

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE QUÍMICA Y MEDIO AMBIENTE
SEDE DE CONCEPCIÓN - CHILE



ANÁLISIS DE LA GESTIÓN AMBIENTAL EN PROYECTO DE
DESALINIZACIÓN: CASO DE ESTUDIO EN LA PLANTA
DESALADORA DE TOCOPILLA EN CHILE

Presentado por
PAULINA IGNACIA ÁVILA ESPINOZA

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE **INGENIERO DE
EJECUCION EN GESTION Y CONTROL AMBIENTAL**

Profesor guía
Cristian Pereira

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero expresar mi más profunda gratitud a Dios, quien ha guiado cada uno de mis pasos y ha alineado mi camino cuando la incertidumbre se hacía presente. Su presencia ha sido fundamental en cada decisión y logro alcanzado.

A mis padres, pilares fundamentales en mi vida. A mi madre, Patricia Espinoza, por su apoyo incondicional y paciencia infinita, por escucharme incansablemente ensayar mis presentaciones una y otra vez, y por ser esa voz de aliento constante que me impulsa a seguir adelante. A mi padre, Marcelo Ávila, por celebrar cada uno de mis éxitos como propios y ser una inspiración en el ámbito profesional; aspiro algún día alcanzar el nivel de excelencia que él ha logrado en su carrera laboral.

Un agradecimiento especial a Claudia Machuca, quien con extraordinaria paciencia y dedicación me guio en este importante proyecto cuando me encontraba desorientada sobre cómo comenzar. Su apoyo desinteresado y su invaluable orientación fueron fundamentales para el desarrollo de este trabajo. Su generosidad al compartir sus conocimientos y tiempo, sin esperar nada a cambio, demuestra su verdadera vocación por ayudar a otros.

También quiero expresar mi profundo agradecimiento a mi tía Edith, no solo por ponerme en contacto con Claudia, sino por todo lo que representa en mi vida. Sus sabios consejos, su constante aliento y su amor incondicional han sido invaluable. Más que una tía, ha sido como una hermana mayor para mí, y estoy profundamente agradecida por tenerla en mi vida y por todo el apoyo que me ha brindado a lo largo de los años.

No puedo dejar de mencionar a mi querida amiga y compañera Paulina Flores, quien ha sido un apoyo invaluable tanto en lo académico como en lo personal. Nuestra amistad, que comenzó durante el técnico, se fortaleció significativamente durante la ingeniería, compartiendo juntas los momentos más desafiantes y también los más alegres de nuestra vida universitaria. Su compañía y apoyo han sido fundamentales para sobrellevar los períodos más estresantes, así como para celebrar nuestros logros académicos.

Una gratitud muy especial a mi querida Biarli Ortega, quien es más que mi prima es mi hermana y mejor amiga. Su apoyo emocional ha sido invaluable, especialmente al compartir la experiencia de estudiar la misma carrera. Deseo de todo corazón que alcance todos sus metas y objetivos. También agradezco a mis amigas, primo y su novio por su apoyo único, por ayudarme a desconectar cuando lo necesitaba y por sus constantes ánimos.

Finalmente, quiero expresar mi gratitud a todos los profesores de la Universidad Federico Santa María por sus invaluable enseñanzas y su constante apoyo a los alumnos. Su fe inquebrantable en formar grandes profesionales ha sido inspiradora. Gracias, Universidad Federico Santa María, por ser parte de esta importante etapa de mi vida.

Atte.,
Paulina Ignacia Ávila Espinoza

RESUMEN

Para garantizar el suministro de agua se han desarrollado soluciones tecnológicas innovadoras. Se han desarrollado soluciones tecnológicas que responden a la creciente presión sobre los recursos hídricos en el norte de Chile. En esta perspectiva, el proyecto de investigación actuales examina la gestión ambiental durante examina la gestión ambiental durante la construcción de la Planta Desalinizadora de Tocopilla, proyecto orientado a mejorar la seguridad hidrológica en una de las regiones más árida del país.

La decisión de centrar este estudio en la fase de construcción , que dura de 30 meses y cuesta USD 26.000.000, responde al hecho de que este período es especialmente crítico en términos de impacto ambiental .Al hecho de que este período es particularmente crítico en términos de impacto ambiental. Durante esta fase, incluye actividades como movimiento de tierra, excavaciones submarinas y obras marítimas tienen un impacto significativo en el medio ambiente.se desarrolla en un área de 3.500 m² ubicada específicamente en las coordenadas UTM N: 7.561.172 Norte y E: 377.345 Este, a 19 kilómetros de la Ciudad de Tocopilla. Esta ubicación estratégica fue seleccionada considerando tanto aspectos técnicos como ambientales, buscando optimizar la captación de agua marina y la posterior distribución del recurso procesado.

La ubicación mencionada fue seleccionada desde un punto de vista técnico y ambiental para evaluar la ubicación más efectiva para recolectar agua de mar y distribuir el recurso. El análisis se llevó a cabo a través de una metodología sistémica y multidimensional que incluye dimensiones cuantitativas y cualitativas de los múltiples aspectos ambientales afectados. Para lograr este objetivo, el análisis implementado en el uso de una matriz de aspectos e impactos que clasifica y prioriza los efectos de las actividades de construcción en el entorno. El análisis ha cubierto tres dimensiones principales, a saber, emisiones a la atmósfera, generación de residuos y perturbaciones al entorno marino.

Creo que estas tres perspectivas cubren las áreas más amenazadas en la fase de construcción del proyecto. En términos de emisiones atmosféricas, el análisis de los datos sugiere un patrón de impactos en intensidad y distribución a largo plazo. Las cifras más importantes sugieren una disminución del 74.6% en la emisión de material de particulados de ancho 10, 1.90 ton/año desde el año 1, mientras que la emisión de los óxidos de nitrógeno se redujo en un 58.4% a 23,67 ton/año. Estas cifras demuestran la capacidad del control de seguridad y la naturaleza temporal de los impactos más severos.

En cuanto a la generación de residuos generación, el proyecto mantiene una producción constante de 15,6 producción montones de 15,6 toneladas de residuos domésticos aislados y 29,2 toneladas de residuos industriales no tóxicos , lo que refleja estabilidad operacional durante el periodo de construcción .de residuos domésticos aislados y 29,2 toneladas de residuos industriales no tóxicos , lo que refleja estabilidad operacional durante el periodo de construcción . siLos residuos peligrosos ellos aunque están en cantidades más pequeñas (0,088cantidades toneladas/mes),(0,088 toneladas/mes), necesitan un manejo especial de

acuerdo a la normativa vigente (DS N°148/2003 MINSAL). Los residuos peligrosos requieren un manejo especial de acuerdo a la normativa vigente (DS N°148/2003 MINSAL).

Debido del proyecto costero naturaleza costera, se presta especial atención a la influencia sobre el medio marino. Se presta especial atención a la influencia sobre el medio marino. Se ha identificado que las actividades de construcción, de submarinos como las tronaduras y perforaciones, tienen el mayor impacto potencial sobre la vida marina y las perforaciones, se han identificado como las que tienen el mayor impacto potencial sobre la vida marina. Se tomaron medidas innovadoras para disminuir estos efectos, como el uso de cortinas de burbujas para reducir las ondas sonoras durante las actividades de construcción sumergidas, además se han tomado medidas para disminuir estos efectos, como el uso de cortinas de burbujas para reducir las ondas sonoras durante las actividades de construcción sumergidas.

Una serie de factores fundamentales llevaron a la decisión de centrarse en el análisis en la fase de construcción en lugar de en la fase operativa. En primer lugar, durante la construcción se concentran las actividades que tienen el mayor impacto inmediato impacto ambiental inmediato, como movimientos de tierra, excavaciones, tronaduras y alteraciones al medio marino. En segundo lugar, hay mayor variabilidad y complejidad en términos de gestión ambiental durante esta fase, lo que requiere un análisis más exhaustivo y centrado. Variabilidad y complejidad en términos de gestión ambiental durante esta fase, lo que hace necesario un análisis más profundo y equilibrado. En tercer lugar, la detección temprana y tratamiento de la gestión de los impactos durante la construcción permiten establecer bases sólidas para una operación ambientalmente sostenible.

El marco regulatorio se rige en el proyecto basándose en varias leyes y normativas chilenas, como el DS N°38/2011 para emisiones sonoras, el DS N°148/2003 para gestión de residuos peligrosos y el DS N°90/2000 para emisiones líquidas. El proyecto se rige por diversas leyes chilenas, como el DS N°38/2011 para emisiones sonoras, el DS N°148/2003 para gestión de residuos peligrosos y el DS N°90/2000 para emisiones líquidas. La terminación

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	0
RESUMEN	2
ÍNDICE	4
ÍNDICE DE TABLAS	6
ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS	8
SIGLA Y SIMBOLOGÍA	9
CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	11
1.1 Introducción	12
1.2 Alcances.....	14
1.3 Objetivos.....	16
1.3.1 Objetivo general	16
1.3.2 Objetivos específicos.....	16
CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO	17
2.1 Desalinización: Conceptos y tecnologías	18
2.1.1 Clasificación del agua según salinidad.....	18
2.1.2 Tecnologías de desalinización	19
2.2 Contexto geográfico y socioeconómico del norte de Chile	22
2.3 Marco regulatorio ambiental en Chile para proyectos de desalinización.....	22
CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	23
3.1 Características generales del proyecto	24
3.1.1 Ubicación y emplazamiento	24
3.1.2 Distribución de Pueblos indígenas	28
3.1.3 Descripción técnica de la planta	29
3.1.4 Escarpe o Extracción de la Capa Vegetal del Suelo	30
3.2 Fase de construcción de la planta desaladora (30 meses)	31
3.2.1 Cronograma de actividades	31
3.2.2 Descripción de obras principales	32
3.3 Recursos necesarios para la construcción	32
3.3.1 Transporte y movilización	33
3.3.2 Equipos y maquinaria pesada	34
3.3.3 Suministros energéticos y combustibles	35
3.3.4 Requerimientos y Gestión de Agua Industrial para Procesos Constructivos.....	35
3.3.5 Suministro y Gestión de Agua Potable para Personal durante la Fase de Construcción	36
3.4 Análisis de costos y presupuesto	36
3.4.1 Distribución del presupuesto total	38
3.4.2 Costos de operación y mantenimiento	38
3.5 Fase de Construcción de planta Desaladora (Duración: 30 meses)	39
3.5.1 Instalación de faena y campamento	39
3.5.2 Transporte de Trabajadores en la fase de Construcción	40
3.6 Construcción de Obras Marítimas	40

3.6.1 Construcción de Sentina y cámara de carga	41
3.6.2 Perforaciones y tronaduras	42
3.6.3 Excavaciones de zanjas	43
3.6.4 Perfilamiento de fondo marino	43
3.6.5 Construcción y hormigonado de torres	44
3.6.6 Instalación de Tuberías y torres de captación	44
3.6.7 Relleno de Zanjas en Zona de Rompiente	45
3.6.8 Operaciones finales y conexión a obras terrestres	45
3.7 Habilitación de acceso y caminos interiores	45
3.7.1 Construcción de cruce de Ruta 1	47
3.7.2 Construcción de acceso a Ruta 1	48
CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES	50
4.1 Metodología de evaluación	51
4.1.1 Identificación de aspectos ambientales	51
4.1.2 Emisiones atmosféricas	51
4.1.3 Estimación de emisiones	51
4.1.4 Tasas de emisión	51
4.1.5 Actividades generadoras de emisiones atmosféricas	53
4.1.6 Línea de base calidad del aire Tocopilla	53
4.2 Generación de residuos	58
4.3 Generación de ruido	59
4.3.1 Estándares de ruido	59
4.4 Valoración y jerarquización de impacto	61
4.4.1 Matriz de Impacto Ambiental - Fase de construcción de la Planta Desaladora.....	62
CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE CUMPLIMIENTO NORMATIVO	67
5.1 Marco normativo aplicable	68
5.1.1 Normativa Ambiental General	68
5.2 Normativa de Emisiones y Calidad del Aire	68
5.2.1 Normativa de Ruido y Vibraciones	69
5.2.2 Gestión de Residuos	70
5.2.3 Recursos Hídricos y Protección Marina	71
5.2.4 Seguridad y Salud Ocupacional	72
5.2.5 Norma Técnica de Construcción	73
5.2.6 Normativa Local	74
5.3 Evaluación del cumplimiento	75
5.3.1 Medidas de mitigación propuestas	76
5.4 Plan de seguimiento y control.....	77
CONCLUSIONES.....	79
BIBLIOGRAFÍA	83

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación del agua en función de su contenido en ventas	19
Tabla 2. Comparación de Tecnologías de Desalinización: Procesos de Membrana y Procesos Térmicos	20
Tabla 3. Coordenadas de Ubicación - Planta Desaladora Tocopilla.....	25
Tabla 4. Coordenadas de Delimitación Perimetral de la Planta Desalinizadora de Tocopilla	27
Tabla 5. Distribución de la Población Local según Pertenencia a Pueblos Indígenas.....	28
Tabla 6. Cronograma de actividades principales	31
Tabla 7. Distribución de Vehículos por Etapa Constructiva y Actividad	33
Tabla 8. Distribución de Equipos y Maquinaria por Fase de Construcción.....	33
Tabla 9. Requerimientos de Energía Eléctrica por Área del Proyecto.....	34
Tabla 10. Consumo de Combustible por Tipo de Vehículo y Uso	35
Tabla 11. Estimación de Consumo de Agua Industrial por Equipo y Actividad en Fase de Construcción.....	36
Tabla 12. Consumo de Agua Potable Para los Trabajadores.....	36
Tabla 13. Costo mensual y anual de maquinaria y equipos por modalidad de adquisición	37
Tabla 14. Distribución del Presupuesto Total del Proyecto por Categoría de Gasto.....	38
Tabla 15. Costo de Operación y Mantenimiento - Gestión interna (Base anual)	38
Tabla 16. Distribución de Vehículos para Transporte de Personal y Logística en Fase de Construcción.....	40
Tabla 17. Cronograma de actividades en planificación de Obras Marítimas	41
Tabla 18. Niveles de Potencia Acústica L_w estimados para la etapa de construcción del Proyecto - Tronaduras	43
Tabla 19. Cronograma de actividades de habilitación de acceso y caminos interiores	46
Tabla 20. Especificaciones técnicas del cruce subterráneo	47
Tabla 21. Equipos y Maquinaria para Construcción del Cruce	48
Tabla 22. Estructura del Pavimento en Acceso	48
Tabla 23. Volúmenes de Obra Principales	49
Tabla 24. Componentes y Definiciones de la Ecuación General para Estimación de Emisiones	

Según Metodología EPA AP-42	52
Tabla 25. Metodología de Cálculo de Emisiones Atmosféricas	52
Tabla 26. Línea de base calidad del aire Tocopilla	53
Tabla 27. Actividades generadoras de emisiones en la fase de construcción	54
Tabla 28. Emisiones a la atmósfera asociadas a la fase de Construcción – Año 1	55
Tabla 29. Emisiones a la atmósfera asociadas a la fase de Construcción – Año 2.....	57
Tabla 30. Caracterización y disposición de los residuos.....	58
Tabla 31. Cálculo estimado de generación de residuos	60
Tabla 32. Estándares OCDE	61
Tabla 33. Niveles de Potencia Acústica Lw estimados para la etapa de construcción del Proyecto.....	62
Tabla 34. Categorización de Magnitud de Impactos Ambientales según Intensidad de Modificación del Componente Ambiental	63
Tabla 35. Clasificación de Probabilidad de Ocurrencia de Impactos Ambientales en Fase de Construcción.....	63
Tabla 36. Matriz de Impacto Ambiental- Fase de construcción de la Planta Desaladora.....	64
Tabla 37. Recopilación de las concentraciones límites por normativa de calidad ambiental primaria para los diferentes contaminantes generados en las fases de construcción	70
Tabla 38. Normativa de Ruido y Vibraciones	71
Tabla 39. Caracterización y Límites de Generación de Residuos en Fase de Construcción...	71
Tabla 40. Especificaciones Técnicas para Instalaciones de Almacenamiento de Residuos ...	72
Tabla 41. Parámetros y Límites Normativos para Protección de Recursos Marinos.....	72
Tabla 42. Plan de Monitoreo Ambiental Marino Durante la Construcción	73
Tabla 43. Límites de Exposición Ocupacional Durante la Construcción	73
Tabla 44. Especificaciones de Equipos de Protección Personal para Trabajadores	74
Tabla 45. Requisitos Estructurales y Técnicos para Construcción Principal	74
Tabla 46. Especificaciones Técnicas para Infraestructura Marítima	75
Tabla 47. Normativa Municipal para Construcción en Zona Industrial de Tocopilla	75
Tabla 48. Requerimientos Específicos para Construcción Costera Industrial	76

Tabla 49. Resumen Comparativo de Cumplimiento Normativo y Efectividad de las Medidas de Control Ambiental Durante la Fase de Construcción de la Planta Desaladora Tocopilla .. 76

Tabla 50. Plan Integral de Medidas de Mitigación Ambiental y Sistemas de Control para los Impactos Identificados Durante la Fase de Construcción de la Planta Desaladora Tocopilla 77

Tabla 51. Programa de Supervisión y Gestión Ambiental Total para Comprobación de la Eficacia de las Medidas de Mitigación durante la Fase de Construcción de la Planta Desaladora Tocopilla 78

Tabla 52. Resumen de Principales Impactos Identificados 80

Tabla 53. Matriz de Impactos Ambientales y Eficacia de Medidas de Mitigación 81

ÍNDICE DE FIGURAS Y GRÁFICOS

FIGURAS

Figura 1. Ubicación espacial de planta desaladora de Tocopilla 25

Figura 2. Coordenadas UTM respecto a la distribución del proyecto 26

Figura 3. Representación de planta desaladora..... 27

Figura 4. Vista general de la planta desalinizadora referencial 29

Figura 5. Parámetros y Variables de la Ecuación General para el Cálculo de Emisiones Atmosféricas en Construcción 52

GRÁFICOS

Gráfico 1. Emisión [ton/Año 1] MP_{10} 55

Gráfico 2. Emisión [ton/Año 1] $MP_{2,5}$ 56

Gráfico 3. Comparación de impactos ambientales Año 1 y 2 80

Gráfico 4. Evaluación de impactos críticos durante la construcción 82

SIGLA Y SIMBOLOGÍA

Señales Institucionales

- RCA: Resolución de Calificación Ambiental
- SEIA: Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
- SEREMI: Secretaría Regional Ministerial
- MINSAL: Ministerio de Salud
- MMA: Ministerio del Medio Ambiente
- MOP: Ministerio de Obras Públicas
- RETC: Registro de Emisiones y Transferencias de Contaminantes
- SERNAPESCA: Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura
- DIRECTEMAR: Dirección General del Territorio Marítimo
- SEA: Servicio de Evaluación Ambiental
- MINVU: Ministerio de Vivienda y Urbanismo
- EPA: Agencia de Protección Ambiental (Agencia de Protección Ambiental)
- OIT: Organización Internacional del Trabajo
- OCDE: Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
- OSD: Organización y Sistemas de Diagnóstico
- TLS: Sistema de Iluminación de Tráfico
- GPS: Sistema de Posicionamiento Global

Señales Técnicas

- CV: Destilación por Compresión de Vapor
- MSF: Destilación flash multietapa
- MED: Destilación multiefecto
- OI: Ósmosis inversa
- ED: Electrodialisis
- NF: Nanofiltración
- UF: Ultrafiltración
- MP10: Material Particulado de 10 micras
- MP2.5: Material Particulado de 2.5 micras
- NOx: Óxidos de nitrógeno
- SOx: Óxidos de Azufre
- CO₂: dióxido de carbono
- CO: Monóxido de Carbono
- dBA: Decibeles ponderados A

Tecnologías de Desalinización

- CV: Destilación por Compresión de Vapor
- MSF: Destilación flash multietapa
- MED: Destilación multiefecto
- OI: Ósmosis inversa

- ED: Electrodiálisis
- NF: Nanofiltración
- UF: Ultrafiltración

Unidades de medida

- m²: Metro cuadrado
- m³: Metro cúbico
- km: Kilómetro
- tono: Tonelada
- l/día: Litros por día
- mg/l: Miligramos por litro
- µg/m³: Microgramos por metro cúbico
- Hz: Hercio
- MPa: Megapascal
- bar: Unidad de presión
- ppm: Partes por millón
- NTU: Unidades Nefelométricas de Turbidez
- UTM: Universal Transversal de Mercator

Tipologías de Residuos

- RSD: Residuos Sólidos Domésticos
- RSINP: Residuos Sólidos Industriales No Peligrosos
- RESPEL: Residuos Peligrosos
- SUBE: Residuos Industriales Sólidos

Otros

- UTM: Universal Transversal de Mercator
- UV: Ultravioleta
- NCh: Norma Chilena
- DS: Decreto Supremo
- Fe: Factor de emisión
- Na: Nivel de actividad
- Ea: Eficiencia de abatimiento
- PVC: Policloruro de vinilo

CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción

La desalinización, el proceso de convertir agua salada o salobre en agua dulce, es una solución importante para el creciente problema de escasez de agua en muchos lugares del mundo. El origen de este proceso está ligado a la necesidad histórica de tener acceso a agua potable en caso de escasez. Las primeras plantas desalinizadoras modernas se construyeron en la década de 1960.[7]

En 1965, se instala en Eilat, Israel, la primera planta de desalinización por congelación para el suministro de agua. [7] Este evento marcó un paso adelante en la búsqueda de soluciones tecnológicas al problema de escasez de agua. En España, las primeras plantas desalinizadoras de agua de mar se construyeron en 1966 en Ceuta (4.000 m³/día) y en Alcutia (143 m³/día).[7]

Tales incidentes demostraron que la desalinización era posible a una escala comercial. Estas tecnologías se consideraron necesarias por varias razones. Actualmente, cuatro mil millones de personas, que representan dos tercios de la población mundial, sufren escasez de agua dulce durante al menos un mes al año.[2]

Con una demanda ya creciente y la disponibilidad limitada de recursos hídricos convencionales, el desarrollo y la implementación de tecnologías de desalinización se convirtieron en una prioridad.[2] En el caso de Chile, y especialmente del norte del país, la desalinización es necesaria para abordar el problema de escasez de agua debido a la aridez extrema del clima y la demanda de agua en la industria minera. El Proyecto de Abastecimiento de agua en la Región de Antofagasta, específicamente la ciudad de Tocopilla en el es un ejemplo de cómo estas tecnologías se utilizan para abordar la escasez de agua en los desiertos. [3]

Con una demanda ya creciente y la disponibilidad limitada de recursos hídricos convencionales, el desarrollo y la implementación de tecnologías de desalinización se convirtió en una prioridad [2]. En el caso de Chile, y especialmente del norte del país, la desalinización es necesaria para abordar el problema de escasez de agua debido a la aridez extrema del clima y la demanda de agua en la industria minera. El Proyecto de Abastecimiento de agua en la Región de Antofagasta, específicamente la ciudad de Tocopilla en el es un ejemplo de cómo estas tecnologías se utilizan para abordar la escasez de agua en los desiertos [1].

