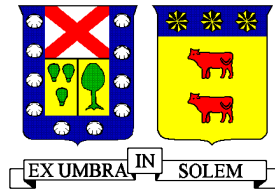


UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA

DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES

VALPARAÍSO - CHILE



DISEÑO PRELIMINAR DE CAPTACIONES COSTERAS DE AGUA DE MAR –
APLICACIÓN EN LA COSTA CENTRAL Y NORTE DE CHILE

ESTEFANI LISBEDT OROSTIZAGA SALINAS

Memoria para optar al Título de
Ingeniero Civil

Profesor Guía
Mauricio Correa Cáceres

Enero de 2018

RESUMEN

Durante los últimos años, los recursos hídricos de la zona norte y central de Chile, se han visto comprometidos por la notable disminución de la oferta de agua dulce y un aumento de la demanda de la misma. La disminución de la oferta principalmente se ha suscitado por el extenso período de sequías. Por otro lado, la demanda creciente, ya sea en consumo de agua para la población e industria menor, agricultura, industria minera, entre otras, ha impulsado la búsqueda de otras fuentes de agua, no necesariamente dulces, y la exploración de tecnologías para el uso de agua salada en los procesos productivos, como es el caso de la gran minería del norte de Chile. La extensa costa chilena, de cerca de 6400 kilómetros de longitud, en un país angosto, sumado a los avances tecnológicos en los procesos de desalación de agua, hacen de la captación de agua de mar, una fuente viable, desde el punto de vista técnico y económico, para la producción de agua destinada a diferentes actividades económicas.

En la actualidad, existen numerosas alternativas de sistemas de captación de agua de mar, los que se adaptan a diferentes condiciones del borde costero. El desarrollo detallado de un proyecto de captación de agua de mar requiere la realización previa de estudios hidrogeológicos y ensayos que pueden llegar a ser muy costosos. Sin embargo, en la etapa de diseño conceptual del proyecto es deseable realizar una preselección de potenciales ubicaciones y tipos de obras de captación, sin la necesidad de realizar estos estudios.

El objetivo de este trabajo es generar un documento que explore variadas formas de captaciones costeras de agua de mar y proponer una metodología de evaluación que permita planificar y pre dimensionar una obra de captación de agua de mar considerando información que puede ser recolectada en inspecciones de terreno e información existente de la costa central y norte de Chile, donde la utilización de agua de mar como fuente de recurso hídrico tiene mayor potencial.

En una primera etapa, se definen los aspectos relevantes a ser considerados y se entrega información sobre los valores y rasgos típicos que estos adquieren a lo largo de la costa de Chile. A continuación, se realiza una revisión bibliográfica de las diferentes obras de captación existentes, destacando las ventajas y desventajas de cada una, para luego, proponer criterios de evaluación para la selección de la ubicación y el tipo de obra de captación más adecuado para un caso particular.

Finalmente, como ejemplo de aplicación, se evalúa la implementación de una captación de agua de mar en Papudo para abastecer de agua potable a las localidades de La Ligua y Papudo. Se realiza un análisis multicriterio que considera la información recopilada y las recomendaciones propuestas. Como comparación final entre las alternativas seleccionadas, se realiza una evaluación económica de cada una de estas.

ABSTRACT

During the last few years, hydric resources at central and northern Chile have been compromised due to the reduction of fresh water offer, mainly due to the long drought period, and the rise in the demand for it. This increase in the water demand, mostly for human consumption, minor industry, agriculture, mining industry, among other, has boosted the search for new water sources and technologies for using saltwater in productive processes.

Chilean territory is very long and narrow, with near 6.400 kilometers of coast. This condition along with technological advances in water desalination processes, have made sea water intake an economically and technically viable alternative for fresh water production.

The objective of this work is to describe different types of seawater intakes facilities and propose an assessment methodology for planning and pre-dimensioning it, considering information from site inspections and bibliography from northern and central Chilean coast, where sea water desalination has a high potential.

As a first step, the issue is addressed by describing sea water characteristics and dynamic aspects of the ocean relevant for intake facilities design. Additionally, important coastline features, as geological description and marine biota, are also addressed. Then, different types of seawater intake facilities are described, highlighting the advantages and disadvantages of each one. Finally, a multi criteria assessment methodology is proposed for selecting the ideal location and type of seawater intake facility.

As an application example, the implementation of a sea water intake system is assessed for Papudo and La Ligua, in central Chile. A multi criteria analysis is conducted, considering the information described in this work and the recommendations proposed. As a final comparison, an economical evaluation is conducted.

ÍNDICE GENERAL

1	INTRODUCCIÓN	14
2	EL PROBLEMA DE LA CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR COMO RECURSO HÍDRICO	16
2.1	BALANCE DE OFERTA Y DEMANDA DE AGUA EN CHILE.....	16
2.2	USO DE AGUA DE MAR COMO RECURSO HÍDRICO EN CHILE.....	17
2.2.1	<i>Agua Potable.....</i>	<i>17</i>
2.2.2	<i>Minería.....</i>	<i>19</i>
2.2.3	<i>Termoeléctricas.....</i>	<i>20</i>
2.2.4	<i>Riego</i>	<i>20</i>
2.2.5	<i>Otros usos.....</i>	<i>21</i>
2.3	PRINCIPALES CAPTACIONES DE AGUA DE MAR UTILIZADAS EN LA ACTUALIDAD	21
2.4	PLANIFICACIÓN DE UNA OBRA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR.....	23
2.4.1	<i>Selección del emplazamiento de una captación de agua de mar.....</i>	<i>23</i>
2.4.2	<i>Selección del tipo de obra de captación de agua de mar.....</i>	<i>23</i>
3	ASPECTOS A CONSIDERAR EN LA SELECCIÓN DE LA UBICACIÓN Y EL TIPO DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR EN LA ZONA CENTRO Y NORTE DE CHILE	24
3.1	PROPIEDADES DE LA COLUMNA DE AGUA	24
3.1.1	<i>Salinidad.....</i>	<i>24</i>
3.1.2	<i>La temperatura</i>	<i>25</i>
3.1.3	<i>La densidad</i>	<i>27</i>
3.1.4	<i>Propiedades de la columna de agua en la Zona Centro y Norte de Chile</i>	<i>27</i>
3.1.4.1	Características típicas de la columna de agua en la Zona Norte de Chile	27
3.1.4.1.1	Condiciones de verano.....	27
3.1.4.1.2	Condiciones de Otoño.....	27
3.1.4.1.3	Condiciones de Invierno.....	28
3.1.4.1.4	Condiciones de Primavera.....	28
3.1.4.2	Características típicas de la columna de agua en la Zona Central de Chile.....	31
3.1.4.2.1	Condiciones de verano.....	31
3.1.4.2.2	Condiciones de Otoño.....	31
3.1.4.2.3	Condiciones de Invierno.....	31
3.1.4.2.4	Condiciones de Primavera.....	31
3.2	CONDICIONES HIDRODINÁMICAS	34
3.2.1	<i>Corrientes.....</i>	<i>34</i>
3.2.1.1	Sistema de Corrientes En la Zona Norte y Central de Chile	35
3.2.2	<i>Mareas</i>	<i>36</i>
3.2.2.1	Tipos de Mareas.....	36
3.2.2.2	Amplitud de Marea	38
3.2.2.3	Características generales de las mareas en la zona Norte y Central de Chile	38
3.2.3	<i>Oleaje</i>	<i>39</i>
3.2.3.1	Clasificación del oleaje de acuerdo a sus características hidrodinámicas.....	39
3.2.3.2	Características generales del oleaje en la zona Norte y Central de Chile	40
3.3	BORDE COSTERO	41
3.3.1	<i>Geomorfología costera de la Zona Norte y Centro de Chile.....</i>	<i>41</i>
3.3.1.1	Perfiles típicos del borde costero de la zona Norte de Chile (18° - 33°S).....	41
3.3.1.2	Perfiles típicos del borde costero de la zona Central de Chile (33°- 37°30'S)	42

3.3.2	<i>Características generales de las playas</i>	43
3.3.2.1	Distribución del sedimento.....	44
3.3.2.2	Dinámica de las playas.....	44
3.3.2.3	Perfil morfodinámico de las playas.....	45
3.3.3	<i>Tsunamis</i>	46
3.3.3.1	Cartas de inundación por tsunamis	46
3.4	INTERACCIÓN DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN CON LA BIOTA MARINA	48
3.4.1	<i>Características generales de un ecosistema marino</i>	48
3.4.1.1	Esquema de un ecosistema marino	48
3.4.2	<i>Principales especies en Chile</i>	49
3.4.3	<i>Principales problemas de las captaciones de agua de mar relacionados con la biota marina</i>	53
3.4.3.1	Colisión (Impingement):.....	53
3.4.3.2	Arrastre por succión (Entrainment):	53
3.4.3.3	Impacto del hábitat:.....	53
4	SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR	54
4.1	CAPTACIONES ABIERTAS DE AGUA DE MAR	54
4.1.1	<i>Captaciones abiertas sumergidas</i>	54
4.1.1.1	Descripción general	54
4.1.1.2	Capacidad de las captaciones abiertas sumergidas	55
4.1.1.3	Componentes de las captaciones abiertas sumergidas	55
4.1.1.3.1	Sentina de bombeo	55
4.1.1.3.2	Tubería de transporte	55
4.1.1.3.3	Cámara de captación.....	55
4.1.1.4	Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas sumergidas	58
4.1.2	<i>Captaciones abiertas elevadas</i>	59
4.1.2.1	Descripción general	59
4.1.2.2	Capacidad de las captaciones abiertas elevadas.....	59
4.1.2.3	Componentes de las captaciones abiertas elevadas.....	60
4.1.2.3.1	Sentina de bombeo	60
4.1.2.3.2	Tubería de transporte	60
4.1.2.3.3	Cámara de captación.....	60
4.1.2.4	Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas elevadas.....	60
4.1.3	<i>Captaciones abiertas directas</i>	61
4.1.3.1	Descripción general	61
4.1.3.2	Capacidad de las captaciones abiertas directas	62
4.1.3.3	Componentes de las captaciones abiertas directas	62
4.1.3.3.1	Sentina de aspiración.....	62
4.1.3.3.2	Rejilla de ingreso	62
4.1.3.3.3	Túnel de captación.....	62
4.1.3.4	Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas directas	62
4.1.4	<i>Recomendaciones generales para el diseño de captaciones abiertas</i>	63
4.1.4.1	Selección de la ubicación de una captación abierta	63
4.1.4.2	Recomendaciones de mantención para las captaciones abiertas.....	64
4.2	CAPTACIONES CERRADAS DE AGUA DE MAR	64
4.2.1	<i>Pozos playeros verticales</i>	65
4.2.1.1	Descripción general	65
4.2.1.2	Capacidad de los pozos playeros verticales	66

4.2.1.3	Componentes de los pozos playeros verticales	67
4.2.1.3.1	Perforación del pozo y tubería cribada	67
4.2.1.3.2	Empaque de grava	67
4.2.1.3.3	Sello sanitario.....	67
4.2.1.4	Ventajas y desventajas de los pozos playeros verticales	67
4.2.2	<i>Norias playeras</i>	68
4.2.2.1	Descripción general	68
4.2.2.2	Capacidad de las norias playeras	69
4.2.2.3	Ventajas y desventajas de las norias playeras	69
4.2.3	<i>Pozos playeros horizontales</i>	69
4.2.3.1	Descripción general	69
4.2.3.2	Capacidad de los pozos playeros horizontales.....	70
4.2.3.3	Componentes de los pozos playeros horizontales.....	71
4.2.3.3.1	Entubado central de hormigón	71
4.2.3.3.2	Drenes horizontales	71
4.2.3.4	Ventajas y desventajas de los pozos playeros horizontales.....	71
4.2.4	<i>Pozos inclinados</i>	72
4.2.4.1	Descripción general	72
4.2.4.2	Capacidad de los pozos inclinados.....	72
4.2.4.3	Componentes de los pozos inclinados.....	73
4.2.4.3.1	Tubería de acero con drenes.....	73
4.2.4.3.2	Entubado central de hormigón armado.....	73
4.2.4.3.3	Estación elevadora	73
4.2.4.4	Ventajas y desventajas de los pozos inclinados	73
4.2.5	<i>Pozos con perforación horizontal dirigida (PHD)</i>	74
4.2.5.1	Descripción general	74
4.2.5.2	Capacidad	75
4.2.5.3	Componentes de los pozos con perforación horizontal dirigida (PHD)	75
4.2.5.3.1	Tubería con drenes	75
4.2.5.3.2	Entubado central de hormigón armado.....	76
4.2.5.3.3	Estación elevadora	76
4.2.5.4	Ventajas y desventajas de los pozos con perforación horizontal dirigida (PHD)	76
4.2.6	<i>Pozos horizontales radiales</i>	76
4.2.6.1	Descripción general	76
4.2.6.2	Capacidad	77
4.2.6.3	Componentes de los pozos horizontales radiales	77
4.2.6.3.1	Brazos radiales	77
4.2.6.3.2	Entubado central.....	78
4.2.6.3.3	Estación de bombeo.....	78
4.2.6.4	Ventajas y desventajas de los pozos horizontales radiales	78
4.2.7	<i>Galerías de infiltración con cama filtrante</i>	79
4.2.7.1	Descripción General.....	79
4.2.7.1.1	Descripción galería de infiltración en el lecho marino	80
4.2.7.1.2	Descripción galería de infiltración en el borde costero.....	81
4.2.7.2	Capacidad	81
4.2.7.3	Componentes del sistema.....	81
4.2.7.3.1	Tuberías ranuradas	81
4.2.7.3.2	Entubado central.....	81
4.2.7.3.3	Medio filtrante	81
4.2.7.4	Ventajas y desventajas de las galerías de infiltración	82

4.2.8	<i>Recomendaciones generales para el diseño de captaciones cerradas</i>	83
4.3	EJEMPLOS DE SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR UTILIZADOS EN LA ACTUALIDAD	83
5	PROPUESTA DE MÉTODO DE EVALUACIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR	86
5.1	EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS PARA EL EMPLAZAMIENTO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR	86
5.1.1	<i>Criterios de evaluación</i>	86
5.1.1.1	Propiedades de la columna de agua	87
5.1.1.2	Corrientes	87
5.1.1.3	Mareas	87
5.1.1.4	Oleaje.....	87
5.1.1.5	Geomorfología del borde costero.....	87
5.1.1.6	Características generales de las playas	87
5.1.1.7	Vulnerabilidad frente a tsunamis.....	88
5.1.1.8	Biota marina	88
5.1.1.9	Impacto al turismo.....	88
5.1.1.10	Actividad pesquera y/o portuaria	88
5.1.1.11	Accesibilidad	88
5.1.1.12	Conectividad a la red de conducción	88
5.1.2	<i>Valoración relativa de las variables</i>	88
5.2	SELECCIÓN DEL TIPO DE OBRA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR	91
5.2.1	<i>Criterios de evaluación</i>	91
5.2.1.1	Condiciones hidrodinámicas	92
5.2.1.1.1	Corrientes	92
5.2.1.1.2	Oleaje.....	93
5.2.1.1.3	Mareas	94
5.2.1.2	Borde costero y características generales de las playas	94
5.2.1.2.1	Condiciones favorables del borde costero y playas para captaciones cerradas	94
5.2.1.2.2	Condiciones favorables del borde costero y playas para captaciones abiertas	96
5.2.1.3	Vulnerabilidad frente a tsunamis.....	98
5.2.1.4	Interacción con la biota marina	98
5.2.1.5	Características del tipo de captación	98
5.2.1.5.1	Uso del agua.....	98
5.2.1.5.2	Capacidad requerida	99
5.2.2	<i>Valoración relativa de las variables</i>	100
6	EJEMPLO DE APLICACIÓN: ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LAS LOCALIDADES DE PAPUDO Y LA LIGUA	103
6.1	DEFINICIÓN DEL PROBLEMA.....	103
6.2	ESTIMACIÓN DEL CAUDAL DE EXTRACCIÓN REQUERIDO.....	104
6.3	CARACTERIZACIÓN DE LOS SECTORES EN ESTUDIO	104
6.3.1	<i>Definición de los sectores</i>	104
6.3.2	<i>Descripción general de los sectores</i>	106
6.3.2.1	Sector 1: Playa Papudo Sur	106
6.3.2.2	Sector 2: Playa Papudo	107
6.3.2.3	Sector 3: Playa Lilén	108
6.3.3	<i>Propiedades de la columna de agua</i>	109
6.3.4	<i>Condiciones hidrodinámicas</i>	110

6.3.4.1	Corrientes	110
6.3.4.2	Mareas	110
6.3.4.3	Oleaje.....	111
6.3.4.3.1	Sector 1	111
6.3.4.3.2	Sector 2	111
6.3.4.3.3	Sector 3	112
6.3.5	<i>Geomorfología del borde costero</i>	112
6.3.5.1	Sector 1: Playa Papudo Sur	112
6.3.5.2	Sector 2: Playa Papudo	114
6.3.5.3	Sector 3: Playa Lilén	115
6.3.6	<i>Características generales de las playas.....</i>	116
6.3.6.1	Sector 1: Playa Papudo Sur	116
6.3.6.2	Sector 2: Playa Papudo	117
6.3.6.3	Sector 3: Playa Lilén	117
6.3.7	<i>Vulnerabilidad frente a tsunamis.....</i>	118
6.3.8	<i>Biota marina.....</i>	118
6.3.9	<i>Impacto al turismo</i>	119
6.3.9.1	Sector 1: Playa Papudo Sur	119
6.3.9.2	Sector 2: Playa Papudo	119
6.3.9.3	Sector 3: Playa Lilén	119
6.3.10	<i>Actividad pesquera y portuaria.....</i>	119
6.3.11	<i>Accesibilidad y conectividad a la red de conducción.....</i>	119
6.3.11.1	Sector 1: Playa Papudo Sur	119
6.3.11.2	Sector 2: Playa Papudo	120
6.3.11.3	Sector 3: Playa Lilén	121
6.4	EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS PARA EL EMPLAZAMIENTO DEL SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR	122
6.5	SELECCIÓN DEL TIPO DE CAPTACIÓN MÁS ADECUADO	123
6.6	PREDISEÑO DE LAS OBRAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR	125
6.6.1	<i>Captación abierta sumergida.....</i>	125
6.6.1.1	Cámara de captación	126
6.6.1.2	Sentina y tubería de transporte	127
6.6.1.2.1	Pérdidas de carga en la tubería de transporte	127
6.6.1.3	Impulsión hacia la planta desaladora.....	129
6.6.2	<i>Captaciones cerradas.....</i>	129
6.6.2.1	Noria Playera	130
6.6.2.1.1	Número de norias	130
6.6.2.1.2	Entubado Central	130
6.6.2.1.3	Espaciamiento entre norias.....	131
6.6.2.1.4	Sistema de bombeo	131
6.6.2.1.5	Conexión de las norias.....	131
6.6.2.1.6	Impulsión hacia la planta desaladora	132
6.6.2.2	Pozo radial	132
6.6.2.2.1	Entubado central y sistema de bombeo	132
6.6.2.2.2	Brazos radiales	133
6.6.2.2.3	Impulsión hacia la planta desaladora.....	133
6.6.3	<i>Evaluación económica de las alternativas</i>	134
6.6.3.1	Presupuesto captación abierta sumergida	134

