenor se utiliza para la ingeniería de detalle, indicando que el primer estrato bajo el lecho marino son arenas limosas o algo	¿Cómo se incluye la clasificación del suelo y el potencial de licuación en el proyecto?	La clasificación del suelo (Tipo IV) se utiliza para definir las solicitudes sísmicas según norma 2369 y 433. Además, las propiedades del suelo se utilizan para calcular la longitud de empotramiento y ficha de pilotes.

Amenaza	¿Cómo fueron evaluadas las amenazas?	Respuesta	¿A que parámetros debe ajustarse el diseño del proyecto?	Respuesta
		limosas de compacidad baja con espesor 10-34 m. No se encuentran documentos que determinen el potencial de licuación.		No se verifica la resistencia de los pilotes considerando el estrado potencialmente licuable ni en el cálculo de longitud de empotramiento ficha.
Inundación fluvial y pluvial	¿Se consideran potenciales inundaciones pluviales o fluviales? ¿Se estimaron los impactos relacionados con el cambio climático en la inundación fluvial y pluvial?	En el documento “Análisis de Riesgos y propuestas de medidas de adaptación con respecto al cambio climático en la Empresa Portuaria Austral” se abordan los impactos del cambio climático en la inundación fluvial, especialmente en la cuenca del río de Las Minas. En la Memoria Explicativa no se mencionan análisis estadísticos de precipitaciones o inundaciones. El Informe MP 929 reconoce la inundación fluvial como una amenaza baja indicando que el proyecto se encuentra fuera del área de riesgo de inundación del Estero Llau-Llau definida en el Plano Regulador. Aspecto que debe ser reconsiderado asociado al periodo de retorno de 10 años con el cual se construyó la zonificación.	¿El proyecto considera medidas específicas para proteger de los efectos de inundaciones pluviales y fluviales a las Infraestructuras portuarias y a las áreas de influencia del proyecto?	El análisis de riesgos identifica la amenaza de inundaciones pluviales y fluviales con riesgo alto para las operaciones del Muelle Mardones y propone medidas de adaptación, pero estas medidas son de carácter general. No establece medidas específicas o de ingeniería concretas para proteger las infraestructuras portuarias frente a inundaciones fluviales En la memoria explicativa se menciona el desarrollo e implementación de un Proyecto de Aguas Lluvias que abarca el diseño y la

Amenaza	¿Cómo fueron evaluadas las amenazas?	Respuesta	¿A que parámetros debe ajustarse el diseño del proyecto?	Respuesta
				planificación de un sistema de recolección, conducción y disposición de aguas pluviales para prevenir posibles problemas de inundación en el sitio de acopio para proyectos eólicos. En las ETE se describe brevemente el proyecto de aguas lluvias que considera escurrimiento superficial por cunetas y badenes y la construcción de un estanque de infiltración.
Sedimentación	¿Se considera la amenaza de sedimentación en el proyecto?	En el documento “Análisis de Riesgos y propuestas de medidas de adaptación con respecto al cambio climático en la Empresa Portuaria Austral” no se menciona la sedimentación como una amenaza relevante para los puertos de la Empresa Portuaria Austral ubicados en Punta Arenas. No se contemplan variaciones derivadas del cambio climático		
Aumento del nivel del mar	¿Se han utilizados datos para modelar impactos en el	En el documento “Análisis de Riesgos y propuestas de medidas de adaptación con respecto al cambio climático en la Empresa Portuaria	¿El proyecto considera como parámetro las Proyecciones de aumento nivel del	El documento de análisis de riesgos y medidas de adaptación

Amenaza	¿Cómo fueron evaluadas las amenazas?	Respuesta	¿A que parámetros debe ajustarse el diseño del proyecto?	Respuesta
	nivel medio del mar? ¿Cómo considera este fenómeno en el diseño del proyecto?	Austral” se reconoce el aumento del nivel medio del mar como amenaza climática, pero no se utilizan ni reporta datos de modelación o simulación para evaluar sus impactos. El Informe MP 929 reconoce el aumento de nivel del mar como una amenaza moderada y que el proyecto si está expuesto. El cálculo presentado en las memorias de cálculo del estribo, puente de acceso y cabezo proyectado (8841-MCA-ES-001, 8841-MCA-ES-002 y 8841-MCA-ES-003) incorporan en el diseño valores máximos de nivel del mar. Ni la memoria explicativa de ingeniería disponible ni las ETE mencionan como se incorpora el aumento del nivel del mar producto del cambio climático en el diseño.	mar por efectos Cambio climático proyectadas para los años de vida útil del proyecto?	identifica el aumento del nivel del mar como una amenaza y sugiere medidas de adaptación estructurales y no estructurales de carácter general. Se sugiere, por ejemplo, incorporar el aumento de nivel mar en futuros propuestas de inversión y de infraestructura. El cálculo presentado en las memorias de cálculo del estribo, puente de acceso y cabezo proyectado (8841-MCA-ES-001, 8841-MCA-ES-002 y 8841-MCA-ES-003) incorporan en el diseño el nivel del mar como un valor máximo estático, no se mencionan consideraciones asociadas al cambio climático en los documentos disponibles.

Amenaza	¿Cómo fueron evaluadas las amenazas?	Respuesta	¿A que parámetros debe ajustarse el diseño del proyecto?	Respuesta
Tsunami	¿Qué estudios de tsunami se realizaron?	Ni la Memoria explicativa ni las EETT hacen referencia a esta amenaza, sólo el documento sobre Análisis de Riesgos hace referencia al Plan Regional de Emergencia Magallanes y de la Antártica chilena (Anexo- Plan por amenaza tsunami) el cual indica un área general de inundación	¿Se consideró el tsunami en el diseño del proyecto?	Ni la Memoria Explicativa ni las EETT mencionan la amplitud del tsunami ni el área potencial de inundación.
Amenazas moderadas				
Oleaje	¿Se han realizado análisis relacionados a los efectos de oleaje en el proyecto? ¿Se han realizado simulaciones de los efectos del cambio climático en el oleaje y su impacto en el proyecto?	El cálculo presentado en las memorias de cálculo del estribo, puente de acceso y cabezo proyectado (8841-MCA-ES-001, 8841-MCA-ES-002 y 8841-MCA-ES-003) incorporan en el diseño la carga de oleaje.	¿Se consideró el oleaje en el diseño del proyecto? ¿Se consideran proyecciones de cambio climático de oleaje en el diseño del proyecto?	Altura y periodo del oleaje son considerados en el diseño estructural del estribo y del cabezo proyectado. Se utilizan valores de altura y periodo que coinciden con los datos de oleaje máximo observados en datos previos de Punta Arenas y se menciona que provienen del Antecedente 46 no disponible. No se identifican medidas asociadas a las modificaciones del oleaje producto del cambio climático en los documentos disponibles.
Marejadas	¿Se han realizado	En el documento "Análisis de Riesgos y propuestas de	¿El proyecto contempla	En el documento de análisis de