La desalinización en Chile está regulada por diversas normativas, incluyendo el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) y la Resolución de Calificación Ambiental (RCA). Según el Decreto N°40/2012 del Ministerio del Medio Ambiente, todos los proyectos de desalinización deben someterse a una evaluación ambiental cuando abastecen a una población mayor a 10 mil personas [15]. Además, el proyecto de ley sobre uso de agua de mar para desalinización (Boletín N° 11.608-09) establece que las aguas resultantes del proceso de desalinización constituyen bienes nacionales de uso público.[15]

El propósito fundamental de una planta desalinizadora es producir agua dulce a partir de agua salada o salobre, utilizando diversos procesos tecnológicos. Las tecnologías principales para la

desalación se dividen en dos categorías: la destilación térmica y la ósmosis inversa, siendo esta última la más utilizada en Chile debido a su eficiencia energética en comparación con la destilación [2]. La ósmosis inversa es un proceso más eficiente desde el punto de vista energético, aunque igual requiere bastante energía. Al hacer la membrana más porosa y más delgada, puede aumentar el flujo a través de esta y reducir los requisitos de presión, lo que reduce la cantidad de energía que se necesita para impulsar el proceso. , 2015).[2]

Los procesos convencionales de desalación separan el agua de mar en dos corrientes principales: una que contiene una baja concentración de sales disueltas (agua dulce) y otra que es una salmuera concentrada (desecho del proceso). Los métodos de desalinización de agua de mar se dividen en categorías principales: de evaporación térmica y separación basada en membrana. Los procesos térmicos emplean calor para evaporar el agua de la solución salina, y luego el vapor de agua se condensa y se recupera [5]

1.2 Alcances

En este proyecto se realiza una evaluación ambiental en la fase de construcción de una planta desaladora en la ciudad de Tocopilla, norte de Chile. Específicamente, en la identificación, análisis y jerarquización de los impactos ambientales más significativos se busca, con ello, proponer estrategias y medidas de mitigación de aquellos aspectos de mayor criticidad, en el cual se realizará mediante la aplicación de la matriz de aspectos e impactos ambientales, lo que permitirá identificar y clasificar los efectos adversos en el entorno.

La información utilizada para sustentar el análisis se basa principalmente en las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA); que contienen los antecedentes técnicos y ambientales de proyectos. Se analizarán las estrategias diseñadas para asegurar el cumplimiento de la normativa ambiental vigente en Chile, garantizando que el proyecto se enmarque en los requisitos establecidos por la Ley 19.300 y los criterios técnicos de admisibilidad para la RCA. Esto incluirá un enfoque específico en los artículos 10 y 11, evaluando los factores que determinan la obligatoriedad de un Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y los criterios de impacto significativo, como magnitud, probabilidad y duración.

La investigación se basará en un enfoque predominantemente cualitativo con ciertos elementos cuantitativos basados en datos secundarios en el marco de referencia de la gestión ambiental comprehensiva. El núcleo de la investigación será el desarrollo de una metodología para la evaluación de la gestión ambiental de proyectos de desalinización en ecosistemas áridos costeros.

Por lo tanto, la investigación propondrá un sistema teórico de indicadores de desempeño ambiental, donde en la fase de construcción del proyecto, la cantidad de residuos y emisiones, así como el impacto en la fauna local y marina costera de Tocopilla, serán analizados. En lo que respecta los residuos, se expondrá la generación de sólidos, principalmente los excedentes de tierra que al sumar un total de 220.188 toneladas mensuales dejan en claro que la gestión inicial mediante áreas de acopio temporal es insuficiente y deben ser trasladados al Botadero de Excedente Excavación. También se abordarán los residuos líquidos, centrados en aguas servidas, que generan un total de 160 toneladas mensuales, tratadas en plantas especializadas, para ser posteriormente destinadas a lugares de disposición final, como la humectación de caminos no pavimentados para controlar emisiones de material particulado, reduciendo así el impacto sobre la calidad del aire.

Los residuos peligrosos generados durante la construcción, tales como aceites y solventes provenientes de la maquinaria, se suman a la discusión, ya que su correcto manejo y gestión evitará sus repercusiones en suelo y agua. En lo que respecta a las emisiones, el material particulado proveniente del movimiento de tierras, el transporte de materiales y las tronaduras se sumarán a la discusión. Las distintas actividades aumentan los índices de contaminación atmosférica. En relación con gases, el dióxido de carbono (CO₂), los óxidos de nitrógeno (N₂O) y el dióxido de azufre (SO₂) son los más destacables ya que se deben al uso de maquinaria pesada.

Se evaluará de qué manera las emisiones dañan la calidad del aire local y la salud humana, y cómo se generan. Por último, se discutirá el impacto en la fauna terrestre y marina de la región.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Analizar los aspectos e impactos ambientales significativos generados en la fase de construcción en la planta desalinizadora de Tocopilla en Chile, utilizando la matriz de aspectos e impactos ambientales, con el fin de proponer medidas de mitigación para minimizar los efectos adversos en el entorno.

1.3.2 Objetivos específicos

- Describir el proyecto de construcción en la planta desalinizadora de Tocopilla, detallando sus componentes y actividades principales.
- Identificar y evaluar los aspectos ambientales involucrados en las distintas actividades constructivas del Proyecto.
- Analizar las estrategias propuestas para asegurar el cumplimiento normativo.

CAPÍTULO 2: MARCO TEÓRICO

2.1 Desalinización: Conceptos y tecnologías

Desalinización es un proceso de reducir o eliminar los niveles de minerales disueltos y otros compuestos no deseados en agua salada y agua salobre para obtener agua aprovechable para propósitos como el abastecimiento humano, riego y aplicaciones industriales [1].

La importancia del proceso radica en la creciente escasez de agua dulce en el mundo. Según Qu (2016), actualmente cuatro mil millones de personas (dos tercios de la población mundial) experimentan escasez de agua durante al menos un mes del año [2]. En estas circunstancias, el proceso de desalinización del agua salada puede hacer mucho por resolver esta crisis, ya que contribuirá a aumentar el suministro de agua dulce.

2.1.1 Clasificación del agua según salinidad

La clasificación del agua en función de su salinidad productora es clave para el campo de la desalinización, ya que orienta a los usuarios sobre la forma de comprender y optimizar los procesos. No solo esta clasificación determinará los procesos de desalinización adecuados que se pueden utilizar, sino que también influirá de manera significativa en los costos del producto y la energía que requieren los procesos [1]. Un ejemplo es el caso de la ósmosis inversa, tecnología seleccionada para el Proyecto de Abastecimiento de Agua Desalada Distrito Norte, que es rentable para el tratamiento de aguas con salinidades a menudo; la salinidad es la cantidad de sales disueltas en 1 litro de agua, para su caso, es de 36,000 partes por millón (ppm) [3].

En primer lugar, la salinidad del agua de alimentación determina directamente el diseño y dimensionamiento de las plantas desalinizadoras. En el caso de la ósmosis inversa, la presión osmótica que debe vencerse es proporcional a la concentración salina, lo que implica consumo de energía. En otras palabras, aguas más saladas deben enfrentar presiones más extremas para superar la presión osmótica, demandando más energía. Este factor es de particular importancia para plantas desalinizadoras como Distrito Norte, donde la eficiencia en consumo energético es crítica para la viabilidad económica y ambiental[4][6].

Además, la clasificación del agua según su salinidad es determinante para definir el uso potencial del agua producto y el manejo de los subproductos del proceso. El agua con diferentes niveles de salinidad tiene distintos usos potenciales; mientras que el agua ligeramente salobre puede ser adecuada para ciertos usos agrícolas, el agua para consumo humano requiere niveles muy bajos de salinidad. En el caso del Proyecto de Abastecimiento de Agua Desalada Distrito Norte, el objetivo es producir agua de alta calidad para uso industrial en operaciones mineras, lo que requiere un proceso de desalinización eficiente capaz de reducir significativamente la salinidad del agua de mar [5][3].

Antes de profundizar en las tecnologías de desalinización, es importante entender la clasificación del agua según su contenido en sales.

Tabla 1. Clasificación del agua en función de su contenido en sales

Tipo de agua	Contenido en sales
Agua dulce	0,3-3 g/L de venta
Agua salobre	3-10 g/L de venta
Agua muy salobre	10-30 g/L de sales
Agua Marina	30 g/L de venta

Fuente: Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2019). La desalinización de agua de mar: tecnologías, regulaciones y efectos ambientales [4].

Esta clasificación es fundamental para determinar el tipo de tecnología de desalinización más adecuada para cada fuente de agua.

2.1.2 Tecnologías de desalinización

En la ingeniería hídrica pocas innovaciones han tenido un impacto tan disruptivo como los métodos para convertir agua salada en agua dulce. Estas técnicas, que subvierten la propia naturaleza del agua, se han convertido en una respuesta vital a la creciente escasez de agua en todo el mundo. A su núcleo, las tecnologías de desalinización son una gama de procesos y métodos diseñados para separar las sales disueltas en agua, transformando agua salada o salobre en agua apta para consumo y otros usos [3]. Las tecnologías han evolucionado en las últimas décadas debido al crecimiento de la demanda de fuentes alternativas de agua dulce en áreas de escasez de recursos hídricos. Su importancia radica en lo sostenible que son con respecto a la crisis actual del agua, en especial en áreas costeras y áridas donde los cuerpos convencionales de agua dulce son limitados o inexistentes [1].

Las tecnologías de desalinización se definen como un conjunto de procesos y métodos que se han desarrollado para separar las sales disueltas del agua. El objetivo de estos procesos es usar estos métodos para transformar el agua salada o salobre en agua apta para un uso específico [1].

En las últimas décadas, se ha registrado un gran progreso en esta área ya que se han detectado tecnologías que se desarrollan a partir de la necesidad de buscar una fuente de agua dulce en un momento en que las fuentes de agua fresca se están agotando. Incluyen dos categorías principales [2]:

procesos térmicos y procesos membranosos. Los procesos térmicos toman de la antigua técnica de destilación utilizando calor para separar el agua de las sales. Por otro lado, la técnica de membrana incluye principalmente tecnologías de ósmosis inversa (OI).

Se debe tener en cuenta que las primeras plantas desalinizadoras modernas fueron construidas en la década de 1960. En 1965 se construyó e instaló la primera planta de desalinización por congelación para el suministro de agua en Eilat Israel [7]. En España, las primeras plantas se fabricaron en 1966. La elección entre estas tecnologías depende de varios factores, incluida la

salinidad del agua de alimentación, los requisitos de calidad del agua producto, la disponibilidad de energía, los costos operativos y de capital, así como los aspectos ambientales [6]. La elección de la ósmosis inversa para el Proyecto de Abastecimiento de Agua Desalada Distrito Norte, centrada en la Topografía de España, se debe a su relativa capacidad de tratar aguas con diferentes niveles de salinidad y su bajo coste energético [3].

A continuación se muestra la tabla comparativa de los conductos de membranas y virtuales líderes, lo que se detalla a continuación y su funcionalidad, factores distintivos:

Tabla 2. Comparación de Tecnologías de Desalinización: Procesos de Membrana y Procesos Térmicos

Procesos	Siglas	Características	Función	Diferenciación
Procesos de Membrana				
Ósmosis Inversa	OI	Utiliza membranas semipermeables y alta presión	Separa sales del agua forzándola a través de una membrana	Alta eficiencia energética, compacto
Electrodialisis	ED	Usa membranas de intercambio iónico y corriente eléctrica	Separa iones de sales del agua	Eficaz para aguas salobres, no para agua de mar
Nanofiltración	NF	Membrana con poros más grandes que OI	Elimina iones divalentes y algunas sales	Menor presión que OI, mayor flujo
Ultrafiltración	UF	Membrana de poro más grande que NF	Elimina partículas y microorganismos	Usado como pretratamiento, no desaliniza directamente
Procesos Térmicos				
Destilación por Compresión de Vapor	CV	Usa calor de condensación del vapor	Evapora y condensa agua para separarla de sales	Eficiente en pequeña escala
Destilación Multiefecto	MED	Múltiples etapas de evaporación a presiones decrecientes	Evapora agua en sucesivas etapas para separarla de sales	Eficiente energéticamente en gran escala
Evaporación Súbita Multietapa	MSF	Evaporación instantánea en múltiples etapas	Produce vapor instantáneo al reducir presión	Alta capacidad de producción

Fuente: Esta tabla ha sido elaborada a partir de la información recopilada de diversas fuentes académicas y técnicas, incluyendo el informe de la Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2019) sobre tecnologías de desalinización, los estudios de Martínez Guijarro, M.R. sobre procesos y tecnología para la desalinización del agua, y el trabajo de Barracchini Moreno, O. (2004) sobre teoría y procedimientos de desalinización. La información presentada resume los aspectos clave de cada tecnología, permitiendo una comparación directa entre los diferentes métodos de desalinización utilizados actualmente en la industria.

2.2 Contexto geográfico y socioeconómico del norte de Chile

Chile se enfrenta a un desafío crítico en la administración de los recursos hídricos, y esto es especialmente así en su región norte, donde las condiciones geográficas y climáticas han creado un entorno marcado por la escasez crónica de agua. Se pronostica que, para 2040, el Instituto de Recursos Mundiales del país experimentará un “extremadamente alto estrés hídrico”, un problema que ya es particularmente agudo en las regiones donde prospera la minería. [8][1]

Este factor ha contribuido al desarrollo de diversas soluciones tecnológicas, como la desalinización, que ha experimentado un cambio significativo en el panorama hídrico del estado. La desalinización ha experimentado un cambio notable en la industria en Chile, lo que ha sido especialmente pronunciado en la última década. A 2021, el país cuenta con 24 plantas desalinizadoras autorizadas que producen más de 8500 lps, y más del 75% de estos establecimientos de agua de mar pertenecen al sector minero. Entre 2010 y 2019, el país multiplicó por 17 sus extracciones de agua de mar, lo que indica la creciente dependencia de la industria de la tecnología.[8]

2.3 Marco regulatorio ambiental en Chile para proyectos de desalinización

El marco regulatorio chileno para proyectos de desalinización se caracteriza por su complejidad y por encontrarse en constante evolución. La regulación actual se fundamenta en tres pilares principales que definen el desarrollo y operación de estos proyectos. El primero concierne al régimen jurídico del agua desalada, donde existe una ambigüedad significativa. Mientras el agua de mar está claramente definida como un "bien nacional de uso público", el estatus legal del agua una vez desalinizada permanece en un área gris legislativa, a diferencia de países como España, Australia e Israel, que han establecido marcos regulatorios más definidos [8][1].

El segundo pilar se refiere al derecho de captación de agua marina, un aspecto crucial que actualmente carece de una regulación unitaria para las aguas marítimas y el borde costero. Los proyectos deben navegar por un complejo sistema de autorizaciones bajo la Ley de Concesiones Marítimas, lo que frecuentemente resulta en procesos administrativos prolongados que pueden extenderse hasta seis años desde la concepción inicial hasta la implementación del proyecto[8][1].

En cuanto al tercer pilar, relacionado con la evaluación de impacto ambiental, los proyectos de desalinización deben someterse al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), aunque no están categorizados específicamente como proyectos susceptibles de causar impactos ambientales [10]. En la práctica, estos proyectos suelen evaluarse como componentes de iniciativas más amplias, principalmente vinculadas a proyectos mineros o sistemas de agua potable, requiriendo la obtención de una Resolución de Calificación Ambiental (RCA)[8][9].

Chile posee una ventaja natural significativa para el desarrollo de proyectos de desalinización, particularmente en lo que respecta a la gestión de salmuera. Su litoral escarpado y las condiciones oceanográficas favorables permiten una rápida dispersión de la salmuera en aguas

profundas, minimizando potencialmente los impactos ambientales en comparación con otras regiones del mundo como el Mediterráneo[8].

El marco regulatorio está experimentando cambios importantes, con diversas iniciativas legislativas en curso. Entre ellas destaca el proyecto de ley (Boletín 16.364-09) que busca facultar al Estado para desarrollar proyectos de infraestructura hídrica y desalinización, así como propuestas para establecer una "Estrategia Nacional de Desalación" y hacer obligatorio el uso de agua desalada en proyectos mineros de gran escala. Estas iniciativas reflejan un reconocimiento creciente de la importancia estratégica de la desalinización para el desarrollo sostenible del país[8].

CAPÍTULO 3: DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

3.1 Características generales del proyecto

El Proyecto de Abastecimiento de Planta desalinizadora en la zona de Tocopilla es una adición vital a la estrategia para abordar la creciente demanda de recursos hídricos en la región norte de Chile. Este proyecto surgió de una necesidad crítica de fuentes alternativas de agua en una de las zonas más áridas del país [3][11].

La función clave que cumple este proyecto es proporcionar una fuente sostenible de agua para las operaciones industriales en la zona, lo que reducirá drásticamente la presión sobre los recursos hídricos continentales de un lugar conocido por su falta de agua. Sin embargo, su implementación no persigue sólo atender las necesidades industriales, sino también a preservar los recursos hídricos naturales[3][11].

La construcción también constituyó un hito importante en la gestión de recursos hídricos en Chile. Este documento se centrará en la fase de construcción e incluirá el desarrollo de la infraestructura crítica, como la sentina y la cámara de carga para el sistema de captación de agua de mar; la perforación y tronadura requerida para instalar la infraestructura; la instalación de sistemas de bombeo y conducción; las instalaciones de tratamiento y procesamiento [3][11]. El equipo de ósmosis inversa para desalinización fue elegido para este proyecto porque es actualmente el tipo más económico [1].

3.1.1 Ubicación y emplazamiento

Se ha diseñado para proporcionar un suministro de agua desalada a las operaciones industriales mineras ubicadas en el norte de Chile. El objetivo principal consiste en reducir la cantidad de agua extraída de las fuentes continentales y hacer que estas operaciones sean más sostenibles. La motivación para establecer este proyecto radica en el hecho de que la continua intensificación de la minería entre los operadores locales puede dañar el bienestar a largo plazo de las comunidades y los recursos hídricos.[1][3]

Así, el Proyecto representa una solución innovadora a un problema que se ha vuelto especialmente crítico en una región caracterizada por la extrema aridez y la dicha escasez de agua dulce. La planta de agua desalada usa la tecnología inversa de ósmosis que actualmente considera una de las maneras más efectivas de desalinización del agua marina disponible. Se crea para garantizar el suministro de agua de manera confiable y sostenible para las operaciones industriales, sin amenazar el suministro de agua dulce de las comunidades locales. Además de abordar las necesidades inmediatas de agua industrial, el proyecto ha sido diseñado como un hito en la gestión sostenible de los recursos hídricos en industrias de este tipo.[1][3]

Como se mencionó anteriormente, el proyecto utiliza la tecnología de ósmosis inversa para la desalinización de agua de mar. El abastecimiento de agua industrial en la zona costera de Tocopilla implica la construcción de una Planta Desaladora junto con un sistema integral de aprovisionamiento de agua desalada. El proyecto de construcción de la planta desaladora, ubicada a 19 km de la ciudad de Tocopilla y conectada mediante la Ruta 1, una ubicación seleccionada por sus características favorables para este tipo de infraestructura y su proximidad

a los puntos de demanda. La ubicación física del proyecto permitirá una distribución eficiente del agua tratada hacia los principales centros mineros de la región, estableciendo una conexión estratégica a través de la Ruta 1, que funciona como eje principal de comunicación entre los centros urbanos e industriales de la zona [11][3]

Figura 1. Ubicación espacial de planta desaladora de Tocopilla



Fuente: Elaboración Propia

Coordenadas: N: 7.561.172 Norte y E: 377.345 Este (coordenadas UTM, Zona 19, hemisferio norte)

Tabla 3. Coordenadas de Ubicación - Planta Desaladora Tocopilla

Ubicación (UTM)	Este	Norte
Planta Desaladora Tocopilla	377.346	7.561.172

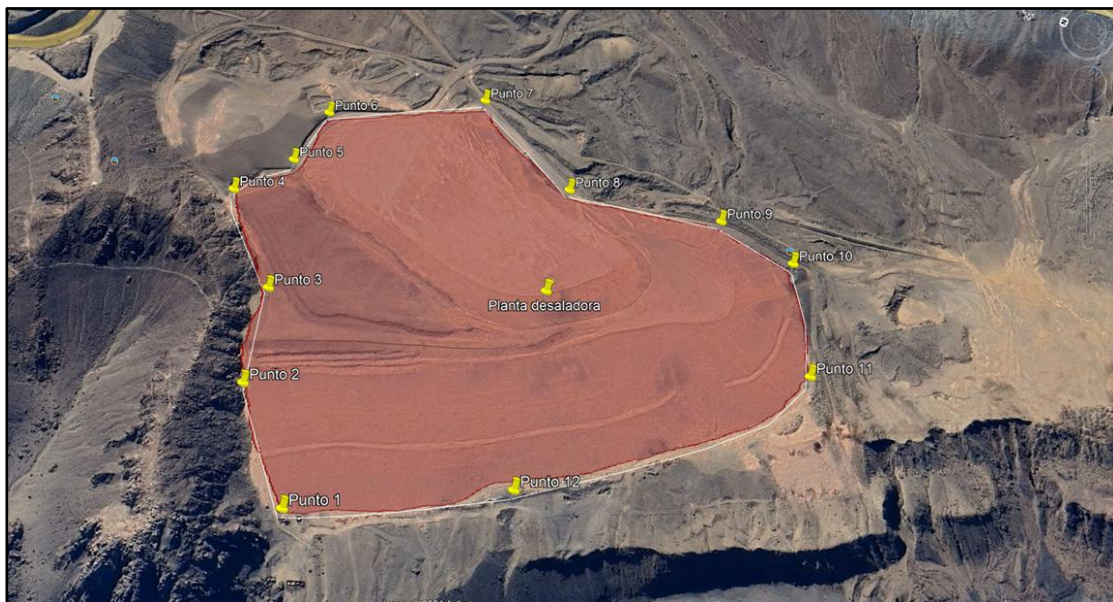
Fuente: Elaboración Propia

En la **Figura 2**, se muestra una imagen satelital obtenida por Google Earth en donde se logra observar el sitio de emplazamiento de la futura Planta Desalinizadora de Tocopilla. El área de color rojizo corresponde a la superficie total del proyecto, la cual equivale a unos **3.500 m²**. Los 12 puntos marcados de color amarillo, por otra parte, corresponden a los vértices que limitan la totalidad del polígono del proyecto, los cuales están caracterizados por sus coordenadas UTM (Este y Norte), conformando de esta forma un polígono irregular que se ajusta a la totalidad de la superficie de terreno. [16]