6.6.3.2	Presupuesto norias playeras	135
6.6.3.3	Presupuesto pozo radial	135
7	CONCLUSIONES.....	137
8	REFERENCIAS	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Distribución latitudinal de la salinidad superficial promedio.	25
Figura 2.	Distribución de salinidad en función de la profundidad para latitudes medias y bajas en el océano Pacífico.	25
Figura 3.	Distribución de la temperatura (°C) en función de la profundidad.	26
Figura 4.	Distribución de la temperatura superficial entre los 17° y 33° de latitud Sur en febrero de 2016 (NASA Earth Observations)	28
Figura 5.	Distribución de la temperatura superficial entre los 17° y 33° de latitud Sur en mayo de 2016 (NASA Earth Observations)	29
Figura 6.	Distribución de la temperatura superficial entre los 17° y 33° de latitud Sur en julio de 2016 (NASA Earth Observations)	29
Figura 7.	Distribución de la temperatura superficial entre los 17° y 33° de latitud Sur en octubre de 2015 (NASA Earth Observations).....	30
Figura 8.	Distribución de la temperatura superficial entre los 32° y 42° de latitud Sur en febrero de 2016 (NASA Earth Observations)	32
Figura 9.	Distribución de la temperatura superficial entre los 32° y 42° de latitud Sur en mayo de 2016 (NASA Earth Observations)	32
Figura 10.	Distribución de la temperatura superficial entre los 32° y 42° de latitud Sur en julio de 2016 (NASA Earth Observations)	33
Figura 13.	Representación gráfica de los tipos de mareas, a través de las variaciones del nivel del mar. 37	
Figura 14.	Tipos de olas clasificadas según sus propiedades hidrodinámicas.	40
Figura 15.	Secciones transversales de la costa en dos puntos de la Zona Norte de Chile: Punta Madrid y Bahía Inglesa.	42
Figura 16.	Secciones transversales de la costa en dos puntos de la Zona Central de Chile: Constitución y el Golfo de Arauco.	43
Figura 17.	Zonas típicas de una playa (Werlinger, C., 2004).....	45
Figura 18.	Corrientes marinas generadas por el oleaje (Werlinger, C., 2004).....	45
Figura 19.	Parámetros Hidrodinámicos y Topográficos, Norma Técnica Minvu NTM007 (2013). 47	
Figura 20.	Esquema de ecosistema acuático según profundidad (Fundación Mar de Chile). 49	
Figura 21.	Velocidad de natación y gasto metabólico según tamaño del pez (Granado. C, 2002). 52	
Figura 23.	Cámara de captación con pantalla de captación rotatoria (Pankratz, T., 2004).. 56	
Figura 24.	Cámara de captación con cajón de succión (Nikolay Voutchkov, 2013)..... 56	
Figura 25.	Cámara de captación con pantalla pasiva cíclica. (WateReuse Association, 2011) 57	
Figura 26.	Esquema Sistema de captación abierta elevada..... 59	
Figura 27.	Esquema Sistema de Captación abierta directa. 61	
Figura 28.	Esquema de Pozo playero vertical. 65	

Figura 29.	Esquema general del sistema de captación pozos horizontales.....	70
Figura 30.	Esquema del sistema de captación mediante pozos inclinados.	73
Figura 31.	Esquema sistema de captación mediante pozos con perforación horizontal dirigida.	75
Figura 32.	Esquema de captación mediante Pozos radiales horizontales.	77
Figura 33.	Esquema de captación mediante galerías de Infiltración.	80
Figura 34.	Matriz de producción entre Papudo y La Ligua (Google Earth).	103
Figura 35.	Esquema ubicación zonas de estudio.	105
Figura 36.	Vista general del sector 1.....	106
Figura 37.	Vista general del extremo oeste del sector 1.	106
Figura 38.	Vista terreno cercano a la orilla en la zona Oeste del sector 1.....	107
Figura 39.	Vista a descarga de agua servida de emergencia en sector 1.	107
Figura 40.	Vista panorámica de la playa Papudo.	107
Figura 41.	Vista hacia el oriente de la desembocadura del Estero Agua Salada.	108
Figura 42.	Vista hacia el nororiente de la desembocadura del Estero Agua Salada.....	108
Figura 43.	Vista hacia el Poniente en el inicio de la playa Lilén.....	109
Figura 44.	Vista hacia el Oriente de la Playa Lilén.	109
Figura 45.	Variación del nivel del mar en Quintero y Pichidangui.....	110
Figura 48.	Oleaje en el Sector 3.	112
Figura 49.	Vista general extremo norte del sector 1.	113
Figura 50.	Vista general de la zona central del sector 1.	113
Figura 51.	Vista general de la zona Sur Oeste del sector 1.....	113
Figura 52.	Vista de la playa Papudo hacia el Sur (Sector 2).	114
Figura 53.	Vista hacia el norte de la playa Papudo (Sector 2)	114
Figura 54.	Vista hacia el norte, final de la playa Papudo (Sector 2).	114
Figura 55.	Vista hacia el norte de la playa Lilén.....	115
Figura 56.	Vista hacia el Sur del afloramiento rocoso.	115
Figura 57.	Vista hacia el Norte desde la punta de la playa Lilén.....	116
Figura 58.	Arena del tramo norte del Sector 1.	116
Figura 59.	Arena gruesa y grava del extremo Sur-Oeste del Sector 2.	116
Figura 63.	Esquema de proyección de obras necesarias en el sector 1.....	120
Figura 64.	Esquema de proyección de obras necesarias en el sector 2.....	121
Figura 65.	Esquema de proyección de obras necesarias en el sector 3.....	122

ÍNDICE DE TABLAS.

Tabla 1.	Sistema de Agua Potable Rural que utiliza desalación (Fuente: Dirección de Obras hidráulicas, 2012) (1).	18
Tabla 2.	Sistema de Agua Potable Rural que utiliza desalación (Fuente: Dirección de Obras hidráulicas, 2012) (2).	19
Tabla 3.	Plantas mineras que utilizan agua de mar para su operación en Chile (Muestra de Catastro de Plantas Desalinizadoras y Sistema de Impulsión de Agua de Mar, 2015/16) (2).	20
Tabla 4.	Resumen de la temperatura superficial del mar en Antofagasta, fuente SHOA (Latitud: 23° 39' S; Longitud: 70° 25' W).	30
Tabla 5.	Resumen de la temperatura superficial del mar en Valparaíso, fuente SHOA (Latitud: 33° 02' S; Longitud: 70° 19' W).	34
Tabla 6.	Altura significativa promedio observada en Chile (Los Océanos (Libro virtual), www.mardechile.cl).	40
Tabla 7.	Principales especies marinas que habitan en la zona Norte y Central de Chile (1).	49
Tabla 8.	Principales especies marinas que habitan en la zona Norte y Central de Chile (2).	50
Tabla 9.	Principales especies marinas que habitan en la zona Norte y Central de Chile (3).	51
Tabla 10.	Principales especies marinas que habitan en la zona Norte y Central de Chile (3).	52
Tabla 11.	Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas sumergidas (1).	58
Tabla 12.	Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas sumergidas (2).	59
Tabla 13.	Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas elevadas (1).	60
Tabla 14.	Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas elevadas (2).	61
Tabla 15.	Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas directas (1).	62
Tabla 16.	Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas directas (2).	63
Tabla 17.	Estimación del radio de influencia del pozo a partir de la granulometría del medio permeable (Missimer et al. 2013).	67
Tabla 18.	Ventajas y desventajas sistema de captación mediante pozos playeros.	68
Tabla 19.	Ventajas y desventajas sistema de captación mediante norias playeras.	69
Tabla 20.	Ventajas y desventajas del sistema de captación mediante pozos horizontales (1).	71
Tabla 21.	Ventajas y desventajas del sistema de captación mediante pozos horizontales (2).	72
Tabla 22.	Ventajas y desventajas del sistema de captación mediante pozos inclinados.	74
Tabla 23.	Ventajas y desventajas del sistema de captación mediante pozos con perforación horizontal dirigida (PHD).	76
Tabla 24.	Ventajas y desventajas del sistema de captación mediante pozos horizontales radiales (1).	78
Tabla 25.	Ventajas y desventajas sistema de captación mediante pozos horizontales radiales (2).	79
Tabla 26.	Ventajas y desventajas sistema de captación mediante galerías de infiltración (1).	82

Tabla 27.	Ventajas y desventajas sistema de captación mediante galerías de infiltración (2).	83
Tabla 28.	Plantas de captaciones existentes en el mundo (Mackey. E et al, 2011) (1).	83
Tabla 29.	Plantas de captaciones existentes en el mundo (Mackey. E et al, 2011) (2).	84
Tabla 30.	Plantas de captaciones existentes en el mundo (Mackey. E et al, 2011) (3).	85
Tabla 31.	Criterios de evaluación para análisis multicriterio de alternativas de emplazamiento de la captación de agua de mar.	86
Tabla 32.	Rangos de diseño de las propiedades de la columna de agua para captaciones que abastecen una planta desaladora. (Voutchkov N., 2013)	87
Tabla 33.	Valoración relativa de las variables para la selección del emplazamiento del sistema de captación de agua de mar.	90
Tabla 34.	Criterios de evaluación para análisis multicriterio de alternativas de captación de agua de mar.	91
Tabla 35.	Corrientes adecuadas y no adecuadas para la implementación de captaciones abiertas y galerías de infiltración en el lecho marino.	92
Tabla 36.	Oleaje adecuado y no adecuado para la implementación de captaciones abiertas y galerías de infiltración en el lecho marino.	93
Tabla 37.	Tipos de sedimentos de las playas adecuadas para la implementación de captaciones cerradas.	94
Tabla 38.	Tipos de sedimentos de las playas adecuadas para la implementación de captaciones cerradas (2).	95
Tabla 39.	Tipos de playas para implementación de galerías de infiltración.	96
Tabla 40.	Tipos de fondos marinos que no son adecuados para la implementación de captaciones abiertas (1).	96
Tabla 41.	Tipos de fondos marinos que no son adecuados para la implementación de captaciones abiertas (2).	97
Tabla 42.	Recomendación tipo captación por uso requerido (1).	98
Tabla 43.	Recomendación tipo captación por uso requerido (2).	99
Tabla 44.	Recomendación tipo de captación por capacidad requerida (1).	99
Tabla 45.	Recomendación tipo de captación por capacidad requerida (2).	100
Tabla 46.	Valoración relativa de las variables para la selección del tipo de captación de agua de mar.	102
Tabla 47.	Población, dotación de consumo y porcentaje de pérdidas en La Ligua y Papudo (Datos proporcionados por ESVAL).	104
Tabla 48.	Proyección de la población, dotación de consumo y porcentaje de pérdidas en La Ligua y Papudo al año 2026 (Datos proporcionados por ESVAL).	104
Tabla 49.	Emplazamiento típicamente requerido según capacidad de la planta de desalación (Voutchkov N., 2013).	105
Tabla 50.	Rangos esperados de valores de propiedades de la columna de agua.	109
Tabla 51.	Análisis multicriterio para seleccionar el emplazamiento del sistema de captación de agua de mar en la localidad de Papudo.	123
Tabla 52.	Análisis multicriterio para seleccionar el tipo de captación de agua de mar.	124

Tabla 53.	Requerimientos, materiales y consideraciones de diseño para la captación abierta sumergida.	126
Tabla 54.	Area de ingreso de agua requerida para la cámara de captación	126
Tabla 55.	Pérdidas de carga estimadas para tres diámetros de tuberías de HDPE Clase PN10.	128
Tabla 56.	Descripción de las bombas para la captación abierta sumergida.....	128
Tabla 57.	Altura requerida para la sentina.	129
Tabla 58.	Especificación tuberías para la impulsión hacia la planta desaladora.....	129
Tabla 59.	Requerimientos, materiales y consideraciones de diseño para las captaciones cerradas.	130
Tabla 60.	Profundidad del entubado con barbacanas en las norias.....	131
Tabla 61.	Sistema de bombeo para las norias playeras.....	131
Tabla 62.	Especificación del manifold para las norias playeras.....	132
Tabla 63.	Especificación tuberías para la impulsión hacia la planta desaladora.....	132
Tabla 64.	Descripción de las bombas para el pozo radial.....	133
Tabla 65.	Especificación tuberías para la impulsión hacia la planta desaladora.....	133
Tabla 66.	Presupuesto captación abierta sumergida.	134
Tabla 67.	Presupuesto norias playeras.....	135
Tabla 68.	Presupuesto pozo radial	136

1 INTRODUCCIÓN

A lo largo del territorio nacional, Chile cuenta con una gran disponibilidad de recursos hídricos de superficie, incluyendo una de las mayores reservas mundiales de agua dulce en campos de hielo sur. A pesar de esta privilegiada condición, la gran variabilidad geográfica y climática del territorio provoca grandes diferencias en la disponibilidad de agua en las diferentes regiones del país, encontrándose zonas de gran abundancia en la zona sur y escasísima disponibilidad en las regiones del norte. Por otro lado, las diferencias en la densidad poblacional y las actividades productivas que se desarrollan a lo largo del país generan variaciones regionales en la demanda de recurso hídrico. De acuerdo con estudios realizados por el Ministerio de Obras Públicas, en la Zona Centro y Norte del país la demanda supera con creces la disponibilidad de agua, observándose un déficit de hasta un 100% en algunas regiones, cifra que se espera pueda aumentar debido a incrementos en la demanda y disminución de la disponibilidad de agua dulce debido al cambio climático. Por el contrario, en la Zona Sur se prevé que existirá disponibilidad suficiente para cubrir la demanda.

Una alternativa para suplir el déficit de oferta existente en las zonas Centro y Norte es la utilización del agua de mar como fuente de recurso hídrico. La extensa costa chilena, de cerca de 6400 kilómetros de longitud, en un país angosto, sumado a los avances tecnológicos en los procesos de desalación de agua, hacen de la captación de agua de mar, una fuente viable, desde el punto de vista técnico y económico, para la producción de agua destinada a diferentes actividades económicas. Actualmente, los principales sectores que utilizan agua de mar como fuente de abastecimiento en Chile son la minería y el consumo humano, sin embargo, se espera que en el futuro su uso se expanda a otras actividades económicas, como la industria y agricultura, impulsado por el creciente déficit de oferta de agua dulce y a la mejora en las tecnologías empleadas en el proceso de desalación.

Uno de los principales factores a considerar al proyectar un sistema de abastecimiento con agua de mar es el diseño de la estructura de captación. El diseño, monitoreo y operación de la obra de captación puede representar hasta un 20% del costo total del proyecto, pudiendo incluso llegar a definir la factibilidad y eficiencia del sistema de abastecimiento. En la actualidad, existen numerosas alternativas de sistemas de captación de agua de mar, con características que se adaptan a los diferentes requisitos de capacidad y calidad, y a las diversas condiciones locales de la costa. De manera general, las estructuras de captación pueden clasificarse en captaciones abiertas, donde el agua es extraída directamente desde el océano, y captaciones cerradas, donde el agua es captada mediante pozos o galerías de infiltración.

El sistema de captación debe ser capaz de proveer el caudal requerido de manera confiable, con una calidad adecuada y un mínimo impacto ambiental. Para lograr estos objetivos es esencial realizar un análisis detallado de las condiciones locales del sector de emplazamiento de la obra, incluyendo las características geomorfológicas, oceanográficas y de la biota marina. Sin embargo, en la etapa de diseño conceptual del proyecto es deseable realizar una preselección de potenciales ubicaciones y tipos de obras de captación, sin la necesidad de

realizar estos estudios, que pueden llegar a ser muy costosos. El objetivo general de esta memoria es generar un documento que explore diversas formas de captaciones costeras de agua de mar y proponer una metodología de evaluación que permita planificar y pre dimensionar una obra de captación de agua de mar considerando información que puede ser recolectada en inspecciones de terreno e información existente de la costa central y norte de Chile, donde la utilización de agua de mar como fuente de recurso hídrico tiene mayor potencial.

Los objetivos específicos del trabajo se detallan a continuación:

- Definir las características costeras más relevantes que deben considerarse en el diseño de una obra de captación de agua de mar y recopilar información sobre los valores y rasgos típicos que adquieren en la Zona Centro y Norte de Chile, de manera que sirvan como guía para la evaluación a nivel de ingeniería conceptual de un potencial emplazamiento para una obra de captación de agua de mar.
- Realizar una revisión bibliográfica de las diferentes obras de captación existentes, destacando las ventajas y desventajas de cada una, para finalmente proponer criterios de evaluación y recomendaciones que permitan analizar diferentes alternativas y plantear la solución más adecuada, a nivel de ingeniería conceptual, para el emplazamiento seleccionado.
- Como ejemplo de aplicación, evaluar la implementación de una captación de agua de mar en Papudo para abastecer de agua potable a las localidades de La Ligua y Papudo, mediante un análisis multicriterio que considera la información recopilada y las recomendaciones propuestas.

2 EL PROBLEMA DE LA CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR COMO RECURSO HÍDRICO

2.1 Balance de oferta y demanda de agua en Chile

Al considerar todo el territorio nacional, Chile podría ser calificado como un país privilegiado en materia de recursos hídricos. El volumen total de agua que escurre por los ríos y cauces del país es de 53.000 [m³] por persona al año, superando en 8 veces la media mundial (6.600 [m³/habitante/año]), y en 25 veces el mínimo de 2.000 [m³/habitante/año] que se requiere desde la óptica de un desarrollo sostenible (Estrategia Nacional de Recursos hídricos 2012-2015, 2012). Sin embargo, debido a la geografía y lo extenso del territorio chileno, la disponibilidad de agua varía significativamente a lo largo de las diferentes regiones del país. En el siguiente gráfico se ilustra la disponibilidad de agua dulce en [m³] por habitante en el año 2009 para cada región de Chile.

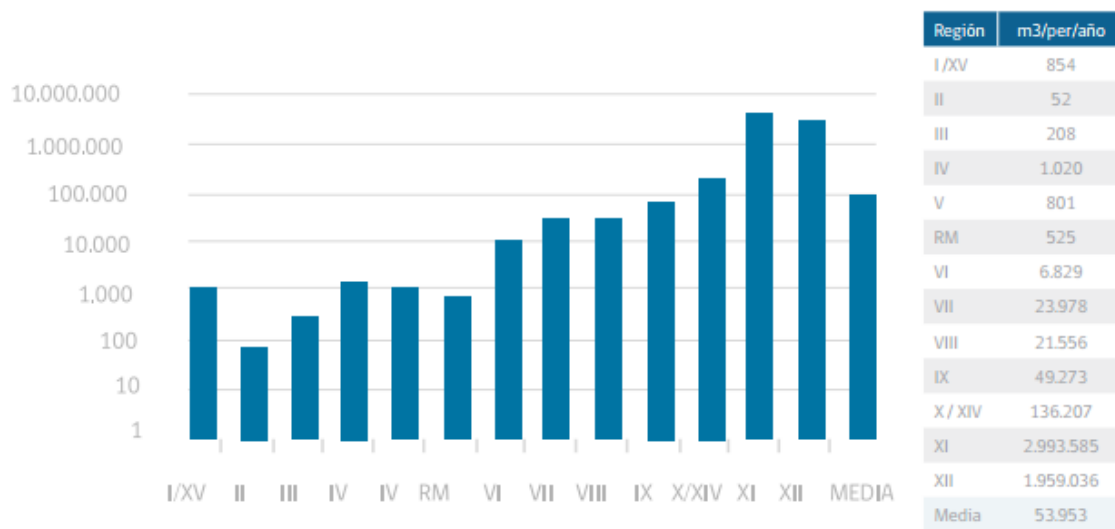


Gráfico 1. Disponibilidad de agua en Chile en m³ por habitante en el año 2009 (Escala logarítmica)
(Fuente: Estrategia Nacional de Recursos hídricos 2012-2015, 2012)

Por otro lado, las variaciones en la densidad poblacional y las diferentes actividades productivas que se desarrollan en las distintas regiones del país provocan que la demanda de agua tampoco sea uniforme a lo largo del territorio. De acuerdo a “Estrategia Nacional de Recursos Hídricos 2012-2015”, ya al año 2010, desde la Región Metropolitana al norte la demanda superaba con creces la disponibilidad de agua, observándose un déficit que en algunas regiones es cercano al 100%. Durante los próximos años, se espera un aumento en la demanda en la Zona Norte y Centro del país, por lo que este déficit podría verse agravado. Por el contrario, en la Zona Sur se prevé que existirá disponibilidad suficiente para cubrir la demanda. En el Gráfico 2 se muestran las diferencias entre la oferta y la demanda de agua para cada región del país.

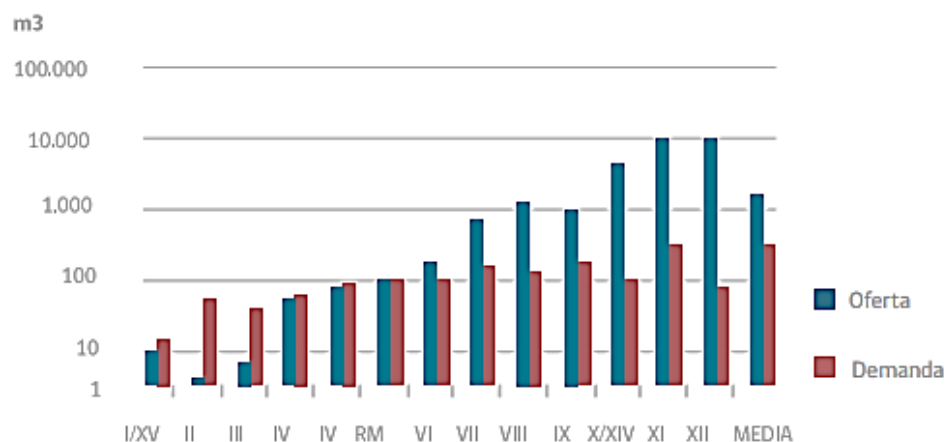


Gráfico 2. Demanda versus Oferta por región en Chile (Escala logarítmica). (Fuente: Estrategia Nacional de Recursos hídricos 2012-2015, 2012)

Una alternativa para suplir el déficit de oferta existente en las zonas Centro y Norte es la utilización del agua de mar como fuente de recurso hídrico. La geografía del territorio chileno, con una extensa costa que recorre el país de norte a sur, hace posible considerar el agua de mar como una fuente confiable de abastecimiento para cualquier región de Chile.