Amenaza	¿Cómo fueron evaluadas las amenazas?	Respuesta	¿A que parámetros debe ajustarse el diseño del proyecto?	Respuesta
	análisis relacionados a los efectos de marejada en el proyecto? ¿Se han realizado simulaciones de los efectos del cambio climático en las marejadas y su impacto en el proyecto?	medidas de adaptación con respecto al cambio climático en la Empresa Portuaria Austral” se reconocen las marejadas como una amenaza, se reportan brevemente las condiciones históricas de oleaje, y se incorporan principalmente para analizar efectos potenciales en accesos, atraques y seguridad de operaciones. No contempla variaciones derivadas de cambio climático. Ni la memoria explicativa de ingeniería disponible ni las ETE mencionan como se incorporan las marejadas en el diseño. El informe MP 929 reconoce las marejadas como una amenaza baja indicando que el actual muelle Mardones ha cerrado 15 veces entre 2008 y 2019 por marejadas.	medidas de adaptación ante los efectos de las marejadas?	riesgos se contempla la necesidad de medidas de adaptación frente a las marejadas. Se identifican las marejadas como amenaza de riesgo alto y moderado a las marejadas para las distintas operaciones portuarias. Se sugieren medidas estructurales y no estructurales de adaptación frente a los potenciales riesgos asociados a marejadas durante la operación portuaria y situaciones de emergencia. No se detallan medidas técnicas específicas como el diseño de rompeolas, elevación de muelles o protocolos operativos. No utiliza las proyecciones de aumento del nivel del mar como parámetro

Amenaza	¿Cómo fueron evaluadas las amenazas?	Respuesta	¿A que parámetros debe ajustarse el diseño del proyecto?	Respuesta
				cuantitativo o de diseño
Erosión costera	¿Se reconoce la erosión costera como una amenaza en el proyecto?	En el documento “Análisis de Riesgos y propuestas de medidas de adaptación con respecto al cambio climático en la Empresa Portuaria Austral” se menciona brevemente la erosión costera como una consecuencia del aumento del nivel del mar		
Viento máximo diario	¿Se realizaron estudios respecto a los efectos del viento en el proyecto? ¿Se han realizado análisis sobre los efectos del cambio climático en los vientos?	En el documento “Análisis de Riesgos y propuestas de medidas de adaptación con respecto al cambio climático en la Empresa Portuaria Austral” se consideran las condiciones de viento máximo en relación a la operabilidad como lo son las maniobras de embarcaciones y seguridad en el terminal, pero no para diseño de estructuras. El documento considera en el análisis de cambio de patrones de viento el clima histórico y futuro bajo escenario RCP 8.5 y la información contenida en el PARCC. El informe MP 929 reconoce el viento como amenaza moderada debido a los fuertes vientos observados en Punta Arenas (se presenta estadística). El cálculo presentado en las memorias de cálculo del estribo, puente de acceso y cabezo proyectado (8841-MCA-ES-001,	¿El proyecto contempla el cumplimiento de la normativa y las recomendaciones para este tipo de Infraestructuras? ¿Se han generado medidas específicas para garantizar la operación segura del Puerto en caso de viento extremo?	El cálculo estructural utiliza la normativa vigente para incorporar la carga de viento en la estructura. No se identifican cálculos relacionados a cambios en el régimen de viento debido al cambio climático. El proyecto reconoce el riesgo de vientos extremos y su aumento proyectado en el análisis de riesgos. Se sugieren posibles medidas de adaptación para asegurar la operación segura durante eventos de viento extremos.

Amenaza	¿Cómo fueron evaluadas las amenazas?	Respuesta	¿A que parámetros debe ajustarse el diseño del proyecto?	Respuesta
		8841-MCA-ES-002 y 8841-MCA-ES-003) incorporan en el diseño la carga de viento.		
Olas de calor	¿Se realizaron estudios respecto a los efectos de las olas de calor en el proyecto? ¿Se han realizado análisis sobre los efectos del cambio climático en las olas de calor?	El informe MP 929 reconoce el que las temperaturas extremas (frío o calor) podrían llegar a generar problemas para la operación, sin embargo, el riesgo se clasifica como bajo, debido a que los rangos de temperatura en Punta Arenas no son tan extremos.	¿Se han generado medidas específicas para garantizar la operación segura del Puerto en caso de olas de calor?	
Incendios forestales	¿Se realizaron estudios respecto a los efectos de los incendios forestales en el proyecto? ¿Se han realizado análisis sobre los efectos del cambio climático en los incendios forestales?	El informe MP 929 indica que los incendios suelen estar asociados a la propagación de incendios en vegetación por terrenos rurales o cercanos a vivienda, sin embargo, considera que la amenaza es baja, dado que se ubica en una zona industrial con poca vegetación. A su vez el análisis de riesgos y propuestas de medidas de adaptación con respecto al cambio climático en la empresa portuaria austral califica el riesgo como moderado.	¿Se han generado medidas específicas para garantizar la operación segura del Puerto en caso de olas de calor?	El plan de gestión de riesgos y desastres indica acciones para enfrentar los incendios en caso de ocurrir, con indicaciones para la evacuación. Las especificaciones técnicas especiales Indican que el contratista deberá mantener un sistema de protección contra incendios.

A continuación, se detalla el nivel de información y de medidas incorporadas en el proyecto, relacionadas con los efectos del cambio climático.

Tabla 19. Integración de consideraciones de cambio climático en desarrollo del Proyecto

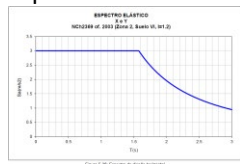
Pregunta	Respuesta
Durante la fase de análisis ¿se incorporaron datos de modelaciones de Cambio climático en los análisis (Informes IPCC, Proyecciones nacionales o locales)?	En el documento “Análisis de Riesgos y propuestas de medidas de adaptación con respecto al cambio climático en la empresa portuaria Austral” se menciona que fue analizada la amenaza de la cadena de impacto de anegamiento en asentamientos costeros incluida en ARClím. El Plan de Acción Regional de Cambio climático Magallanes PARCC se cita como fuente para tendencias y proyecciones de precipitación, temperatura y viento.
¿Los resultados de los modelos climáticos fueron sometidos a downscaling para representar las condiciones locales?	El informe menciona datos que ya fueron sometidos a downscaling por otras instituciones (como ARClím y PARCC), pero no ejecuta ni documenta un proceso de downscaling propio para el proyecto. Sin embargo, un porcentaje elevado de las amenazas climáticas de ARClím es de bajo impacto.
¿El diseño considera medidas con respecto a aumento de frecuencias, intensidad y cambios en dirección del viento?	Los documentos disponibles no incorporan medidas de diseño específicas relacionadas con el aumento en la frecuencia, intensidad o cambios en la dirección del viento. El documento “Análisis de Riesgos y propuestas de medidas de adaptación con respecto al cambio climático en la Empresa Portuaria Austral” reconoce el riesgo y la necesidad de incorporar medidas de adaptación en etapas posteriores o en proyectos futuros.
¿El diseño considera medidas con respecto a aumento nivel del mar?	El documento disponible sobre diseño del proyecto no menciona medidas concretas frente al aumento del nivel del mar, aunque se reconoce la necesidad de considerar este fenómeno y lo menciona como un factor clave en el documento “Análisis de Riesgos y propuestas de medidas de adaptación con respecto al cambio climático en la Empresa Portuaria Austral”
¿El diseño considera medidas con respecto a eventos de precipitaciones intensas?	El diseño considera la amenaza de precipitaciones intensas y plantea medidas generales de manejo y adaptación. El documento de ingeniería disponible presenta un proyecto de manejo de aguas lluvias para disponer de las aguas superficiales y evitar posibles anegamientos en la zona de acopio.