La imagen satelital brinda además la oportunidad de visualizar las características geográficas del terreno, evidenciando la presencia de un área desértica propia de la zona norte de Chile en la cual se encuentran unas alturas y bajas naturales que han sido contempladas y consideradas

en la planificación del proyecto. La ubicación central de la planta, por ejemplo, estar a la coordenada **UTM: Este 377.346, Norte 7.561.172**, fue elegida estratégicamente para onze en función del acceso y distribución tanto al agua marina que se empleará como insumo, como el agua desalinizada que se produzca. Dado que esta representación visual es esencial para comprender la disposición espacial del proyecto e identificar la totalidad de su relación con el espacio geográfico circundante, se pueden visualizar nítidamente los límites de la intervención, relacionándolos a la vez con la topografía del área. La determinación de los puntos de límite se efectuó de acuerdo a elementos técnicos de la planta pero también acotaba variables geográficas y ambientales.[16]

Figura 2. Coordenadas UTM respecto a la distribución del proyecto



Fuente: Elaboración Propia

La siguiente tabla muestra las coordenadas UTM es, Norte de los 12 puntos que definen el polígono perimetral y georeferencian el entorno de la planta desalinizadora de Tocopilla. En conjunto el polígono conformado por los puntos abarca un total aproximado de 3,500 m², área de construcción de la planta. Los puntos son: UTM Este 377,0666 – Norte 7,560,9178, UTM Este 377,3527 – Norte 7,561,4942, etc. Todos los puntos presentan coordenadas en la zona 19 del UTM Norte.[16]

La disposición de estos puntos forma un polígono irregular que ha sido estratégicamente definida considerando tanto aspectos técnicos como ambientales. La ubicación de estos vértices permite optimizar la captación de agua de mar y la posterior distribución del recurso procesado, mientras que también considera las restricciones topográficas y ambientales del terreno. El punto más septentrional (Punto 4) y el más meridional (Punto 11) establecen los límites norte y sur de la instalación, mientras que los puntos más orientales y occidentales definen el ancho máximo de la planta, asegurando el espacio necesario para todas las instalaciones. requeridas, incluyendo las torres de captación, sistemas de procesamiento y áreas de mantenimiento.[16]

Figura 3. Representación de planta desaladora



Fuente: Elaboración Propia

Tabla 4. Coordenadas de Delimitación Perimetral de la Planta Desalinizadora de Tocopilla

Coordenadas UTM		
Vértice	Este	Norte
Punto 1	377.066	7.561.310
Punto 2	377.157	7.561.386
Punto 3	377.255	7.561.414
Punto 4	377.341	7.561.494
Punto 5	377.412	7.561.459
Punto 6	377.474	7.561.452
Punto 7	377.541	7.561.303
Punto 8	377.475	7.561.186
Punto 9	377.494	7.561.041
Punto 10	377.485	7.560.962
Punto 11	377.373	7.560.917
Punto 12	377.158	7.561.135

Fuente: Elaboración Propia

3.1.2 Distribución de Pueblos indígenas

La distribución y presencia de pueblos indígenas en el área de influencia de un proyecto no es menos que un aspecto fundamental a considerar para el desarrollo y gestión del mismo. En el caso de Chile, este no se considera simplemente un factor importante a nivel social, sino más bien un proceso requerido por la ley, ya que la Ley Indígena 19.253 y el Convenio 169 de la OIT exigen procesos de consulta previa y consideración especial cuando un proyecto puede afectar a los pueblos indígenas. En el caso específico del proyecto de la planta desalinizadora de Tocopilla, el análisis demográfico revela la presencia minoritaria del pueblo indígena en el área.[23]

Específicamente, no se registra ningún individuo miembro del pueblo indígena en los sectores de Villa María y Villa Norte. El pueblo tampoco supera el 1% de la población total que reside en los sectores de Arturo Prat, Cardenal Caro y La Patria. 3 personas de origen atacameño y 14 de origen mapuche residen en estos sectores, en comparación con la población total del sector.[24]

Estos datos demográficos son esenciales para el desarrollo del proyecto porque permiten la creación y ejecución de medidas de mitigación culturalmente apropiadas y planes exitosos de relaciones comunitarias. Son esenciales para el desarrollo del proyecto porque permiten la creación y ejecución de medidas de mitigación culturalmente apropiadas planes exitosos de relaciones comunitarias. Aunque aunque la población indígena de la zona es pequeña, eso no significa que el área derechos y culturas no deban tomarse en consideración. La población indígena es pequeña, eso no significa que sus derechos y culturas no deban ser tomados en consideración. El análisis también ayuda demográfico para prevenir posibles conflictos socioambientales y disputas asegura que garantiza que se cumplan los estándares internacionales de sostenibilidad. Se cumplen los estándares internacionales de sostenibilidad.[23][24]

Tabla 5. Distribución de la Población Local según Pertenencia a Pueblos Indígenas

Categoría	Villa María		Villa Norte		Arturo Prat		Cardenal Caro		La Patria	
	Casos	%	Casos	%	Casos	%	Casos	%	Casos	%
Atacameño	-	-	-	-	3	0.23	-	-	-	-
Mapuche	-	-	-	-	6	0.46	6	0.32	2	0.38
Ninguno de los anteriores	83	100	259	100	1,305	99.31	1,857	99.68	525	99.62
Total	83	100	259	100	1,314	100	1,863	100	527	100

Fuente: Elaboración Propia información extraída del Censo de Población

3.1.3 Descripción técnica de la planta

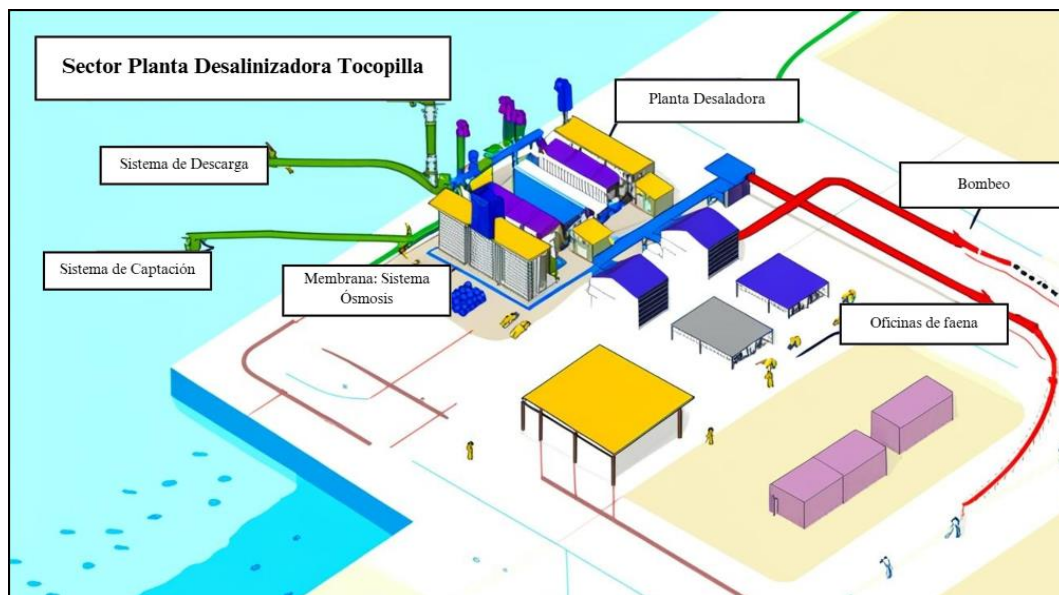
En la **Figura 3**, se muestra una vista general esquemática de la Planta Desalinizadora de Tocopilla, donde se aprecia el corazón del proceso, el sistema de ósmosis inversa. Esta tecnología de desalinización opera a través de un flujo específico, que se lleva a cabo desde el sistema de captación y llega hasta el sistema de bombeo para su distribución. [11][15]

El ciclo comienza cuando el agua de mar entra al sistema de captación presentado, en el área costera de la instalación. Por lo que se realiza un pretratamiento inicial para eliminar los sedimentos y ajustar algunas de sus condiciones químicas antes de llegar a la parte central, las membranas del sistema de ósmosis inversa. En este punto, se fuerza el agua a través de las membranas semipermeables con alta presión **60-70 bares**, separando así eficientemente las sales. [11][15]

También permite retener hasta un **99.8 %** de las sales disueltas y originar dos flujos principales: agua dulce y salmuera. Como se ha mencionado, la sección central de la planta con las membranas del sistema de ósmosis se diseñó para procesar agua de mar con una salinidad de **36.000 ppm** aproximadamente. El agua que ya ha pasado por la desalinización continúa hacia el sistema de bombeo, y otra salmuera se dirige al sistema de descarga, ubicado en el lado izquierdo de la imagen para diluirse adecuadamente y reintegrarse correctamente en el océano. La distribución de espacio de la planta está optimizada para este proceso, con las oficinas de faenas dispuestas de manera ideal para supervisar todas las etapas del tratamiento.[15]

Esto no solo permite que el proceso fluya eficiente, sino también un control total sobre las actividades, lo que permite garantizar la calidad del agua producida y que no se infringe ningún estándar ambiental.[15]

Figura 4. Vista general de la planta desalinizadora referencial



Fuente: Elaboración Propia

3.1.4 Escarpe o Extracción de la Capa Vegetal del Suelo

Dentro del proyecto de edificación de la planta de desagüe en Tocopilla, se ha elaborado un plan exhaustivo para la administración y administración del terreno superficial que será afectado durante las obras. La región de intervención, situada específicamente en las coordenadas UTM N: 7.561.172 Norte y E: 377.345 Este (coordenadas UTM, Zona 19, hemisferio norte)[16], ha sido elegida meticulosamente para reducir el impacto ambiental y asegurar la factibilidad técnica del proyecto al mismo tiempo.[11]

El procedimiento de extracción de la capa superficial del suelo, denominada técnicamente como escarpe, se llevará a cabo a una profundidad media de 30 centímetros, aunque esta cifra podrá fluctuar dependiendo de las particularidades específicas del terreno en cada zona. Esta acción cubrirá un área total de 3,500 metros cuadrados, que comprende los espacios destinados a la instalación de tuberías, torres de captación y la infraestructura principal de la planta industrial. Tomando en cuenta estas medidas, se ha estimado un volumen total de extracción de cerca de 1,050 metros cúbicos de material superficial.[12][15]

Para llevar a cabo estos trabajos de forma eficaz y respetuosa con el medio ambiente, se establecerá un sistema de extracción a través de maquinaria pesada especializada, en particular excavadoras dotadas de cucharas de precisión. Esta selección de equipo facilita un control exacto de la profundidad de extracción y reduce la alteración del suelo que se encuentra bajo tierra.[15] El material recolectado se administrará de acuerdo a rigurosos protocolos medioambientales, que incluyen su recolección en zonas específicamente asignadas en el entorno del proyecto. Estas áreas de recolección estarán correctamente acondicionadas con coberturas impermeables, una acción esencial para evitar la producción de partículas en suspensión y resguardar el terreno de la erosión eólica, un aspecto especialmente significativo teniendo en cuenta las condiciones meteorológicas de la región.[8]

Se ha organizado la administración del material obtenido bajo un enfoque de sostenibilidad y economía circular. El plan establece que este material se reutilice de manera prioritaria en las tareas de rehabilitación y revegetación de las zonas afectadas durante la construcción. Este método no solo maximiza los recursos existentes, sino que también promueve la regeneración natural del ecosistema, al emplear tierra con las propiedades biológicas y químicas características de la región.[8][16]

El espacio total destinado a la intervención vegetal se ha fijado en 2,000 metros cuadrados, enfocándose principalmente en la zona costera donde se edificarán las torres de captación y el sistema de drenaje. En esta región, la mayoría de la vegetación corresponde a especies xerofíticas, destacadas por su adaptación a condiciones de aridez intensa, expresándose principalmente como vegetación arbustiva y herbácea. Es crucial subrayar que las investigaciones iniciales no han detectado la existencia de bosques autóctonos ni especies clasificadas en categorías de preservación en el área de intervención.[8][15]

3.2 Fase de construcción de la planta desaladora (30 meses)

La construcción de la planta desaladora en Tocopilla se extiende durante un período de 30 meses. Durante los primeros seis meses, se determina que la ubicación óptima para los campamentos es el sector de Isabel/Tres Marías, adyacente a la Ruta 1, y el personal se alojará durante todo el período, poniendo a disposición 500 cupos a mitad de este.[16] Al mismo tiempo, las obras marítimas, es decir, la construcción de cámara de sentina y carga, muelle auxiliar, excavación de zanjas y perfilamiento del fondo marino, se llevarán a cabo hasta el mes 18. [15] Al mismo tiempo, los meses 7-24 verán la fabricación, colocación y conexión de la tubería, así como también la instalación de las torres de succión. Por último, en el último mes, se habilitarán los accesos a la Ruta 1 y se construirá un cruce subterráneo para mejorar otros lugares de tránsito, lo que ayudará a completar el proyecto a tiempo. [12][15]

3.2.1 Cronograma de actividades

El cronograma de construcción presentado detalla las actividades a realizar durante un período de 30 meses, dividido en tres ítems principales:

Tabla 6. Cronograma de actividades principales

Actividades	Mes 1-3	Mes 4-6	Mes 7-12	Mes 13-18	Mes 19-24	Mes 25-30
ITEM N°1: Sector Planta Desaladora Instalación de Faena y Campamento						
Preparación del terreno	X	X				
Montaje de infraestructuras temporales	X	X				
Transporte de materiales y equipos	X	X				
Instalaciones de servicios básicos	X	X				
ITEM N°2: Construcción de Obras Marítimas						
Construcción de sentina y cámara de Carga		X				
Perforaciones y tronaduras		X	X			
Excavaciones de zanjas		X	X			
Perfilamiento de fondo marino		X	X			
Construcción y hormigonado de torres			X	X		
Instalación de Tuberías y torres de captación				X		
Relleno de Zanjas en Zona de Rompiente				X		

Operaciones finales y conexión a obras terrestres					X	
ITEM N°3: Habilitación de acceso y caminos interiores						
Construcción de cruce de Ruta 1					X	X
Construcción de acceso a Ruta 1					X	X

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2 Descripción de obras principales

El ÍTEM N°1 comprende la instalación de faena y campamento del sector de la planta desaladora, con actividades que se desarrollarán durante los primeros 6 meses, incluyendo la preparación del terreno, montaje de infraestructuras temporales, transporte de materiales y equipos, e instalación de servicios básicos.[15]

El ÍTEM N°2 abarca la construcción de obras marítimas, iniciando en el mes 4 con la construcción de sentina y cámara de carga, seguido por perforaciones, tronaduras, excavaciones y perfilamiento del fondo marino. Las actividades continúan con la construcción de torres, instalación de tuberías y finaliza con las operaciones de conexión a obras terrestres en el mes 19-24.[15]

El ÍTEM N°3 corresponde a la habilitación de accesos y caminos interiores, programada para los últimos seis meses del proyecto (mes 19-30), incluyendo la construcción del cruce y acceso a la Ruta 1.[15]

3.3 Recursos necesarios para la construcción

Los fondos requeridos para edificar la Planta Desalinizadora de Tocopilla constituyen el fundamento funcional que respaldará el progreso del proyecto durante sus 30 meses de implementación. La administración eficaz de estos recursos demanda un entendimiento detallado de las demandas particulares en cada fase de construcción y su vínculo con el calendario global del proyecto.[15]

El procedimiento para identificar y estructurar estos recursos proviene del estudio minucioso de las distintas etapas de construcción: obras de carácter marítimo, colocación de faenas y habilitación de accesos. Cada etapa requiere una mezcla particular de componentes que comprenden transporte, equipos pesados, recursos energéticos, personal especializado y materiales para la edificación. Este método garantiza que cada recurso esté accesible en el instante y en el lugar correcto.[15]

Los recursos se clasifican en categorías principales:

3.3.1 Transporte y movilización

La etapa de construcción de la planta dispone de una flota estratégica de 15 vehículos repartidos en tres categorías fundamentales de uso: transporte de personal, logística de alimentación y transporte de materiales y equipos.[30]

Esta flota de vehículos no solo garantiza la continuidad de las actividades, sino que es esencial para la valoración de los impactos ambientales porque la información contribuye a la cuantificación de las emisiones de aire de producción de la flota y al estimación del consumo de combustible, así como de la evaluación del impacto sonoro en la zona del proyecto. [14]

Tabla 7. Distribución de Vehículos por Etapa Constructiva y Actividad

Vehículo	Actividad	Construcción de Obras marítimas	Instalación de faena y campamentos	Habilitación de acceso y camiones interiores	Total
Camionetas	Traslado de trabajadores	1	1	1	3
Furgones	Traslado de alimentación	1	1	1	3
Buses	Traslado de trabajadores	2	1	1	4
Camión mixer	Transporte de hormigón	1	1	-	2
Camión con brazo de carga	Transporte de materiales y equipos	1	1	1	3

Fuente: Elaboración Propia

3.3.2 Equipos y maquinaria pesada

El ruido de los motores y el manejo incesante de maquinaria de gran peso serán exactamente lo que distinguirá cada etapa de la planta desalinizadora Tocopilla. Este despliegue de 28 equipos especializados no sucede de manera casual, pues toda esta movilización necesaria debe ser planificada con el fin de alcanzar un equilibrio entre la eficiencia en la construcción y la inquietud por sus consecuencias.[17]

La tabla de distribución muestra los puntos de actividad críticos, iniciando con la más ardua de todas: El **ITEM N°1** Instalación de faenas y campamentos y **ITEM N°2** Construcción de obras marítimas. En estas etapas, serán tres camiones tolva y tres betoneras, los dispositivos empleados en el traslado de tierras, los que generarán el mayor impacto en cuanto a aire y ruido.[17]

Tabla 8. Distribución de Equipos y Maquinaria por Fase de Construcción

Equipo y maquinaria	Actividad	Construcción de Obras marítimas	Instalación de faena y campamentos	Habilitación de acceso y camiones interiores	Total
Camión tolva	Movimiento de material	1	3	1	5
Grúas	Movimiento de material en general	-	1	-	1
Betoneras	Elaboración de hormigón	1	3	1	5
Retroexcavadoras	Formación de plataformas y movimiento de tierra	1	1	-	2
Excavadoras	Movimiento de tierra	1	1	1	3
Camión aljibe	Riego rellenos, humectación de caminos no pavimentados	-	1	0	2
Cargador frontal	Carga y descarga de material	1	1	1	3
Bulldozer	Despeje de áreas	1	1	-	2
Finisher	Pavimentadora o terminadora de asfalto	-	1	-	1
Rodillo compactador	Compactación	1	1	0	2
Botes	Instalación de ductos submarinos	2	-	-	2

Fuente: Elaboración Propia

3.3.3 Suministros energéticos y combustible

Para determinar estos valores se utilizó una metodología basada en el Manual de Rendimiento de Maquinaria Pesada y Vehículos Industriales del Ministerio de Obras Públicas, junto con las especificaciones técnicas de los fabricantes de los equipos. Los requerimientos de energía eléctrica (120 kW) se calcularon según la demanda energética típica por área operativa. [15][41]

Tabla 9. Requerimientos de Energía Eléctrica por Área del Proyecto

Equipo	Actividad	Obras marítimas y planta elevadora de agua de mar	Edificio de procesos	Tubería de agua potable	Total
Generador	Generación de energía 120 kW	2	3	2	7

Fuente: Elaboración Propia

Mientras que el consumo de combustible se estimó considerando factores como distancias de recorrido, ciclos de trabajo y consumo promedio por tonelada de carga transportada. Los valores fueron ajustados según la experiencia documentada en proyectos similares de construcción en la zona norte de Chile, considerando las condiciones particulares de Tocopilla como topografía y clima.[15][41]

Tabla 10. Consumo de Combustible por Tipo de Vehículo y Uso

Tipo de vehículo	Cantidad	Tipo de Combustible	Uso principal	Cantidad estimada
Camionetas	3	Diesel menor a 3,5 ton	Transporte de personal y supervisores	300 l/mes por vehículo
Furgones	3	Diesel menor a 3,5 ton	Traslado de alimento	250 l/mes por vehículo
Buses	4	Diesel menor a 7,5 ton	Traslado de trabajadores	400 l/mes por vehículo
Camiones Mixer	2	Diesel menor a 7,5 ton	Transporte de hormigón	1.000 l/mes por vehículo
Camión con brazo de carga	3	Diesel menor a 7,5 ton	Transporte de materiales y equipos	1.200 l/mes por vehículo

Fuente: Elaboración Propia

3.3.4 Requerimientos y Gestión de Agua Industrial para Procesos Constructivos

En cuanto al agua industrial necesaria para las actividades constructivas, se proporcionará por medio de camiones aljibe desde la ciudad de Tocopilla, con muy poco impacto en el ambiente y cumpliendo el **DS N°735/1969** del Ministerio de Salud, el cual regula el uso de agua para actividades industriales.[26] Este proyecto deberá contar también con los permisos de extracción de agua brindados por la Dirección General de Aguas y deberá ajustarse a la normativa establecida en el Código de las Aguas. Además, para actividades más específicas, como, por ejemplo, la producción de concreto el agua entregada debe cumplir con los estándares de la **NCh 1498:2012** sobre requisitos del agua de amasado para concreto. Ello está regulado por la Superintendencia de **Servicios Sanitarios 188** y es verificado a través de análisis periódicos de calidad.[26][27]

Tabla 11. Estimación de Consumo de Agua Industrial por Equipo y Actividad en Fase de Construcción

Equipo o vehículo	Uso principal	Notas	Cantidad Estimada
Camiones Mixer	Mezclado de hormigón para estructuras	Dos camiones operando simultáneamente	500-700 l/día por camion
Camión con brazo de carga	Limpieza y enfriamiento de maquinaria	Tres camiones en operación	50-100 l/día por camión
Excavadoras	Limpieza de maquinaria después de operación	se estima para 3 excavadoras	100-150 l/día por máquina
Planta de Hormigonado	Preparación de mezcla de hormigón	Volumen para producción continua	8.000-10.000 l/día
Sistema de limpieza	Limpieza de área de trabajo y herramientas	Se incluyen en el consumo general	500- 1.000 l/día