2.2 Uso de agua de mar como recurso hídrico en Chile

Además del consumo humano, el agua es un recurso estratégico para muchos sectores productivos claves para el desarrollo del país, como la minería, la industria, la agricultura y la ganadería. En la actualidad, los principales sectores que utilizan agua de mar como fuente de abastecimiento son la minería y el consumo humano, sin embargo, se espera que su uso se expanda a los demás sectores en el futuro. Los requerimientos de calidad y cantidad de agua son diferentes en cada sector productivo.

2.2.1 Agua Potable

El porcentaje de agua necesario para el abastecimiento de la población en las ciudades es minoritario respecto al uso total de las aguas extraídas en Chile (4,5%), sin embargo, el crecimiento urbano en las últimas décadas ha producido un incremento en el uso de agua potable. En cuanto a la distribución de la demanda de agua potable para consumo humano a lo largo del territorio, esta se concentra principalmente en la zona central del país; la Región Metropolitana utiliza el 44% de la producción total de agua potable mientras que la región de Valparaíso un 12%.

En la actualidad, la utilización de agua de mar como recurso hídrico para abastecer a la población ha aumentado considerablemente. En el Norte del país, entre Taltal y Antofagasta, el abastecimiento de agua dulce es escaso, por lo que se ha tomado como medida de abastecimiento la desalación a partir de ríos de agua salobre. Para abastecer las localidades de Antofagasta, Taltal y Mejillones, la empresa sanitaria Aguas Antofagasta utiliza la planta

desaladora “La Chimba”, que opera desde el año 2013, y la planta desaladora Taltal, que opera desde el año 2008. El abastecimiento de agua potable proveniente de la desalación en esta zona alcanza un 60% del total. Por otro lado, Aguas del Altiplano, que abastece a la localidad de Arica, produce agua potable con dos plantas desaladoras con capacidades de 208 [L/s] y 150 [L/s]. Para los próximos años se ha proyectado una nueva planta desaladora con una capacidad de 200 [L/s]. En las provincias de Copiapó y Chañaral, recientemente se aprobó el proyecto de una planta desalinizadora que tendrá una capacidad de 360 a 450 [L/s] para el año 2022. (Fuente: Plan de Infraestructura para Sequía, MOP)

El agua de mar también puede utilizarse para abastecer pequeñas localidades mediante sistemas de agua potable rural (APR). En la Tabla 1 se encuentran algunos APR que cuentan con plantas desaladoras en Chile.

Región	Comuna	Nombre Sistema	Año Instalación Planta OI	N° Arranques	Consumo mensual estimado (m³/mes)	Tipo de captación
Tarapacá	Huara	Tarapacá	2005	350	2.400	Noria
Antofagasta	San Pedro de Atacama	San Pedro de Atacama	1998	1.402	16.790	Pozos
Atacama	Copiapó	Total	2004	73	701	Pozos
Atacama	Freirina	Carizalillo C. Chañaral de Aceituno	2001	223	2.141	Pozos
Atacama	Huasco	Carrizal	2001	212	2.035	Pozos
Coquimbo	Ovalle	Cerrillos de Tamaya	2003	907	8.650	Pozos
Coquimbo	Ovalle	San Julian	2003	192	1.843	Pozos
Coquimbo	Ovalle	Trapiche	2003	130	1.258	Pozos
Coquimbo	Ovalle	Barraza	2003	459	4.330	Pozos
Coquimbo	Ovalle	Porvenir	2011	172	1.548	Pozos
Coquimbo	Ovalle	Tabalí	2011	148	1.332	Noria
Coquimbo	Ovalle	Barraza Alto Socos	2011	92	400	Pozos
Coquimbo	Ovalle	Alcones Bajos	2011	120	450	Noria
Coquimbo	La Higuera	Chungungo	2005	270	2.602	Captación abierta
Coquimbo	Coquimbo	Puerto Aldea	2004	93	854	Noria

Tabla 1. Sistema de Agua Potable Rural que utiliza desalación (Fuente: Dirección de Obras hidráulicas, 2012) (1).

Región	Comuna	Nombre Sistema	Año Instalación Planta OI	N° Arranques	Consumo mensual estimado (m3/mes)	Tipo de captación
Coquimbo	La Higuera	Caleta de Hornos	1999	363	3.466	Pozos
Aysén	Puerto Aysén	Islas Huichas	2008	317	2.880	Captación abierta

Tabla 2. Sistema de Agua Potable Rural que utiliza desalación (Fuente: Dirección de Obras hidráulicas, 2012) (2).

2.2.2 Minería

La minería es el primer sector económico del país en términos de contribución al PIB y a las exportaciones. La actividad minera, además, constituye uno de los principales usuarios del recurso hídrico de la zona norte de Chile, utilizando en la actualidad una gran cantidad de agua de mar en sus procesos.

En minería, el agua se utiliza principalmente para separar los minerales de las rocas y limpiarlos de los desechos, por lo que suele requerirse un caudal importante de agua desalada. En la actualidad, las plantas desaladoras instaladas para la minería en Chile tienen una capacidad máxima de 2.038 [L/s]. Por otro lado, en algunos procesos mineros se utiliza agua de mar de manera directa, es decir, sin desalar, con captaciones de capacidades que alcanzan los 3.648 [L/s].

La producción de cobre es el área que consume la mayor parte del agua de mar, llegando a consumir 2.500 [L/s] en el año 2015. La minería del cobre proyecta una utilización de agua de mar para el año 2025 que alcanzaría los 10.500 [L/s] según el estudio “Proyección del consumo de agua en la minería del cobre al 2026”, de la Comisión Chilena del Cobre.

En la tabla 3 se resumen las plantas existentes que utilizan agua de mar y agua desalada en la actualidad.

Planta	Operador	Región	Capacidad máxima planta [L/s]
Agua Desalinizada			
Planta Desalinizadora M. Candelaria	Freeport	Atacama	500
Minera Antucoya	Antofagasta Minerals	Antofagasta	48
Minera Sierra Gorda	Sierra Gorda SCM	Antofagasta	63
Minera Mantos de la Luna	Compañía Minera Tocopilla	Antofagasta	9

Planta	Operador	Región	Capacidad máxima planta [L/s]
Desalinizadora CAP Cerro Negro Norte	CAP	Atacama	600
Mina Mantoverde	Anglo American	Atacama	120
Distrito Minero Centinela (Esperanza)	Antofagasta Minerals	Antofagasta	173
Planta Coloso Minera Escondida	BHP Billiton	Antofagasta	525
Agua de Mar			
Planta Cátodos Pampa Camarones	Minera Pampa Camarones	Arica y Parinacota	25
Distrito Minero Centinela	Antofagasta Minerals	Antofagasta	1.500
Minera Cierre Gorda	Sierra Gorda SCM	Antofagasta	1.315
Mina Algorta	Algorta Norte S.A	Antofagasta	400
Minera Antucoya	Antofagasta Minerals	Antofagasta	280
Agua de mar Cenizas Taltal	SLM Las Cenizas	Antofagasta	50
Agua de mar Mantos de la Luna	Caompañia Minera Tocopilla	Antofagasta	78

Tabla 3. Plantas mineras que utilizan agua de mar para su operación en Chile (Muestra de Catastro de Plantas Desalinizadoras y Sistema de Impulsión de Agua de Mar, 2015/16) (2).

Para el futuro, el sector minero prevé al menos 19 proyectos con uso directo de agua de mar y/o desalinización en sus procesos. Estos proyectos se ubican principalmente en la zona norte del país; en la Región de Antofagasta, la Región de Atacama, y un nuevo foco de desarrollo en la IV y I Región. La capacidad total instalada se proyecta en cerca de 13.240 [L/s] de agua desalinizada y en 3.685 [L/s] de agua de mar directa.

2.2.3 Termoeléctricas

La energía termoeléctrica representa el 64% del total de producción de energía eléctrica de Chile. Las plantas termoeléctricas se ubican principalmente en las zonas áridas y semiáridas del país, es decir, desde la región metropolitana hacia el norte, y generalmente utilizan agua de mar para sus procesos. Parte del agua es convertida en vapor que permite que el generador produzca electricidad, sin embargo, la mayor parte del agua es usada en el enfriamiento del condensador.

2.2.4 Riego

El riego es particularmente importante para la agricultura chilena porque de esto depende el 40% del área cultivada y una gran parte de los productos de alto valor de exportación. Además,

el riego es el sector que tiene el mayor porcentaje de uso del agua en Chile, llegando a ser en conjunto con la acuicultura el 80% aproximadamente.

En Chile, el agua de mar no ha sido muy utilizada como fuente de abastecimiento para riego hasta el momento, sin embargo, el fenómeno del cambio climático y las extensas sequías que han afectado a la zona central del país en los últimos años sugieren que puede ser una alternativa viable para el futuro.

2.2.5 Otros usos

Otros sectores productivos como la ganadería, la industria y el turismo, representan, en conjunto, aproximadamente el 10% del uso total de agua en Chile. En la ganadería el uso del agua se destina a la alimentación de los animales y en la limpieza de las instalaciones dedicadas a la cría de ganado, mientras que en la industria, el agua se utiliza principalmente en la industria química, el azúcar, petróleo y celulosa, siendo esta última la que realiza el mayor consumo. En general, no se utiliza una cantidad considerable de agua de mar en estos sectores.

En el gráfico 3 se muestra la distribución del uso total del agua en Chile por sector productivo.



Gráfico 3. Usos del agua en porcentajes de Chile. (Elaborado: "Sociedad Nacional de Agricultura", 2011, Fuente: DGA)

2.3 Principales captaciones de agua de mar utilizadas en la actualidad

La utilización del agua de mar como fuente de recurso hídrico ha adquirido en los últimos años un importante auge debido principalmente a la mejora de las tecnologías empleadas en el proceso de desalación. Los sistemas de captación también han ido cambiando y mejorando con

el transcurso de los años debido a la necesidad de adaptarse a las nuevas normativas ambientales, mejoras tecnológicas y el aumento de calidad y eficiencia de las nuevas plantas.

En la actualidad, existen diversas alternativas de obras de captación de agua de mar, las que se clasifican en captaciones abiertas, donde el agua es extraída directamente desde el océano, y captaciones cerradas, donde el agua es captada mediante pozos o galerías de infiltración.

En las captaciones abiertas el agua de mar es extraída directamente del océano mediante una tubería que puede construirse elevada o sumergida. Este tipo de captación además debe considerar la construcción de un pozo húmedo, sentina u otro mecanismo para tener el sistema de bombas, y una estación de bombeo que suele ubicarse en la costa ya que requiere de fácil acceso y conexión con la planta elevadora. Las alternativas existentes para las captaciones abiertas de agua de mar son:

- 1) Captaciones abiertas sumergidas.
- 2) Captaciones abiertas elevadas.
- 3) Captaciones abiertas directas.

En las captaciones cerradas, el agua de mar o salobre es extraída desde la orilla de las playas o sectores cercanos, a través de lechos de arena saturada u otros estratos subterráneos permeables. A diferencia de las captaciones abiertas, la capacidad de las captaciones cerradas es limitada por las condiciones geomorfológicas locales.

El uso de captaciones cerradas ofrece diversas ventajas ambientales y operacionales. El agua de mar recolectada mediante estas captaciones es pretratada naturalmente vía filtración lenta a través del suelo marino arenoso, por lo que usualmente contiene bajos niveles de sólidos, aceites, grasas, contaminantes naturales orgánicos y organismos acuáticos, lo que reduce el costo de pretratamiento requerido y el impacto a la biota marina.

Existen diversos tipos de captaciones cerradas de agua de mar. En general, los más utilizados son:

- 1) Pozos playeros verticales
- 2) Norias playeras
- 3) Pozos playeros horizontales
- 4) Pozos inclinados
- 5) Pozos con perforación dirigida (PHD)
- 6) Pozos horizontales radiales
- 7) Galerías de infiltración con cama filtrante

Las características, ventajas y desventajas de cada tipo de captación de agua de mar se estudian en detalle en el capítulo 4.

2.4 Planificación de una obra de captación de agua de mar

La planificación de una captación de agua de mar contempla dos etapas esenciales: la selección de la ubicación y la elección del tipo de obra de captación más adecuado para las condiciones específicas del sitio elegido. El desarrollo de la ingeniería de detalle de un proyecto de captación de agua de mar requiere la realización de pruebas y estudios hidrogeológicos para determinar las propiedades del agua de mar y del borde costero, sin embargo, en la etapa de diseño conceptual es necesario evaluar la factibilidad técnica de instalar una captación de agua de mar en diferentes alternativas de emplazamiento y plantear una solución basándose en información de carácter general, que puede recolectarse de inspecciones en terreno y la bibliografía existente. El objetivo general de este trabajo es reunir información sobre los aspectos que se deben considerar para el diseño conceptual de una obra de captación de agua de mar y proponer un método de evaluación de alternativas.

2.4.1 Selección del emplazamiento de una captación de agua de mar

En la evaluación de posibles emplazamientos para una obra de captación de agua de mar deben considerarse múltiples aspectos, como las características del borde costero, accesibilidad, conectividad a la red de conducción, impacto al turismo o a la actividad pesquera, etc. El presente trabajo se enfoca en las características costeras que deben considerarse para la evaluación de potenciales ubicaciones de un sistema de captación de agua de mar.

El objetivo específico en este ámbito es definir los aspectos más relevantes de la costa que deben estudiarse, y describir los valores y rasgos típicos que adquieren a lo largo de la Zona Norte y Centro de Chile (Desde límite marítimo chileno-peruano hasta los 43° latitud Sur), donde la utilización de agua de mar como fuente de recurso hídrico tiene mayor potencial, de manera que sirvan como guía para la evaluación a nivel de ingeniería conceptual de un potencial emplazamiento para una obra de captación de agua de mar.

2.4.2 Selección del tipo de obra de captación de agua de mar

Una vez que se ha seleccionado una potencial ubicación, debe determinarse el tipo de obra más adecuado para las características particulares de la costa en el lugar. En la bibliografía es posible encontrar información detallada sobre las características de cada tipo de captación, sin embargo, no existe una guía que permita evaluar que alternativa es la más adecuada para condiciones particulares de la costa.

El objetivo específico en esta etapa es describir los diferentes tipos de obras de captación existentes, y proponer criterios de evaluación y recomendaciones que permitan analizar diferentes alternativas y plantear la solución más adecuada, a nivel de ingeniería conceptual, para el emplazamiento seleccionado.

3 ASPECTOS A CONSIDERAR EN LA SELECCIÓN DE LA UBICACIÓN Y EL TIPO DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR EN LA ZONA CENTRO Y NORTE DE CHILE

Existen diversas propiedades del agua de mar y características del borde costero y la biota marina que es importante considerar para seleccionar la ubicación y el sistema más adecuado para una captación de agua de mar. A continuación, se describen los aspectos más relevantes que se deben estudiar y los valores y rasgos típicos que adquieren en la costa de la Zona Centro y Norte de Chile.

3.1 Propiedades de la columna de agua

Las propiedades de la columna de agua corresponden a la salinidad, temperatura y densidad del agua de mar en el punto de estudio. Si bien estas características no influyen significativamente en el tipo de obra de captación a utilizar, si pueden tener incidencia en la selección de una potencial ubicación, ya que, son relevantes para determinar si el agua a captar es apta para el uso que se le quiere dar, y para el estudio de dilución y dispersión de la pluma del efluente en el sector de descarga, en los casos en que se proyecta además una planta desaladora. Aun cuando este estudio queda fuera del alcance de este trabajo, es relevante conocer información de carácter general respecto a estas características para tener una idea global de los valores que se deben obtener en las pruebas de terreno.

3.1.1 Salinidad

La salinidad se define como la cantidad total de sustancias sólidas (expresada en gramos) contenida en un litro de agua de mar, cuando todos los carbonatos se han convertido en óxido, el bromo y el yodo han sido sustituidos por el cloro y la materia orgánica ha sido completamente oxidada. El nivel de salinidad de las aguas superficiales de los océanos depende principalmente de la diferencia entre la evaporación y precipitación.

Los valores típicos de salinidad en el mar oscilan entre 29 [gr/L] y 37 [gr/L]. Esta variación es función de:

- 1) El balance entre la evaporación y la precipitación (E-P) que concentran o disuelven las aguas superficiales.
- 2) Fenómeno de mezcla y de su efectividad entre aguas superficiales y subyacentes.
- 3) Los aportes fluviales que pueden intervenir en las regiones costeras.
- 4) Derretimiento o formación de hielos en las regiones polares.

En la Figura 1 se muestra la variación de la salinidad en las aguas superficiales en función de la latitud.

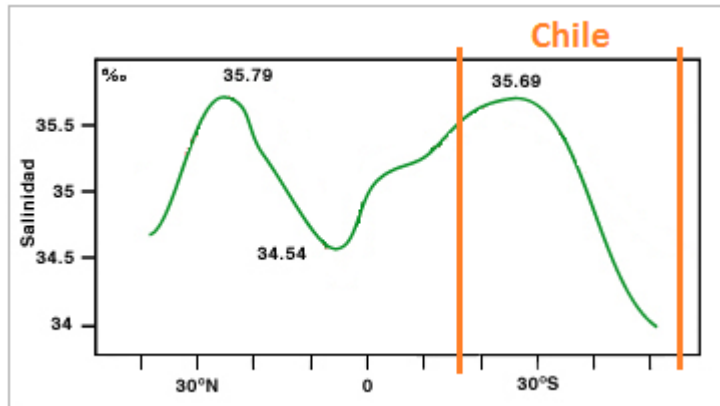


Figura 1. Distribución latitudinal de la salinidad superficial promedio (Adaptación de “Curso Geografía del Mar”, Universidad Católica de Chile).

El nivel de salinidad en el océano además depende de la profundidad de las aguas. En la Figura 2 se muestra la distribución de la salinidad en función de la profundidad para latitudes medias y bajas. Se observa que en las aguas superficiales la salinidad es mucho mayor que en las aguas profundas. A profundidades mayores que 2.000 metros la concentración es bastante homogénea, existiendo de todas maneras ligeras variaciones entre masas de aguas profundas según su origen. La zona de interés para las captaciones de agua de mar son las primeras decenas de metros medidos desde la superficie.

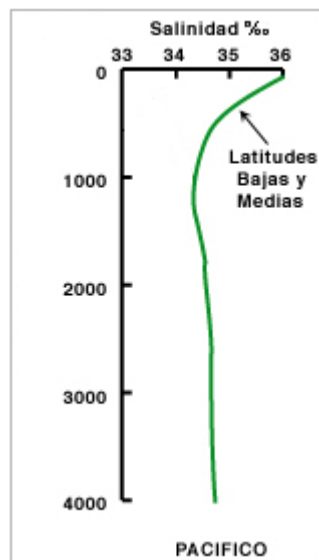


Figura 2. Distribución de salinidad en función de la profundidad para latitudes medias y bajas en el océano Pacífico (Adaptación de “Curso Geografía del Mar”, Universidad Católica de Chile).

3.1.2 La temperatura

La temperatura, al igual que la salinidad, es una propiedad conservativa del agua de mar, es decir, sus valores solo pueden ser alterados por procesos de mezcla. La temperatura en la

superficie del océano es función de la radiación solar que recibe y de la fracción que es reflejada. La superficie del océano pierde temperatura mediante tres procesos:

- 1) Intercambio por convección, radiación de onda larga hacia la atmósfera.
- 2) Intercambio térmico, liberación de calor sensible.
- 3) Intercambio por evaporación, liberación de calor latente asociado a la evaporación del agua desde la superficie del mar.