Pregunta	Respuesta
¿El diseño considera medidas con respecto a aumento de frecuencia e impacto de marejadas?	El diseño no considera medidas específicas ante el aumento de frecuencia e impacto de marejadas; el fenómeno está reconocido y evaluado, pero las acciones propuestas son generales y aún no se traducen en soluciones de diseño concretas.
¿El diseño considera medidas con respecto a eventos de olas de calor o frío?	El diseño no considera medidas específicas ante el incremento en la duración de olas de calor o frío, aunque reconoce a las olas de calor como un riesgo bajo. No incluye medidas en el diseño ni en la operación.

8.2. Indagación sobre consideraciones de diseño

A continuación, se sintetizan aspectos considerados en el diseño del Proyecto. En primer lugar, se detallan las normativas relacionadas y el cumplimiento de estas en el Proyecto. Posteriormente se sintetizan los principales aspectos de diseño incorporados para mitigar los impactos de las amenazas identificadas (a las que el proyecto está expuesto).

Tabla 20. Soluciones de diseño incorporadas en el proyecto relacionadas con amenazas a las que está expuesto.

Amenaza	Requerimiento (por normativa o análisis)	Solución incorporada en el diseño	Imagen Referencial de la solución incorporada
Licuación	Clasificación del suelo de fundación según norma NCh2369-2003 y aplicación de Capítulo 2.7.9 de la Guía para el Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras (DOP, 2013) para el potencial de licuación debido a la acción sísmica	Se clasificó el suelo de fundación y se determinaron las fuerzas sísmicas según la norma NCh 2369-2003. No se determinó el potencial de licuación del estrato de arena limosa, ni se verificó la resistencia de la estructura considerando el estrato potencialmente licuable.	Espectro de diseño 
Inundación fluvial y pluvial	Evaluación de zonas de inundación por desborde de cauces y manejo de aguas lluvias	La memoria explicativa considera el desarrollo y la implementación de un proyecto de aguas lluvias en el patio de acopio para proyectos eólicos, que garantice la eficiencia en el manejo del agua y la prevención de posibles problemas de	No hay figuras disponibles

Amenaza	Requerimiento (por normativa o análisis)	Solución incorporada en el diseño	Imagen Referencial de la solución incorporada
		acumulación o inundación en el sitio. Se describe un estanque de infiltración y sus dimensiones, no se especifican análisis estadístico de precipitaciones o de inundación para su dimensionamiento. En el Análisis de Riesgos se mencionan estudios de inundabilidad cercanos a la zona del proyecto como: el Plan de Acción Regional de cambio climático de Magallanes (PARCC), las inundaciones por desborde del río de Las Minas, que cruza y desemboca en la ciudad de Punta Arenas (Contreras Soto, 2022). Se concluye que la precipitaciones presentan concentradas en un periodo en torno a 2 días aproximadamente (Muñoz et al.,2020) Se generan matrices de riesgo para luego concluir que las brechas pueden ser aplicables tanto para Terminal Prat, Muelle Mardones y Natales de la Empresa Portuaria Austral. En el documento de análisis de riesgos se sugiere como medida de adaptación frente a riesgo de inundación: “Evaluar posible Desarrollo de infraestructura de canalización entre terreno de EPAustral y ASMAR, que	

Amenaza	Requerimiento (por normativa o análisis)	Solución incorporada en el diseño	Imagen Referencial de la solución incorporada
		capture y canalice el agua hacia el mar. La infraestructura podría ser un canal abierto en paralelo al deslinde norte del Terminal Mardones” Se identifica que: “Aproximadamente 1/3 de la superficie del Terminal Mardones, incluyendo el acceso al muelle, está en zona inundable de acuerdo al Plan Regulador Comunal de Punta Arenas, año 2011. La zona inundable se proyecta desde el estero Llau-Llau hacia al sur, comprometiendo área de bodegas, zonas de explanada con conexiones reefer y acceso a muelle”	
Sedimentación	Considerar los procesos de sedimentación en el diseño del proyecto	Las memorias de cálculo disponibles no mencionan la sedimentación en el diseño	
Aumento del nivel del mar	Medidas de diseño o mitigación para considerar los efectos del aumento del nivel del mar durante la vida útil del proyecto	El informe disponible no presenta cálculos ni criterios técnicos de diseño que incorporen el efecto del aumento del nivel del mar en el diseño. En la lista de medidas de adaptación estructurales del estudio de análisis de riesgos se proponen recomendaciones que sugieren acciones de diseño/obra futuras, por ejemplo: “Inclusión de proyecciones de aumento del nivel del mar en futuras concepciones de	No hay figuras disponibles

Amenaza	Requerimiento (por normativa o análisis)	Solución incorporada en el diseño	Imagen Referencial de la solución incorporada
		infraestructuras”, “Adecuación de las estructuras del atracadero al nivel del mar” y “Aumento de la cota de elevación del puerto”. El cálculo presentado en las memorias de cálculo del estribo, puente de acceso y cabezo proyectado (8841-MCA-ES-001, 8841-MCA-ES-002 y 8841-MCA-ES-003) incorporan en el diseño el nivel del mar como un valor máximo estático, no se mencionan consideraciones asociadas al cambio climático en los documentos disponibles. No se dispone de la memoria de cálculo utilizada para estimar el valor máximo de nivel del mar utilizado en los cálculos.	
Tsunami	Verificar la resistencia de las estructuras bajo la acción del tsunami con la norma NCh 3363/2015 y Capítulo 4.11 de la Guía para el Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras (DOP, 2013). Analizar el área de inundación Tsunami/CITSU Punta Arenas Ed. 2016. La inundación por tsunami en Punta Arenas es debido a tsunamis por deslizamientos subaéreos.	No se hace referencia a esta amenaza en el diseño del puerto. No se menciona el máximo nivel de inundación con o sin marea.	

Amenaza	Requerimiento (por normativa o análisis)	Solución incorporada en el diseño	Imagen Referencial de la solución incorporada
Amenazas moderadas			
Oleaje y Marejadas	Adecuación de diseño de estructuras las cargas derivadas del oleaje y de los eventos de marejadas ¿Se utiliza la normativa para el cálculo del oleaje?	El cálculo presentado en las memorias de cálculo del estribo, puente de acceso y cabezo proyectado (8841-MCA-ES-001, 8841-MCA-ES-002 y 8841-MCA-ES-003) incorporan en el diseño la carga de oleaje de acuerdo con la normativa "Technical Standards and Commentaries for Port and Harbour Facilities in Japan" Altura y periodo del oleaje son considerados en el diseño estructural del estribo y del cabezo proyectado. Se utilizan valores de altura y periodo que coinciden con los datos de oleaje máximo observados en datos previos de Punta Arenas, pero no se especifican en los cálculos el origen de los valores utilizados o si se consideró en el cálculo los efectos del cambio climático. Se menciona como antecedente de los valores utilizados el documento "Criterios de Diseño Estructural" no disponible. El análisis de riesgos sugiere métodos de defensa que consisten en la instalación de estructuras o sistemas para proteger las infraestructuras portuarias de los eventos	No hay imágenes disponibles