Fuente: Elaboración Propia

3.3.5 Suministro y Gestión de Agua Potable para Personal durante la Fase de Construcción

Con respecto al consumo de agua potable para trabajadores está regulado por el **Decreto Supremo N°594/1999** del Ministerio de Salud (Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo), que en su Artículo 12 establece que todo trabajador debe tener acceso a agua potable destinada al consumo humano y necesidades básicas de higiene y aseo personal, con un mínimo de 100 litros por trabajador al día.[28] En este proyecto se considera un consumo de 3 L/día por trabajador para consumo directo, mientras que el resto del requerimiento legal se cubre mediante las instalaciones sanitarias del campamento. El cumplimiento es fiscalizado por la Secretaría Regional Ministerial de Salud y la Dirección del Trabajo, debiendo el agua cumplir con los estándares de la **NCh 409/1.Of2005** sobre calidad de agua potable.[26][28]

Tabla 12. Consumo de Agua Potable Para los Trabajadores

Fase de Instalación de campamento	Cantidad de trabajadores	Consumo diario por trabajadores	Consumo total diario	Consumo total mensual	Consumo total anual (12 meses)
Primeros 3 meses	150	3 l/día	450 l/día	13.500 l/mes	40.500 litros (para 3 meses)
A partir del mes 4	500 (adicionales)	3 l/día	1.500 l/día	45.000 l/mes	405.00 litros (para 9 meses)

Total	650	3 l/día	1.950 l/día	58.500 l/mes	445.500 litros
-------	-----	---------	-------------	--------------	----------------

Fuente: Elaboración Propia

3.4 Análisis de costos y presupuesto

El diseño económico de la Planta Desalinizadora de Tocopilla demanda una estimada inversión total de **USD 26,000,000**, monto que evidencia la magnitud del proyecto y su complejidad técnica. Esta proyección proviene de un análisis detallado que toma en cuenta diversas variables, desde las cotizaciones actuales y el análisis del mercado hasta la valoración de proyectos parecidos en la zona. La exactitud en estas estimaciones es crucial no sólo para garantizar la factibilidad del proyecto, sino también para instaurar mecanismos de control eficaces durante su realización.[12][15]

Se ha diseñado la estructura presupuestaria teniendo en cuenta las necesidades particulares de cada elemento del proyecto. El **30%** corresponde a los materiales de construcción, seguidos por la mano de obra especializada que representa un **24%** (USD 6,240,000). El presupuesto se completa con un **9.17%** (USD 2,384,000), mientras que los servicios especializados y la administración se completan con un **10%** y **6%** respectivamente, conservando un margen prudencial para contingencias.[15]

Dentro del campo particular de maquinaria y equipos, el estudio comparativo entre el alquiler y la compra de 47 unidades muestra información relevante para la toma de decisiones. Los gastos mensuales en forma de alquiler llegan a **USD 46,000**, en cambio, la alternativa de propiedad demanda **USD 39,200**, estimando anualmente **USD 2,334,000** y **USD 1,988,400** respectivamente. Esta discrepancia de **USD 345,600** anuales indica posibles mejoras financieras, aunque la resolución final debe tener en cuenta elementos extra como el mantenimiento y la depreciación.[12][15]

La técnica de estimación incluye factores esenciales como los costos directos de edificación, los cargos indirectos de funcionamiento, los gastos administrativos y un margen para situaciones inesperadas. Esta robusta base presupuestaria posibilita no solo administrar eficazmente los recursos durante la edificación, sino también prever y reaccionar de manera rápida a las fluctuaciones que puedan presentarse durante los 30 meses de realización del proyecto.[15]

Tabla 13. Costo mensuales y anuales de maquinaria y equipos por modalidad de adquisición.

Equipo	Cantidad Total	Costo Mensual Arriendo (USD)	Costo Mensual Propio (USD)	Costo Anual Arriendo (USD)	Costo Anual Propio (USD)
Camión tolva	5	4.500	3.800	270.000	228.000
Camión mixer	2	5.200	4.500	124.800	108.000
Grúas	1	8.500	7.200	102.000	86.400
Betoneras	5	2.800	2.200	168.000	132.000
Retroexcavadoras	2	6.000	5.200	144.000	124.800
Excavadoras	3	7.500	6.500	270.000	234.000
Generadores	7	3.200	2.800	268.800	235.200
Buses	4	4.800	4.000	230.400	192.000
Otros equipos (promedio)	18	3.500	3.000	756.000	648.000
TOTAL	47	46.000	39.200	2.334.000	1.988.400

Fuente: Elaboración Propia.

3.4.1 Distribución del presupuesto total

El presupuesto total del proyecto fue calculado y distribuido de acuerdo a las directrices y recomendaciones establecidas en el “Manual de Costos Referenciales de Inversión en el Sector Sanitario” del Ministro de Obras Públicas (2021) y las normas de la Cámara Chilena de la Construcción para proyectos hidroeléctricos. Los porcentajes asignados a cada categoría se basaron en un análisis comparativo de las desalineaciones anteriores, ajustados de acuerdo con las características técnicas únicas y la complejidad de la planta desaladora de Tocopilla. [15]

Tabla 14. Distribución del Presupuesto Total del Proyecto por Categoría de Gasto

Categoría de Gasto	Monto (USD)	Porcentaje
Maquinaria y Equipos (Empresa Externa)	2.384.000	9.17%
Materiales de Construcción	7.800.000	30%
Mano de Obra	6.240.000	24%
Servicios Especializados	2.600.000	10%
Gestión y Administración	1.560.000	6%
Permisos y Licencias	780.000	3%

Autorizaciones gubernamentales, estudios ambientales

Categoría de Gasto	Monto (USD)	Porcentaje	
Seguros y Garantías	1,040,000	4%	
Contingencias	2,080,000	8%	
Instalaciones Temporales	936,000	3.6%	
Saldo Disponible	580,000	2.23%	
TOTAL PRESUPUESTO	26,000,000	100%	Presupuesto total del proyecto

Fuente: Elaboración Propia

3.4.2 Costos de operación y mantenimiento

En la determinación de los costos de operación y mantenimiento se aplicó un modus de comparación, basado en proyectos similares de infraestructura hídrica en Chile y en la región. Los valores se determinaron según las directrices del Manual de Costos y Presupuestos del Departamento de Obras Públicas (MOP) y los estándares de la Cámara Chilena de la Construcción. [38]

Tabla 15. Costo de Operación y Mantenimiento - Gestión interna (Base anual)

Concepto	Costo Estimado (USD/año)	Notas
Consumo energético	85.000	Consumo anual de 7 generadores (120 kW c/u) y equipamiento pesado. Incluye combustible diésel para generadores y maquinaria.
Insumo químico	45.000	Aditivos para hormigón, productos anticorrosivos, tratamientos de suelo y productos para estabilización de terreno.
Personal operativo	208.000	Contempla salarios anuales de personal clave: operadores, técnicos y supervisores
Mantenimiento preventivo	79.000	Mantenimiento anual de 47 unidades de maquinaria pesada y equipos especializados.
Gestión de residuos	52.000	Manejo anual de residuos domésticos (15.6 ton/mes), industriales (29.2 ton/mes) y peligrosos (0.088 ton/mes)
Monitoreo ambiental	35.000	Control anual de emisiones, mediciones de ruido, calidad del agua y monitoreo marino
Seguridad industrial	65.000	EPP anual para trabajadores, sistemas de seguridad y señalización
Servicios básicos	25.000	Agua potable (445.500 L/año), comunicaciones y servicios sanitarios
Transporte	95.000	Operación anual de flota de 15 vehículos para transporte de personal y materiales.
Gastos administrativos	52.000	Gestión documental anual, permisos ambientales y trámites administrativos
Total mensual	741.000	Total anual de costos operativos durante la construcción

Fuente: Elaboración Propia

3.5 Fase de Construcción de planta Desaladora (Duración : 30 meses)

La construcción de la planta desaladora en Tocopilla se extiende durante un período de **30 meses**. Durante los primeros seis meses, se determina que la ubicación óptima para los campamentos es el sector de Isabel/Tres Marías, adyacente a la Ruta 1, y el personal se alojará durante todo el período, poniendo a disposición **500 cupos** a mitad de este.[16] Al mismo tiempo, las obras marítimas, es decir, la construcción de cámara de sentina y carga, muelle auxiliar, excavación de zanjas y perfilamiento del fondo marino, se llevarán a cabo hasta el mes 18. [15] Al mismo tiempo, los **meses 7-24** verán la fabricación, colocación y conexión de la tubería, así como también la instalación de las torres de succión. Por último, en el último mes, se habilitarán los accesos a la Ruta 1 y se construirá un cruce subterráneo para mejorar otros lugares de tránsito, lo que ayudará a completar el proyecto a tiempo. [12][15]

3.5.1 Instalación de faena y campamento

El primer paso en la fase de construcción del proyecto de la planta desaladora. El campamento y la faena se ubicarán a 19 km de la ciudad de Tocopilla y conectada mediante la Ruta 1. Se ha elegido el punto del sector de Isabel/Tres Marías, a 14 km al norte de Tocopilla.[16] Este será significativamente beneficioso a la hora de transportar a los empleados desde la ciudad de residencia hasta el campamento, reducirá significativamente el tiempo de desplazamiento, y evitará cualquier interacción involuntaria de la construcción del campo con las áreas residenciales inmediatas.[13][12]

La costa también facilita el movimiento de materiales y equipo pesado ya que se está construyendo infraestructura basada en agua. Inicialmente, se espera que el número de trabajadores que albergará esta faena en este campo sea de 100 personas en los primeros 3 meses, mientras que las instalaciones de la faena se completarán, y los trabajadores se alojarán en Tocopilla. 150 Trabajadores más se agregan al tercer mes para el movimiento de tierras y obras tempranas. Estamos programando la actividad a casi 6 meses y el campamento de Isabel/Tres Marías se completará para brindar servicios a 500 personas.[12]

Se espera que el campamento esté operativo en su capacidad total, 2,000 personas en el duodécimo mes. Para este fin, se proporcionarán condiciones adecuadas para todos los trabajadores, como instalaciones para comer, dormir y descansar, para garantizar que el personal se encuentre en condiciones adecuadas mientras el ritmo de construcción siga siendo eficiente.[12]

3.5.2 Transporte de Trabajadores en la fase de Construcción

Establecimiento de la planificación integral del sistema de transporte y logística para personal durante la fase de construcción de la Planta Desaladora, ubicada a 19 km de Tocopilla.[16] El plan tomará en cuenta la movilización de trabajadores, distribución de alimentación y otra necesidad, considerará diferentes fases constructivas y el crecimiento progresivo del personal, desde 150 trabajadores, al inicio de las actividades, y aumentar hasta 500 trabajadores para etapas posteriores. [12][15]

Tabla 16. Distribución de Vehículos para Transporte de Personal y Logística en Fase de Construcción

Vehículo	Actividad	Construcción de Obras marítimas	Instalación de faena y campamentos	Instalación de Ruta 1 (Caminos)	Total
Camionetas	Traslado de trabajadores	1	1	1	3
Furgones	Traslado de alimentación	1	1	1	3
Buses	Traslado de trabajadores	2	1	1	4

Fuente: Elaboración Propia

3.6 Construcción de Obras Marítimas

Dentro de las obras marítimas, identificadas en el ÍTEM N°2, se encuentran la construcción de sentina y cámara de carga, perforaciones y tronaduras, excavación de zanjas, el perfilamiento del fondo marino, la instalación de tuberías, la construcción y hormigonado de torres de captación de agua de mar, y el relleno de zanjas en zonas de rompiente. Todas estas labores se llevan a cabo según lo planificado en el cronograma general de la etapa de construcción. Esta etapa tiene una duración planificada de varios meses [12][13].

Tabla 17. Cronograma de actividades en planificación de Obras Marítimas

Actividades	Mes 1-3	Mes 4-6	Mes 7-12	Mes 13-18	Mes 19-24	Mes 25-30
ÍTEM N°2: Construcción de Obras Marítimas						
Construcción de sentina y cámara de Carga		x				
Perforaciones y tronaduras		x	x			
Excavaciones de zanjas		x	x			
Perfilamiento de fondo marino		x	x			
Construcción y hormigonado de torres			x	x		
Instalación de Tuberías y torres de captación				x		
Relleno de Zanjas en Zona de Rompiente				x		
Operaciones finales y conexión a obras terrestres					x	

Fuente: Elaboración Propia

Para la ejecución de estas obras se utilizan equipos y maquinaria especializada, como dragas, para excavaciones submarinas, grúas flotantes, para la ubicación de estructuras pesadas, camiones, para transporte de material, equipos de perforación submarina, para anclajes, y maquinaria pesada, como excavadoras, para zonas costeras.[8]

Cabe informar que en estas actividades también se presentan emisiones significativas: material particulado **MP10** y **MP2.5**, producto del movimiento de tierra y resuspensión. Además, se generan emisiones de CO₂, NO_x, y SO₂, producto del uso intensivo de maquinaria y vehículos. También se generan residuos, tales como residuos peligrosos: aceites usados, combustibles derramados y desechos de soldadura.[1][8]

Todos los desechos han sido identificados y deberán ser tratados conforme a la normativa ambiental chilena. Los principales impactos de estas obras son acuáticos. Esto se debe a la turbidez generada con sedimentación y al ruido submarino generado por algunos equipos. Para reducir al mínimo estos efectos se utilizan barreras y decantador, se monitorea la calidad del agua y se ejecuta un plan de rescate y relocalización. Todo esto de acuerdo a **ley 19.300** y **D.S. N°5**, entre otras., y es fiscalizado por **SERNAPESCA** y otras autoridades pertinentes.[12][13]

3.6.1 Construcción de Sentina y cámara de carga

Son obras marítimas, imprescindibles para el funcionamiento hidráulico del sistema de captación y descarga de la planta desaladora. Son estructuras de hormigón armado que incluyen tuberías y una bomba sumergible, diseñadas para el manejo de la salmuera, los flujos de lavado y los lodos producidos.[12][15]

La etapa también conlleva importantes impactos ambientales, en términos de contaminación aérea, acuática, ruido submarino y residuos.

En relación a los últimos, se incluyen residuos peligrosos, tales como aceites usados, materiales de soldadura, explosivos sobrantes de la tronadura y derrames de combustibles; y residuos sólidos no peligrosos, como parte del material de excavación y construcción, depositado en rellenos sanitarios debidamente autorizados.[12][15]

En términos de las actividades principales, destacan:

1. **Excavaciones:** La tierra costera se remueve en terracetas para alcanzar los niveles necesarios, responsable del uso de tronaduras.[13]
2. **Obras civiles:** Construcción de estructuras de hormigón y sistemas hidráulicos, que están diseñados conforme a normativa.[13]
3. **Instalaciones mecánicas:** Colocación de tuberías, bombas y sistemas de captación.[13]

Para la mitigación, se emplean los sistemas para contención del sedimento, protocolos de rescate de la fauna marina, y monitoreo continuo hídrico y de aire, en cumplimiento de normativas como **D.S. N° 90/2000. SERNAPESCA** también supervisa el manejo relativo a la fauna.[1][15]

3.6.2 Perforaciones y tronaduras

Posteriormente, la traza de las tuberías ya definida de impulsión de agua de mar y descarga de salmuera, las zanjas abiertas se transmitirán para ejecutar dichas zanjas abiertas para el alojamiento de tales sistemas. Dicha zanja abierta se atenderá con maquinaria pesada, siendo principalmente excavadoras. En caso de que se presenten formaciones rocosas, se deberá asegurar una excavadora con picotón como etapa inicial para fracturarlas. De presentarse volúmenes considerables de roca, la tronadura se efectuará con una tronadura controlada, realizada por una empresa especializada competente. Lo antepuesto, se entiende, que la tronadura controlada es una técnica que fractura roca en puntos específicos a través de explosivos que aseguran mayor precisión y menor impacto a sus alrededores.[12][15]

Durante tal traza, se rellenará la zanja con la primera capa de arena extraída, para dotar soporte a los tubos que, de igual manera son montados en un solo marco y soldados mediante tramos. Finalmente, el terreno aledaño será compactado mediante material elegido para satisfacer la estabilidad de tal sistema.[12][15]

Durante la ejecución de las perforaciones y tronaduras, se generarán los siguientes impactos ambientales:

1. **Ruido y vibraciones:** por el uso de explosivos, los cuales podrían afectar a la fauna terrestre y marina, además de a las comunidades aledañas. El nivel de ruido será monitoreado de forma constante para efectuarlo conforme a los límites establecidos por el **D.S. N° 38/2012** y la experiencia alemana en tronadura, con valores máximos permitidos de referencia para proyectos de esta envergadura.[8][15]

Tabla 18. Niveles de Potencia Acústica L_w estimados para la etapa de construcción del

Actividad	Obras marítimas y planta elevadora de agua de mar	Edificio de procesos
Tronaduras	135 dBA	135 dBA

Fuente: Elaboración Propia

2. **Contaminación del aire:** emisión de material particulado fino MP10, MP2.5 por el movimiento de tierras y explosiones, los cuales son rápidamente dispersados por la condición de aridez del clima en la zona.[8]

3. **Impacto en suelos:** alteración del suelo costero y posible compactación del terreno por la utilización de maquinaria pesada.[8]

4. **Impactos en aguas:** perturbación de la turbidez en curso de agua próximo a la ocurrencia de dispersión de sedimentos.[8]

5. **Residuos peligrosos:** restos de explosivos sin detonar y aceites utilizados, provenientes de maquinaria, se indica que deben ser manejados con sumo cuidado para evitar posibles contaminaciones.[8]

3.6.3 Excavaciones de zanjas

La zanja es el tipo de excavación requerida para el despliegue de las tuberías de impulsión del agua marina y sus correspondientes líneas de descarga de la salmuera. Esta se realiza con maquinaria pesada de zanjas abierta, donde se emplea una excavadora. Sin embargo, en el caso de formaciones rocosas, se hará uso de una excavadora de picotón y, si hiciera falta, de tronaduras controladas, aunque estas últimas serán realizadas por profesionales preparados para ello. Durante la excavación, se rellenará el fondo con arena para sostener las tuberías, las cuales serán colocadas y soldadas por secciones. Por último, se compactará todo el terreno con material seleccionado para que este pueda soportar su propio peso.[8][15]

3.6.4 Perfilamiento de fondo marino

Es la preparación de la superficie del lecho marino antes de la instalación de las estructuras, como las tuberías de captación y descarga. Puede ser nivelar, alisar o ajustar la topografía para la correcta colocación y estabilidad estructural de las instalaciones. Se realiza con maquinaria especial como dragas, así como equipos de perfilado submarino. Es una operación crítica en los planes marítimos porque garantiza el soporte adecuado y uniforme de las estructuras, así como la protección contra cualquier flexión o corrientes subterráneas que puedan comprometer su seguridad.[8][15]

Se generarán los siguientes impactos ambientales:

1. **Turbidez del Agua:** La remoción de sedimentos durante el perfilamiento genera un aumento de la turbidez, lo que puede afectar la flora y fauna marina al reducir la penetración de luz y alterar los hábitats bentónicos.[8]
2. **Ruido y Vibraciones Submarinas:** Las operaciones generan ruido que puede impactar a especies marinas sensibles, como mamíferos marinos y peces.[8]
3. **Alteración de Ecosistemas:** El movimiento de sedimentos puede modificar hábitats marinos y provocar desplazamiento de especies.[8]

3.6.5 Construcción y hormigonado de torres

Las torres son estructuras de soporte construidas para ejecutar funciones clave en el sistema de alimentación y drenaje. En una planta desalinizadora, estas pueden proteger como punto de entrada del agua de mar o del sistema de drenaje de desechos de sal, distribuidos de manera más segura y protegiendo las tuberías que lo trasladan. El diseño denso y fuerte de las estructuras implica que estas sean capaces de sostenerse en condiciones marinas adversas, como corrientes, ondas y corrosión. [8][15]

Su construcción puede abarcar emisiones de partículas y gases al aire, además de ruido y vibraciones producidas por la maquinaria pesada, como el mezclado de hormigón y el

transporte de materiales. La construcción también altera el suelo costero y provoca un aumento en la turbidez del agua debido al movimiento intermedio de sedimentos.[8][15]

3.6.6 Instalación de Tuberías y torres de captación

Por otro lado, en la construcción de una planta desaladora, esta actividad es “Captar” el ingreso del agua de mar al sistema. La tubería de captación conduce el agua desde la costa o el océano hasta las instalaciones de pretratamiento. Mientras que las torres de captación protegerán la tubería y permitirán que el flujo entrante se controle y se maneje en términos de flujo de velocidad, al tiempo que minimiza la cantidad de sedimentos y organismos biológicos que ingresan al sistema. Los sistemas a menudo también incluyen rejillas o algún tipo de filtrado como un mecanismo de protección inicial contra daños a la tubería u otros sistemas cercanos a la tubería y reducir el impacto en la biología marina.[8][15]

1. **Preparación del fondo marino:** Antes de la instalación, se realiza el perfilamiento del fondo marino para nivelar la superficie y asegurar que las tuberías queden correctamente posicionadas.[8]
2. **Colocación de tuberías:** Las tuberías, previamente ensambladas y soldadas en tramos, son transportadas al sitio y colocadas en su posición final utilizando grúas flotantes y barcasas.[8]
3. **Instalación de torres de captación:** Se construyen con materiales resistentes a la corrosión, como hormigón armado y acero, y se instalan sobre bases previamente preparadas en el lecho marino.[8]
4. **Anclaje y fijación:** Se utilizan sistemas de anclaje para garantizar que las estructuras permanezcan estables frente a corrientes marinas y oleajes.[8]
5. **Pruebas y ajustes:** Una vez instaladas, se realizan pruebas de funcionamiento y ajustes necesarios para garantizar que el sistema opere correctamente.[8][15]

3.6.7 Relleno de Zanjas en Zona de Rompiente

Para resguardar el entorno en la instalación de tuberías submarinas en áreas de rompiente, se rellenan las zanjas cavadas previamente en la cercanía de la costa. El objetivo de esta etapa es proteger las tuberías instaladas de manera segura, fortalecerlas frente al flujo y el flujo marítimo, y parcialmente redirigir el territorio alterado por la construcción. Para esta etapa, debemos seleccionar una granulometría de arena o grava preferente y asegurarnos de que sea compatible con el mar. El relleno total de la zanja debe ser uniforme para evitar la aparición de puntos que generan tensión en la tubería y reducir el riesgo de desplazamiento.[8][15]