La distribución vertical de la temperatura es anatómica, es decir, las aguas más calientes se encuentran sobre las más frías. En general, en un corte esquemático vertical, la masa de agua se puede estructurar térmicamente en dos capas homogéneas con una zona de transición entre ambas capas (Figura 3). La primera zona es la capa de mezcla, donde el calor se distribuye homogéneamente en sentido vertical debido a la acción del viento y a los movimientos generados por éste. Entre la capa superficial y la capa fría profunda se encuentra la termoclina. En esta zona existe una gran variación de temperatura en función de la profundidad. Finalmente se encuentra la capa profunda, donde las temperaturas descienden lentamente a medida que aumenta la profundidad.

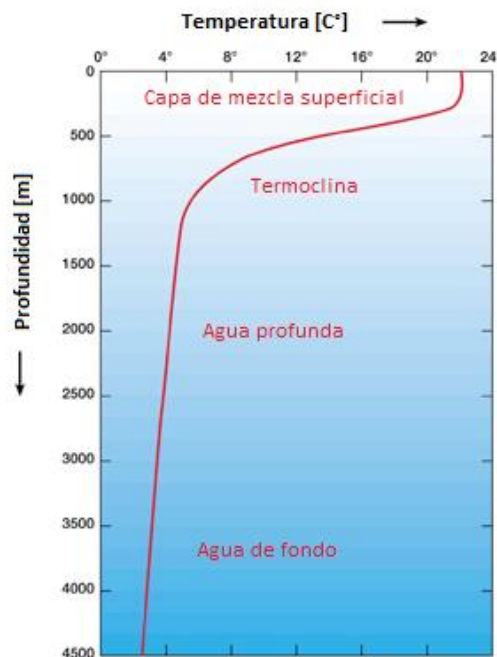


Figura 3. Distribución de la temperatura (°C) en función de la profundidad (Adaptación de "Curso Geografía del Mar", Universidad Católica de Chile).

Al igual que la distribución de la temperatura superficial por latitud, el perfil vertical de la temperatura está expuesto a variaciones estacionales, los que originan cambios en la capa de mezcla y la termoclina. En el fondo del océano la temperatura permanece aproximadamente constante, oscilando entre -0,9°C y 2,0°C y no se ve afectada con los cambios estacionales.

3.1.3 La densidad

La densidad del agua de mar está estrechamente relacionada con la temperatura y la salinidad; disminuye cuando la temperatura se eleva debido a la dilatación térmica del agua y; aumenta con la salinidad por el peso de las sales disueltas. La densidad del océano varía aproximadamente entre 1,024 y 1,030 gr/cm³ y, en general, aumenta con la profundidad dentro de un estrecho rango de variación. Comparativamente, es la propiedad menos relevante desde el punto de vista de las captaciones del agua de mar.

3.1.4 Propiedades de la columna de agua en la Zona Centro y Norte de Chile

Los valores de salinidad, temperatura y densidad deben determinarse a partir de pruebas en terreno en diferentes estaciones de año, sin embargo, existe información de carácter general que resulta útil para la etapa de diseño conceptual.

3.1.4.1 Características típicas de la columna de agua en la Zona Norte de Chile

3.1.4.1.1 Condiciones de verano

Durante el verano, la influencia del agua subtropical es más acentuada y por lo tanto prevalecen en la zona temperaturas superiores a los 20°C asociadas a salinidades superiores a 35‰.

La característica principal de las temperaturas en esta época del año es el desarrollo de un fuerte gradiente horizontal, el cual es más acentuado entre Arica y Mejillones. Esto da origen a un frente térmico a causa de la penetración de aguas cálidas cercanas a la costa que entran en contacto con aguas frías. Las aguas oceánicas tienen elevadas salinidades, superiores a los 35‰, llegando a alcanzar incluso valores de 37,5‰. Las salinidades disminuyen de forma gradual de Antofagasta al sur.

En la Figura 4 se muestra la distribución de temperatura en la Zona Norte de Chile en el periodo de verano.

3.1.4.1.2 Condiciones de Otoño.

Durante el otoño se observa una disminución gradual de las temperaturas en toda esta zona, fluctuando entre los 15°C y los 20°C con focos muy pequeños de temperaturas altas en el sector norte. Por otro lado, la salinidad presenta un rango máximo en el sector norte, alcanzando valores cercanos a 36‰ en las cercanías de la costa.

En la Figura 5 se muestra la distribución de temperatura en la Zona Norte de Chile en el periodo de verano.

3.1.4.1.3 Condiciones de Invierno

Durante el invierno se presenta una gran uniformidad tanto en las temperaturas como en las salinidades superficiales. Los valores de temperatura fluctúan entre 16° y 17°C en el sector norte, y entre 14° y 15°C en el sector sur de la zona. Las salinidades varían entre 34.5‰ y 34.9‰, localizándose los valores inferiores en el sector sur.

En la Figura 6 se muestra la distribución de temperatura en la Zona Norte de Chile en el periodo de invierno.

3.1.4.1.4 Condiciones de Primavera

La modalidad de la distribución de las propiedades térmicas y salinas durante este período del año difiere del período de otoño al presentar cambios abruptos más que graduales. En esta época entran frentes térmicos cálidos que generan localmente áreas de fuertes gradientes. El intervalo de temperaturas va desde aguas de 14°C hasta aguas de 21°C.

Las salinidades por otra parte se caracterizan por una distribución intermedia entre aquellas típicas del invierno y las que prevalecieron durante el verano. Sin embargo, la mayor parte del área presenta aún salinidades que se asemejan más a las de invierno.

En la Figura 7 se muestra la distribución de temperatura en la Zona Norte de Chile en el periodo de primavera.

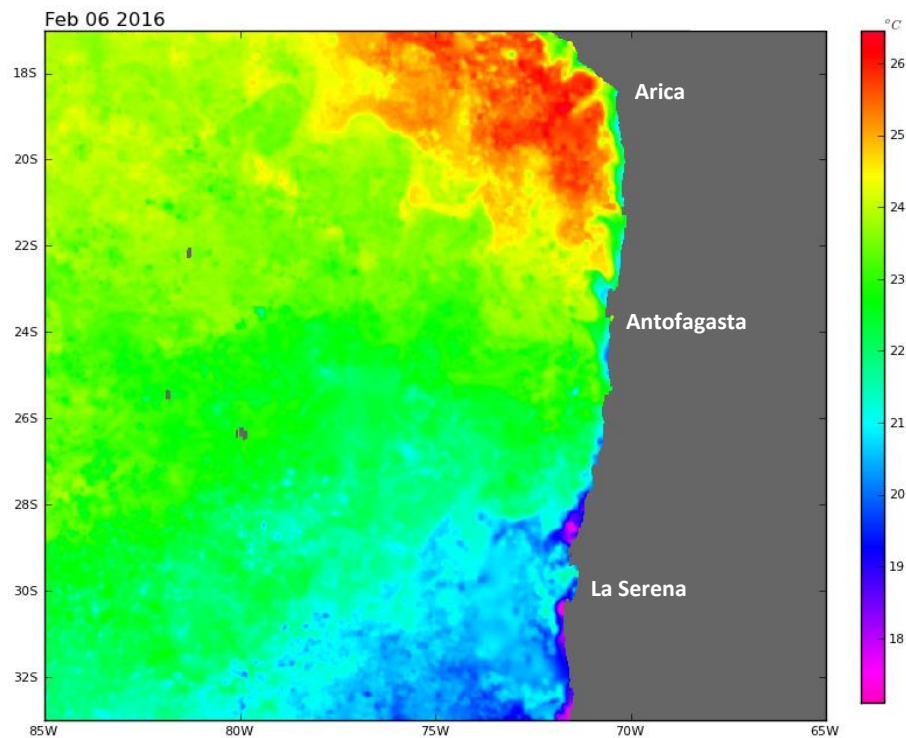


Figura 4. Distribución de la temperatura superficial entre los 17° y 33° de latitud Sur en febrero de 2016
(NASA Earth Observations)

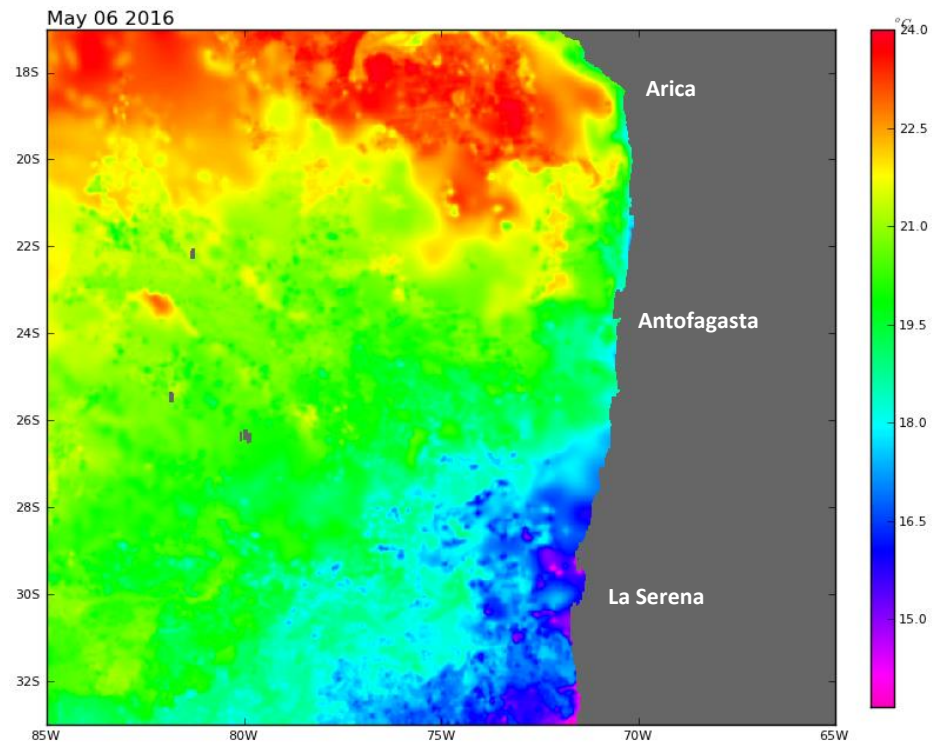


Figura 5. Distribución de la temperatura superficial entre los 17° y 33° de latitud Sur en mayo de 2016 (NASA Earth Observations)

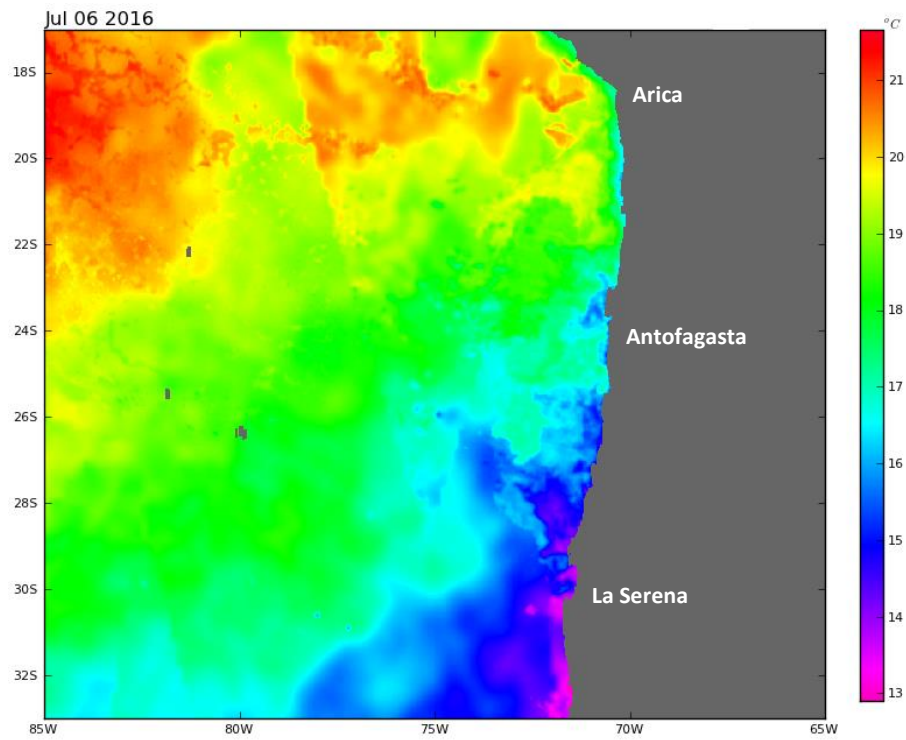


Figura 6. Distribución de la temperatura superficial entre los 17° y 33° de latitud Sur en julio de 2016 (NASA Earth Observations)

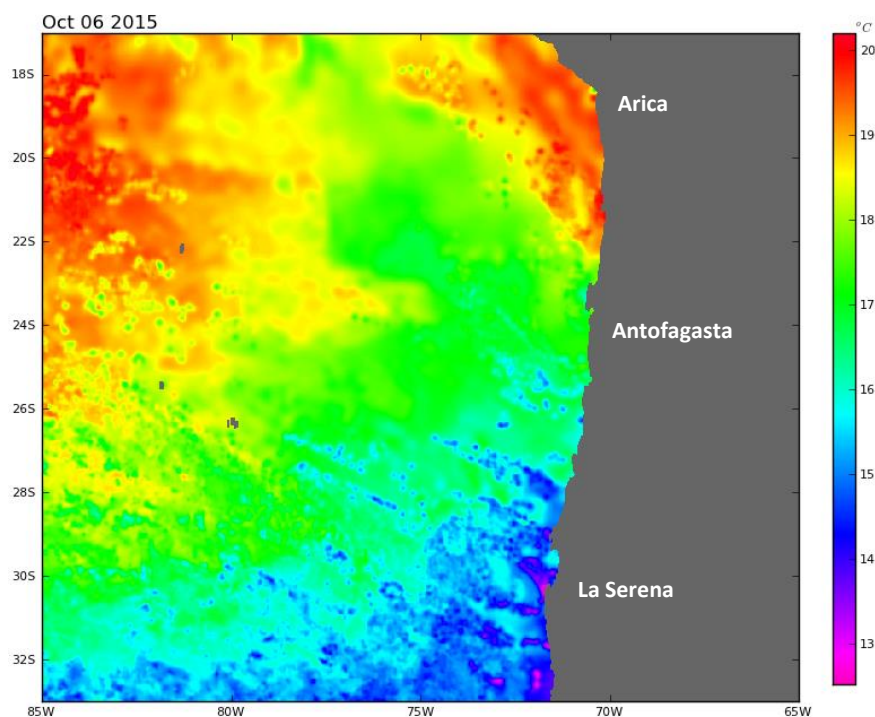


Figura 7. Distribución de la temperatura superficial entre los 17° y 33° de latitud Sur en octubre de 2015 (NASA Earth Observations)

En la Tabla 4 se resumen los valores de temperatura superficial del mar (TSM) para cada mes del año 2015 en Antofagasta. Además, se muestran los promedios históricos de TSM calculados entre los años 1981 y 2010.

MES	TSM °C mínima	TSM °C máxima	TSM °C promedio mensual	TSM °C promedio histórico
Enero	16,9	22,3	20,1	20,1
Febrero	17,5	23,3	20,6	19,9
Marzo	16,5	21,7	19,2	18,8
Abril	16,3	21,0	18,5	17,2
Mayo	15,8	17,9	16,8	16,1
Junio	15,8	17,8	16,7	15,1
Julio	15,8	17,0	16,4	14,9
Agosto	15,0	16,6	15,9	15,0
Septiembre	14,9	18,3	16,9	15,4
Octubre	15,3	19,4	17,2	16,2
Noviembre	15,7	20,0	17,6	17,5
Diciembre	16,1	21,9	19,3	18,8

Tabla 4. Resumen de la temperatura superficial del mar en Antofagasta, fuente SHOA (Latitud: 23° 39' S; Longitud: 70° 25' W)

3.1.4.2 Características típicas de la columna de agua en la Zona Central de Chile

3.1.4.2.1 Condiciones de verano

De Talcahuano al sur el aporte fluvial produce bajas salinidades costeras (cerca de 33‰), sin embargo, su influencia es menor que en la Zona Sur Austral del país. En la Figura 8 se muestra la distribución de temperatura en la Zona Central de Chile en el periodo de verano.

3.1.4.2.2 Condiciones de Otoño

En este periodo se presenta una disminución de la temperatura superficial y un aumento de la salinidad costera debido al menor aporte fluvial. Además, la surgencia costera (fenómeno que consiste en el movimiento vertical de las masas de agua, de niveles profundos hacia la superficie) tiende a disminuir, por lo que prevalecen condiciones más homogéneas.

Durante el otoño el aporte de las aguas subantárticas superficiales es mayor, lo que provoca la desaparición de la termoclina y que prevalezcan en la costa condiciones más frías. En la Figura 9 se muestra la distribución de temperatura en la Zona Central de Chile en el periodo de otoño.

3.1.4.2.3 Condiciones de Invierno

Durante el invierno las aguas superficiales presentan un rango de temperaturas de 11°C a 14°C, encontrándose las temperaturas más bajas en la zona costera. Esta época presenta condiciones bastante estables con escasa actividad de las surgencias, menor incluso que en el otoño.

En esta estación hay un gran aumento del aporte hídrico al océano debido al aumento de la pluviosidad. Este fenómeno genera fuertes gradientes salinos en la superficie del océano principalmente en las áreas de desembocadura de ríos. En la Figura 10 se muestra la distribución de temperatura en la Zona Central de Chile en el periodo de invierno.

3.1.4.2.4 Condiciones de Primavera

Durante la primavera se observa una disminución en las lluvias, lo que produce una reducción del aporte de agua dulce a la costa. Sin embargo, este descenso se compensa con el aumento del caudal de los ríos producto del comienzo del deshielo. Se presenta un ligero incremento en las temperaturas superficiales en la parte oceánica, las que varían desde los 11°C a los 16°C en la costa.

Los mínimos de salinidad superficial no son tan pronunciados como en el invierno, siendo posible encontrar aguas de baja salinidad en la costa (32,0 ‰). En el norte de la Zona Central se comienza a insinuar el predominio de aguas más salinas (34,4 ‰), lo que constituye una característica propia del verano.

En la Figura 11 se muestra la distribución de temperatura en la Zona Central de Chile en el periodo de primavera.