Amenaza	Requerimiento (por normativa o análisis)	Solución incorporada en el diseño	Imagen Referencial de la solución incorporada
		climáticos intensos, como las fuertes tormentas y marejadas ciclónicas o el aumento del nivel del mar.” Se presentan estrategias de adaptación frente a estos eventos. Se sugieren medidas estructurales y no estructurales frente a marejadas.	
Erosión costera	Considerar los procesos de erosión costera producto del aumento del nivel del mar, marejadas, y eventos extremos	El cálculo presentado en las memorias de cálculo disponibles no considera procesos de erosión	
Viento máximo diario	Diseño de estructuras considera las cargas derivadas del viento siguiendo la norma chilena NCh 432: Diseño Estructural - Cargas de Viento. Incorporación de medidas de adaptación por variación del viento máximo derivadas del cambio climático	El cálculo presentado en las memorias de cálculo del estribo, puente de acceso y cabezo proyectado (8841-MCA-ES-001, 8841-MCA-ES-002 y 8841-MCA-ES-003) incorporan en el diseño la carga de viento. Se considera una carga básica de viento de velocidad 53,5 m/s y el efecto de ráfagas de viento. No se especifican en los cálculos el origen de los valores utilizados o si se consideró en el cálculo los efectos del cambio climático en la intensidad del viento. Se menciona como antecedente de los valores utilizados el documento “Criterios de Diseño Estructural” no disponible. El documento de análisis de riesgos identifica el	

Amenaza	Requerimiento (por normativa o análisis)	Solución incorporada en el diseño	Imagen Referencial de la solución incorporada
		viento como amenaza para las operaciones del muelle Mardones y como potenciales consecuencias el corte de espías y defensas. Luego propone medidas asociadas a operación, monitoreo y refuerzo futuro frente a eventos de viento extremo: como por ejemplo monitorear viento extremo, considerar cambio de ubicación de embarque de prácticos, etc.	
Olas de calor	El Reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo (D.S. 594 del Ministerio de Salud)	No se incorporan medidas especiales por considerarse un riesgo bajo. El Informe MP 929 – 2025 indica que las instalaciones de las obras temporales cumplirán el D.S. 594	
Incendios forestales	Planes de prevención, emergencia y evacuación ante incendios forestales. Contar con un Reglamento Interno de Orden Higiene y Seguridad según el art. 153 del Código del trabajo.	El informe MP 929 – 2025 indica que el reglamento Interno de Orden Higiene y Seguridad contiene Normas de protección contra incendios y de actuación frente a emergencias de incendio El plan de gestión de riesgos y desastres contiene un procedimiento de evacuación ante incendios forestales. Asimismo, dentro del MP 929 se indica en el plan de gestión ambiental y social: Contar con un sistema contra incendio adecuado a los elementos constructivos presentes en la obra y a los materiales almacenados,	

Amenaza	Requerimiento (por normativa o análisis)	Solución incorporada en el diseño	Imagen Referencial de la solución incorporada
		y Comprobar e inspeccionar el buen funcionamiento de los equipos de seguridad y control de riesgos (por ejemplo, equipos para la protección contra incendios).	

8.3. Indagación sobre el riesgo incremental

A continuación, se describe una indagación de como la ejecución del proyecto podría generar riesgos adicionales para la comunidad aledaña o el medio ambiente.

Tabla 21. Indagación sobre riesgo incremental

Pregunta	Respuesta
¿Puede el Proyecto cambiar las condiciones de amenaza (por ejemplo, en su frecuencia, intensidad, extensión espacial) de cualquiera de las amenazas identificadas, resultando en intensidades más altas con respecto a condiciones de línea base?	El proyecto no modifica la frecuencia, intensidad ni distribución espacial de las amenazas identificadas.
¿Puede el Proyecto cambiar la exposición de su área de influencia directa o indirecta resultando en un incremento de activos o población que pueden estar expuestos a amenazas naturales?	El proyecto no incrementa la exposición de población o activos externos al puerto a amenazas.
¿El Proyecto considera medidas específicas para evitar generar riesgos adicionales o para mitigarlos?	El proyecto incorpora medidas específicas destinadas a evitar la generación de riesgos adicionales y a mitigar aquellos inherentes a la operación portuaria, de acuerdo con los alcances señalados previamente.

8.4. Narrativa del riesgo

El proyecto tiene por objetivo habilitar y reforzar la infraestructura portuaria del Terminal José de los Santos Mardones como pieza habilitante para la cadena logística asociada al desarrollo de proyectos de hidrógeno verde y otras actividades industriales en la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. Se busca asegurar capacidad de transferencia de carga general y sobredimensionada, reduciendo brechas de conectividad marítima y fortaleciendo la resiliencia del sistema logístico en un contexto de creciente demanda energética e industrial.

El proyecto corresponde a la construcción y operación de infraestructura portuaria, centrada en el refuerzo estructural del muelle existente, la adecuación del puente de acceso y del cabezo de atraque, junto con la habilitación de explanadas de respaldo para acopio y manejo de cargas especiales. La superficie terrestre del terminal alcanza aproximadamente 240.000 m² (24 ha), de las cuales cerca de 9,4 ha son pavimentadas y 14,6 ha corresponden a superficies no pavimentadas; el

muelle cuenta además con una explanada asociada del orden de 4.500 m², destinada a operación directa de carga y equipos. El proyecto no incorpora estructuras de gran altura ni obras de alta complejidad técnica, por lo que se asigna una criticidad moderada desde el punto de vista de sus características físicas.

El proyecto se emplaza en el borde costero norte de la ciudad de Punta Arenas, dentro de un recinto portuario industrial consolidado, separado físicamente de las áreas residenciales densas, aunque inserto en un entorno urbano con presencia de infraestructura y servicios relevantes. El proyecto se encuentra localizado en una cuenca pequeña y abarca un tramo de costa afectada menor a 1 Km, y no eliminará características ecológicas de alto valor. Aproximadamente un tercio de la superficie del Terminal Mardones, incluyendo parte de las explanadas y el acceso al muelle, se encuentra dentro de la zona inundable identificada por el Plan Regulador Comunal en el entorno del estero Llau-Llau, mientras que el muelle y sus estructuras asociadas se ubican fuera de cauces activos y no intervienen directamente en áreas de inundación fluvial definidas a la fecha.

La sismicidad y la licuación se clasifican como amenazas de nivel alto para el proyecto. El terminal se emplaza sobre suelos blandos y saturados (Tipo IV, $V_{s30} < 250$ m/s), con estratos de arenas limosas de baja compacidad y espesores significativos, identificados en estudios geotécnicos previos. La ingeniería estructural incorpora la clasificación sísmica del suelo conforme a la NCh 2369 y a los criterios nacionales de diseño, pero se deben proporcionar antecedentes para verificar la resistencia y longitud de empotramiento de pilotes considerando un escenario de suelo licuable. Esta brecha introduce incertidumbre en el desempeño del muelle ante sismos moderados o severos.