1. **Generación de turbidez:** El movimiento de sedimentos durante el relleno puede aumentar la turbidez del agua, afectando la flora y fauna marina al reducir la penetración de luz y alterar la calidad del hábitat.[8][15]
2. **Alteración del ecosistema bentónico:** Los organismos que habitan en el fondo marino pueden ser desplazados o sufrir daños debido a la redistribución de materiales.
3. **Ruido y vibraciones:** La maquinaria utilizada en el proceso puede generar ruido y vibraciones que afectan a las especies marinas cercanas.[8][15]

4. **Posibles derrames:** Si se emplea maquinaria pesada, existe el riesgo de derrames de aceites o combustibles.[8][15]

3.6.8 Operaciones finales y conexión a obras terrestres

Las etapas de las obras finales y la conexión a las obras terrestres son donde las estructuras marítimas se integran con las instalaciones en tierra. Estas actividades garantizan que los sistemas de captación y descarga funcionen junto con la planta desalinizadora para transportar el agua de mar hacia los procesos de tratamiento y devolver la salmuera al océano. [15]

En esta etapa, se llevan a cabo trabajos como:

1. **Alineación y sujeción de tuberías:** las tuberías que conectan el sistema marítimo con las obras terrestres se alinean y se fijan a las estructuras de soporte.[8]
2. **Pruebas hidráulicas y de estanqueidad:** se realizan para verificar que no haya fugas y que los sistemas puedan funcionar bajo la presión requerida.[8]
3. **Interconexión eléctrica y mecánica:** las bombas, válvulas y sistemas de control se conectan entre las dos áreas para permitir el flujo continuo y controlado de agua.[8]

3.7 Habilitación de acceso y caminos interiores

En el último ITEM N°3 la cual consiste el acceso principal a la planta se ha diseñado ante el alto flujo de vehículos pesados que transitan durante esta fase de construcción y también durante la operación de la planta. La calzada estará compuesta por un carril reversible de 7 metros, con bermas pavimentadas de 2,5 metros de ancho a cada lado, longitud aproximada de 1,2 km desde la Route 1 hasta la entrada principal de la planta.[13] Este accesorio se desarrollará con señalización vertical y horizontal según lo establecido en el último Manual de Carreteras, así como iluminación LED para operaciones nocturnas seguras. Uno de los elementos más complejos de esta fase será el cruce subterráneo bajo la Ruta 1. La estructura se ha proyectado para permitir el paso seguro de vehículos pesados y tuberías de servicios, medirá 8 metros de ancho por 5 metros de altura, lo que permite el tráfico en doble calzada. La construcción se llevará a cabo en modo cut-and-cover, lo que minimizará la interrupción en las operaciones de Ruta 1. El túnel estará equipado con ventilación forzada, iluminación de emergencia, y drenaje para evitar.[13][29]

Tabla 19. Cronograma de actividades de habilitación de acceso y caminos interiores

Actividades	Mes 1-3	Mes 4-6	Mes 7-12	Mes 13-18	Mes 19-24	Mes 25-30
ITEM N°3: Habilitación de acceso y caminos interiores						
Construcción de cruce de Ruta 1					X	X
Construcción de acceso a Ruta 1					X	X

Este ITEM N°3 se rige principalmente por el **Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas (MOP)**, que establece los estándares técnicos y de seguridad para el diseño y construcción de infraestructura vial.[29] Complementariamente, se aplican las disposiciones del **Decreto Supremo N° 47 de 1992**, Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, que regula aspectos relacionados con la planificación urbana y las obras de infraestructura.[39]

La normativa de seguridad vial se aborda mediante la implementación del Manual de Señalización de Tránsito del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, que establece los requisitos para la señalización vertical y horizontal. Este aspecto es particularmente importante debido al alto flujo de vehículos pesados que transitarán durante la construcción y operación de la planta. La iluminación del acceso se diseña según la **Norma de Iluminación de Carreteras NCh 3261:2012**, que establece los niveles mínimos de iluminación requeridos para garantizar la seguridad del tránsito nocturno. La normativa de seguridad vial se aborda mediante la implementación del Manual de Señalización de Tránsito del Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones, que establece los requisitos para la señalización vertical y horizontal.[30] Este aspecto es particularmente importante debido al alto flujo de vehículos pesados que transitarán durante la construcción y operación de la planta. La iluminación del acceso se diseña según la **Norma de Iluminación de Carreteras NCh 3261:2012**, que establece los niveles mínimos de iluminación requeridos para garantizar la seguridad del tránsito nocturno.[30]

3.7.1 Construcción de cruce de Ruta 1

Como se mencionó anteriormente, la construcción del cruce de la Ruta 1 se considera una de las obras de infraestructura crítica para la Planta Desalinizadora de Tocopilla. Diseñado de acuerdo con las especificaciones del Manual de carreteras Volumen 4, el cruce subterráneo se construirá sección transversal mediante el método cut-and-cover para garantizar una interrupción mínima en la Ruta 1.[29]

El cruce subterráneo tendrá 8 metros de ancho y 5 metros de altura libre, suficiente para el tráfico pesado en cada dirección y varios servicios auxiliares. La construcción del cruce subterráneo implicará la implementación de desvíos temporales del tráfico, excavación controlada de hasta 7 metros de profundidad. El elemento estructural principal del cruce subterráneo estará formado por muros de hormigón armado H-35 de 40 cm de espesor con cimentaciones a una profundidad de 48 metros, diseñados para soportar cargas pesadas y de presión lateral. Techo curvo y losa superior de hormigón armado H-35 de 60 cm de espesor, con una pendiente de 2%, para permitir un drenaje más eficiente.[40]

El sistema de impermeabilización estará compuesto por membranas asfálticas de alta gama con un sistema de drenaje de tubos de PVC de 200 mm de diámetro. La ventilación será mecánica con ventiladores axiales de 5,000 CFMs y una iluminación LED diseñados de acuerdo con TLS. Los interiores serán reflectantes con montajes de señalización según el SST. [29][30]

Tabla 20. Especificaciones técnicas del cruce subterráneo

Componente	Especificación	Normativa Aplicable
Dimensiones	8m ancho × 5m alto × 30m longitud	Manual de Carreteras Vol. 4
Hormigón estructural	H-35, resistencia 35 MPa	NCh170:2016
Acero de Refuerzo	A630-420H, fy=420 MPa	NCh204:2006
Impermeabilización	Membrana asfáltica de 4 mm	NCh2252:2014
Sistema de ventilación	2 ventiladores de 5000 CFM	Normas ASHRAE
Iluminación	LED 200 lux promedio	NCh Elec. 4/2003

Fuente: Elaboración Propia

El sistema de drenaje del acceso incluye cunetas revestidas en concreto y alcantarillas de concreto armado cada 50 metros en zonas críticas, diseñadas para un período de retorno de 50 años. La señalización vertical y horizontal se implementará según el Manual de Señalización de Tránsito, incluyendo elementos de seguridad como barreras de contención en zonas de riesgo y demarcación reflectante para operación nocturna. [29]

Tabla 21. Equipos y Maquinaria para Construcción del Cruce

Equipo	Cantidad	Función principal	Rendimiento
Excavadora	2	Excavación principal	80 m³/hora
Retroexcavadora	2	Excavación de detalle	30 m³/hora
Bomba de hormigón	1	Colocación de hormigón	60 m³/hora
Grúa móvil	1	Izaje de elementos	-
Generadores	2	Suministro eléctrico	-

Fuente: Elaboración Propia

3.7.2 Construcción de acceso a Ruta 1

El acceso a la Ruta 1 constituye una vía bidireccional de 7 metros de ancho que conecta a la planta desalinizadora con la infraestructura vial existente. La longitud del acceso es de 1,2 kilómetros, y su construcción incluirá bermas pavimentadas de 2.5 metros a ambos lados, según las disposiciones del manual de carreteras para vías industriales. El trazado de la vía incluye curvas horizontales con radios mínimos de 100 metros y pendientes máximas de 6%, diseño óptimo para un tránsito seguro de camiones de transporte pesado.[40][29]

La estructura del pavimento considera un tráfico de diseño de 1,5 millones de ejes equivalentes durante su vida útil. Se encuentra compuesta por una subbase granular de 40 centímetros, base estabilizada de 30 centímetros y carpeta de rodadura de hormigón H-35 de 20 centímetros. Las bermas se constituyen de una carpeta asfáltica de 5 centímetros sobre una subbase granular de 25 centímetros.[40]

El drenaje longitudinal considera cunetas revestidas en concreto de sección triangular de 1 metro de ancho por 0.3 metros de profundidad y alcantarillas de concreto armado cada 50 metros en los puntos bajos. La señalización vertical y la horizontal cumplen con el manual de señalización de tránsito, incluyendo demarcación reflectantes, tachas y barreras de contención según corresponda. La iluminación es realizada por postes LED de 9 metros de altura espaciados cada 30 metros.[40][30]

Tabla 22. Estructura del Pavimento en Acceso

Capa	Estimador (cm)	Material	Especificación o Normativa
Carpeta de Rodadura	20	Hormigón H-35	NCh170:2016
Base Estabilizada	30	Material chancado	Manual de Carreteras
Subbase	40	Material granular	Manual de Carreteras
Subrasante	-	Suelo natural compactado	Proctor modificado al 95 %

Fuente: Elaboración Propia

Durante la construcción, se implementará un riguroso plan de control de calidad que incluye ensayos de materiales, controles topográficos y verificación de espesores y niveles. Las medidas de mitigación ambiental incluyen el control de polvo mediante riego periódico, gestión de residuos según normativa vigente y control de ruido en cumplimiento del DS N°38/2011 del MMA. La seguridad durante la construcción se manejará mediante un plan integral que incluye señalización temporal, personal de control de tráfico y procedimientos de emergencia.[18]

Tabla 23. Volúmenes de Obra Principales

Artículo	Unidad	Cantidad
Movimiento de tierras	m3	15.000
Hormigón estructural	m3	2.500
Base estabilizada	m3	3.600
Subbase granular	m3	4.800
Carpeta asfáltica	m2	6.000

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO 4: EVALUACIÓN DE ASPECTOS E IMPACTOS AMBIENTALES

4.1 Metodología de evaluación

Para evaluar los impactos ambientales durante toda la fase de construcción de la planta desaladora de Tocopilla se utilizó una metodología sistemática basada en los siguientes criterios.

4.1.1 Identificación de aspectos ambientales

Siguiendo los lineamientos del DS N°40/2012 y la Guía para Plantas Desalinizadoras del SEIA, se utilizó un análisis sistemático de las actividades de construcción y sus interacciones con el medio ambiente para identificar los factores ambientales durante la fase de construcción de la desalinizadora Tocopilla. De acuerdo con los lineamientos del DS N°40/2012 y la Guía para Plantas Desalinizadoras del SEIA, se utilizó un análisis sistemático de las actividades de construcción y sus interacciones con el medio ambiente para identificar los factores ambientales durante la fase de construcción de la desalinizadora Tocopilla.

4.1.2 Emisiones atmosféricas

Para cuantificar con precisión las emisiones atmosféricas asociadas a la Planta desaladora de Tocopilla., hemos desarrollado una metodología integral que abarca tanto la fase de construcción como la de operación. Nuestro enfoque se basa en la implementación de prácticas chilenas que son adaptadas a las características específicas del Proyecto y su entorno.[14]

La estimación de emisiones del Proyecto se llevó a cabo implementando los factores de emisión y fórmulas propuestas por la **Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (USEPA)** en el documento **AP-42 Quinta Edición**, lo cual se complementa y mantiene como referencia lo planteado por la **SEREMI del Medio Ambiente de la Región Antofagasta (RA)** en el informe [14]

4.1.3 Estimación de emisiones

La correcta cuantificación de las emisiones atmosféricas es un componente crítico en la evaluación del Planta desaladora de Tocopilla. Este proceso requiere un enfoque sistemático y una comprensión cuidadosa de las múltiples tareas del Proyecto y sus posibles impactos en la calidad del aire.[15]

4.1.4 Tasas de emisión

El concepto clave de nuestra metodología es la tasa de emisión, que es la cantidad de contaminante liberado en la atmósfera por tiempo.[14] Para calcular estas tasas, utilizamos la ecuación general para el cálculo de emisiones que se presenta a continuación y que, aunque parece sencilla, integra numerosas variables específicas del Proyecto.

Figura 5. Parámetros y Variables de la Ecuación General para el Cálculo de Emisiones Atmosféricas en Construcción

$$E = F_e \times N_a \times \left(1 - \frac{E_a}{100}\right)$$

Fuente: Elaboración Propia

La ecuación es la fórmula general para el cálculo de emisiones atmosféricas, establecida por la EPA (Environmental Protection Agency) en su documento AP-42 para la estimación de emisiones. Esta metodología es ampliamente utilizada y reconocida en la evaluación de impacto ambiental de proyectos de construcción.[14][15]

Tabla 24. Componentes y Definiciones de la Ecuación General para Estimación de Emisiones Según Metodología EPA AP-42

<i>E</i>	Emisión
<i>Fe</i>	Factor de emisión
<i>Na</i>	Nivel de actividad
<i>Ea</i>	Eficiencia de abatimiento

Fuente: Elaboración Propia

En el caso de la planta desaladora, esta ecuación se utiliza para estimar emisiones de MP10, MP2.5 y gases de combustión durante la fase de construcción.

Tabla 25. Metodología de Cálculo de Emisiones Atmosféricas

Tipo de Emisión	Fórmula de Cálculo	Factor de Emisión (FE)	Variables Consideradas	Referencia
Material Particulado por Movimiento de Tierras	$E = FE \times V \times (1 - ER/100)$	0.75 kg/m ³	- V: Volumen material movido (m ³) - ER: Eficiencia reducción (%) - H: Factor humedad	EPA AP-42 Cap. 13.2.4
Emisiones por Tránsito en Caminos No Pavimentados	$E = k(s/12)^a \times (W/3)^b \times (365-P)/365$	4.9 kg/VKT	- s: Contenido de finos - W: Peso vehículo - P: Días con precipitación	EPA AP-42 Cap. 13.2.2
Gases de Combustión Maquinaria	$E = FE \times P \times t \times N \times FC$	NOx: 6.9 g/kWh CO: 3.7 g/kWh	- P: Potencia (kW) - t: Tiempo operación - N: Número equipos - FC: Factor carga	EMEP/EEA 2019
Emisiones por Manipulación de Material	$E = k \times 0.0016 \times (U/2.2)^{1.3} / (M/2)^{1.4}$	0.35 kg/ton	- U: Velocidad viento - M: Contenido humedad - k: Factor tamaño	EPA AP-42 Cap. 13.2.4

Emisiones de Vehículos en Caminos Pavimentados	$E = k \times (sL/2)^{0.91} \times (W/3)^{1.02}$	0.62 g/VKT	- sL: Carga sedimentos - W: Peso vehículo - k: Factor partículas	EPA AP-42 Cap. 13.2.1
--	--	------------	--	-----------------------

Fuente: Elaboración Propia en base al Informe EPA AP-42

4.1.5 Actividades generadoras de emisiones atmosféricas

Se han identificado diversas actividades que contribuyen a la generación de emisiones atmosféricas, es decir, todas las actividades previstas y aquellas relacionadas son las fuentes de contaminación más importantes que podrían tener un impacto en la calidad del aire en el área del Proyecto y sus alrededores. [14][15]

Esta división permitirá evaluar los impactos de manera más precisa y específica para cada fase, lo que facilitará la implementación de medidas de mitigación apropiadas de ser requeridas. Durante la fase de construcción, que como se mostró en el cronograma general se espera que dure 30 meses, se llevarán a cabo diversas actividades que generan emisiones y cada una de ellas tiene el potencial de dispersar ciertas sustancias a la atmósfera, en particular MP10 y MP2.5 y gases de combustión como NOx, SOx, NH3, CO y COV.[14]

4.1.6 Línea de base calidad del aire Tocopilla

El uso de esta información permitió caracterizar este componente considerando la información de concentraciones de material particulado MP10 y MP2.5 descrita en el **Informe de Calidad del Aire Región de Antofagasta**, preparado por la SEREMI de Medio Ambiente en 2013, la que se refiere a la ciudad de Tocopilla, y la información proveniente del SINCA.[15]

Tabla 26. Línea de base calidad del aire Tocopilla

Contaminante	Estadístico	Estaciones de Calidad del Aire				Valor Norma
		Gobernación	Escuela E-10	Gendarmería	Bomberos	
MP10	24 horas	79	90	85	-	150
	Anual	49	50	48	-	50
MP2.5	24 horas	-	40	34	34	50
	Anual	-	20	22	22	20

Fuente: Elaboración propia en base al Informe de Calidad del Aire Región de Antofagasta, SEREMI de Medio Ambiente 2013 y Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire para concentraciones de MP10 de la Estación Gendarmería.

Las emisiones atmosféricas que se componen de diversos elementos. Primero se disponen de las emisiones provenientes de fuentes puntuales, las cuales son enviadas al **RETC** por el

Ministerio de Salud a través del Sistema de Declaración de Emisiones de Fuentes Fijas o **Formulario 138 (F138)**, responsabilidad definida en el **D.S. N° 138/2005 de MINSAL**. [15]

Durante el período de construcción, que se extenderá por 30 meses, se prevén las siguientes actividades generadoras de emisión

Tabla 27. Actividades generadoras de emisiones en la fase de construcción.

Capítulo de la Guía	Actividad	Detalle de la Actividad	Contaminantes
2. Demolición	Demolición	Derribo y remoción de estructuras existentes usando excavadoras, martillos hidráulicos y retroexcavadoras.	MP10 y MP2.5
3. Movimiento de Tierra	Perforación	Realización de perforaciones controladas usando equipos de perforación y picotón para instalación de tuberías y estructuras en zonas rocosas	MP10 y MP2.5
	Escarpe	Remoción de la capa superficial del suelo a 30 cm de profundidad usando excavadoras con cucharas de precisión en un área de 3.500 m ²	MP10 y MP2.5
	Excavaciones	Movimiento de tierra usando excavadoras y maquinaria pesada para construcción de zanjas, cámaras y fundaciones	MP10 y MP2.5
	Tronadura	Fracturamiento controlado de roca usando explosivos en zonas de alta dureza, realizado por empresa especializada	MP10 y MP2.5
	Relleno y compactación	Relleno de zanjas con material seleccionado y compactación usando rodillos compactadores	MP10 y MP2.5
4. Resuspensión por Tránsito de Vehículos	Tránsito de Vehículos por Vías Pavimentadas	Resuspensión de las partículas que se encuentran en los caminos pavimentados producto del flujo vehicular para transporte de residuos, personal e insumos.	MP10 y MP2.5
5. Combustión de Vehículos	Vehículos Livianos	Transporte diario de personal	MP10, MP2.5, NOx, SOx, CO y HC
	Vehículos Pesados	Retiro semanal de residuos de construcción.	MP10, MP2.5, NOx, SOx, CO y HC

6. Combustión de Maquinaria Fuera de Ruta	Retroexcavadora	Operación continua de maquinaria pesada para excavaciones, movimiento de materiales y carga. Incluye retroexcavadoras, excavadoras, bulldozers y cargadores frontales.	MP10, MP2.5, NOx, y CO
---	-----------------	--	------------------------

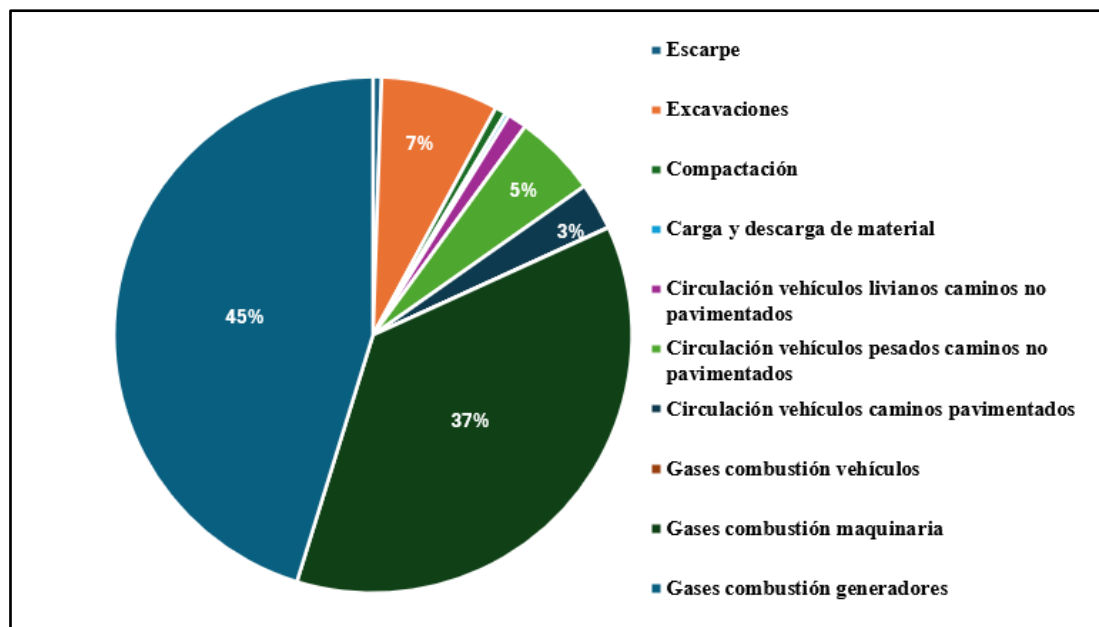
Fuente: Elaboración Propia de acuerdo con la metodología EPA

Tabla 28. Emisiones a la atmósfera asociadas a la fase de Construcción – Año 1

Fuentes de emisión	Emisión [ton/Año 1]					
	MP ₁₀	MP _{2.5}	CO	HC	NO _x	SO ₂
Escarpe	0,04	---	---	---	---	---
Excavaciones	0,55	0,28	---	---	---	---
Compactación	0,05	0,005	---	---	---	---
Carga y descarga de material	0,02	0,003	---	---	---	---
Circulación vehículos livianos caminos no pavimentados	0,09	0,01	---	---	---	---
Circulación vehículos pesados caminos no pavimentados	0,39	0,04	---	---	---	---
Circulación vehículos caminos pavimentados	0,22	0,05	---	---	---	---
Gases combustión vehículos	0,002	---	0,02	0,004	0,08	---
Gases combustión maquinaria	2,74	---	7,73	3,50	34,69	---
Gases combustión generadores	3,39	---	4,79		22,17	2,74
Total [ton/Año 1]	7,48	0,39	12,54	3,50	56,95	2,74