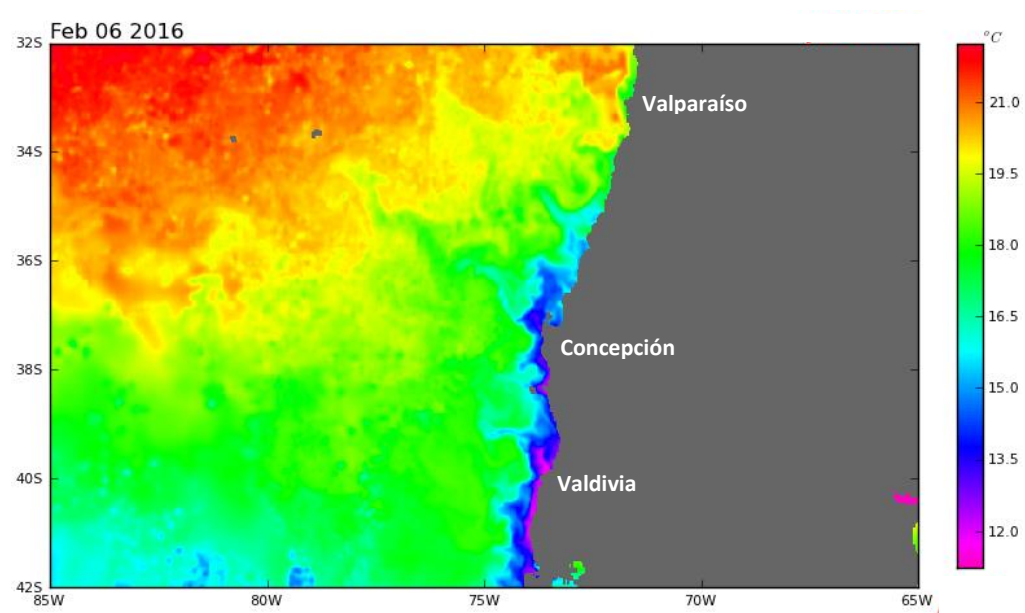


Figura 8. Distribución de la temperatura superficial entre los 32° y 42° de latitud Sur en febrero de 2016 (NASA Earth Observations)

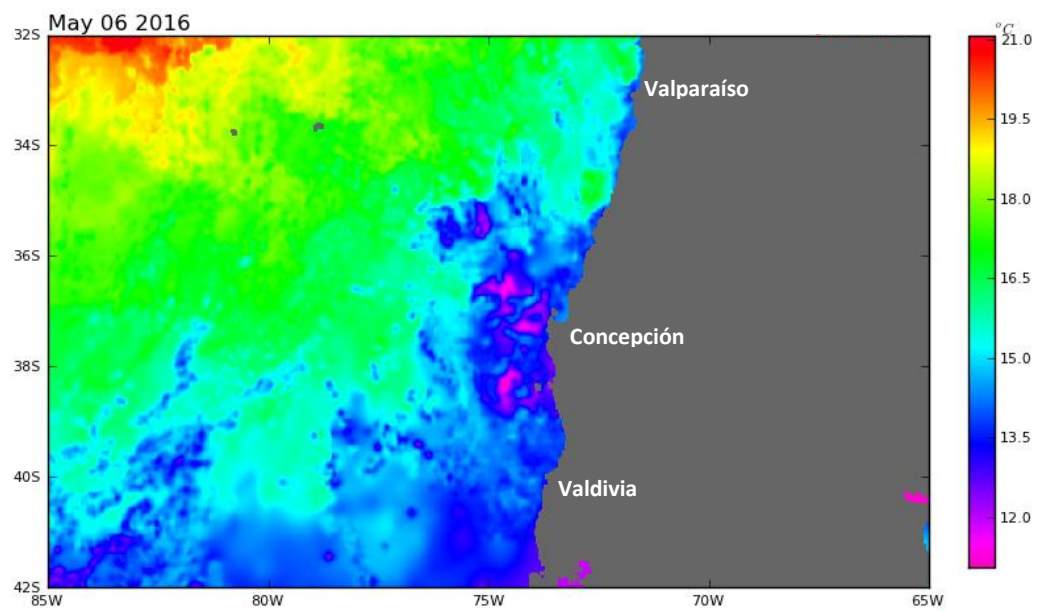


Figura 9. Distribución de la temperatura superficial entre los 32° y 42° de latitud Sur en mayo de 2016 (NASA Earth Observations)

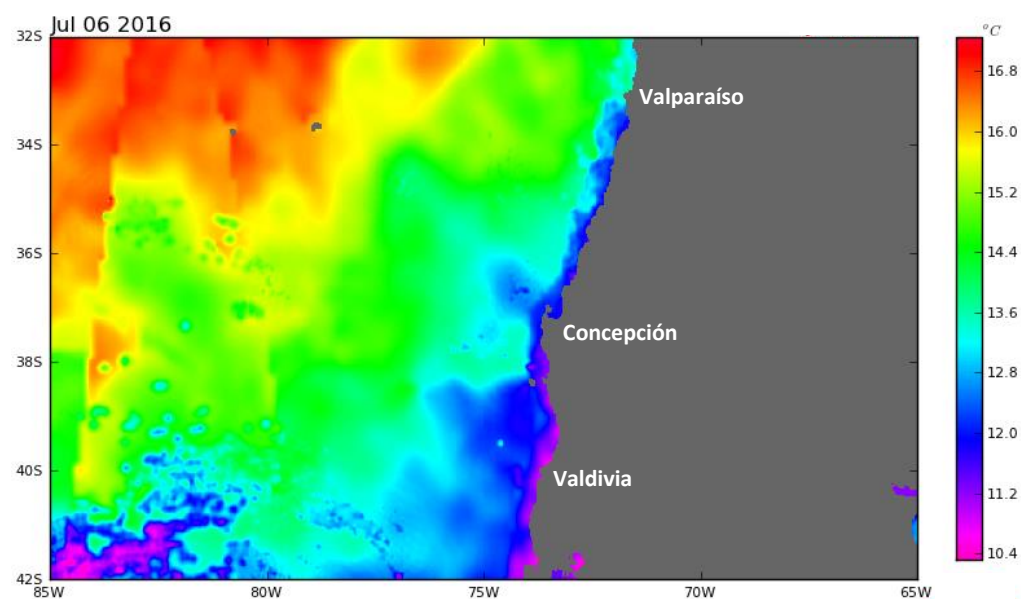


Figura 10. Distribución de la temperatura superficial entre los 32° y 42° de latitud Sur en julio de 2016 (NASA Earth Observations)

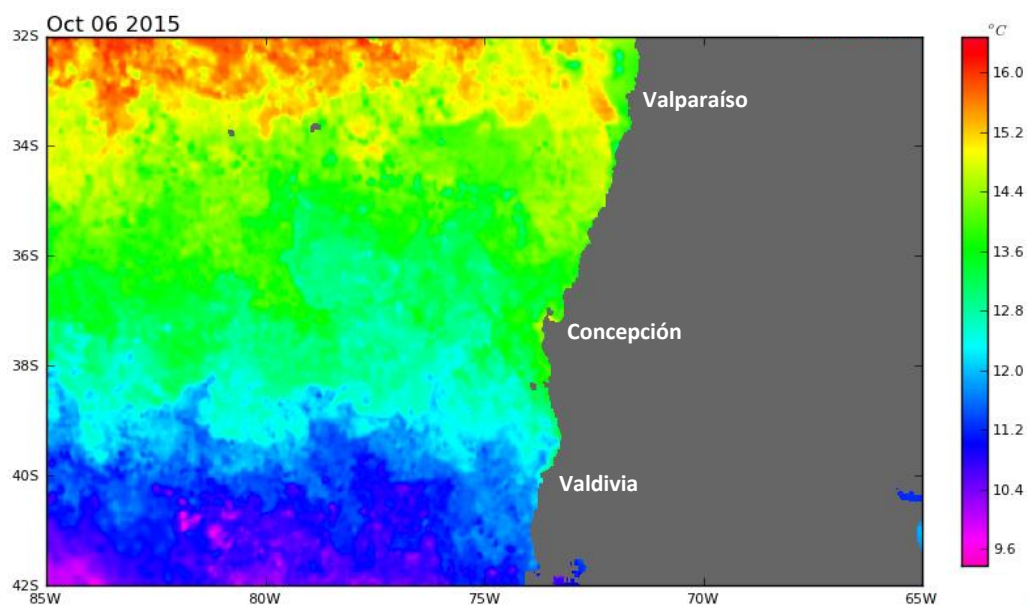


Figura 11. Distribución de la temperatura superficial entre los 32° y 42° de latitud Sur en octubre de 2015 (NASA Earth Observations)

En la Tabla 5 se resumen los valores de temperatura superficial del mar (TSM) para cada mes del año 2015 en Valparaíso. Además, se muestran los promedios históricos de TSM calculados entre los años 1981 y 2010.

MES	TSM °C mínima	TSM °C máxima	TSM °C promedio mensual	TSM °C promedio histórico
Enero	13,2	19,3	16,4	15,6
Febrero	13,0	18,5	15,9	15,7
Marzo	14,2	19,4	17,2	15,0
Abril	12,8	17,5	14,7	14,0
Mayo	12,7	14,9	13,6	13,1
Junio	11,5	13,4	12,3	12,8
Julio	11,9	12,9	12,3	12,4
Agosto	10,1	15,3	13,3	12,5
Septiembre	12,3	15,3	13,6	12,8
Octubre	11,8	16,1	13,7	13,2
Noviembre	11,7	16,0	13,4	13,6
Diciembre	12,1	18,4	14,4	14,4

Tabla 5. Resumen de la temperatura superficial del mar en Valparaíso, fuente SHOA (Latitud: 33° 02' S; Longitud: 70° 19' W)

3.2 Condiciones hidrodinámicas

Los principales fenómenos hidrodinámicos a considerar en el diseño de un sistema de captación de agua de mar son las corrientes, las mareas y el oleaje. Estas condiciones son relevantes para determinar el tipo de obra de captación adecuado y para la realización de estudios anexos, como el diseño estructural de los elementos, el transporte de sedimentos y la dilución y dispersión de la descarga. Si bien estos estudios quedan fuera del alcance de esta memoria, es relevante conocer información de carácter general respecto a estos fenómenos para poder realizar una evaluación cualitativa de potenciales ubicaciones para el sistema de captación.

3.2.1 Corrientes

Las aguas de los océanos se encuentran en continuo movimiento. Tanto la circulación atmosférica como oceánica son producidas por la radiación solar, y debido al estrecho contacto entre estos medios, ambas se encuentran relacionadas. La energía solar genera diferencias de temperatura sobre la superficie terrestre y da origen a los vientos en la atmósfera. Estos, a su vez, son la causa principal del movimiento de las aguas superficiales del océano. Además, el calentamiento desigual del océano por la energía solar contribuye al movimiento de las masas de agua en forma de corrientes.

Los movimientos más amplios y de características planetarias se denominan corrientes marinas y son muy importantes en el establecimiento de los climas en las zonas costeras. En las costas chilenas la corriente de Humboldt transporta aguas frías desde los mares australes hacia el ecuador terrestre. Los movimientos de período más corto, se denominan corrientes oceánicas

y son originados por el viento. Este tipo de corriente afecta solamente a la capa superficial del océano. En el océano Pacífico las corrientes son más intensas en la superficie del mar, disminuyendo rápidamente con la profundidad, hasta casi desaparecer a uno o dos kilómetros de profundidad.

En el contexto de las captaciones de agua de mar, las corrientes no influyen directamente en el tipo de obra de captación a utilizar, sin embargo, el estudio de los sistemas locales de corrientes es particularmente relevante en la determinación de las cargas hidrodinámicas sobre los elementos del sistema, posibles embancamientos y para el estudio de dilución y dispersión de la pluma del efluente en el sector de descarga, en los casos en que se proyecta además una planta desaladora. Los parámetros más relevantes a conocer son la velocidad y la dirección del flujo.

3.2.1.1 *Sistema de Corrientes En la Zona Norte y Central de Chile*

Las características locales del sistema de corrientes en la zona de estudio deben determinarse a partir de pruebas en terreno, sin embargo, existe información de carácter general que resulta útil para la etapa de diseño conceptual.

En la costa chilena, la circulación oceánica se encuentra dominada por un sistema de corrientes y contracorrientes que fluyen paralelas a la costa, interactuando de manera compleja. En la zona Centro y Norte de Chile se distinguen dos corrientes hacia el norte y dos hacia el sur. El flujo norte corresponde al sistema de corrientes de Humboldt, con una rama oceánica o corriente Perú-Chile y otra costera llamada también corriente costera de Chile. En tanto los flujos sur corresponden a la contracorriente oceánica del Perú y a la contracorriente costera de Chile, también denominada contracorriente Chile-Perú.

La rama oceánica de la corriente de Humboldt, se caracteriza por tener velocidades entre 11 y 27 [cm/s], presentándose con mayor intensidad en el otoño y transportando entre un 65% y 85% del volumen que fluye hacia el Norte. En los 100 kilómetros próximos a la costa, los que incluyen la zona de interés de este trabajo, y principalmente en la capa superficial, se desplaza la contracorriente Chile-Perú con velocidades entre 2,5 y 7,5 [cm/s], teniendo su máxima intensidad en otoño y transportando entre 2 y 3 [Sv] (1 Sverdrup = 0.001 km³/s) en ésta época.

En la figura 12 se muestra un esquema general del sistema de corrientes en la costa de Chile.

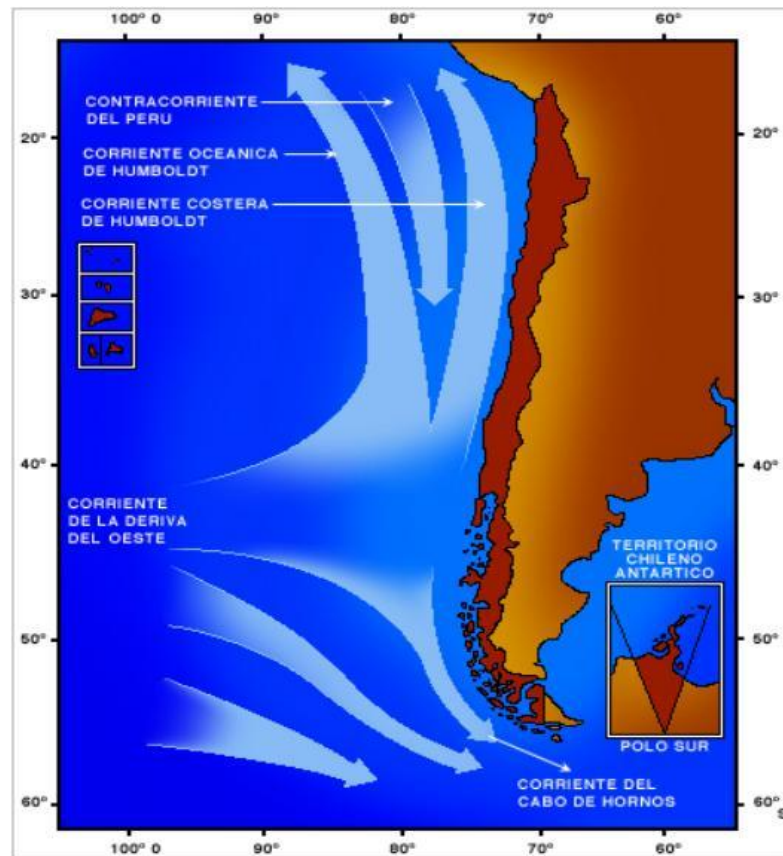


Figura 12. Sistema de corrientes en la costa de Chile ("Corriente de Humboldt", Escuela de Ingeniería de Antioquía, Colombia).

3.2.2 Mareas

El periódico ascenso y descenso del nivel del mar recibe el nombre de mareas. Esta variación en el nivel de las aguas se debe a la presencia de grandes olas, cuyas longitudes alcanzan miles de kilómetros y sus alturas varían desde unos pocos centímetros hasta más de 15 metros, dependiendo del lugar y de las posiciones relativas del Sol, la Luna y la Tierra.

Como se verá en el capítulo 4, las mareas son particularmente importantes para la evaluación y dimensionamiento de las captaciones abiertas, en las que el agua es obtenida directamente desde el mar. Un diseño que no considere correctamente las variaciones en el nivel del mar debido a las mareas puede provocar que la obra de captación quede inutilizable por importantes periodos de tiempo.

3.2.2.1 Tipos de Mareas

En dos sucesivas culminaciones de la Luna el océano asciende y desciende dos veces. Se denomina pleamar y bajamar a los niveles máximos y mínimos alcanzados por el nivel del mar respectivamente. La diferencia entre la pleamar y la bajamar se le llama amplitud de la marea, mientras que a la diferencia en altura entre dos pleamares o dos bajamares sucesivas se le

denomina desigualdad diurna. El tiempo que transcurre entre dos pleamares o dos bajamares recibe el nombre de período de la marea.

Se definen los siguientes tipos de marea:

- Marea diurna: se caracteriza por la ocurrencia de una pleamar y una bajamar durante un día lunar, siendo este el intervalo de tiempo transcurrido entre dos pasos sucesivos de la Luna por el meridiano del lugar. El periodo mareal es de 24 hr 50 min 28 seg.
- Marea semidiurna: se caracteriza por presentar dos pleamares y dos bajamares durante un día lunar, donde las alturas de las mareas altas y las bajas son similares. El período de estas mareas es de 12 hr 25 min.
- Marea mixta: presenta características de los dos tipos de mareas, es decir, dos mareas altas de diferentes alturas y dos mareas bajas también de distinta altura durante un día lunar. Las mareas mixtas tienen normalmente un período de 12 hr 25 min.

El régimen o tipo de mareas de cada zona o localidad está asociado a su posición latitudinal, mientras que el rango de mareas depende principalmente de la configuración del lugar. En la Figura 13 se muestra una representación de los tipos de mareas, a través de observaciones de las variaciones del nivel del mar: P=pleamar, B=bajamar.

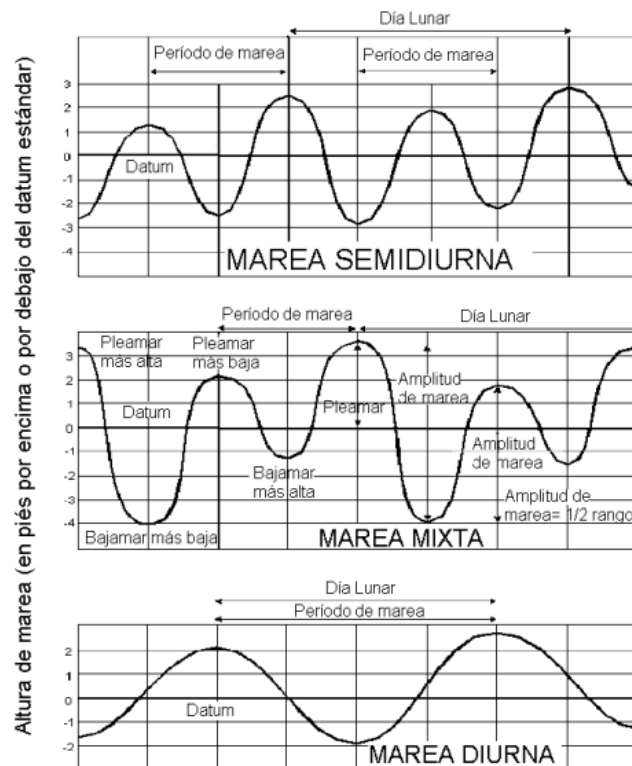


Figura 13. Representación gráfica de los tipos de mareas, a través de las variaciones del nivel del mar.
(<http://ckw.phys.ncku.edu.tw/public/pub/Notes/GeneralPhysics/Powerpoint/Extra/08/Tide.htm>)

3.2.2.2 Amplitud de Marea

La amplitud de marea depende de las posiciones relativas entre la Tierra, el Sol y la Luna. A medida que el sistema Tierra-Luna se mueve alrededor del sol, ambos cuerpos siguen una trayectoria ondeada por separado. La trayectoria de la Luna es más pronunciada debido a que ambos cuerpos están, además, rotando en torno a su propio centro de masa. Mientras orbitan alrededor del Sol y durante un mes sinódico (29,53 días), la Luna toma diferentes posiciones con respecto al Sol y la Tierra. Estas posiciones relativas generan diferentes amplitudes que permiten clasificar las mareas en:

- Mareas de Sicigia: comúnmente se les llama mareas vivas. Estas mareas son producidas cuando la posición de los tres astros (Sol, Luna y Tierra) se encuentran sobre una misma línea. En consecuencia, se suman las fuerzas de atracción de la Luna y el Sol, por lo que se producen las pleamares de mayor magnitud y bajamares más bajas que las promedio. A mayor amplitud de marea se originan mayores corrientes, debido al mayor volumen de agua a trasladar en el mismo tiempo.
- Mareas de Cuadratura: comúnmente se les conoce por mareas muertas. Estas ocurren cuando la Luna y el Sol forman un ángulo de 90° con centro en la Tierra (la Luna se encuentra en cuarto creciente o menguante). En consecuencia, las fuerzas de atracción de la Luna y el Sol se contrarrestan produciéndose mareas de menor magnitud a las mareas promedio. Al ser menor el volumen de agua a trasladar, las corrientes originadas son menores.

Existen fenómenos atmosféricos que influyen fuertemente en la amplitud de las mareas. El viento es el fenómeno más importante, favoreciendo o entorpeciendo el movimiento mareal del océano según sea su dirección e intensidad. El fenómeno del viento persiste en algunas ocasiones mucho tiempo después de que ha dejado de soplar, produciendo grandes anomalías tanto en las amplitudes de la marea como en el horario en que debería verificarse. Otro fenómeno que influye en las amplitudes de las mareas es la presión atmosférica. En lugares donde la altura barométrica media es relativamente baja, la presión atmosférica genera una mayor elevación de las aguas.

3.2.2.3 Características generales de las mareas en la zona Norte y Central de Chile

La onda de marea en la costa de Chile se propaga con dirección Norte-Sur. Es decir, al producirse una pleamar en Arica, esta misma pleamar se producirá minutos después en Iquique e ira descendiendo hacia el sur a una velocidad que depende de la profundidad. Entre la zona de Arica y cabo Quedal (Región de Los Lagos), las máximas amplitudes de marea fluctúan entre 1,50 y 1,90 metros. Más al sur, dentro del seno de Reloncaví y los golfos de Ancud y Corcovado, las amplitudes tienen un aumento notorio, fluctuando entre 5 y 8 metros.

El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) cuenta con una red de estaciones de medición del nivel del mar a lo largo de todo el territorio. Los datos pueden ser obtenidos de manera gratuita a través de la página web www.shoa.cl.