La inundación fluvial y pluvial se clasifica globalmente como amenaza de nivel alto para la operación del terminal. Aunque el proyecto se ubica fuera de zonas de inundación fluvial directa asociadas a cauces mayores, la zonificación vigente del Plan Regulador y los análisis de riesgo señalan que aproximadamente un tercio del Terminal Mardones, incluyendo áreas de bodegas, zonas de explanada con conexiones reefer y el acceso al muelle, se encuentra en zona potencialmente inundable para un periodo de retorno de 10 años. Adicionalmente, la alta proporción de superficie pavimentada, la escasa pendiente y la concentración de eventos de lluvia intensa en periodos cortos aumentan la susceptibilidad a inundaciones pluviales locales. El proyecto contempla un sistema de drenaje y un estanque de infiltración para el patio de acopio, pero su dimensionamiento no se fundamenta en análisis hidrológicos e hidráulicos detallados. Se recomienda realizar modelaciones de inundación fluvial y pluvial, ajustar el diseño de drenaje y, de ser necesario, incorporar obras que puedan reducir los impactos en la fase de diseño del patio de acopio.

En términos de amenazas costeras-oceánicas, las asociadas al oleaje y las marejadas se clasifican como de nivel moderado, pero con potencial interacción con el aumento del nivel medio del mar, mientras que el tsunami se considera una amenaza de baja probabilidad, pero de alto impacto potencial. El diseño estructural del estribo, puente de acceso y cabezo proyectado incorpora cargas de oleaje y viento de acuerdo con normas técnicas internacionales y nacionales, utilizando valores máximos observados, pero se deberían evidenciar las consideraciones asociadas a las proyecciones de cambio climático sobre oleaje y el aumento del nivel del mar. Los análisis previos

señalan una recurrencia limitada de cierres por marejadas y un incremento moderado del nivel medio del mar (del orden de 0,3–0,4 m hacia 2100). Por su parte, el tsunami es reconocido en los instrumentos regionales de emergencia, pero no se han verificado las solicitudes asociadas ni la resistencia estructural específica. Se recomienda explicitar en el diseño definitivo escenarios de aumento del nivel del mar con sus efectos potenciales de oleaje extremo y marejadas, reforzar protecciones de pie de estructura donde corresponda y evaluar la carga de tsunami en la estructura.

Las amenazas asociadas al viento máximo diario, olas de calor e incendios se clasifican principalmente como de nivel moderado para la operación portuaria. Los vientos fuertes frecuentes en Punta Arenas afectan la operatividad de grúas móviles, el movimiento de cargas sobredimensionadas y las maniobras de atraque, pudiendo generar esfuerzos adicionales sobre espías y defensas. El diseño estructural incorpora cargas de viento de acuerdo con la normativa chilena y considera ráfagas, pero no se ha analizado en detalle la posible intensificación o cambio de patrón bajo escenarios climáticos futuros. Las proyecciones regionales indican un aumento muy relevante en la frecuencia y duración de episodios cálidos, lo que incrementa la exigencia sobre condiciones de trabajo seguras en explanadas y equipos, sin que el proyecto haya definido medidas específicas adicionales más allá del cumplimiento del D.S. 594. En cuanto a incendios, el riesgo directo es moderado debido al carácter industrial del entorno y a la escasa vegetación, pero se reconoce la necesidad de mantener sistemas de protección contra incendios, reglamentos internos y procedimientos de evacuación vigentes.

Otras amenazas como volcanismo, remociones en masa, sequía, olas de frío, nieve y cambios graduales en temperatura, salinidad y acidificación del mar se clasifican como de nivel bajo para la infraestructura evaluada. Sus efectos esperados son principalmente de carácter ambiental o se manifiestan como interrupciones menores de la operación, manejables mediante mantenimiento rutinario, monitoreo y la aplicación de protocolos generales de gestión ambiental y de seguridad ya considerados en el marco normativo y en los instrumentos internos de la empresa portuaria. No se identifican, en el horizonte de evaluación, efectos estructurales críticos derivados de estas amenazas, pero deberían ser incorporadas en los planes de emergencia.

Recomendaciones principales

- Verificar el diseño para licuación, tsunami y viento extremo.
- Desarrollar modelaciones hidrológicas e hidráulicas de inundación fluvial y pluvial que integren estadísticas de precipitaciones intensas, ajustando en consecuencia el diseño de drenaje y, si procede evaluar medidas de mitigación en el Estero Llau-Llau.
- Incorporar explícitamente en el diseño estructural escenarios de aumento del nivel del mar y su nexo con cambios en el oleaje extremo y marejadas, revisando cotas, protecciones y márgenes de seguridad del muelle.
- Se recomienda consolidar umbrales operacionales frente a viento extremo, fortalecer el monitoreo meteorológico local, integrar medidas de adaptación para olas de calor en la gestión de personal y asegurar la completa operatividad y mantenimiento de los sistemas contra incendios y planes de emergencia asociados.

- Actualizar el Plan de Gestión de Riesgos y Desastres del terminal incorporando los escenarios y brechas identificados en la MERDCC, asegurando coherencia con la Ley N.º 21.364, los planes regionales y comunales de emergencia y las matrices internas de riesgo de EPAustral.

8.4.1. Resultado y conclusión del Paso 3

El análisis integrado de los pasos 1 y 2, complementado con la indagación cualitativa del paso 3, permite concluir que el Proyecto presenta un nivel de **riesgo alto**. Esta clasificación se sustenta en el eje impacto negativo en servicios esenciales/infraestructura esencial, conforme a la Ley N.º 21.542, la cual define como infraestructura crítica a las instalaciones portuarias. El puerto cumple una función estratégica para la conectividad regional y la logística antártica. Adicionalmente, es el único punto portuario con capacidad portacontenedores en la región de Magallanes, lo que refuerza su condición de activo no redundante. Asimismo, el emplazamiento del proyecto se enfrenta a amenazas relevantes, tales como licuación, inundaciones fluviales y pluviales, aumento del nivel del mar y tsunamis. En este sentido, los antecedentes técnicos proporcionados a la fecha no permiten asegurar su integración al diseño.

En este contexto, resulta prioritario profundizar las medidas orientadas al análisis y adaptación en distintas etapas del proyecto. Con carácter urgente, se requiere verificar el diseño frente a condiciones de licuación, tsunami y viento extremo, así como asegurar que el diseño estructural incorpore adecuadamente los escenarios de aumento del nivel del mar y su interacción con variaciones en el oleaje extremo y marejadas. En la misma línea, es necesario presentar antecedentes que permitan evaluar la consideración de amenazas asociadas a la sedimentación y erosión costera, dada su potencial incidencia sobre la estabilidad y operación del terminal.

Una vez abordadas estas brechas prioritarias, se deberá abordar en la fase de diseño del patio de acopio, lo relativo a la problemática de inundaciones pluviales y fluviales, las cuales representan una amenaza significativa para la infraestructura considerando la incertidumbre de la información disponible, que ya identifica áreas de inundación con periodo de retorno de 10 años afectando parte del Puerto. Finalmente, se recomienda actualizar el Plan de Gestión de Riesgos y Desastres del terminal, integrando los escenarios y brechas identificados (incluida la revisión de tipos y niveles de amenaza) y asegurando coherencia con la Ley N.º 21.364, con los planes regionales y comunales de emergencia, y con las matrices internas de riesgo de EPAustral.