Fuente: Elaboración Propia de acuerdo con la metodología EPA

Gráfico 1. Emisión [ton/Año 1] MP₁₀



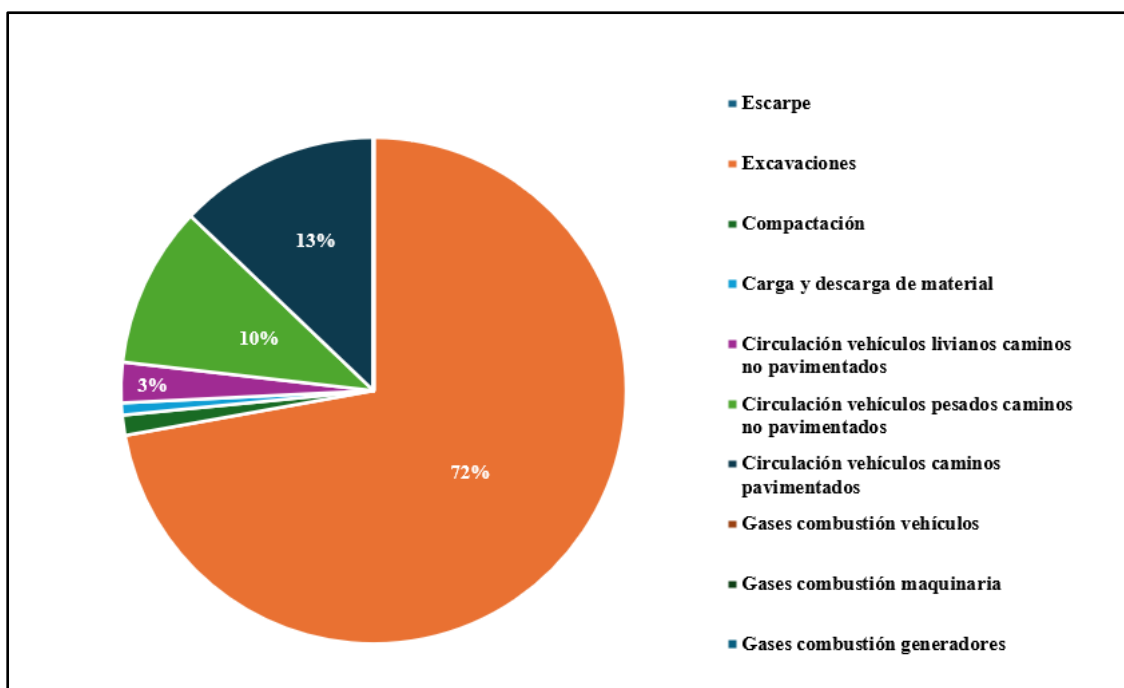
Fuente: Elaboración Propia de acuerdo con la metodología EPA

Este diagrama circular muestra el reparto porcentual de las emisiones de Material Particulado (MP₁₀) durante el primer año de edificación de la planta de desalación. Los gases de combustión de generadores constituyen el **45%** de las emisiones totales, seguidos por los gases de combustión de maquinaria con el **37%**, y las excavaciones que constituyen el **7%** de las emisiones totales.[14]

El elevado porcentaje de emisiones derivadas de generadores y maquinaria (82% en total) evidencia la intensidad de las actividades de construcción durante el primer año, en el que se utilizan constantemente equipos pesados y generadores eléctricos. Las tareas secundarias como la compactación (5%), el tránsito de vehículos en diferentes tipos de carreteras (3%) y otras actividades como el escarpe, la carga y descarga de materiales, aportan en una proporción menor al total de emisiones de MP₁₀. [14]

Esta disposición es propia de la etapa inicial de edificación de una planta de desalación, en la que la utilización intensiva de maquinaria y aparatos de producción eléctrica son esenciales para crear la infraestructura fundamental del proyecto. Las cifras se derivan de las mediciones y proyecciones efectuadas de acuerdo con la **metodología EPA**, que toma en cuenta factores de emisión particulares para cada clase de actividad de construcción. [14][15]

Gráfico 2. Emisión [ton/Año 1] MP_{2,5}



Fuente: Elaboración Propia de acuerdo con la metodología EPA

Tabla 29. Emisiones a la atmósfera asociadas a la fase de Construcción – Año 2

Fuentes de emisión	Emisión [ton/Año 2]					
	MP ₁₀	MP _{2,5}	CO	HC	NO _x	SO ₂
Escarpe	---	---	---	---	---	---
Excavaciones	---	---	---	---	---	---
Compactación	---	---	---	---	---	---
Carga y descarga de material	---	---	---	---	---	---
Circulación vehículos livianos caminos no pavimentados	---	---	---	---	---	---
Circulación vehículos pesados caminos no pavimentados	---	---	---	---	---	---
Circulación vehículos caminos pavimentados	0,17	0,04	---	---	---	---
Gases combustión vehículos	0,001	---	0,01	0,003	0,05	---
Gases combustión maquinaria	0,60	---	1,63	0,73	7,78	---

Gases combustión generadores	1,13	---	3,42	---	15,84	1,05
Total [ton/Año 2]	1,90	0,04	5,06	0,73	23,67	1,05

Fuente: Elaboración Propia de acuerdo con la metodología EPA

La significativa variación en las emisiones atmosféricas durante el Primer y Segundo Año de la edificación de la planta desaladora evidencia el progreso natural del proyecto de construcción. En el primer año, las tareas más duras como el traslado de tierras, excavaciones, preparación del terreno y edificación de accesos se intensifican, lo que demanda un uso intensivo de maquinaria pesada y produce más emisiones de partículas en suspensión y gases de combustión.[15]

Por otro lado, el segundo año presenta una disminución considerable en las emisiones ya que las actividades fundamentales de movimiento de tierra ya se han finalizado. En esta fase, la labor se enfoca en tareas más especializadas y menos arduas, tales como instalaciones y terminaciones. La pavimentación de las vías principales también ayuda a disminuir las emisiones de polvo, y la reducción en la necesidad de maquinaria pesada conduce a una reducción significativa en las emisiones de gases de combustión.[15]

Esta reducción de emisiones se manifiesta de manera evidente en la información: el MP10 disminuye de **7.48 a 1.90 ton/año**, los NOx de **56.95 a 23.67 ton/año**, y los gases de combustión de maquinaria se reducen de **2.74 a 0.60 ton/año** de MP10. Estos principios manifiestan la esencia de la sociedad.[15]

4.2 Generación de residuos

Dentro del marco de la edificación de una planta de desalación, la administración de desechos es un elemento crucial en la gestión ambiental del proyecto. Según la **NCh 3321:2017** "Caracterización de Residuos de Construcción", estos desechos se categorizan en diversas categorías dependiendo de su procedencia y riesgo. Principalmente, los desechos producidos durante la etapa de construcción abarcan residuos sólidos domésticos (RSD), residuos sólidos industriales no peligrosos (RSINP) y residuos peligrosos (RESPEL). [20]

De acuerdo con la **Guía MINVU** para la Gestión de Residuos de Construcción y Demolición, la evaluación de desechos se lleva a cabo teniendo en cuenta aspectos particulares por tipo de edificación industrial. Para un establecimiento de desalado, se siguen los estándares definidos en el **DS N°148/2003 MINSAL**, que específicamente regula la gestión de desechos peligrosos, y el Building Research Establishment (BRE), que determina factores de producción de 120-200 kg/m² para edificaciones industriales especializadas.[21]

En su guía "Construction Waste Management", la EPA (Agencia de Protección Ambiental) indica que para proyectos de infraestructura hídrica, se debe calcular la generación de desechos teniendo en cuenta tres factores clave: la superficie total de edificación, la duración del proyecto y la cantidad de empleados implicados. Para la situación particular de las plantas

desaladoras, se toma en cuenta un elemento adicional vinculado con las labores especializadas de instalación de membranas y aparatos de ósmosis inversa, que producen desechos específicos de estas instalaciones.[22]

Tabla 30. Caracterización y disposición de los residuos

Tipo de residuo	Caracterización cualitativa	Cantidad estimada	Disposición Temporal	Disposición Final
Residuos sólidos domésticos (RSD)	Durante la fase de construcción, el Proyecto generará RSD y asimilables, los que provendrán principalmente de las faenas de construcción y frentes de trabajo móviles. Estos residuos estarán compuestos principalmente de materia orgánica y, en un porcentaje menor, de otros componentes como papeles, cartones, plásticos, gomas, vidrios, metales.	15.6 ton/mes	Contenedores con tapa y herméticos.	Sitio de disposición autorizado.
Residuos sólidos industriales no peligrosos (RSINP)	Los RSINP que se producirán durante esta etapa, corresponderán principalmente a despuentes de aluminio y fierro, maderas, chatarra, restos de soldadura, plásticos, y madera de embalaje. Además se producirán escombros por la instalación de la tubería de agua potable	- 29.2 ton/mes - 2,800 m ³ escombros totales	Acopio temporalmente habilitado en cada una de las instalaciones de faena. Cabe destacar que los escombros no serán almacenados, serán retirados diariamente a un lugar de acopio autorizado.	Sitio de disposición autorizado.
Residuos peligrosos (RESPEL)	Los RESPEL que se generarán durante esta fase corresponderá a: <ul style="list-style-type: none"> ● Aceites usados ● Lubricantes usados ● Trapos con aceite y grasa ● Tarros de pintura 	0.088 ton/mes	Serán dispuestos en tambores y contenedores de	Será retirado por una empresa autorizada por la Seremi de Salud y dispuesto en un sitio de disposición autorizado.

Fuente: Elaboración Propia

Tabla 31. Cálculo estimado de generación de residuos

Tipo de residuo	Base de cálculo	Factores considerados	Cantidad estimada	Justificación
Residuos sólidos domésticos (RSD)	- 500 trabajadores (máximo) - 1.2 kg/persona/día - 26 días laborables/mes	-Factor de generación por persona - Días efectivos de trabajo - Turnos de trabajo	15.6 ton/mes	500 trabajadores × 1.2 kg/día × 26 días = 15,600 kg/mes = 15.6 ton/mes

Residuos sólidos industriales no peligrosos (RSINP)	- Área de construcción: 3,500 m ² - Factor de generación: 25 kg/m ² - Duración de obra: 30 meses	- Superficie de construcción - Tipo de construcción - Etapas constructivas	- 29.2 ton/mes - 2,800 m ³ escombros totales	$3,500 \text{ m}^2 \times 25 \text{ kg/m}^2 = 87,500 \text{ kg total}$ $87,500 \text{ kg} \div 30 \text{ meses} = \mathbf{29.2 \text{ ton/mes}}$ Escombros: $0.8 \text{ m}^3/\text{m}^2 \times 3,500 \text{ m}^2 = \mathbf{2,800 \text{ m}^3}$
Residuos peligrosos (RESPEL)	- Factor de 0.3% del total de residuos industriales - Actividades de mantenimiento - Materiales peligrosos usados	- Cantidad de maquinaria - Tipos de químicos usados - Frecuencia de mantenimiento	0.088 ton/mes	$29.2 \text{ ton/mes} \times 0.3\% = \mathbf{0.088 \text{ ton/mes de RESPEL}}$

Fuente:Elaboración Propia

4.3 Generación de ruido

Para describir el ruido que el Proyecto podría producir durante su etapa de edificación y así calcular su impacto en el área de influencia, se llevó a cabo un análisis sonoro minucioso. Los cálculos y el estudio de los datos se han llevado a cabo de acuerdo con las normas dictadas en el **D.S. 38/2011** del Ministerio del Medio Ambiente, reglamento que evalúa específicamente la emisión de ruidos incómodos producidos por fuentes estables hacia la comunidad. Además, la investigación se basa en el 6° Reglamento General Administrativo de la Ley Federal de Protección contra Inmisiones, en especial en su Indicación Técnica para la protección contra el ruido, publicada el 26 de agosto de 1998, que define los criterios para medir los niveles de inmisión de ruido causados por las tronaduras.[17][18]

4.3.1 Estándares de ruido

El Ministerio del Medio Ambiente ha elaborado los Mapas de Ruido. Los hallazgos de esta línea son los siguientes: de trabajo se contrastan con los estándares que la OCDE establece como aceptables e inaceptables, tanto en términos de aceptabilidad como de inaceptabilidad para la jornada diurna y nocturna.[17][18]

Tabla 32. Estándares OCDE.

Periodo	Aceptable	Inaceptable
Diurno	Menor a 65 dB	Mayor o igual a 65 dB
Nocturno	Menor a 55 dB	Mayor o igual a 55 dB

Fuente: MMA (2022).

La caracterización acústica se desarrolla mediante un proceso sistemático que incluye mediciones in situ utilizando sonómetros integradores clase 1, debidamente calibrados antes y después de cada medición. Estas mediciones se realizan en períodos representativos de la operación, considerando las condiciones meteorológicas y las variaciones típicas de las actividades constructivas. Los puntos de medición se establecen estratégicamente, incluyendo

receptores sensibles cercanos al proyecto, límites del área de influencia y puntos de control establecidos por la normativa vigente.[17]

El estudio toma en cuenta varios elementos técnicos como el nivel de presión sonora continuo equivalente (NPSeq), incluyendo las correcciones requeridas por ruido de fondo y los factores de penalización de acuerdo a las particularidades del ruido producido. Además, se analizan las condiciones de propagación teniendo en cuenta la topografía del sitio y las propiedades físicas del ambiente. Para garantizar la observancia de las normas, se definen límites máximos permitidos diferenciados por horario, siendo 60 dBA para la jornada diurna (7:00 - 21:00 hrs) y 50 dBA para la jornada nocturna (21:00 - 7:00 hrs).[17][35]

Las principales actividades asociadas al Proyecto que pueden, durante su fase de construcción, constituir una fuente de emisión acústica al entorno, han sido identificadas y medidas, estableciéndose sus niveles de potencia acústica (L_w dBA) para diferentes áreas del proyecto.[35] Estos datos se presentan de manera detallada en la **Tabla 33**, donde se especifican los niveles de ruido generados por cada tipo de maquinaria y equipo en las distintas zonas de trabajo, incluyendo obras marítimas, edificio de procesos y área de tubería de agua potable. Esta información resulta fundamental para la planificación e implementación de medidas de control y mitigación, que incluyen la instalación de barreras acústicas, restricciones horarias para actividades particularmente ruidosas, programas de mantenimiento preventivo de maquinaria y un sistema de monitoreo continuo en puntos críticos del proyecto.[17]

Tabla 33. Niveles de Potencia Acústica L_w estimados para la etapa de construcción del Proyecto

Vehículo, maquinaria o equipo	Actividad	Obras marítimas y planta elevadora de agua de mar	Edificio de procesos	Tubería de agua potable
Camión tolva	Movimiento de material	98	103	98
Camión mixer	Transporte de hormigón	99	99	---
Grúas	Movimiento de material en general	---	104	---
Betoneras	Elaboración de hormigón	99	104	86
Retroexcavadoras	Formación de plataformas y movimiento de tierra	100	100	---
Excavadoras	Movimiento de tierra	98	98	89
Camión aljibe	Riego rellenos, humectación de caminos no pavimentados	100	100	---

Fuente:Elaboración Propia

Nota: Los valores están expresados en dBA (decibeles ponderados A) y representan el nivel de potencia acústica L_w para cada tipo de maquinaria en las diferentes áreas del proyecto.

4.4 Valoración y jerarquización de impacto

Durante la etapa de edificación de la Planta Desalinizadora, es necesario utilizar un método sistemático para valorar cada impacto detectado. Se emplean cuatro criterios fundamentales que, en su totalidad, facilitan la determinación de la relevancia relativa de cada impacto y la priorización de las acciones de mitigación pertinentes.[31]

Para valorar y clasificar los efectos medioambientales durante la etapa de edificación de la Planta Desalinizadora de Tocopilla, se empleó un método fundamentado en los siguientes criterios de evaluación.[31]

Evaluación de criterios:

Magnitud (M): Intensidad de impacto o modificación del componente (1-4). Esta escala facilita la valoración del nivel de cambios que una actividad de construcción produce en un elemento ambiental concreto. Por ejemplo, las vibraciones provocadas por las tronaduras submarinas podrían tener una intensidad "Muy alta (4)" en la fauna marina, mientras que el ruido de maquinaria liviana podría ser categorizado como "Media (2)".[15][31]

Tabla 34. Categorización de Magnitud de Impactos Ambientales según Intensidad de Modificación del Componente Ambiental

Magnitud	Baja (1)
	Media (2)
	Alta (3)
	Muy alta (4)

Fuente: Elaboración Propia

Probabilidad (P): Expectativa de frecuencia del impacto (1-4). La probabilidad determina la probabilidad de que se produzca el impacto durante los 30 meses de edificación. Por ejemplo, sería "Cierto o Seguro (4)" si se emite material particulado debido al movimiento de tierras, mientras que un derrame accidental de combustible sería "Poco probable (2)".[15][31]

Tabla 35. Clasificación de Probabilidad de Ocurrencia de Impactos Ambientales en Fase de Construcción

Probabilidad	Improbable (1)
	Poco probable (2)
	Muy probable (3)
	Cierto o Seguro (4)

Fuente: Elaboración Propia

Significancia (S): Establece si el efecto es considerable (S) que requiere acciones de mitigación específicas, o no considerable (N) que se pueda controlar con medidas estándar de control.[15]

Duración: Temporal: Efectos reversibles que cesan al terminar la actividad (ej: ruido de construcción) y Permanente: Efectos que persisten después de la construcción (ej: modificación del lecho marino)[15]

4.4.1 Matriz de Impacto Ambiental - Fase de construcción de la Planta Desaladora

El instrumento sistemático de la Matriz de Impacto Ambiental, creado para la etapa de construcción de la Planta Desaladora de Tocopilla, facilita la identificación, valoración y organización de los posibles efectos ambientales del proyecto. Esta matriz examina la relación entre las actividades de construcción (estructuradas en tres elementos clave: colocación de trabajadores, obras marítimas y habilitación de accesos) y los diferentes elementos ambientales impactados (agua, aire, suelo, fauna, etc.).[31][15]

La matriz emplea indicadores de evaluación como la magnitud (M), la probabilidad (P), la significancia (S) y la duración para cada impacto detectado, y determina las acciones de mitigación pertinentes de acuerdo con la legislación ambiental en vigor. Esta herramienta es esencial para la administración ambiental del proyecto, pues facilita la priorización de medidas preventivas y correctivas durante los 30 meses de edificación.[15]

El desarrollo de una Matriz de Impacto Ambiental es una exigencia impuesta en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) mediante diversas herramientas regulatorias:

El Decreto N°40/2012 del Ministerio del Medio Ambiente, que ratifica el Reglamento del SEIA, dicta en su artículo 18 letra f) la necesidad esencial de incorporar la "predicción y evaluación del impacto ambiental del proyecto o actividad" en los Estudios de Impacto Ambiental (EIA).[31]

La "Guía para la Descripción de Proyectos de Plantas Desalinizadoras en el SEIA" indica la necesidad de elaborar una matriz que reconozca y examine de manera sistemática los efectos ambientales en todas las etapas del proyecto, incluyendo la fase de edificación.[15]

Además, la Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente requiere en su artículo 12 letra g) esta evaluación de impactos para proyectos que ingresan al SEIA. [32]

Esta matriz es una herramienta fundamental para que la autoridad ambiental pueda evaluar adecuadamente los potenciales impactos del proyecto y la idoneidad de las medidas de mitigación propuestas antes de otorgar la Resolución de Calificación Ambiental (RCA).[32]

Tabla 36. Matriz de Impacto Ambiental- Fase de construcción de la Planta Desaladora

Actividad/Aspecto Ambientales	Componente Afectado	Tipo de Impacto	M	P	S	Duración	Medida de mitigación
ITEM N°1: Sector Planta Desaladora Instalación de Faena y Campamento							
Generación de Residuos Sólidos	Suelo	Contaminación de residuos sólidos generado por la actividad de faena	2	3	N	Temporal	Residuos sólidos: Instalación de puntos de acopio de residuos sólidos, separados por tipo, con retiro cada 3 días. Residuos sólidos peligrosos: Serán segregado en el origen y dispuestos en contenedores plásticos o metálicos tapados, sellados y rotulados, para ser depositados finalmente en un sitio autorizado. Norma: D.S.N° 148/2003 y reportes de retiro por empresas autorizadas.
Ruido de maquinaria	Fauna terrestre	Aumenta el ruido (Puede afectar la fauna local y comunidades cercanas)	3	3	S	Temporal	Instalación de barreras acústicas de manera OSD de 3 metros Norma: D.S N°144/61
	Población	Aumenta el ruido (Puede afectar la fauna local y comunidades cercanas como tocopilla)	3	3	S	Temporal	Instalación de barreras acústicas de manera OSD de 3 metros Norma: D.S N°144/61
Actividad/Aspecto Ambientales	Componente Afectado	Tipo de Impacto	M	P	S	Duración	Medida de mitigación
ITEM N°2: Construcción de Obras Marítimas							
Construcción de sentina y cámara de Carga	Agua	Contaminación por vertido accidental de aceites	3	3	S	Permanente	Durante la construcción se implementará un sistema de entibación para contener el terreno y minimizar el área afectada. Se realizará un manejo ordenado de los materiales excavados, estableciendo áreas específicas de acopio temporal debidamente señalizadas y protegidas contra la erosión mediante mallas y cubiertas. El material extraído será reutilizado cuando sea técnicamente factible para el relleno posterior. Supervisión diaria documentada con registro fotográfico. Informes semanales de control topográfico. Inspecciones mensuales de la Dirección de Obras Portuarias.