3.2.3 Oleaje

Las olas son oscilaciones periódicas de la superficie del mar, formadas por crestas y depresiones, que se desplazan horizontalmente a lo largo de la interfaz entre el océano y la atmósfera. Las propiedades hidrodinámicas del oleaje son relevantes para determinar el tipo de obra de captación a utilizar, mientras que características como la altura significativa y la dirección inciden en el diseño estructural y en la orientación de la obra de captación y/o descarga.

3.2.3.1 Clasificación del oleaje de acuerdo a sus características hidrodinámicas

Como se verá en el capítulo 4, las propiedades hidrodinámicas de las olas influyen en el tipo de captación que es más adecuado utilizar. De acuerdo a esto, las olas pueden clasificarse en

- Olas de vuelco (pluning): se generan cuando las ondas son poco peraltadas propagándose sobre playas poco inclinadas. La cara frontal de la ola se hace casi vertical y la cresta de la ola se vuelve más aguda, curvándose hacia el frente hasta que se precipita. Este proceso produce una gran turbulencia y una gran entrada de aire. La reducción de la altura de la ola durante la rotura se produce rápidamente. Las olas reformadas son generalmente de menos de una tercera parte de la altura de la ola en rotura y suelen romper de nuevo cerca de la línea de la orilla. Poco momentum de estas olas es reflejado hacia el mar.
- Olas de derrame (spilling): se producen en playas de poca pendiente con oleaje peraltado. La cresta de las olas se va haciendo más aguda, hasta que se vuelve inestable y se derrama hacia abajo por la pendiente frontal de la ola. La rotura es gradual sobre la zona de rompientes y el decaimiento de la altura es bastante uniforme. Muy poco momentum es reflejado hacia el mar.
- Olas onduladas (surging): se producen en playas con pendientes altas. La rotura de estas olas comienza a desarrollarse de una forma similar a las olas tipo pluning, donde su cara frontal se hace muy vertical, pero con la diferencia de que la ola llega a la playa antes de que se produzca el rompimiento de la ola, por lo que la cresta se colapsa y desaparece. Con este tipo de olas, generalmente la zona de surf es muy estrecha y aproximadamente la mitad del momentum de las olas es reflejado hacia el mar.

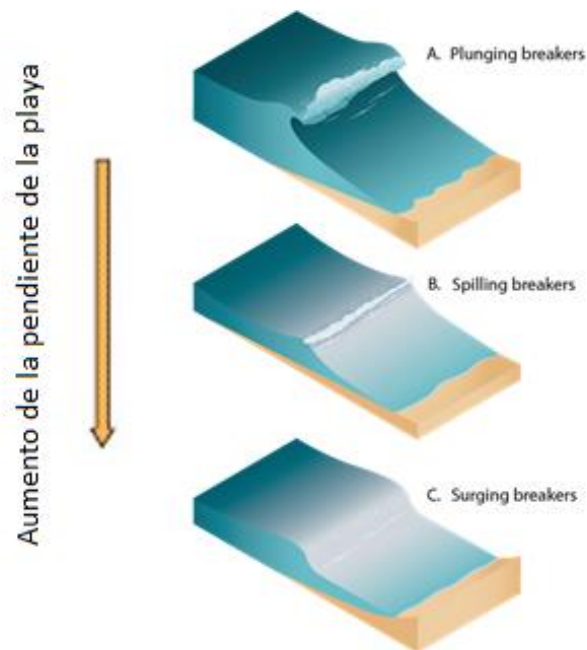


Figura 14. Tipos de olas clasificadas según sus propiedades hidrodinámicas.
(<https://manoa.hawaii.edu/exploringourfluidearth/physical/coastal-interactions>)

3.2.3.2 Características generales del oleaje en la zona Norte y Central de Chile

Si bien los estudios de caracterización del oleaje quedan fuera del alcance de esta memoria, existe información de carácter general que resulta útil para la etapa de diseño conceptual del sistema de captación.

Como las olas son muy variables para analizarlas y describirlas, se utilizan métodos estadísticos. La altura normalmente se expresa en términos de la altura significativa, la que corresponde al promedio de un tercio de las olas más altas observadas en una serie en un período de tiempo determinado. De acuerdo a los registros, en la costa de Chile se observa lo siguiente:

Frecuencia de observación	Altura [m]
Hasta 28%	0.5 - 1.0
60%	1.0 - 2.5
10%	2.5 - 4.0
1-2%	>4

Tabla 6. Altura significativa promedio observada en Chile (Los Océanos (Libro virtual), www.mardechile.cl).

En Constitución, por ejemplo, en el período de otoño-invierno, la altura significativa de las olas varía de 0.9 a 1.5 metros; en primavera-verano entre 0.8 y 2.2 metros. En el mismo lugar, con oleaje de tormenta, se observan alturas entre 4 y 5 metros.

En cuanto a la dirección, en general, en la costa de la zona Norte y Centro Chile el oleaje reinante (más frecuente) tiene dirección SW, mientras que el oleaje dominante (más intenso) dirección NW.

3.3 Borde Costero

La ubicación, y el tipo de captación a utilizar se ven fuertemente influenciados por las características locales del borde costero. Estas incluyen la geomorfología costera, las características de la playa (en caso de existir), y en menor grado la vulnerabilidad frente a tsunamis. Con el objetivo de evaluar diferentes alternativas en una etapa de diseño conceptual, es necesario conocer información de carácter general de las características del borde costero, la que se puede obtener de visitas a terreno y la bibliografía existente sobre la costa de Chile.

3.3.1 Geomorfología costera de la Zona Norte y Centro de Chile

Las costas son modeladas por dos procesos: la erosión y la depositación de sedimentos. En general, la costa de Chile se caracteriza por la alta energía del oleaje que la afecta. En las salientes del continente que se extienden en el mar, las olas erosionan las rocas, configurando morfologías como acantilados litorales, plataformas de abrasión, cuevas marinas arcos y pilares litorales. En las bahías la energía de las olas decrece favoreciendo la depositación de los sedimentos y por consiguiente la formación de las playas. A lo largo de todo Chile predominan ampliamente las formas litorales de erosión, costas acantiladas y rocosas bajas, labradas en rocas metamórficas, intrusivas o volcánico-continetales. En general, debido a que la costa de Chile es abierta al oleaje dominante del suroeste, las playas de arena son poco extensas, limitadas a bahías de bolsillo donde desembocan los ríos de Chile central o a fondos de fiordos más al sur. A pesar de que en el norte la costa chilena penetra en la zona intertropical, no se encuentran arrecifes coralinos debido a la presencia de las aguas litorales frías de la corriente de Humboldt.

3.3.1.1 Perfiles típicos del borde costero de la zona Norte de Chile (18° - 33°S)

La costa desértica del Norte Grande se caracteriza por la presencia de un gran acantilado continuo sobre una distancia de más de 700 kilómetros y con una altura de 700 metros en promedio. Al norte de Iquique, el acantilado es activo y sigue retrocediendo por efecto de la acción mecánica de las olas. Al sur de esta ciudad, el acantilado está muerto, ya que una terraza marina se interpone entre él y la orilla del mar. Esta terraza de abrasión, en general, no sobrepasa los 50 metros de altura y tiene un ancho que puede alcanzar hasta 2 ó 3 kilómetros. Al igual que más al norte, la plataforma continental es estrecha, con menos de 10 km de ancho.

El Norte Chico semiárido se caracteriza por tener una costa rocosa baja, detrás de la cual se extienden terrazas marinas de abrasión, escalonadas hasta los primeros contrafuertes de la

cordillera de la Costa. Generalmente, esas terrazas tienen un ancho que puede alcanzar unos pocos kilómetros y suelen elevarse hasta 150-200 metros sobre el nivel del mar.

En la Figura 15 se muestran secciones transversales de la costa en dos puntos de la Zona Norte de Chile: Punta Madrid, representativo de la costa del Norte Grande, y Bahía Inglesa, representativo de la costa del Norte Chico.

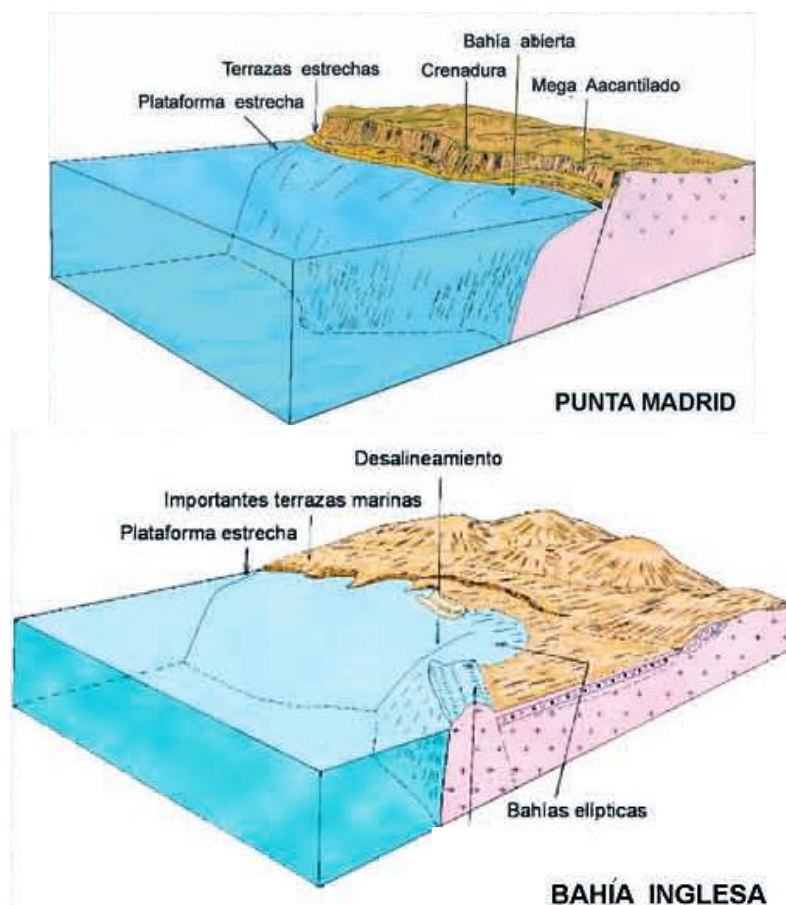


Figura 15. Secciones transversales de la costa en dos puntos de la Zona Norte de Chile: Punta Madrid y Bahía Inglesa (Díaz-Naveas y Frutos, 2010).

3.3.1.2 Perfiles típicos del borde costero de la zona Central de Chile (33°- 37°30'S)

La zona central se caracteriza por tener amplias terrazas de erosión y planicies de probable origen marino. Sus sucesivos escalones llegan a levantarse por encima de los 400 metros sobre el nivel del mar y se extienden hasta más de 30 kilómetros tierra adentro.

Uno de los aspectos característicos de la costa en la Zona Central de Chile, es la presencia de largas playas asociadas a extensos campos de dunas. Estas áreas de acumulación de arenas son producto de la carga aluvial abundante, principalmente sedimentos de origen volcánicos trasladados hasta el océano por grandes ríos, provenientes de la cordillera de Los Andes y caracterizados por un régimen hidrográfico de tipo mediterráneo. La plataforma continental se ensancha hacia el sur y se presentan cañones submarinos, como el de San Antonio.

En la Figura 16 se muestran secciones transversales de la costa en dos puntos de la Zona Central de Chile: Constitución y el Golfo de Arauco.

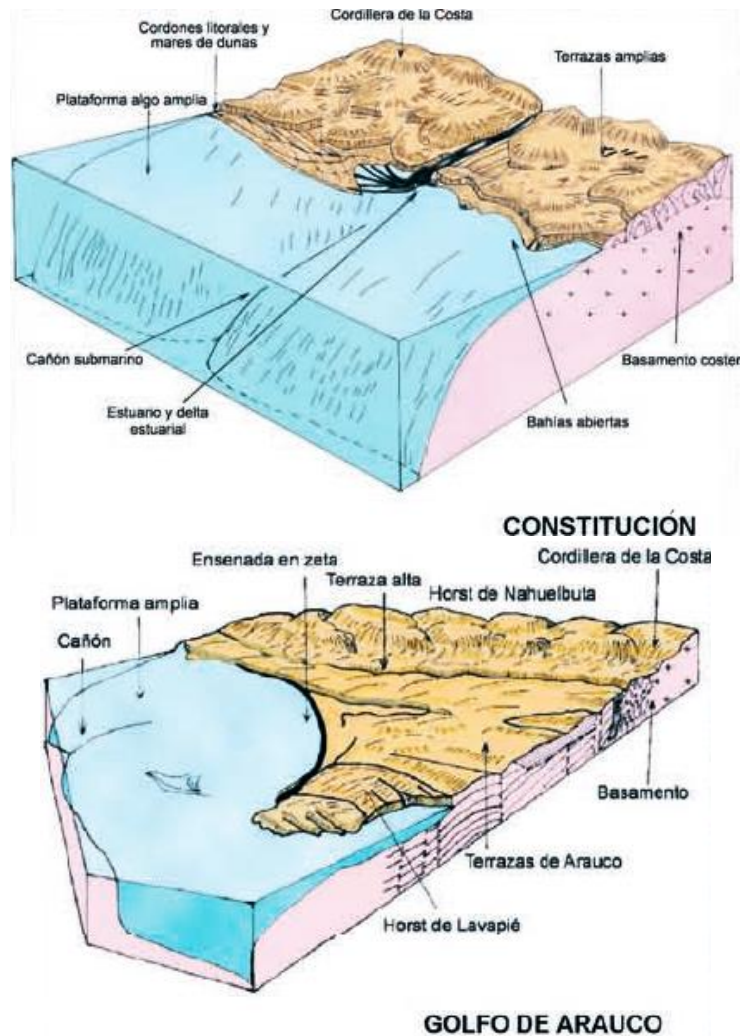


Figura 16. Secciones transversales de la costa en dos puntos de la Zona Central de Chile: Constitución y el Golfo de Arauco (Díaz-Naveas y Frutos, 2010).

3.3.2 Características generales de las playas

Las playas se desarrollan cuando las corrientes costeras y las olas erosionan, transportan y depositan grandes cantidades de sedimentos a lo largo de la costa. Asociadas a las playas generalmente se encuentran dunas costeras que son formadas por la acción del viento que transporta y deposita los sedimentos provenientes de las playas. El color de la arena depende de la composición mineralógica del sedimento; las playas de arena blanca están constituidas por granos de cuarzo, mientras que las playas de color negro están compuestas por fragmentos de rocas volcánicas basálticas.

En general, es deseable que las obras de captación se instalen en costas que presenten playas. Las características del sedimento (tamaño del grano y distribución), son relevantes para las

captaciones cerradas, donde suelen utilizarse pozos playeros, mientras que las características morfodinámicas de las playas son más importantes para el diseño de las captaciones abiertas.

3.3.2.1 Distribución del sedimento

En la zona litoral los sedimentos presentan variaciones de tipo espacial, en sentido transversal y longitudinal, y de tipo temporales. Las variaciones en el perfil longitudinal se producen principalmente por los cambios en la energía del oleaje a lo largo de la playa, la clasificación selectiva del sedimento durante el transporte o con cambios en el tipo y cantidad de sedimento proporcionado a la playa. Las variaciones transversales del sedimento generalmente son producto del perfil de equilibrio, es decir, cuando la totalidad de las partículas de un determinado tamaño del sedimento se encuentran en equilibrio con el oleaje y los flujos que actúan en ese punto.

El tamaño de las partículas de los sedimentos en la zona litoral presenta una disminución desde la línea de la costa hacia la plataforma continental, esta disminución es causada por la disminución de la energía de los flujos de transporte hacia la plataforma, sin embargo, la presencia de corrientes mareales de gran intensidad puede interrumpir la gradación en algunas playas. En general, el sedimento más grueso se deposita en la zona de swash o zona de rompiente del oleaje, mientras que en los surcos el sedimento es comparativamente más fino. La profundidad límite hasta la que alcanza la secuencia granodecreciente del sedimento es función del tipo y cantidad de aportes sedimentarios que recibe el litoral y del substrato geológico.

3.3.2.2 Dinámica de las playas

La playa se define como un segmento dinámico relativamente estrecho de una costa, constituido por sedimentos (arenas, gravas en menor proporción y fragmentos de conchas) donde el oleaje tiene acción directa. Una playa típica presenta tres zonas (Figura 17):

- **Trasplaya (Backshore):** Es el sector de la playa que se extiende desde la línea de alta marea hasta un acantilado, duna o vegetación. Permanece generalmente seca, a menos que se presencien marejadas. Es característico en esta zona la formación de pequeños escalones producidos por los temporales, que reciben el nombre de bermas.
- **Playa (Foreshore):** Es la zona comprendida entre la línea de alta y baja marea. La parte de mayor pendiente en el margen hacia el mar y que recibe el agua de la rompiente de la ola se llama frente de playa.
- **Anteplaya (Inshore):** Se encuentra siempre bajo el agua, entre el nivel de baja marea y el punto donde el oleaje deja de ejercer una acción sobre el fondo.

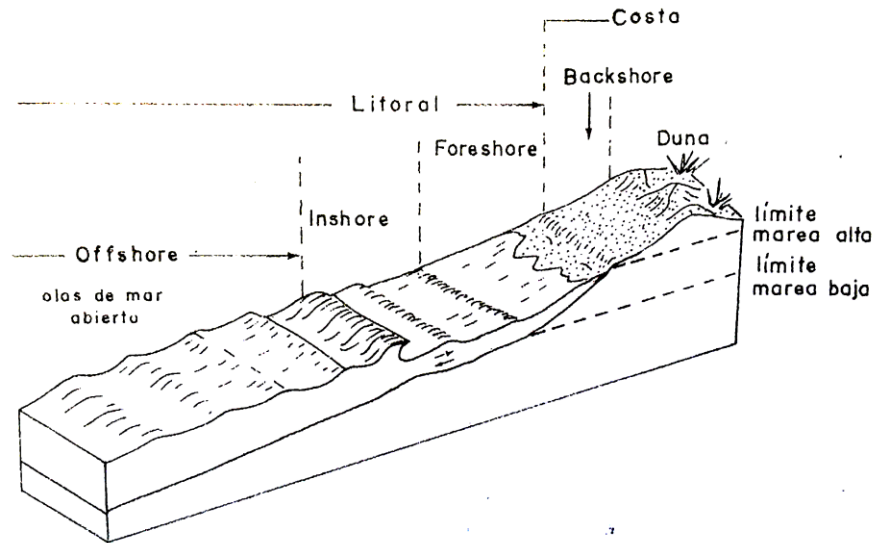


Figura 17. Zonas típicas de una playa (Werlinger, C., 2004).

El principal factor que controla el desarrollo y los cambios de una playa es la energía de las olas. Las olas generan dos tipos de corrientes próximas a la costa: la corriente de resaca y la corriente deriva costera. La primera es una corriente que fluye mar adentro casi perpendicular a la línea de la costa desde la zona de resaca. La deriva costera es una corriente casi paralela a la línea de la costa en la zona de resaca, que se extiende longitudinalmente por decenas de metros y que termina en la corriente de resaca. En la Figura 18 se muestra un esquema de ambos tipos de corrientes.

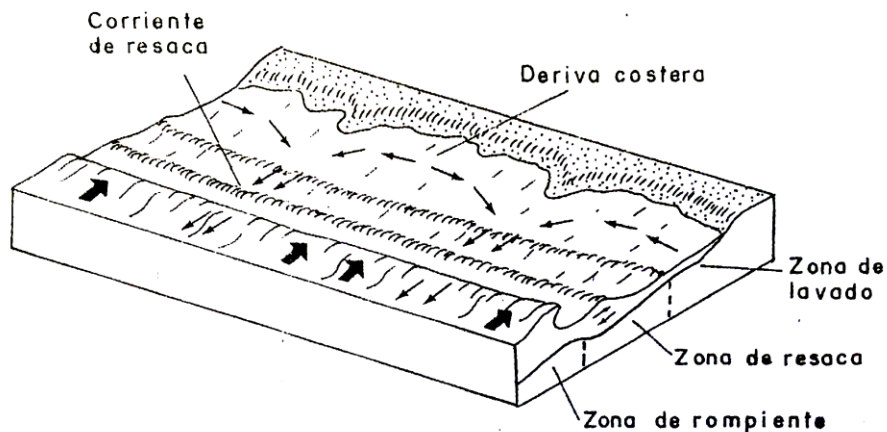


Figura 18. Corrientes marinas generadas por el oleaje (Werlinger, C., 2004).