Dado lo anterior, y conforme a la lógica metodológica del BID, corresponde avanzar al **Paso 4**, pues aún persisten brechas técnicas que impiden cerrar completamente el análisis cualitativo.

9. Plan preliminar de Gestión del Riesgo de Desastre

9.1. Marco para la gestión del riesgo de desastre

Aspecto	Descripción
Contenido	En este Plan se presentan y detallan las medidas orientadas a reducir los riesgos de desastre asociados al proyecto. Su definición se fundamenta en las conclusiones y recomendaciones derivadas de la evaluación de riesgos de desastres y cambio climático desarrollada previamente, cuyos resultados integrados se exponen en el Capítulo 8 de este informe.
Objetivos generales	Fortalecer la resiliencia en torno a la gestión del riesgo del Proyecto mediante la implementación de medidas que reduzcan la exposición, vulnerabilidad y posibles impactos asociados a amenazas asegurando la continuidad operativa y la sostenibilidad de la infraestructura en el largo plazo.
Normas internacionales de referencia	Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres (2015-2030) Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático Acuerdo de París Convenio de Basilea (desechos peligrosos) Convenio OPRC 1990 (OMI) Convenio SAR 1979 (OMI) Acuerdo de Escazú (acceso a información, participación y justicia ambiental) Reglamento Sanitario Internacional (RSI 2005, OMS)
Normas nacionales de referencia e institucionalidad	El marco normativo nacional para la gestión del riesgo de desastres en Chile establece los principios, responsabilidades y procedimientos que orientan la prevención, preparación, respuesta y recuperación ante eventos adversos que puedan afectar la infraestructura portuaria. En el caso del Proyecto Puerto José de los Santos Mardones, este marco se articula transversalmente a lo largo del ciclo de vida del terminal, en coherencia con la Ley N° 21.364, que crea el Sistema Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SINAPRED) y define las obligaciones de coordinación entre organismos públicos, privados y comunitarios. Complementariamente, la Política Nacional para la Reducción del Riesgo de Desastres 2020–2030 orienta la incorporación de criterios de resiliencia y adaptación ante diversas amenazas. Durante el emplazamiento y diseño del proyecto las normas técnicas vigentes (NCh 2369:2025, NCh 3363:2015 y la Guía de Planificación y Diseño de Obras Marítimas y Costeras del MOP) establecen los estándares de diseño sísmico, estructural y de comportamiento frente a oleaje, marea, tsunami y socavación, asegurando la estabilidad y continuidad operativa de la infraestructura portuaria. En materia de preparación y respuesta, las normas sectoriales (DS N° 26/1966, DS N° 68/2009, DS N° 156/2011) regulan los mecanismos de alerta temprana, vigilancia oceánica y coordinación institucional con SENAPRED, SHOA, OTMAs y DIRECTEMAR, integrando los procedimientos del Comité de Operaciones de Emergencia. Esta institucionalidad, junto con los planes regionales y comunales de emergencia, garantiza un enfoque multisectorial y articulado para la gestión del riesgo de desastres, asegurando que el terminal opere bajo estándares consistentes con los requerimientos nacionales de seguridad y resiliencia.
Ámbito de aplicación	El PGRD será un documento vivo que abarcará el ciclo de vida completo de la infraestructura. Contendrá lineamientos de medidas y recomendaciones necesarias para reducir y gestionar el riesgo del proyecto y de terceros, basándose exclusivamente en los resultados de la evaluación cualitativa del riesgo y en los beneficios asociados a cada medida priorizada.

Cronograma	Este Plan se aplica durante todo el ciclo de vida del proyecto
Estructura	• Programa de Medidas Estructurales para la reducción del riesgo • Programa de Medidas no Estructurales para la reducción del riesgo • Programa de Medidas para la Prevención y Respuesta a la Emergencia

Definiciones. A lo largo de este Plan se hace uso de los términos y conceptos específicos que se definen a continuación.

Término	Definición
Medidas estructurales	Las medidas estructurales para la reducción del riesgo de desastres corresponden a intervenciones físicas destinadas a disminuir la vulnerabilidad de una infraestructura frente a amenazas. Pueden incluir la construcción, refuerzo o adecuación de obras tales como sistemas de drenaje, protecciones costeras, estabilización de suelos, obras de contención y mejoras estructurales que permitan asegurar la continuidad y el desempeño seguro del proyecto ante eventos extremos.
Medidas no estructurales	Las medidas no estructurales para la reducción del riesgo de desastres comprenden acciones que no requieren la construcción de infraestructura física, orientándose a la planificación, organización y gestión del riesgo. Consideran instrumentos como planes de contingencia y evacuación, protocolos operativos, sistemas de alerta temprana, mecanismos de coordinación interinstitucional, capacitación y gestión de información, con el propósito de fortalecer la preparación y respuesta ante eventos adversos.

Fuente: Elaboración propia refundida y adaptada a partir de definiciones de varias fuentes que refleja los conceptos y enfoques promovidos a nivel internacional para la reducción del riesgo de desastres mediante medidas estructurales y no estructurales.

9.2. Programa de Medidas Estructurales para la reducción del riesgo

Definiciones específicas. En este Programa se describen y despliegan las siguientes subtipologías de medidas.

Término	Descripción
Medidas de fortalecimiento	Corresponden a las medidas que incorporan al proyecto nuevos elementos constructivos y/o modificar las características estructurales de los existentes para reforzarlos, con el objeto de reducir la vulnerabilidad del proyecto a las amenazas, o retirarlo de la zona de amenaza, modificando la exposición. La integración de estas medidas en la fase de diseño resulta significativamente más costo-eficiente que en la fase de implementación (durante o después de la construcción).
Medidas de protección y control	Estas medidas se orientan a proteger las estructuras reduciendo la acción directa de las fuerzas destructivas, ya sea mediante la instalación de barreras físicas o a través de intervenciones que desvíen, disipen o controlen dichos efectos. Consideran tanto soluciones ingenieriles convencionales de obra civil como soluciones basadas en la naturaleza, las cuales emplean procesos y sistemas naturales para limitar daños, disminuir pérdidas y mantener o restablecer funciones ecosistémicas. Se clasifican en: (i) medidas convencionales y (ii) medidas basadas en la naturaleza.

Tabla 22. Medidas estructurales de fortalecimiento.

Título	Prioridad	Descripción de medida
1. Licuación	Urgente	Verificar si el largo total de los pilotes es adecuado considerando el potencial de licuación del suelo.
2. Tsunami	Urgente	Verificar la fuerza del tsunami en el diseño la estructura según escenarios utilizados por el SHOA.
3. Protección contra sedimentación y erosión.	Urgente	Revisión de posibles impactos o amenazas asociados a la sedimentación y erosión costera. Puede derivar medidas de mantenimiento.
4. Protección contra el aumento del nivel medio del mar, la acción del oleaje y marejadas	Urgente	Revisión del impacto en los diseños derivado del cambio en el nivel medio del mar en conjunto con el efecto en el comportamiento de las olas y marejadas derivados del cambio climático. Puede derivar en aceptación de reducción de la operatividad del puerto, o implantación de medidas de adecuación de estribo, puente de acceso y cabezo en cota, sección o alineación.
5. Protección contra el viento	Urgente	Revisión del impacto en los diseños derivado del cambio en la intensidad y/o direcciones del viento derivados del cambio climático. Puede derivar en aceptación de reducción de la operatividad del puerto, o implantación de medidas de adecuación estructuras afectadas por el viento (bitas/muelle, elementos de fijación de grúas, etc.)