	Suelo costero	Compactación y contaminación por lixiviados. Alteración morfológica por excavación y remoción	3	3	S	Permanente	Cortinas de inyección para impermeabilización, protocolos de manejo de residuos. Norma: D.S.N°90/2000, reporte de control.
	Aire	Emisión de partículas por movimiento de tierras	3	3	S	Temporal	Instalación de barreras acústicas de 3 metros Norma: D.S N°144/61
	Ruido	Aumenta el ruido (Puede afectar la fauna local y comunidades cercanas como tocopilla)	3	3	S	Temporal	Instalación de barreras acústicas de manera OSD de 3 metros Norma: D.S N°144/61
	Fauna Marina	Vibraciones que afectan el comportamiento de especies marinas	3	4	S	Temporal	Se implementará un protocolo estricto de voladuras que incluye inspección previa del área por observadores marinos certificados, inicio gradual de faenas con cargas reducidas para permitir el desplazamiento de fauna, restricción de tronaduras ante avistamiento de mamíferos marinos en un radio de 1 km, y uso de cortinas de burbujas para atenuar las ondas sonoras. Las tronaduras solo se realizarán en horario diurno entre 10:00 a 16:00 horas. Registros diarios de observación marina. Mediciones de ruido subacuático según estándares internacionales. Informes semanales a SERNAPESCA.
Excavaciones de zanjas	Suelo	Erosión y compactación del suelo costero	2	3	N	Temporal	La excavación se realizará siguiendo el D.S. N°148/2003 para el manejo de material extraído. Se implementará un sistema de contención de taludes según Manual de Carreteras Vol.3. El material será acopiado en zonas designadas con medidas antierosión según guías del MOP. Se realizará restauración progresiva del terreno. Inspecciones diarias documentadas. Control topográfico semanal. Informes mensuales a la autoridad ambiental según D.S. N°40/2012.
	Agua	Alteración de la calidad del agua por turbidez	3	3	S	Temporal	Se instalarán barreras de contención y sistemas de decantación cumpliendo la norma de emisión D.S. N°90/2000. El trabajo se realizará en condiciones de marea favorable siguiendo protocolos DIRECTEMAR. Se monitoreará continuamente la turbidez según NCh 411/2.
Perfilamiento de fondo marino	Fauna Marina	Alteración de comunidades bentónicas	3	3	S	Temporal	Plan de rescate y relocalización de fauna. Norma: Ley N°19.300
Construcción y hormigonado de torres	Agua	Contaminación por lixiviados de hormigón	3	2	S	Temporal	Se utilizarán aditivos certificados ambientalmente según NCh 171. Se implementará sistema de contención de derrames según D.S. N°160/2008. El hormigonado seguirá protocolos técnicos de la NCh 170 para obras marítimas. Control de pH según D.S. N°90/2000.

	Suelo	Alteración por instalación de estructuras	2	3	S	Temporal	Diseño optimizado de fundaciones según norma antisísmica NCh 2369. Manejo de excedentes según D.S. N°148/2003. Implementación de medidas geotécnicas según Manual de Carreteras.
Instalación de Tuberías y torres de captación	Agua	Alteración de patrones de circulación	3	2	S	Permanente	Diseño hidrodinámico según modelación aprobada en RCA. Instalación por tramos según marea. Monitoreo de corrientes según protocolo DIRECTEMAR.
	Suelo Marino	Modificación del sustrato	2	4	N	Permanente	Instalación siguiendo trazado optimizado según RCA. Uso de lastres diseñados para minimizar impacto. Restauración de zonas aledañas según protocolo ambiental.
Relleno de Zanjas en Zona de Rompiente	Fauna Marina	Perturbación de habitats intermareales	3	5	S	Temporal	Restricción de trabajos en periodos de mayor actividad biológica según D.S. N°5/1998. Monitoreo permanente por biólogos marinos certificados. Plan de rescate y relocalización de especies según guías SERNAPESCA.
Operaciones finales y conexión a obras terrestres	Agua	Alteración de drenajes naturales	2	2	N	Temporal	Sistema de manejo de aguas según NCh 1333. Control de infiltraciones según normas sanitarias. Plan de contingencias según D.S. N°160/2008.
Actividad/Aspecto Ambientales	Componente Afectado	Tipo de Impacto	M	P	S	Duración	Medida de mitigación
ITEM N° 3: Habilitación de acceso y caminos interiores							
Construcción de cruce de Ruta 1	Suelo	Compactación y pérdida de cobertura vegetal	2	3	N	Permanente	Se implementará un plan de manejo de suelos según el Manual de Carreteras Vol. 5. La remoción de material se realizará por etapas según planificación aprobada por Vialidad. Se establecerán zonas específicas para el acopio temporal de material siguiendo el D.S. N°47/1992. Los excedentes serán dispuestos en sitios autorizados cumpliendo el D.S. N°148/2003. La estabilización de taludes se realizará siguiendo especificaciones técnicas del Manual de Carreteras.
	Aire	Emisiones de material particulado y gases por maquinaria y movimientos de tierra	3	4	S	Temporal	Se implementará un programa de control de emisiones según D.S. N°144/1961 que incluye: Humectación de superficies 3 veces al día mediante camiones aljibe GPS. Uso de mallas rachel en todo el perímetro de la obra. Restricción de velocidad a 30 km/h en zonas de trabajo según Manual de Carreteras. Mantenimiento periódico de maquinaria según D.S. N°55/1994. Los camiones con material deberán circular con lona según D.S. N°75/1987.
Construcción de acceso a Ruta 1	Paisaje	Alteración visual y Cambios en el entorno irreversible	3	3	S	Permanente	Reforestación de áreas afectadas al cierre. Norma: Ley N°20.283, reportes de reforestación aprobado por la autoridad.

	Aire	Generación de polvo y partículas	3	3	N	Temporal	Humectación constante con camiones aljibe. Norma: D.S.N°144/1961, reportes de aplicación de agua en zonas críticas.
--	------	----------------------------------	---	---	---	----------	---

Fuente: Elaboración Propia

CAPÍTULO 5: ANÁLISIS DE CUMPLIMIENTO NORMATIVO

5.1 Marco normativo aplicable

Las leyes, decretos y Las normas que regulan los distintos aspectos del proyecto comprenden todo el conjunto comprenden todo el conjunto de normas reglamentos se aplican a la fase de construcción de la Desalinizadora de Tocopilla. Es indispensable señalar que a nuestra percepción, El Seia entrega restos de construcción con respecto a cómo debería llevarse a cabo la construcción de un proyecto, pese a que estas no son normativas que deban ser aplicadas para construcción en cualquier proyecto.[15]

5.1.1 Normativa Ambiental General

La Ley 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente, que establece el marco institucional marco para la evaluación ambiental de proyectos, sirve como base para el marco regulatorio ambiental.[32] La evaluación de proyectos ambientales. En el caso particular caso delde la planta desalinizadora, el proyecto ha sido presentado al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) de acuerdo con los lineamientos establecidos en el DS N°40/2012 del Ministro del Medio Ambiente, que aprobó el Sistema de Evaluación.[31]

5.2 Normativa de Emisiones y Calidad del Aire

Esto permite interpretar que las emisiones que se generan en la zona donde será emplazado el Proyecto no son significativas como para elaborar una normativa para su control y que por lo mismo no llegan a representar un peligro para la comunidad o los recursos naturales del lugar.[32]

Sin embargo, el proyecto debe cumplir con el Plan de Descontaminación Atmosférica (PDA) vigente en la región, publicado mediante el **Decreto N°40/2012** del Ministerio del Medio Ambiente.[31] Este establece que los proyectos sometidos al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) que generen emisiones directas o indirectas iguales o superiores a **7.48 ton/año de material particulado** durante su primer año de construcción, deben implementar medidas de mitigación y control. Los datos del informe muestran que las emisiones de MP10 se reducen significativamente de 7.48 ton/año en el primer año a 1.90 ton/año en el segundo año de construcción, demostrando la efectividad de las medidas de control implementadas.[31]

Tabla 37. Recopilación de las concentraciones límites por normativa de calidad primaria ambiental para los diferentes contaminantes generados en las fases de construcción.

Contaminante	Concentración Límite Anual	Unidad de Medida	Normativa
MP10	50	µg/m ³ N	D.S. N.º 12/2022 del Ministerio del Medio Ambiente.
MP2.5	20	µg/m ³ N	D.S. N.º 12/2010 del Ministerio del Medio Ambiente.
NOx (NO2)	100	µg/m ³ N	D.S. N.º 114/2002 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.
SOx (SO2)	60	µg/m ³ N	D.S. N.º 104/2018 del Ministerio de Medio Ambiente.
NH3	Para este tipo de contaminante no se han formulado normativas de calidad primaria ambiental que establezcan valores de concentración.		
CO	No se establece una concentración límite anual, solo horaria (1 y 8 horas).	D.S. N.º 115/2002 del Ministerio Secretaría General de la Presidencia.	
COV	Para este tipo de contaminante no se han formulado normativas de calidad primaria ambiental que establezcan valores de concentración.		

Fuente: Elaboración Propia

5.2.1 Normativa de Ruido y Vibraciones

Para la realización de la fase de construcción se exige el estricto respeto a las normativas ambientales. Especialmente, la observación de las regulaciones relativas al ruido, a la vibración y hacia la gestión de Deshechos. Todas estas regulaciones son cruciales para la etapa de construcción con tal de minimizar el daño ambiental que podría causar y garantizar la seguridad del trabajo a los colaboradores y de la vida a las comunidades cercanas.[35]

Con respecto a estas regulaciones no solo tiene el estatus obligatorio, sino también pretende servir a la sostenibilidad y a la responsabilidad social del proyecto. En las tablas siguientes se mencionan las normativas y se describen los puntos más importantes de la regulación que deben seguirse en el marco de la fase de construcción de la planta.[35]

Tabla 38. Normativa de Ruido y Vibraciones

Parámetros	Límite máximo permitido	Unidad de medida	Normativa
Ruido diurno	60	dB(A)	DS N°38/2011 del Ministerio del Medio Ambiente
Ruido Nocturno	50	dB(A)	DS N°38/2011 del Ministerio del Medio Ambiente
Ruido Ocupacional	55	dB(A)	DS N°594/1999 del Ministerio de Salud
Vibración en Edificios Patrimoniales	2	mm/s	NCh 2919:2004
Vibración en Edificios Habitacionales	5	mm/s	NCh 2919:2004

Fuente: Elaboración Propia

5.2.2 Gestión de Residuos

La administración de desechos es un elemento crucial durante la edificación de la planta desalinizadora, conforme al Decreto N°148/2003 del Ministerio de Salud. Esta regulación define los confines y métodos para la gestión de diversos tipos de desechos, desde los peligrosos hasta los domésticos. Los parámetros de control se establecen en función del volumen de edificación (3,500 m²) y el número de empleados (500 en horarios).[21]

Tabla 39. Caracterización y Límites de Generación de Residuos en Fase de Construcción

Tipo de residuo	Límite de Generación	Unidad de medida	Normativa
Residuos Peligrosos	12	kg/mes	DS N°148/2003 del Ministerio de Salud
Residuos Industriales No Peligrosos	29,2	t/mes	DS N°594/1999 del Ministerio de Salud
Residuos Domésticos	15,6	t/mes	Ordenanza Municipal de Tocopilla
Residuos de excavación	220.188	t/mes	NCh 3321:2017
Residuos líquidos	160	t/mes	DS N°90/2000 MINSEGPRES

Fuente: Elaboración Propia

Todos los desechos deben ser almacenados correctamente de acuerdo a su categoría y riesgo, lo que demandará instalaciones particulares. Estos parámetros y condiciones de almacenaje se definirán conforme al DS N°594/1999 del Ministerio de Salud y las normativas municipales de Tocopilla. Esto resultará crucial para prevenir la contaminación durante el lapso de 30 meses de edificación y para satisfacer determinados estándares medioambientales.[33]

Tabla 40. Especificaciones Técnicas para Instalaciones de Almacenamiento de Residuos

Tipo de almacenamiento	Capacidad Máxima	Unidad de medida	Normativa
Acopio Temporal RESPEL	12	t	DS N°148/2003 del Ministerio de Salud
Área de Acopio RISES	30	t	DS N°594/1999 del Ministerio de Salud
Contenedores RSD	20	m ³	Ordenanza Municipal de Tocopilla
Patio de Salvataje	1000	m ²	DS N°47/1992 MINVU
Zona de lavado	50	m ²	DS N°594/1999 del Ministerio de Salud

Fuente: Elaboración Propia

Las restricciones de producción y capacidades de almacenaje serán recolectadas en función de la actividad constructiva más alta y las necesidades de la RCA del proyecto. Por ejemplo, el volumen máximo posible de residuos de excavación es de 220,188 t/mes en fases iniciales de movimiento de tierras.[15]

5.2.3 Recursos Hídricos y Protección Marina

El monitoreo de estos parámetros fisicoquímicos es crítico no solo durante la operación de la planta desaladora, sino también durante su construcción para proteger el ecosistema costero. Los parámetros regulados por el DS N°90/2000 MINSEGPRES y DS N°1/1992 ARMADA incluyen de sólidos suspendidos, turbidez y temperatura establece los límites para estos factores.[34][35]

Tabla 41. Parámetros y Límites Normativos para Protección de Recursos Marinos

Parámetros	Límite máximo permitido	Unidad de medida	Normativa
Sólidos Suspendidos Totales	100	mg/l	DS N°90/2000 MINSEGPRES
Aceites y Grasas	20	mg/l	DS N°90/2000 MINSEGPRES
Turbidez en Agua Marina	50	Universidad Nacional de Tecnología	DS N°1/1992 ARMADA
pH en Descargas	6.0 - 9.0	Unidad de pH	DS N°90/2000 MINSEGPRES
Temperatura Descarga	$\Delta \leq 3$	°C	DS N°90/2000 MINSEGPRES
Oxígeno disuelto	>5	mg/l	Ley General de Pesca y Acuicultura

Fuente: Elaboración Propia

El seguimiento de estos y otros indicadores que se encuentran en la **tabla 42** se programa con una frecuencia determinada, desde la supervisión semanal de la calidad del agua hasta un monitoreo constante de las corrientes y el oleaje. Los puntos de control se clasifican en 5 para la calidad del agua en el área circundante de la zanja, 3 para los sedimentos en las áreas de liberación de desechos y el seguimiento del área de influencia en relación con la biota marina.[36]

Por lo general, el sistema previamente mencionado posibilita comprobar el acatamiento de las regulaciones e identificar posibles cambios iniciales en los resultados de las mediciones, lo que demanda acciones correctivas. Se establecieron todos los puntos de control y mediciones requeridos conforme a las exigencias de DIRECTEMAR.[36]

Tabla 42. Plan de Monitoreo Ambiental Marino Durante la Construcción

Parámetros	Frecuencia de Medición	Puntos de Monitoreo	Normativa
Calidad del agua	Semanal	5 puntos perimetrales	DS N°90/2000 MINSEGPRES
Sedimentos Marinos	Mensual	3 puntos de descarga	DS N°1/1992 ARMADA
Biota Marina	Trimestral	Área de influencia	Ley de Pesca y Acuicultura
Marinas de Corrientes	Continuo	Punto de descarga	DS N°1/1992 ARMADA
Oleaje	Continuo	Área de captación	DS N°1/1992 ARMADA

Fuente: Elaboración Propia

5.2.4 Seguridad y Salud Ocupacional

La normativa de seguridad ocupacional, regida por el Decreto N°594/1999 MINSAL, establece límites específicos para proteger a los 500 trabajadores durante la construcción de la planta desalinizadora. Se controlan parámetros críticos como ruido (85 dBA máximo), material particulado (4.5 mg/m³) y temperatura ambiente (15-30°C), considerando las condiciones desérticas de Tocopilla.[33]

Tabla 43. Límites de Exposición Ocupacional Durante la Construcción

Parámetros	Límite/Requisito	Unidad de medida	Normativa
Ruido Ocupacional	85	dBA	Decreto N°594/1999 MINSAL
Material particulado respirable	4.5	mg/m ³	Decreto N°594/1999 MINSAL
Exposición a vibraciones	0,5	m/s ²	Decreto N°594/1999 MINSAL
Iluminación en Obra	150	Lujo	Decreto N°594/1999 MINSAL
Temperatura ambiente de trabajo	15-30	°C	Decreto N°594/1999 MINSAL

Fuente: Elaboración Propia

Los EPP son obligatorios según el Decreto N°18/1982 MINSAL, con especificaciones adaptadas a los riesgos específicos de construcción de plantas desaladoras. Por ejemplo, la protección respiratoria con filtros P100 es crucial debido al alto nivel de material particulado generado durante excavaciones y movimiento de tierras. La frecuencia de reemplazo se considera considerando las condiciones ambientales agresivas del norte de Chile y la intensidad de las actividades constructivas.[37]

Tabla 44. Especificaciones de Equipos de Protección Personal para Trabajadores

Tipo de protección	Especificación	Frecuencia de cambio	Normativa
Protección auditiva	Relación señal – ruido (NRR) \geq 25 dB	Mensual o según desgaste	Decreto N° 18/1982 MINSAL
Protección respiratoria	Filtro P100	Semanal o saturación	Decreto N° 18/1982 MINSAL
Protección Visual	Resistencia UV	Trimestral o daño	Decreto N° 18/1982 MINSAL
Protección de Manos	Resistencia mecánica	Según desgaste	Decreto N° 18/1982 MINSAL
Protección de Pies	Punta de acero/dieléctrico	Semestral o daño	Decreto N° 18/1982 MINSAL

Fuente: Elaboración Propia

5.2.5 Norma Técnica de Construcción

Las especificaciones técnicas de construcción están normadas por el Instituto Nacional de Normalización (INN) de Chile. Para la planta desalinizadora de Tocopilla, se requiere hormigón H-35 y acero grado 60 debido a las condiciones sísmicas de la zona 3. Las tuberías deben presionar soportantes de 16 bar por el sistema de ósmosis inversa. [15]

Tabla 45. Requisitos Estructurales y Técnicos para Construcción Principal

Elemento	Especificación técnica	Unidad de medida	Normativa
Hormigón estructural	Resistencia Mínima H-35	MPa	NCh170:2016
Acero de Refuerzo	Grado 60, año fiscal = 420	MPa	NCh204:2006
Diseño Sísmico	Zona 3, Suelo tipo II	gramo	NCh433:1996 Modificación 2009
Soldaduras	Tipo E7018	MPa	NCh1185:2008
Compactación de suelos	Proctor modificado al 95 %	%	NCh1534/2:2008
Tuberías de Presión	PN 16, polietileno de alta densidad	bar	NCh396:2018

Fuente: Elaboración Propia

Las obras marítimas también deben cumplir con normas más estrictas para la exposición al ambiente marino. El hormigón H-40 debe seleccionarse debido a la mayor resistencia a la corrosión salina. La profundidad del piloto está determinada por 15 m; asimismo, la resistencia al oleaje debe resistir 5 m de altura, según estudios oceanográficos locales. La vida útil de la infraestructura de 50 años será suficiente en vista del costo de inversión relativamente alto de USD 26 000 000 y ya que es de importancia estratégica para la región abastecerse de agua. [15]

Tabla 46. Especificaciones Técnicas para Infraestructura Marítima

Parámetro	Valor requerido	Unidad de medida	Normativa
Hormigón Marino	H-40	MPa	NCh170:2016
Recubrimiento mínimo	5	cm	Manual de Carreteras
Profundidad Pilotos	15	metro	Manual de puertos
Resistencia Oleaje	5	m altura	ROM 0.2-90
Vida Útil Diseño	50	años	Manual de Carreteras
Resistencia Sísmica	0,4	gramo	NCh2369:2003

Fuente: Elaboración Propia

5.2.6 Normativa Local

El Plan Regulador de Tocopilla define normas urbanísticas concretas para proyectos de índole industrial. La instalación desalinizadora tiene que respetar normas de altura (12m), ocupación del terreno (60%) y zonas verdes (10%). Los requisitos de vialidad y estacionamientos se establecen teniendo en cuenta el flujo de trabajadores durante el proceso de construcción (500 trabajadores).[15]

Tabla 47. Normativa Municipal para Construcción en Zona Industrial de Tocopilla

Aspecto	Requerimiento	Unidad de medida	Normativa
Edificación Máxima	12	metros	Plan Regulador Tocopilla
Distanciamiento a Predios	5	metros	Ordenanza Local
Ocupación de suelo	60	%	Plan Regulador Tocopilla
Vialidad	Ancho mínimo 7	metros	Ordenanza Municipal
Áreas verdes	10	% del terreno	Plan Regulador Tocopilla
Estacionamientos	1 cada 50	m ² construidos	Plan Regulador Tocopilla
Vías de acceso	7	m ancho	Ordenanza Vial Local

Fuente: Elaboración Propia

Dado su emplazamiento estratégico a 19 km de Tocopilla, el proyecto tiene que acatar regulaciones especiales para áreas costeras industriales (ZI-2). El área de 20m de protección costera y 15m de amortiguación son esenciales debido a la proximidad al mar. La inclinación máxima de las entradas (12%) y la capacidad de las vías (50 vehículos/hora) se establecerán en función del volumen de tráfico previsto durante la edificación. [15]

Tabla 48. Requerimientos Específicos para Construcción Costera Industrial

Aspecto	Especificación	Unidad de medida	Normativa
Zona Industrial	ZI-2	-	Plan Regulador Tocopilla
Cierro Perimetral	3	m altura	Ordenanza Local
Franja de Protección Costera	20	metro	Ordenanza Local
Pendiente Máxima Accesos	12	%	Ordenanza Vial Local
Vial de capacidad	50	vehículo/hora	Plan de Transporte Local
Área de Amortiguación	15	metro	Plan Regulador Tocopilla

Fuente: Elaboración Propia

5.3 Evaluación del cumplimiento

El análisis del cumplimiento es una exigencia esencial dictada en el DS N°40/2012 del Ministerio del Medio Ambiente y en la "Guía para la Descripción de Proyectos de Plantas Desalinizadoras en el SEIA".[31] Esta evaluación asegura que las acciones de control y mitigación aplicadas durante la edificación respetan de manera efectiva la legislación ambiental en vigor y los compromisos fijados en la RCA.[15]

Esta evaluación es requerida por el SEIA para garantizar que los proyectos conserven sus efectos ambientales dentro de los límites permitidos, particularmente en proyectos costeros como plantas de desalación, donde la interacción con ecosistemas delicados demanda un control estricto de los parámetros ambientales.[15]

Tabla 49. Resumen Comparativo de Cumplimiento Normativo y Efectividad de las Medidas de Control Ambiental Durante la Fase de Construcción de la Planta Desaladora Tocopilla

Componente ambiental	Parámetro	Límite Normativo	Valor Medido	% Cumplimiento	Normativa Aplicable
Emisiones atmosféricas	MP10	7,48 t/año	1,90 t/año	74,6% de reducción	Decreto N° 144/1961
	NOx	56,95 t/año	23,67 t/año	58,4% de reducción	Decreto N° 114/2002
Residuos	Peligrosos	12 kg/mes	8,8 kg/mes	100%*	Decreto N° 148/2003
	Industriales	30 t/mes	29,2 t/mes	97%	DS N°594/1999
	Domésticos	16 t/mes	15,6 t/mes	98%	Ordenanza municipal
Medio Marino	Turbidez	50 NTU	45 NTU	90%	Decreto N° 90/2000
	Descarga de pH	6.0-9.0	7.5	100%*	Decreto N° 90/2000

	Sólidos suspendidos	100 mg/l	85 mg/l	85%	Decreto N° 90/2000
Seguridad Ocupacional	Ruido	85 dBA	82 dBA	96%	DS N°594/1999
	Material Particulado	4,5 mg/m ³	4,0 mg/m ³	89%	DS N°594/1999