3.3.2.3 Perfil morfodinámico de las playas

El comportamiento del litoral respecto del oleaje incidente puede ser disipativo, reflectivo o intermedio entre ambos. El predominio de un comportamiento es función de la morfología del litoral. Wright & Short (1984) definen los siguientes tipos de playa:

- Playas disipativas (D): Poseen una zona de surf muy ancha y de baja pendiente, donde las olas disipan su energía al romper. Morfológicamente se caracterizan por tener una zona amplia de swash, de baja pendiente y plana, que puede ir extendida desde el pie de la anteduna hasta la línea de más baja marea, con anchos comunes de 100 metros o más. La zona de surf usualmente alcanza los 200 metros de amplitud, conteniendo entre dos y cinco tenues barras y surcos paralelos. Las olas incidentes rompen al chocar contra la barra más extensa, vuelven a formarse en el primer surco y rompen nuevamente al entrar en contacto con la barra posterior.
- Playas intermedias: Es el tipo más común de playa. Se caracterizan morfológicamente por tener una zona de surf horizontalmente segregada con barras y corrientes de retorno. Las barras tienen rápida posibilidad de migración según la dinámica del oleaje y de los sedimentos, permitiendo una variación en la morfología de la zona de surf.
- Playas Reflectivas (R): Están ubicadas en sectores protegidos del oleaje directo. Se caracterizan morfológicamente por presentar una zona de swash estrecha, siendo comunes las corrientes de retorno. No contienen barras ni zonas de rompiente, por lo que las olas rompen directamente en la cara de playa, generando en ésta una pendiente pronunciada.

3.3.3 Tsunamis

Un tsunami es una serie de ondas oceánicas extremadamente largas, con longitudes que superan los 100 kilómetros, y que se propagan a través del océano con una velocidad cercana a los 800 kilómetros por hora. En el océano profundo suelen tener poca altura, sin embargo, a medida que acercan a aguas pocas profundas disminuyen su velocidad, se acortan y su altura aumenta rápidamente, pudiendo alcanzar varios metros. Aunque existen varias formas de que se genere un tsunami (como deslizamientos de tierras, erupciones volcánicas, impacto de meteoritos) se estima que cerca del 90% son originados por un terremoto, lo cual implica que países sísmicos con límite costero como Chile, poseen un alto riesgo de impacto.

Al planificar un sistema de captación de agua de mar es importante evaluar la vulnerabilidad frente a tsunamis de las potenciales ubicaciones de las obras de captación y las obras anexas.

3.3.3.1 Cartas de inundación por tsunamis

Una forma usual de cuantificar el impacto de un tsunami en un sector costero es medir las alturas de inundación y "run-up", que indican cuán adentro penetró el tsunami. Para evaluar las áreas en riesgo de inundación por tsunami, la Norma Técnica Minvu NTM007 define las siguientes variables.

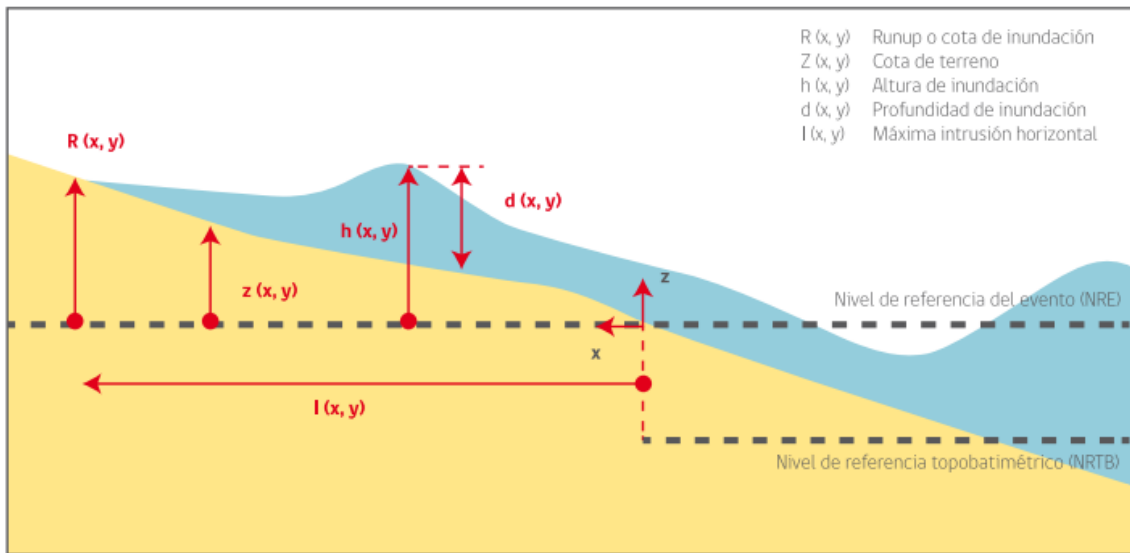


Figura 19. Parámetros Hidrodinámicos y Topográficos, Norma Técnica Minvu NTM007 (2013).

- Línea de Inundación, $l(x,y)$: Lugar geométrico de todos los puntos correspondientes a la máxima intrusión horizontal del tsunami. Representa la envolvente de la zona inundable.
- Runup o cota de inundación por trepado R : Diferencia entre la cota del punto de máxima intrusión horizontal alcanzado por el tsunami y el nivel de referencia vertical relevante al tsunami NRE.
- Cota de terreno, $z(x,y)$: Cota de elevación del terreno, referida al NRE.
- Altura de Inundación, $h(x,y)$: Diferencia entre la cota máxima de la superficie libre del fluido durante el evento y el nivel de referencia vertical relevante al tsunami NRE.
- Profundidad de Inundación, $d(x,y)$: Diferencia entre la cota máxima de la superficie libre del fluido durante el evento y la cota de terreno existente en el mismo punto.

El año 1997, el SHOA (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada) inició el proyecto “CITSU, Elaboración de cartas de inundación por tsunami para la costa de Chile”, herramientas que permiten definir los niveles de inundación máximos esperados para las principales zonas urbanas y portuarias del borde costero de Chile ante la ocurrencia de eventos sísmicos tsunamigénicos de campo cercano. Estas cartas de inundación se encuentran disponibles de manera gratuita en la página www.shoa.cl/servicios/citsu/citsu.html.

3.4 Interacción del sistema de captación con la biota marina

Dos aspectos deben considerarse respecto a la interacción del sistema de captación con el ecosistema marino: El impacto ambiental de las obras en la biota marina, y los problemas de funcionamiento que pueden ocasionar obstrucciones de organismos marinos en las tuberías del sistema de captación. Para tomar las medidas adecuadas que permiten minimizar estos problemas, es necesario determinar las especies que habitan el sector en estudio y analizar características como su hábitat y velocidad de desplazamiento.

3.4.1 Características generales de un ecosistema marino

La gran diversidad de vida que es posible encontrar en el océano depende principalmente del proceso de fotosíntesis realizado por el plancton marino en la zona iluminada del mar. Este organismo es el responsable de captar la energía transmitida por el Sol y transferirla hacia los demás organismos vivos. Otro organismo de vital importancia es el bentos marino, también conocido como macroalgas marinas, o algas. Estos son organismos fotosintetizadores que pueden llegar a aportar el 50% de la producción primaria del planeta. La gran mayoría viven adheridos al fondo marino, en zonas costeras.

3.4.1.1 Esquema de un ecosistema marino

Hedgpeth (1957) y Belyayev (1959) proponen una clasificación ecológica del medio ambiente marino. De acuerdo a la superficie en que la vida marina se manifiesta en el nivel oceánico es posible distinguir:

- a) El ambiente pelágico o de aguas oceánicas.
- b) El ambiente béntico o de fondo de mar.
- c) El ambiente pleustónico o capa limítrofe entre el aire y el mar.

Además, la biota marina se puede clasificar en función de subdivisiones horizontales: Zona Litoral, Zona Nerítica y Zona Oceánica (Ver Figura 20). La Zona Litoral está constantemente expuesta a las olas e influenciada por los cambios de nivel del agua debido a las mareas. Las especies de la zona litoral deben adaptarse a este permanente movimiento del mar, es por esto que muchos han desarrollado ventosas, las cuales les permiten adherirse a las rocas y otros sustratos como las tuberías de un sistema de captación. Por otro lado, la Zona Nerítica se desarrolla sobre la plataforma continental y a continuación de la Zona Litoral. En esta zona, diversas especies de peces habitan libremente en el agua sin contacto con el fondo, siendo estas especies menos abundantes que las bentónicas, en cuanto a cantidad de especies, pero más abundantes que los bentónicos en cuanto a cantidad de individuos. Finalmente, la Zona Oceánica es la zona más alejada de la costa, y se caracteriza por una disminución de la riqueza biológica. Los peces de la Zona Oceánica tienen una amplia distribución debido a las migraciones que realizan en busca de alimentos y de reproducción.

En la Figura 20 se muestra un esquema de la clasificación ecológica de la biota marina, y las especies típicas que habitan en la zona Centro y Norte de Chile.

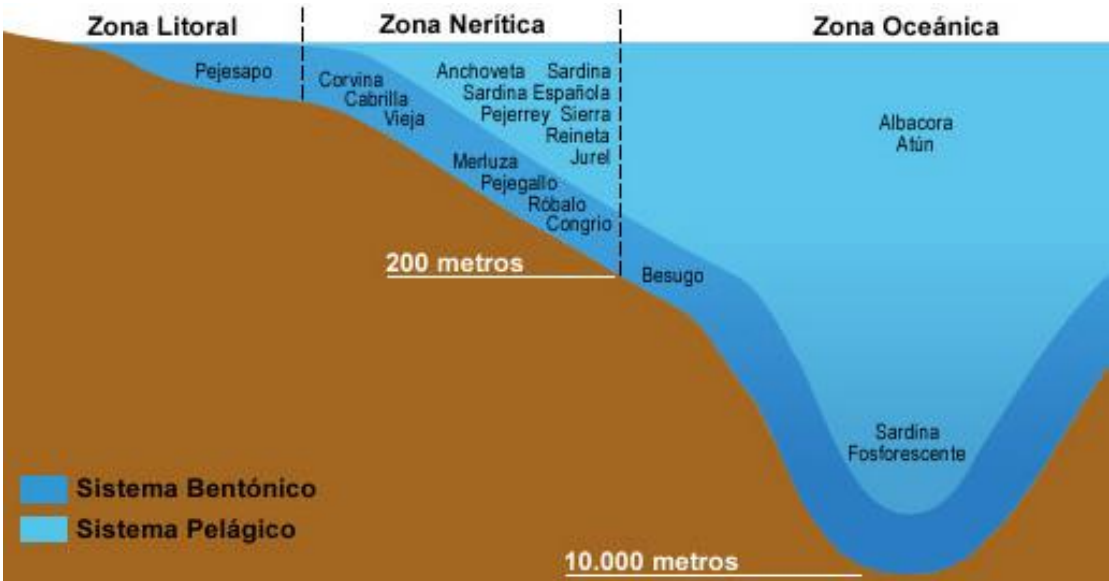


Figura 20. Esquema de ecosistema acuático según profundidad (Fundación Mar de Chile).

3.4.2 Principales especies en Chile

En el mar chileno se pueden encontrar peces, crustáceos, moluscos y algas de diversos géneros. La zona norte de Chile se caracteriza por la abundancia de organismos marinos en el fondo oceánico, debido a la mayor temperatura del agua. En particular, en las cercanías de Mejillones, es posible encontrar una gran densidad de estrellas de mar, moluscos y crustáceos.

Por otro lado, la zona central de Chile se caracteriza por la presencia de múltiples especies de esponjas marinas, que cubren ampliamente el fondo. Se encuentran también grandes cardúmenes y bosques de algas, especialmente en la época estival. Las principales especies marinas en la zona norte y central de Chile son las siguientes:

Especie	Descripción	Zona
1. Lobo marino	Habitan en barrancas rocosas, se destacan por su gran habilidad para nadar.	Norte
2. Cabinza	Pez que mide hasta 25 centímetros, suele vivir en el ambiente bento pelágico marino, sobre fondos de arena o de roca, a poca profundidad, hasta 50 metros.	Norte
3. Castañeta	Son peces pequeños que miden entre 7.5 y 16 centímetros de longitud, de movimientos lentos. Suelen vivir en los roqueros costeros.	Norte y Central

Tabla 7. Principales especies marinas que habitan en la zona Norte y Central de Chile (1).

Especie	Descripción	Zona
4. Bilagay	Se encuentran a poca profundidad. Son peces medianos que miden en promedio 35 centímetros.	Norte y Central
5. Cabrilla española	Habitan preferentemente sobre fondos rocosos cercanos a la playa. En promedio miden 20 centímetros, sin embargo, pueden llegar a medir unos 40 centímetros.	Norte
6. Sardina española	Se encuentran en aguas someras, con profundidad máxima de 40 metros. En promedio miden 26 centímetros de largo.	Norte
7. Pejesapo	Habitan en las zonas submareal e intermareal. Pueden medir hasta 30 centímetros. Se caracterizan por sus aletas ventrales que le permiten adherirse a las rocas.	Norte y Central
8. Rollizo	Habitan generalmente en los roqueros de baja profundidad cercanos a la costa. Se encuentran en los arenales posados en el fondo. Pueden medir hasta 15 cm de largo. Se encuentran en aguas blandas de pH promedio 6,5.	Norte
9. Actinia	Se encuentran en las zonas litorales. Prefieren las áreas expuestas a corrientes y soleadas.	Norte y Central
10. Cholga	Esta especie bentónica habita en general en agua someras, adherida a distintos sustratos duros como piedras, rocas, arcillas y arena.	Norte
11. Jaiba	Se encuentra en la zona bentónica. En general pueden llegar a medir 15 centímetros en la parte más ancha de su caparazón.	Norte y Central
12. Estrella de mar	Habitan en el sublitoral (parte del sistema bentónico).	Norte y Central
13. Piure	Habitan en la zona intermareal y submareal	Norte
14. Congrio	Habita en los fondos rocosos. Se puede encontrar desde los 20 metros hasta los 500 metros. El tamaño del congrio adulto supera el metro de longitud.	Norte y Central
15. Erizo	Ocupan la franja intermareal hasta profundidades de 80 metros.	Norte y Central
16. Camarón	Las zonas de cría de juveniles se encuentran en la línea costera, en profundidades bajas. Los camarones adultos habitan en mayor concentración entre los 3 y 50 metros de profundidad.	Norte y Central
17. Jurel	Prefieren aguas someras, en fondos pedregosos o arenosos. En promedio mide 40 centímetros de longitud, sin embargo, se pueden encontrar jureles de 60 centímetros de largo.	Central
18. Blanquillo	Habitan entre los 10 y 500 metros de profundidad. Su tamaño se encuentra entre los 30 y 45 centímetros de largo.	Central

Tabla 8. Principales especies marinas que habitan en la zona Norte y Central de Chile (2).

Especie	Descripción	Zona
19. Jaiba remadora	Su hábitat es submareal. Se encuentran en profundidades entre los 4 y 6 metros. En general se ubican cerca a la costa en zona de rompientes de olas.	Central
20. Caracol	Habitan sobre roca y en grietas. Algunas especies de estos moluscos habitan en playas de bolones.	Central
21. Cangrejo ermitaño	Especie que vive en los fondos arenosos a lo largo del litoral, desde la superficie hasta los 45 metros de profundidad.	Central
22. Pepino de mar	Habitan generalmente en aguas someras. Algunos especímenes de esta especie se entierran en sedimentos blandos y otros pueden nadar.	Central
23. Loco	Es un molusco que habita en la zona sublitoral. Se encuentra en peligro de extinción por su extracción abusiva.	Central
24. Babosa de mar	Existen variadas especies de babosas. Las especies más grandes pueden alcanzar los 40 centímetros. La especie más común habita entre los 5 y 20 metros de profundidad.	Central
25. Picoroco	Es un crustáceo que en su vida larval habita en la columna de agua y en su vida adulta vive fijo a sustrato.	Norte y Central
26. Lenguado	Habita en fondos arenosos del litoral, alcanzando una profundidad máxima de 50 metros. Su largo mínimo es 30 centímetros y máximo de 41 centímetros.	Norte y Central
27. Corvina	Especie que prefiere niveles bajos de salinidad y zonas de mucha vegetación. Habitan sobre los 15 metros de profundidad. Su tamaño alcanza los 90 centímetros de largo.	Norte y Central
28. Reineta	Pez que se encuentra en la zona pelágica hasta los 500 metros de profundidad. En promedio mide 43 centímetros de largo.	Norte y Central
29. Sardina española	Usualmente habita en la capa superficial del océano. En su vida adulta alcanza los 26 centímetros de largo.	Norte y Central
30. Sardina común	Habitan en el día bajo los 50 metros de profundidad y en la noche entre los 5 y 15 metros de profundidades. En promedio miden 12 centímetros de largo.	Central
31. Lapa	Molusco que habita en la zona intermareal y submareal, sobre sustratos rocosos.	Norte y Central
32. Pejegallo	Se encuentran en aguas más someras en primavera y en aguas profundas en invierno. Alcanzan un tamaño de 100 centímetros.	Norte y Central

Tabla 9. Principales especies marinas que habitan en la zona Norte y Central de Chile (3).

Especie	Descripción	Zona
33. Albacora	Es un pez pelágico. Los jóvenes se encuentran cercanos a la superficie, mientras que los adultos se encuentran a profundidades mayores que 100 metros. Es un pez de gran tamaño, llegando a medir hasta 1,5 metros y pesar cerca de 45 kilogramos.	Central
34. Machas	Molusco que habita enterrado en playas de arena con abundante oleaje.	Central
35. Ostiones	Molusco que habita en fondos costeros bajo la línea intermareal.	Norte y Central
36. Almejas	Habita en el litoral bentónico. Se entierran aproximadamente entre 5 y 30 centímetros.	Central
37. Ostras	Moluscos que se adhieren a las rocas o se entierran en el fondo marino. Se mueven por efecto de las olas.	Central
38. Algas	Las algas pueden estar flotando en las capas superiores del agua (alga planctónica) o adheridas a rocas o piedras (algas bentónicas).	Norte y Central

Tabla 10. Principales especies marinas que habitan en la zona Norte y Central de Chile (3).

En el caso de los peces, es posible relacionar el tamaño y el peso con la velocidad de natación (Figura 21). Por lo general la velocidad máxima es de 2 a 3 veces la longitud del pez/segundo. En el caso de las captaciones abiertas, esta relación es de gran utilidad para estimar la velocidad máxima que puede tener el agua en la entrada a la tubería de captación.

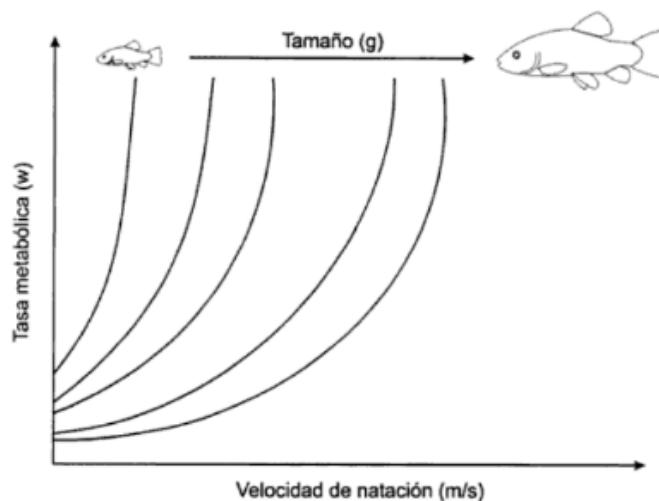


Figura 21. Velocidad de natación y gasto metabólico según tamaño del pez (Granado. C, 2002).

3.4.3 Principales problemas de las captaciones de agua de mar relacionados con la biota marina

Tanto los organismos marinos como las obras de captación pueden resultar afectados si no se consideran las medidas de protección necesarias. Peces y otros organismos de tamaño similar pueden ser capturados en las cámaras de captación, pudiendo al mismo tiempo dañar el sistema. Los moluscos por su parte pueden causar pérdidas de carga si es que frecuentan las tuberías de acceso, mientras que las algas y flora marina en general pueden afectar el ingreso del agua al sistema de captación porque pueden adherirse y proliferar en la cámara de succión, afectando y reduciendo el área de ingreso de agua. Los principales problemas que se deben considerar en el diseño son:

3.4.3.1 Colisión (*Impingement*):

Este fenómeno se produce cuando un pez joven o adulto u otro organismo marino queda atascado en la rejilla de la cámara de succión del sistema de captación, debido a que la velocidad del organismo marino es menor a la velocidad de succión. A pesar de que el pez no entra la tubería ni a los componentes del sistema de captación, queda atrapado y no puede nadar.