6. Protección contra inundación fluvial	No urgente (diseño patio de acopio)	Realizar estudio de precipitaciones y modelación hidráulica de inundaciones considerando otros periodos de retorno (Ej. 25, 50 y 100 años), especialmente para la fase de diseño del patio de acopio. Puede derivar en medidas adicionales de protección estructurales para disminuir la amenaza de inundación, generación de zonas de inundación controlada. En el caso de inundaciones pluviales considerar medidas de pavimentos permeables u otras que favorezcan la infiltración.
7. Protección contra incendios forestales	No urgente (diseño patio de acopio)	Considerar la construcción de cortafuegos para incendios forestales especialmente en el área destinada al acopio, materiales y combustible.

Tabla 23. Medidas estructurales de protección y control.

Título	Descripción
8. A determinar en pasos posteriores de esta metodología	Podrán definirse realizados estudios específicos de inundación fluvial y pluvial.

9.3. Programa de Medidas no Estructurales para la reducción del riesgo

Definiciones específicas. En este Programa se describen y despliegan las siguientes subtipologías de medidas.

Término	Descripción
Medidas de Planificación e Institucionales	Estas medidas se refieren a los instrumentos de planificación urbana y territorial promovidos por las instituciones para ordenar el uso del suelo y orientar el desarrollo hacia áreas alejadas de zonas propensas a amenazas, con el fin de evitar la exposición de personas y activos a situaciones de riesgo.
Medidas de Educación y Concientización	Estas medidas se orientan a informar y capacitar al prestatario, a los beneficiarios y a las partes interesadas y afectadas sobre los peligros, los riesgos asociados y las estrategias de mitigación. Aunque reducen el riesgo de manera menos directa que las medidas estructurales, son fundamentales para promover una cultura de prevención. Al fortalecer la comprensión y la conciencia respecto de las amenazas, se incrementa la disposición y capacidad para implementar eficazmente el resto de las medidas de mitigación.

Tabla 24. Medidas no estructurales de planificación e institucionales.

Título	Descripción
10. Definición de zonas inundables	Gestionar nuevos estudios de inundación de acuerdo con la zonificación de área de riesgo del Instrumento de Planificación Territorial que deriven en obras de mitigación por parte de los organismos competentes (DOH).

11. Mapas y Señaléticas para prevención y evacuación	Elaboración e instalación de mapas y señaléticas en puntos estratégicos del recinto portuario, destinadas a identificar zonas de riesgo, rutas de evacuación, puntos de encuentro y áreas con restricciones operacionales. Estas señalizaciones deben permitir orientar al personal y visitantes durante situaciones de emergencia, facilitando una evacuación ordenada conforme a los procedimientos establecidos en el Plan de Gestión de Riesgos y Desastres del Terminal Mardones. Se sugiere contar con traducción al inglés.
---	--

Tabla 25. Medidas no estructurales de educación y concientización.

Título	Descripción
12. Programa de formación sobre el plan de emergencia	Acciones permanentes de capacitación orientadas a reforzar el conocimiento y la aplicación del Plan de Emergencia, dirigidas al personal del puerto y, cuando corresponda, a la comunidad vinculada. Este programa busca asegurar que todos los actores conozcan los procedimientos, roles y medidas a adoptar ante una situación de emergencia.
13. Programa de educación en riesgos	Acciones permanentes orientadas a fortalecer la educación en gestión de amenazas y riesgos, dirigidas al personal del puerto y, cuando corresponda a la ciudadanía. Estas iniciativas pueden materializarse a través de actividades formativas, eventos comunitarios, instancias de participación, materiales de difusión.

9.4. Programa de Medidas para la Prevención y Respuesta a la Emergencia

Definiciones específicas. En este Programa se describen y despliegan las siguientes subtipologías de medidas.

Término	Descripción
Medidas de Preparación y Respuesta ante la emergencia	Las medidas de preparación y respuesta ante emergencias deberán centrarse en la actualización y fortalecimiento del Plan de Gestión de Riesgos y Desastres ya existente en el Terminal José de los Santos Mardones. El objetivo general es mantener un sistema robusto y vigente de preparación y respuesta en el área de intervención del proyecto, asegurando que los procedimientos se ajusten a los nuevos escenarios operacionales y de riesgo derivados de la ampliación del terminal. La actualización del plan permitirá responder adecuadamente a situaciones accidentales o de emergencia vinculadas al proyecto, previniendo y mitigando potenciales impactos sobre las personas, la infraestructura y el medio ambiente.

Tabla 26. Medidas no estructurales para la Prevención y Respuesta a la Emergencia.

Título	Descripción
12. Plan de prevención de contingencias	Si bien el Terminal José de los Santos Mardones ya cuenta con un Plan de Gestión de Riesgos y Desastres corporativo, este deberá ser actualizado y ajustado para incorporar las condiciones específicas del proyecto de ampliación. La actualización deberá considerar: - Las obras definitivas proyectadas, incluyendo eventuales modificaciones en el diseño. - La ejecución por fases, integrando los distintos escenarios de

	riesgo asociados a cada etapa. - Las situaciones temporales propias de la construcción, que pueden alterar flujos internos, accesos, rutas de evacuación o zonas de seguridad. Se recomienda especialmente revisar la consideración de las olas de calor en la seguridad y salud ocupacional. De este modo, el plan se mantendrá plenamente vigente y coherente con los nuevos requerimientos operacionales y de seguridad del terminal.
13. Plan de actuación ante emergencias	El Plan de actuación ante emergencias estará adecuado a cada fase del proyecto. La tipología y nivel de amenazas deberán revisarse de acuerdo con lo emanado en el presente informe. Tendrá los siguientes contenidos mínimos: a) Identificación y clasificación de las emergencias b) Procedimientos de actuación ante emergencias • Detección y alerta • Mecanismos de alarma • Mecanismos de respuesta frente a la emergencia • Evacuación o confinamiento • Prestación de las primeras ayudas • Modos de recepción de las ayudas externas c) Identificación y funciones de las personas y equipos que llevarán a cabo los procedimientos de actuación en emergencias • Identificación • Funciones d) Identificación del responsable de la puesta en marcha del plan de actuación ante emergencias
14. Programa de formación sobre el plan de emergencia	Acciones permanentes de capacitación orientadas a reforzar el conocimiento y la aplicación del Plan de Emergencia, dirigidas principalmente al personal del puerto y comunidad vinculada. Este programa busca asegurar que todos los actores conozcan las medidas a adoptar ante una emergencia y ejecuten los procedimientos de manera coordinada y eficaz.