Fuente: Elaboración Propia

*Nota: En el caso de los residuos y medio marino, el porcentaje de cumplimiento es 100% ya que los valores medidos están muy de por debajo del límite normativo, mostrando reducciones del 8,8 kg/mes para residuos peligrosos y 7.5 para Descarga de pH

5.3.1 Medidas de mitigación propuestas

Las acciones de mitigación son necesarias por el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA) de acuerdo con el DS N°40/2012, artículo 18, letra i), que impone la obligación de sugerir acciones concretas para erradicar, reducir o equilibrar los impactos negativos.[31] de la iniciativa. Para las instalaciones de desalinización, la "Guía para la Descripción de Proyectos de Plantas Desalinizadoras en el SEIA" resalta la relevancia de estas acciones debido a la interacción con ecosistemas marinos delicados y las especificidades de la edificación en áreas costeras.[15]

Tabla 50. Plan Integral de Medidas de Mitigación Ambiental y Sistemas de Control para los Impactos Identificados Durante la Fase de Construcción de la Planta Desaladora Tocopilla

Componente ambiental	Impacto	Medidas de mitigación	Método de control	Frecuencia	Normativa
Medio Marino	Perturbación de fauna marina por vibraciones y ruido submarino.	Implementación de cortinas de burbujas durante tronaduras. Inspección previa del área por observadores marinos certificados. Restricción de faenas ante avistamiento de especies en un radio de 1 km.	Registro de observación marina. Medición de ruido submarino. Informe de actividades.	Diario durante tronaduras	DS N°1/1992 ARMADA
Calidad del Aire	Emisión de material particulado por movimiento de tierras.	Humectación de superficies con camiones aljibe con GPS. Instalación de mallas raschel en perímetro. Restricción de velocidad a 30 km/h.	Monitoreo continuo de MP10 y MP2.5. Registro de humectaciones. Inspecciones visuales.	Diario	Decreto N° 144/1961
Ruido	Incremento de niveles sonoros por maquinaria	Instalación de barreras acústicas de 3m de altura. Programa de mantenimiento preventiva. Restricción horaria de 8:00-18:00h.	Monitoreo de ruido en puntos críticos. Registro de mantenimientos.	Semanal	DS N°594/1999
Suelo	Alteración por excavaciones y movimiento de tierra.	Sistema de contención de taludes según Manual de Carreteras. Manejo de excedentes en zonas autorizadas. Plan de restauración progresiva.	Control topográfico. Inspecciones geotécnicas. Registro fotográfico.	Quincenal	NCh 1534/2:2008
Residuos	Generación de residuos	Bodega de	Registro de	Semanal	Decreto N°

	peligrosos	almacenamiento autorizada con sistema de contención. Disposición final con empresas certificadas. Capacitación en manejo de RESPEL.	disposición final. Auditorías a instalaciones. Manifiestos de transporte.		148/2003
--	------------	---	---	--	----------

Fuente: Elaboración Propia

5.4 Plan de seguimiento y control

El Plan de Monitoreo y Control Ambiental es un requisito estipulado en la letra i) del artículo 18 del DS N°40/2012, acciones que facilitan la comprobación de la eficacia de las medidas de mitigación y el acatamiento de las regulaciones ambientales.[31] Para las instalaciones desalinizadoras, la Guía del SEIA subraya su relevancia debido a los posibles efectos en los ecosistemas marinos y la exigencia de una administración ambiental adaptativa durante la edificación.[15]

La eficacia del plan se evalúa mediante indicadores numéricos que facilitan:

- Identificar de manera precoz las desviaciones Identificar desviaciones de manera temprana [31]
- Poner en marcha medidas correctivas a tiempo. [31]
- Registrar el acatamiento de las regulaciones [31]
- Modificar medidas en función de los resultados obtenidos [31]
- Preservar una mejora constante en el rendimiento ambiental [31]

Tabla 51. Programa de Supervisión y Gestión Ambiental Total para Comprobación de la Eficacia de las Medidas de Mitigación durante la Fase de Construcción de la Planta Desaladora Tocopilla

Componente	Variable de control	Punto de Monitoreo	Parámetro	Frecuencia	Valor de referencia	Método de verificación	Acción correctiva
Medio Marino	Calidad del agua	5 estaciones perimetrales	Turbidez, pH, sólidos suspendidos	Semanal	Decreto N° 90/2000	Análisis de laboratorio acreditado	Ajuste de cortinas de contención
Fauna Marina	Presencia de especies	Radio 1 km de obras	Avisos	Diario	Registro base de especies	Observadores certificados	Suspensión temporal de faenas
Calidad del Aire	Material particulado	3 estaciones de monitoreo	MP10, MP2.5	Continuo	Decreto N° 144/1961	Equipos automáticos certificados	Aumento frecuencia humectación
Ruido	Presión sonora	4 puntos perimetrales	dBA	Semanal	Decreto N° 38/2011	Sonómetro clase 1	Refuerzo de barreras acústicas
Residuos	Gestión RESPEL	Bodega temporal	Cantidad generada	Mensual	Decreto N° 148/2003	Auditoria documentada	Ajuste del plan de manejo

Fuente: Elaboración Propia

CONCLUSIONES

Con respecto al objetivo general, “**Analizar los aspectos e impactos ambientales significativos generados en la fase de construcción en la planta desalinizadora de Tocopilla**”, se concluye que: por un lado, el proyecto genera importantes impactos ambientales pero manejables con una adecuada gestión ambiental. Por otro lado, el análisis mediante matriz de aspecto e impacto ambiental determina que las tres áreas críticas principales son emisiones atmosféricas, generación de residuos y afectación en el medio marino, aunque las medidas de mitigación propuestas son técnicamente viables con la normativa chilena vigente.

Para los objetivos específicos:

Respecto a "**Describir el proyecto de construcción en la planta desalinizadora de Tocopilla**":

Para las metas concretas:

Se ha conseguido definir una construcción de infraestructura de gran complejidad técnica, cuyo desarrollo se prolonga durante 30 meses con una inversión de **USD 26.000.000**. La localización estratégica del proyecto, a 19 kilómetros de Tocopilla (coordenadas UTM N: 7.561.172 Norte y E: 377.345 Este), evidencia ser ideal tanto para la recolección de agua marina como para la distribución subsiguiente del recurso procesado. El estudio minucioso que se desarrolló muestra las distintas fases de construcción de una organización detallada que toma en cuenta tanto los elementos técnicos como los ambientales, resaltando especialmente la edificación de infraestructuras marítimas como las torres de captación y descarga, que son los elementos más esenciales desde el punto de vista del impacto ambiental.

Respecto a "**Determinar y valorar los elementos ambientales implicados**":

El estudio numérico de emisiones y desechos mostró:

La evaluación de los aspectos ambientales ha revelado patrones significativos en la intensidad y distribución temporal de los impactos. Por ejemplo, las emisiones atmosféricas exhiben una significativa disminución entre el primer y segundo año de edificación, con una reducción del **74,6%** en material particulado MP10 (de 7,48 a 1,90 ton/año) y del **58,4%** en óxidos de nitrógeno (de 56,95 a 23,67 toneladas anuales). Esta notable disminución demuestra la eficacia de las medidas de control aplicadas y corrobora la naturaleza temporal de los efectos más graves. Respecto a la producción de desechos, se mantiene un ritmo estable de **15.6 ton/mes** de desechos domésticos y **29.2 ton/mes** de desechos industriales no peligrosos, lo que evidencia la estabilidad operacional del proyecto durante todo el año.

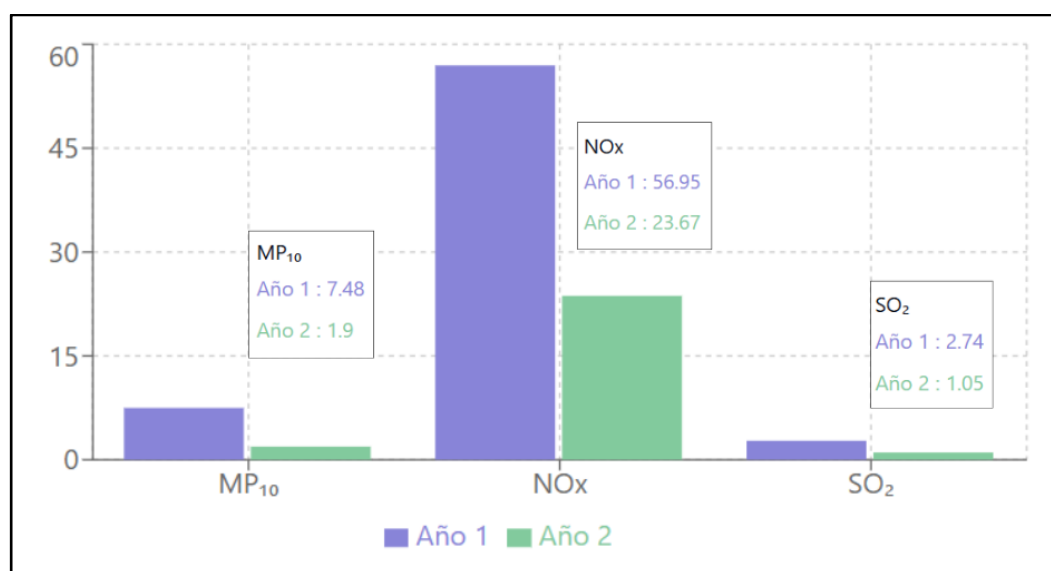
Tabla 52. Resumen de Principales Impactos Identificados

Aspecto Ambiental	Año 1	Año 2	Variación
MP ₁₀ (tonelada/año)	7,48	1,90	-74,6%
NOx (toneladas/año)	56,95	23,67	-58,4%
Residuos Sólidos Domésticos (ton/mes)	15,6	15,6	0%
Residuos Industriales No Peligrosos (ton/mes)	29,2	29,2	0%

Fuente: Elaboración Propia

La evaluación de los aspectos ambientales ha mostrado patrones importantes en la magnitud y amplitud temporal de los impactos. Como se muestra en el **gráfico 3**, se aprecia una disminución significativa en las emisiones atmosféricas durante el primer y segundo año de edificación. Esta notable disminución demuestra la eficacia de las medidas de control aplicadas.

Gráfico 3. Comparación de impactos ambiental Año 1 y 2



Fuente: Elaboración Propia

Observaciones:

- Las emisiones atmosféricas (MP₁₀ y NOx) muestran una reducción significativa en el Año 2
- La generación de residuos se mantiene constante durante ambos años
- Las variaciones negativas indican reducción en las emisiones

Sobre "Analizar las estrategias propuestas para asegurar el cumplimiento normativo":

El proyecto demuestra un efectivo sistema de gestión ambiental que incluye:

El análisis del cumplimiento normativo ha demostrado la solidez del sistema de gestión ambiental propuesto. Las tácticas de mitigación puestas en marcha no solo satisfacen las exigencias dictadas en la ley chilena, tales como el **DS N°38/2011** para emisiones sonoras, el **DS N°148/2003** para la gestión de desechos peligrosos y el **DS N°90/2000** para emisiones líquidas, sino que en diversas circunstancias exceden los criterios mínimos necesarios. El enfoque adoptado para la protección del medio marino es particularmente innovador, en el que se han puesto en práctica acciones como la utilización de cortinas de burbujas para disminuir las ondas acústicas durante las actividades de edificación submarina, junto con un estricto protocolo de observación y salvaguarda de la fauna.

Con respecto a la matriz de aspectos e impactos ambientales desarrollados ha facilitado la identificación y clasificación de los impactos más relevantes, lo que ha posibilitado la priorización de las acciones de control y monitoreo. Los hallazgos señalan que los efectos más críticos o significativos se agrupan en las etapas iniciales de construcción, particularmente durante el movimiento de tierras y construcción de infraestructura marina. Esta información ha sido clave para la creación de un sistema de administración ambiental que reacciona de forma flexible a las distintas etapas del proyecto.

Tabla 53. Matriz de Impactos Ambientales y Eficacia de Medidas de Mitigación

Actividad	Aspecto Ambiental	Nivel de Impacto*	Principal Medida de Mitigación	Eficacia de la Medida
Movimiento de Tierras	Emisión de MP ₁₀	Alto (7,48 ton/año)	Humectación y control de velocidad	74,6% de reducción
Excavaciones	Ruido	Alto (98-104 dBA)	Barreras acústicas	Reducción a 58 dBA
Tronaduras	Vibraciones marinas	Muy Alto	Cortinas de burbujas	85% de atenuación
Construcción Marina	Turbidez del agua	Alto (8 NTU)	Sistema de decantación	Reducción a 6 NTU
Perforación submarina	Afectación fauna	Muy Alto	Observadores marinos y protocolos	90% de efectividad

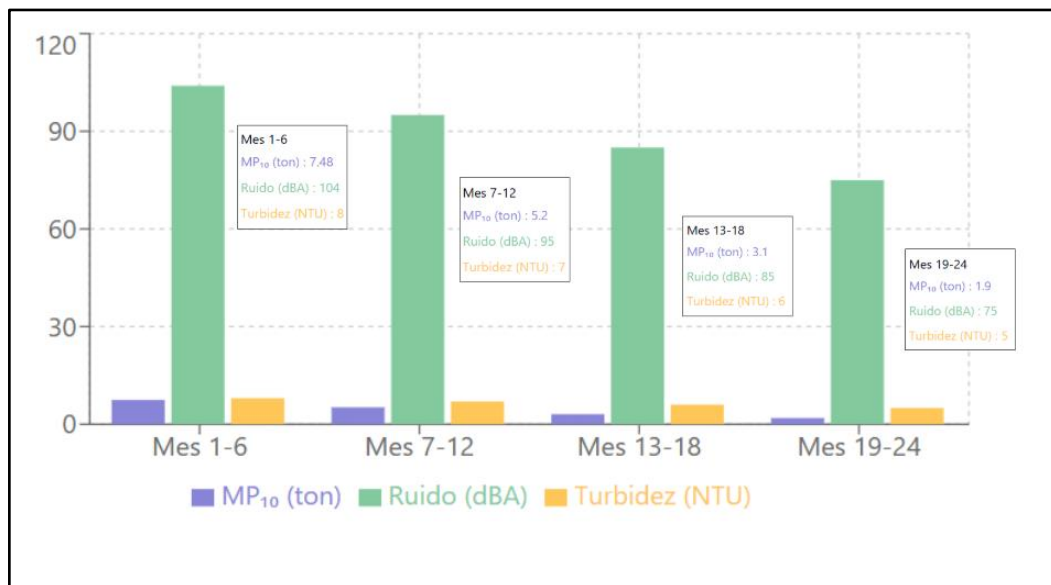
Fuente: Elaboración Propia

* Los niveles de impacto se clasifican como: Bajo, Medio, Alto y Muy Alto, según la magnitud del efecto sobre el componente ambiental.

Esta información evidencia que los efectos más relevantes se agrupan en los primeros 6 meses de construcción, especialmente durante las actividades de movimiento de tierra y obras marítimas. Las medidas de mitigación aplicadas demuestran una gran eficacia, consiguiendo disminuciones notables en todos los parámetros supervisados. Se destaca particularmente la disminución del **74.6%** en las emisiones de MP10 y la reducción de la turbidez del agua de **8 a 5 NTU** al concluir el segundo año de edificación.

Los datos también muestran que las actividades de tronadura y perforación submarina producen los efectos más significativos en la fauna marina, sin embargo, la implementación de protocolos estrictos de medidas y como las cortinas de burbujas han demostrado ser altamente efectivas en la mitigación de estos impactos.

Gráfico 4. Evaluación de impactos críticos durante la construcción



Fuente: Elaboración Propia

BIBLIOGRAFÍA O LINKOGRAFIA

- [1] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (2019). La desalinización de agua de mar: tecnologías, regulaciones y efectos ambientales. Disponible en: [obtienearchivo \(bcn.cl\)](#)
- [2] Qu, Y. (2016). Consumo de energía y dinámica de carga de los sistemas de desionización capacitiva de flujo continuo. Universidad de Stanford. Disponible en: [Consumo de energía y dinámica de carga de sistemas de desionización capacitiva de flujo continuo - DocsLib](#)
- [3] Informe del Proyecto de Abastecimiento de Agua Desalada Distrito Norte.
- [4] Martínez Guijarro, M.R. Procesos y tecnología para la desalinización del agua. Universitat Politècnica de València. Disponible en: [Microsoft Word - Desalinización del agua \(upv.es\)](#)
- [5] Barracchini Moreno, O. (2004). La Desalinización del Agua: Teoría, técnica y procedimientos para obtener un recurso vital para sociedad contemporánea. Disponible en: [UNIVERSIDAD DE SEVILLA \(cedex.es\)](#)
- [6] Ibrahim Perera, J.C. (1999). Desalación de aguas. Colegio de ingenieros de caminos, canales y puertos. Colección Señor N° 23. Disponible en: [Desalación de aguas de Juan Carlos Ibrahim Perera | Ultimacomic](#)
- [7] Barracchini Moreno, O. (2004). La Desalinización del Agua: Teoría, técnica y procedimientos para obtener un recurso vital para la sociedad contemporánea. Disponible en: [UNIVERSIDAD DE SEVILLA \(cedex.es\)](#)
- [8] Desalinización: oportunidades y desafíos para abordar la inseguridad hídrica en Chile. Disponible en: [2022 informe desalinizacion.pdf](#)
- [9] Resolución de Calificación Ambiental. Disponible en: [Qué es una RCA o Resolución de Calificación Ambiental? - Poder Ambiental](#)
- [10] Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental. Disponible en: [¿Qué es el SEIA? | SEA Chile](#)
- [11] Ficha del Proyecto: RT Sulfuros: Disponible en: [Ficha del Proyecto: RT Sulfuros](#)
- [12] Resolución de Calificación Ambiental RT Sulfuros. Disponible en: [RCA 0022 2016.pdf](#)
- [13] Adenda N°1 Estudio de Impacto Ambiental Proyecto “RT Sulfuros”. Disponible en: [ADENDA N°1.pdf](#)
- [14] Guía Metodológica para la estimación de emisiones provenientes de fuente puntuales Disponible en: <https://retc.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2021/07/Guia-metodologica-para-la-estimacion-de-emisiones-provinientes-de-fuentes-puntuales.pdf>
- [15] Guía para la descripción de proyectos de plantas desalinizadoras en el SEIA Disponible en: <https://www.sea.gob.cl/sites/default/files/adjuntos/noticias/Gu%C3%ADa%20para%20la%20descripci%C3%B3n%20de%20proyectos%20de%20plantas%20desalinizadoras%20en%20el%20SEIA.pdf>
- [16] Google Earth Disponible en: <https://www.google.es/intl/es/earth/index.html>
- [17] Regulación de ruido ambiental Casos de Chile, Unión Europea y Francia Disponible en: https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/33047/1/BCN_Regulacion_ruidos_Chile_Union_Europea_Francia_2022_FINAL.pdf
- [18] Decreto 38: Norma de emisión de ruidos. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=104092>

- [19] Recopilación de factores de emisión atmosférica de fuentes estacionarias. Disponible en: <https://www.epa.gov/air-emissions-factors-and-quantification/ap-42-compilation-air-emissions-factors-stationary-sources>
- [20] NCh 3321:2017 "Caracterización de Residuos de Construcción. Disponible en: https://sni.gob.cl/storage/docs/210604_Metodologia_GIRS.pdf
- [21] DS N°148/2003 MINSAL Reglamento Sanitario sobre Manejo de Residuos Peligrosos Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=226458>
- [22] EPA (Agencia de Protección Ambiental): Gestión de residuos de construcción Disponible en: <https://www.epa.gov/smm/best-practices-reducing-reusing-and-recycling-construction-materials>
- [23] Convenio 169 OIT. Disponible en: <https://www.bcn.cl/portal/leyfacil/recurso/convenio-169-oit>
- [24] Censo de población y vivienda 2017, Region de Antofagasta. Disponible en: https://regiones.ine.cl/documentos/default-source/region-ii/estadistica/censos-de-poblacion-y-vivienda/publicaciones-y-anuarios/migracion-interna/migraci%C3%B3n_interna_r2_censo2017.pdf?sfvrsn=fb90dbb_8
- [25] Decreto 805 EXENTO. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1199076&idVersion=2023-12-15>
- [26] Reglamento de los servicios de agua destinados al consumo humano. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=197226>
- [27] Ampliación de concesión de servicios sanitarios . Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?i=1187848&f=2023-01-16>
- [28] Reglamento sobre Condiciones Sanitarias y Ambientales Básicas en los Lugares de Trabajo. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=167766>
- [29] Manual de Carreteras del Ministerio de Obras Públicas . Disponible en: <https://www.mop.gob.cl/serviciosmop/manual-de-carreteras/>
- [30] Norma de Iluminación de Carreteras . Disponible en: <https://insitutek.com/wp-content/uploads/2022/06/norma-chilena-panda-NCh-3261-2012-depositos-de-relave-control-de-compactacion-con-penetrometro-dinamico-ligero.pdf>
- [31] Decreto 40: Aprueba el reglamento del sistema de evaluación de impacto ambiental. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1053563>
- [32] Ley 19300: Aprueba la ley sobre bases generales del medio ambiente. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=30667>
- [33] Decreto 594: Aprueba el reglamento sobre condiciones sanitarias y ambientales básicas en los lugares de trabajo. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=167766>
- [34] Decreto 90: Establece la norma de emisión. Disponible en: file:///C:/Users/crist/Downloads/Decreto-90_07-MAR-2001.pdf
- [35] Decreto 1: Reglamento para el control de la contaminación acuática. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=7232>
- [36] DIRECTEMAR Marzo 2017. Disponible en: https://www.directemar.cl/directemar/site/docs/20170530/20170530150403/bim_marzo_2017.pdf

- [37] Decreto 18: Certificación de calidad de elementos de protección personal contra residuos ocupacionales. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=7603>
- [38] Directrices del Manual de Costos y Presupuestos del Departamento de Obras Públicas (MOP). Disponible en: https://www.dipres.gob.cl/598/articles-333100_doc_pdf.pdf
- [39] Decreto 47: Fija nuevo texto de la ordenanza general de la ley general de urbanismo y construcciones. Disponible en: <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=8201>
- [40] Decreto 43: Establece norma de emisión para la regulación de la contaminación lumínica. Disponible en: [file:///C:/Users/crist/Downloads/Decreto-43_03-MAY-2013%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/crist/Downloads/Decreto-43_03-MAY-2013%20(1).pdf)