10. Referencias

- Ammirati, J. B., Tassara, A., Zajec, M., Ruiz, S., Poli, P., & Maksymowicz, A. (2020). Seismicity along the Magallanes–Fagnano fault system: Evidence from high-resolution seismic data and moment tensor inversion. *Journal of South American Earth Sciences*, 104, 102834. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2020.102834>
- Aránguiz, R., Sepúlveda, S. A., Chao, W. A., González, D. I., Cienfuegos, R., Catalán, P. A., ... & León, J. D. (2023). Cascading rainfall–landslide–tsunami hazard in southern Chile: Lessons from a real landslide and new numerical modeling. *Natural Hazards*, 117, 2201–2225. <https://doi.org/10.1007/s11069-023-06013-x>
- Bran, D., Waldmann, N. D., Piola, A. R., Paterlini, C. M., & Muñoz, A. (2023). Subaqueous mass movements and tsunami generation in a fjord environment: Insights from Ushuaia Bay, southernmost South America. *Sedimentary Geology*, 440, 106277. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2023.106277>
- Cisternas, M., & Vera, W. (2008). Sismos históricos y recientes en Magallanes. Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), Chile.
- Del Carlo, P., Di Roberto, A., D’Orazio, M., Petrelli, M., Angioletti, A., Zanchetta, G., ... Rocchi, S. (2018). Late Glacial–Holocene tephra from southern Patagonia and Tierra del Fuego (Argentina, Chile): A complete textural and geochemical fingerprinting for distal correlations in the Southern Hemisphere. *Quaternary Science Reviews*, 195, 153–170. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2018.07.028>
- DINÁMICA COSTERA (2022). Estudio del desempeño y co-beneficios de las áreas marinas protegidas a la mitigación y adaptación al cambio climático (Proyecto FIPA 2021-22).
- Fontijn, K., Lachowycz, S. M., Rawson, H., Pyle, D. M., Mather, T. A., Naranjo, J. A., & Moreno-Roa, H. (2014). Late Quaternary tephrostratigraphy of southern Chile and Argentina. *Quaternary Science Reviews*, 89, 70–84. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2014.02.007>
- Gobierno Regional de Magallanes y de la Antártica Chilena. (2023). Plan de Acción Regional de Cambio climático de Magallanes (PARCC).
- Ilustre Municipalidad de Punta Arenas (IMPA). Modificación Plan Regulador Comunal de Punta Arenas. Memoria explicativa, 7.2 Estudio de Riesgos y Protección Ambiental Preparado. Por Lida Gutiérrez Nazir.
- Ilustre Municipalidad de Punta Arenas. (2011, septiembre). Modificación Plan Regulador Comunal de Punta Arenas – Memoria Explicativa.
- Kilian, R., Hohner, M., Biester, H., Wallrabe-Adams, H. J., & Stern, C. R. (2003). Holocene peat and lake sediment tephra record from the southernmost Chilean Andes (53–55° S). *Revista Geológica de Chile*, 30(1). <https://doi.org/10.4067/s0716-02082003000100002>
- Klaes, B., Wörner, G., Kremer, K. et al. High-resolution stalagmite stratigraphy supports the Late Holocene tephrochronology of southernmost Patagonia. *Commun Earth Environ* 3, 23 (2022). <https://doi.org/10.1038/s43247-022-00358-0>
- Koschitzki, R., Schwalbe, E., Cárdenas, C., & Maas, H.-G. (2017). Photogrammetric monitoring concept for remote landslide endangered areas using multi-temporal aerial imagery. 2017 First IEEE International Symposium of Geoscience and Remote Sensing (GRSS-CHILE), Valdivia, Chile, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/GRSS-CHILE.2017.7996021.

- Martinic, M. (1988). Actividad volcánica histórica en la Región de Magallanes. *Anales del Instituto de la Patagonia*, 18, 105–112.
- Martinic, M. (2008). Registro histórico de antecedentes volcánicos y sísmicos en la Patagonia Austral y la Tierra del Fuego. *Magallania*, 36(2), 5–18.
- Ministerio del Medio Ambiente (2019). Determinación del riesgo de los impactos del cambio climático en las costas de Chile, Volumen 1: Amenazas.
- Ministerio del Medio Ambiente. (s. f.). Explorador de amenazas climáticas.
- Muñoz Muñoz, Á., Gálvez Bozzo, V., & Opazo Contreras, E. (2021). Geología y remociones en masa recientes de la cuenca del río Las Minas, Punta Arenas, Región de Magallanes y la Antártica Chilena (Informe IR-21-91, 144 pp.). Servicio Nacional de Geología y Minería.
- Muñoz, A.; Pérez, L.; Opazo, E.; Gálvez, V. 2020e. Revisión crítica de antecedentes disponibles en temáticas de geología y peligros naturales de la cuenca del río Las Minas relevantes para su monitoreo. Informe técnico (Inédito), Servicio Nacional de Geología y Minería, Dirección Regional de Magallanes y la Antártica Chilena: 104 p.
- N+ Ciencia. (2025, octubre 10). Sismo de magnitud 7.6 golpea la Antártida y Sudamérica hoy 10 de octubre 2025. <https://www.nmas.com.mx/internacional/sismo-de-magnitud-76-golpea-la-antartida-y-sudamerica-hoy-10-de-octubre-2025/>
- Onorato, R., Tassara, A., Ammirati, J. B., & Sánchez, J. (2021). Morphotectonic characterization and neotectonic activity of the Magallanes–Tierra del Fuego region (southernmost Chile and Argentina). *Geomorphology*, 384, 107715. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107715>
- Panaretos, P., Albert, P. G., Thomas, Z. A., Turney, C. S., Stern, C. R., Jones, G., ... Hogg, A. G. (2025). Distal cryptotephra in southern South America: integrated age estimates for key Holocene marker layers. *Quaternary Science Reviews*, 369, 109599. <https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2025.109599>
- Perucca, L. P., Alvarado, P. M., & Ramos, V. A. (2016). Neotectonics and seismicity in southern Patagonia (Argentina and Chile). *Journal of South American Earth Sciences*, 71, 108–123. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2016.07.005>
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (2016). Carta de amenaza de tsunami para Punta Arenas.
- Stern, C. R. (2008). Holocene tephrochronology record of large explosive eruptions in the southernmost Patagonian Andes. *Bulletin of Volcanology*, 70, 435–454. <https://doi.org/10.1007/s00445-007-0153-2>
- Stern, C.; Moreno, P.; Villa-Martinez, R.; Sagredo, E.; Prieto, A.; Labarca, R. 2011, Evolution of ice-dammed proglacial lakes in ultima Esperanza, Chile: implications from the late-glacial R1 eruption of Reclus volcano, Andean Austral Volcanic Zone. *Andean Geology* 38 (1) : 82-97.
- Tala Campos, G. P. (2021). Registro sedimentario marino de aluviones en el río Las Minas durante el Holoceno (Punta Arenas). Memoria para optar al título de Geólogo, Universidad de Chile.
- Villarroel, P., Nocera, F., & Carrasco, R. (2024). Propuesta de microzonificación sísmica para la ciudad de Punta Arenas, Chile. *Proceedings of the 17th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (XVII PCSMGE), and 2nd Latin-American*

Regional Conference of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG), La Serena Chile, 2024.

Wikipedia. (2025). Terremoto del paso Drake de 2025. Wikipedia, La enciclopedia libre.
https://es.wikipedia.org/wiki/Terremoto_del_paso_Drake_de_2025