La fuerza del agua que entra a la cámara de succión está directamente relacionada con la cantidad de agua y la “velocidad de succión” (velocidad del agua perpendicular a la cara de la cámara de succión). Esta velocidad debe ser lo suficientemente baja como para que los peces pueden nadar lejos de la cámara y no ser atrapados.

3.4.3.2 Arrastre por succión (*Entrainment*):

Es el fenómeno en el cual los organismos que son más pequeños, como las larvas de los peces u organismos como el zooplancton y fitoplancton, son succionados a través de las ranuras de las rejillas de la cámara de succión. Estos organismos flotan en las corrientes del océano y pueden ingresar a la tubería y al sistema de captación. La probabilidad de arrastre por succión de los organismos está relacionada con la separación entre las barras y la “velocidad de succión” del agua.

Si un organismo es más grande que el tamaño de la ranura generalmente no será arrastrado. Mientras más lenta sea la “velocidad de succión” del agua en relación con las corrientes del ambiente alrededor de la cámara de succión, es menos probable que un organismo que se encuentre a unos kilómetros de la cámara de succión pueda acercarse y ser arrastrado.

3.4.3.3 Impacto del hábitat:

El impacto ambiental a la biota marina incluye la alteración del fondo marino y el ambiente oceánico durante la construcción del sistema de captación y efectos de largo plazo, debido a posibles cambios en las condiciones de la zona béntica si es que un volumen importante de agua es extraído desde un área relativamente pequeña del fondo marino.

4 SISTEMAS DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR

Uno de los mayores desafíos en la etapa de ingeniería conceptual del diseño de un sistema de captación de agua de mar, es la elección del tipo de obra más adecuado para las condiciones locales de la costa y las características particulares del proyecto. El objetivo de este capítulo es describir las alternativas existentes en la actualidad, destacando sus ventajas y desventajas, para finalmente, proponer criterios de evaluación que permitan al diseñador seleccionar el tipo de captación más adecuado, considerando los aspectos descritos en el capítulo 3.

Las obras de captación de agua de mar se pueden clasificar en dos grandes grupos: captaciones abiertas, generalmente de gran tamaño ya sea superficial o sobre el fondo marino, y captaciones cerradas, donde el agua es captada mediante pozos o galerías de infiltración.

4.1 Captaciones abiertas de agua de mar

En las captaciones abiertas el agua de mar es extraída directamente del océano mediante una tubería, elevada o sumergida, de largo que va desde los 300 hasta los 2.000 metros, o mediante un túnel horizontal. Las alternativas existentes para las captaciones abiertas de agua de mar son:

- 1) Captaciones abiertas sumergidas.
- 2) Captaciones abiertas elevadas.
- 3) Captaciones abiertas directas.

4.1.1 Captaciones abiertas sumergidas

4.1.1.1 Descripción general

En las captaciones abiertas sumergidas, la tubería de transporte va anclada o enterrada en el fondo marino. El agua de mar ingresa por una cámara con rejillas o pantallas ranuradas para luego ser acumulada en una sentina, desde donde es llevada mediante un sistema de bombas a su destino (usualmente, la planta desaladora). En la Figura 22 se muestra un esquema de una captación abierta sumergida típica.

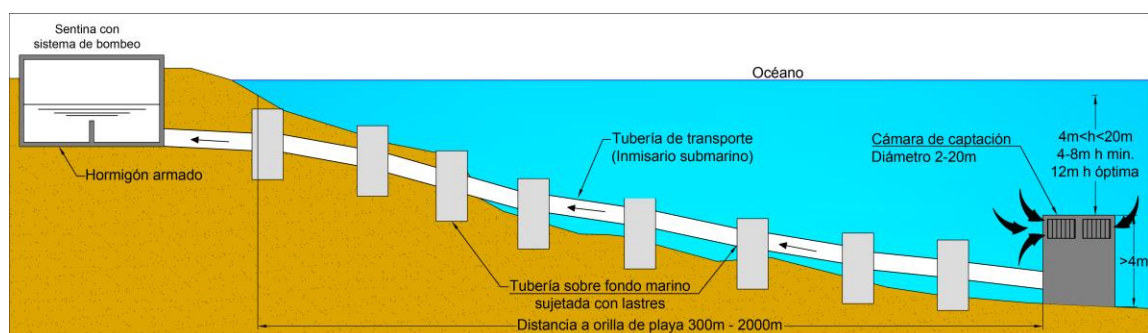


Figura 22. Esquema sistema de captación abierta sumergida (Elaboración propia).

4.1.1.2 Capacidad de las captaciones abiertas sumergidas

Al ser una captación abierta que extrae el agua directamente en el océano, la capacidad puede ser ilimitada, dependiendo solamente del diámetro de la tubería y de la dimensión de la cámara de captación.

4.1.1.3 Componentes de las captaciones abiertas sumergidas

4.1.1.3.1 Sentina de bombeo

La sentina de bombeo por lo general se diseña en hormigón armado. Esta instalación dispone de un canal de entrada y unas rejas o tamices de desbaste, que pueden ser mecánicos o manuales. Los equipos de bombeo usualmente son sumergibles, sin embargo, se pueden instalar en una cámara seca con aspiración.

4.1.1.3.2 Tubería de transporte

La tubería de transporte generalmente tiene entre 300 y 2000 metros y puede ir enterrada en el fondo marino o anclada con lastres. En los casos en que se proyecte además una planta desaladora, la tubería de captación debe adentrarse en el mar la distancia suficiente para evitar la captación de agua contaminada con la salmuera de descarga.

Los materiales más utilizados para las tuberías de transporte de agua de mar son el GRP (plástico reforzado con vidrio) y el HDPE. La ventaja de las tuberías de GRP es que prácticamente no tienen restricciones de tamaño (el diámetro máximo es 4000 milímetros). Sin embargo, el GRP es menos flexible y más liviano que el HDPE, por lo que tiende a flotar y a fallar ante cargas dinámicas. Por esta razón, las tuberías de GRP deben ser enterradas en el fondo marino y cubiertas con rocas o algún otro material de protección. Por otro lado, debido a su durabilidad y resistencia a la corrosión, las tuberías de HDPE generalmente se instalan directamente sobre el fondo marino. La principal desventaja del HDPE es su limitación de tamaño (diámetro máximo 2000 milímetros) y su mayor costo comparado con el GRP.

4.1.1.3.3 Cámara de captación

La cámara de captación es el componente más importante de las captaciones abiertas, ya que debe evitar el ingreso de organismos marinos al sistema de captación. Generalmente se utilizan tres tipos de cámaras de succión: pantalla de captación rotatoria, cajón de succión y pantalla pasiva cilíndrica.

- a) *Pantalla de captación rotatoria:* Esta cámara de captación se utiliza desde 1890. La cámara de captación está equipada con paneles ranurados que tienen entre 6 y 9,5 milímetros de abertura (ver Figura 23). Como los paneles giran en sentido vertical al flujo, un chorro a presión de agua elimina los desechos acumulados. Este tipo de pantalla se debe instalar mar adentro, alejada de la zona de surf.

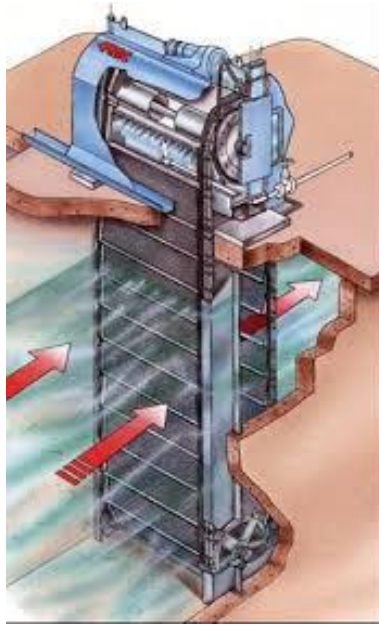


Figura 23. Cámara de captación con pantalla de captación rotatoria (Pankratz, T., 2004)

- b) *Cajón de succión*: Esta cámara de captación es la más utilizada. Se recomienda que el flujo de agua entre por las ventanillas laterales de forma horizontal para disminuir el arrastre de peces. Se ha observado que los peces evitarán cambios rápidos en el flujo horizontal y el cajón de succión ha demostrado proporcionar una reducción del 80-90% en el arrastre por succión de peces y una reducción de choque de 50% a 62% frente a una captación convencional (EPA Efficacy of Cooling Water Intake Structures). Las aberturas de las barras de las ventanillas deben ser entre 50 y 300 milímetros.

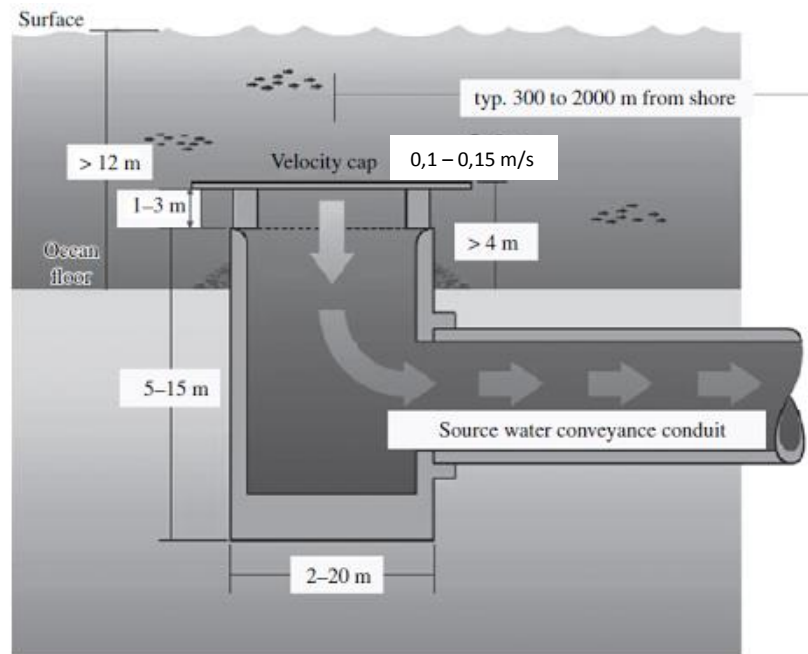


Figura 24. Cámara de captación con cajón de succión (Nikolay Voutchkov, 2013)

- c) *Pantalla pasiva cíclica*: Esta cámara de captación consiste en una pantalla cilíndrica que tiene múltiples ranuras de alambre que van desde los 0,5 a 10 milímetros y son orientadas generalmente sobre el eje horizontal. Las pantallas pasivas cíclicas son más adecuadas para áreas donde se presenta un flujo cruzado, y se recomienda generalmente un sistema de autolavado para limpiar la pantalla de los escombros que se puedan acumular. Esta pantalla tiene la capacidad de reducir el arrastre por succión y la colisión de la biota marina, ya que tiene ranuras adecuadas y una velocidad de flujo baja. Se ha demostrado que 1 milímetro de abertura de las ranuras es altamente efectivo para reducir el arrastre por succión en al menos un 80% (Pankratz, T., 2004).

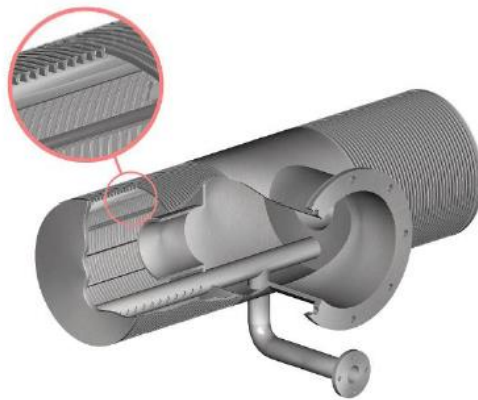


Figura 25. Cámara de captación con pantalla pasiva cíclica. (WateReuse Association, 2011)

Los principales parámetros de diseño para las cámaras de captación son: La dirección del flujo de entrada, la velocidad de succión y la distancia de las ventanas de la cámara de succión a la superficie del mar y al fondo marino (M. Sánchez-Barriga y E. Pita, 2011).

- a) *Dirección del flujo de entrada*: si el flujo de entrada es horizontal se reduce bastante la succión de organismos.
- b) *Velocidad de succión*: es la velocidad de entrada de agua de mar en el sistema a través de las ranuras de las pantallas o ventanas de la cámara de captación. La velocidad de succión depende del caudal de diseño del sistema (parámetro fijo) y de la geometría de las ventanas de la cámara de captación. Si la velocidad de succión disminuye se minimiza el impacto sobre la biota marina en la extracción de agua. Al contrario, si la velocidad es excesiva podría causar que se succione mayor cantidad de arena en suspensión y arena depositada en el fondo marino, pudiendo causar problemas en el desempeño de las bombas y en las instalaciones del sistema. Se recomienda que la velocidad de succión sea menor a 15 [cm/s].
- c) *Distancia de las ventanas o pantallas al fondo marino*: esta distancia debe ser suficiente para evitar la entrada de sedimento al sistema. Una distancia adecuada al fondo evitara

acumulaciones de material alrededor de la cámara de captación que puedan llegar hasta las ventanas. Se recomienda que la distancia disponible entre el fondo del cuerpo de agua y la pantalla sea de al menos 50% del diámetro o 1 metro.

- d) *Distancia de las ventanas a la superficie del mar:* es importante que esta distancia sea la mayor posible por las siguientes razones: lograr captar agua sin partículas en suspensión y evitar la entrada de especies sestónicas (Ej: Medusas) que habitan en el tramo próximo a la superficie; a mayor profundidad se disminuye la cantidad de luz por lo que muchos organismos no se depositarán en la superficie de la cámara de captación y; menor impacto de la acción del oleaje. El aspecto negativo es el elevado costo de construcción y mantención debido a la gran profundidad a la que se diseña. Se recomienda como profundidad óptima entre 12 y 20 metros, ya que más allá de ese límite la calidad de agua no mejora significativamente.

4.1.1.4 Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas sumergidas

En la tabla 11 se resumen las ventajas y desventajas de este tipo de captación abierta.

Ventajas	Desventajas
1. Las captaciones abiertas son capaces de satisfacer cualquier caudal requerido, esto se debe a que el caudal que se extrae depende del diámetro de la tubería de captación y del tamaño y cantidad de las ventanillas de la cámara de succión.	1. Se requiere diseñar cuidadosamente la cámara de succión, ya que se debe evitar el arrastre por succión y la colisión de la biota marina. Además, se debe considerar una profundidad adecuada con el fin de mitigar el impacto a los organismos microscópicos. Al ser una captación abierta, por lo general se requiere la implementación de tratamiento previo a la desalinización, para eliminar arenas y sólidos en suspensión. Esto aumenta los costos de producción de agua desalada.
2. No depende de las condiciones geológicas locales, por lo tanto, no requiere de estudios hidrogeológicos previos a la implementación.	2. Como este tipo de captación está sumergido en el mar, las partes del sistema de captación estarán expuestas a la corrosión, al crecimiento biológico, al oleaje y efectos de las tormentas pudiendo afectar la vida útil y operación de la captación. Se requiere la implementación de elementos resistentes a estas acciones, y aditivos anti fouling.

Tabla 11. Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas sumergidas (1).

Ventajas	Desventajas
3. Si se utilizan los materiales adecuados en la cámara de succión y tubería de transporte la mantención es menor y una vez al año.	3. La construcción e implementación son muy costosas debido a que la construcción se realiza en el fondo marino.
4. En las captaciones abiertas se puede asegurar un caudal de producción constante.	4. Las captaciones abiertas son más vulnerables a todo tipo de vertido de contaminantes y presenta mayor variabilidad en la calidad del agua extraída.

Tabla 12. Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas sumergidas (2).

4.1.2 Captaciones abiertas elevadas

4.1.2.1 Descripción general

En algunos casos es posible re utilizar una estructura tipo muelle abandonada con el fin de reducir los costos iniciales y el impacto ambiental relacionado con la construcción del sistema de captación en el fondo marino. Este sistema de captación consiste en la instalación de una tubería de transporte en la estructura existente, una cámara de captación con las mismas características y condiciones de desempeño que en las captaciones abiertas sumergidas, y una sentina de bombeo. En la figura 26 se muestra un esquema de una captación abierta elevada típica.

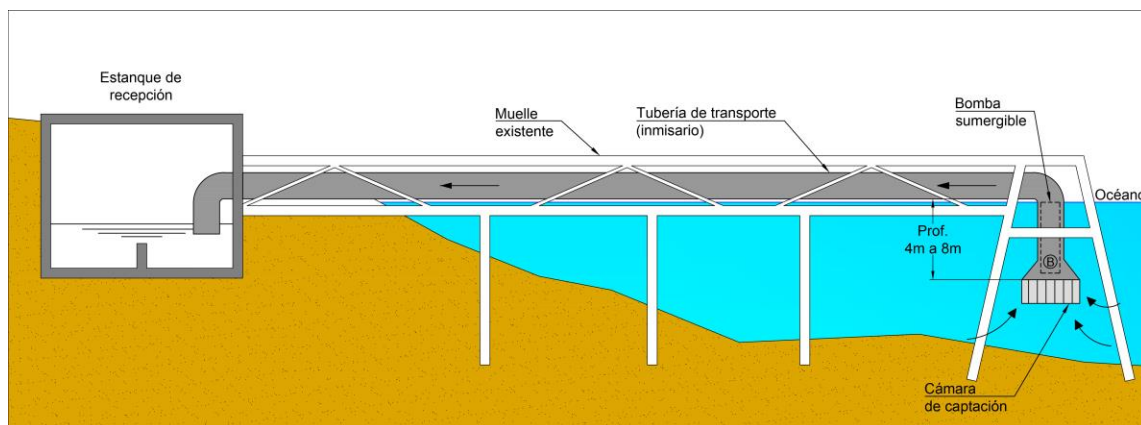


Figura 26. Esquema Sistema de captación abierta elevada (Elaboración propia).

4.1.2.2 Capacidad de las captaciones abiertas elevadas

Al igual que en las captaciones abiertas sumergidas la capacidad es muy alta, dependiendo solamente del diámetro de la tubería y de la dimensión de la cámara de captación. Se debe tener en cuenta que el diámetro de la tubería dependerá de la estructura existente de soporte, por espacio y estado.

4.1.2.3 Componentes de las captaciones abiertas elevadas

Al igual que en las captaciones abiertas elevadas, los elementos que componen una captación abierta elevada son el estanque de recepción o sentina de bombeo, la tubería de transporte y la cámara de captación.

4.1.2.3.1 Sentina de bombeo

La sentina de bombeo sigue las mismas recomendaciones que en el caso de las captaciones abiertas sumergidas.

4.1.2.3.2 Tubería de transporte

La tubería de transporte se instala sobre la estructura tipo muelle existente, y sus dimensiones suelen quedar determinadas por las características y estado de esta. Al igual que en el caso de las captaciones abiertas sumergidas, suele fabricarse de GRP o HDPE.

4.1.2.3.3 Cámara de captación

Para este tipo de captación se recomienda que la cámara de succión a utilizar sea del tipo pantalla pasiva cíclica con espaciado de ranura mínimo para evitar el ingreso de vida marina al sistema. Además, se recomienda que la parte superior de la cámara de captación se instale a un mínimo de 8 metros por debajo de la superficie del agua en niveles de marea media y a 4 metros por debajo de la superficie del agua en niveles de marea baja.

La limpieza de la cámara de captación debe ser frecuente, debido a que este sistema es más vulnerable a mayores niveles de turbidez, presencia de escombros y vida marina que la captación abierta sumergida. Se debe utilizar aditivos antifouling para evitar la adhesión de algas y moluscos que pueden obstruir la entrada de agua y así garantizar el buen funcionamiento del sistema.

4.1.2.4 Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas elevadas

En la tabla 13 se resumen las ventajas y desventajas de este tipo de captación abierta.

Ventajas	Desventajas
1. Las captaciones abiertas son capaces de satisfacer cualquier caudal requerido, esto se debe a que el caudal que se extrae depende del diámetro de la tubería de captación y del tamaño y cantidad de las ventanillas de la cámara de succión.	1. Captación de agua con mayor cantidad de sólidos en suspensión y mayor exposición a la contaminación. Los primeros 10 metros de agua desde la superficie, típicamente contienen mayores niveles de turbiedad, algas, contaminación de hidrocarburos, limos y compuestos orgánicos que las aguas profundas.

Tabla 13. Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas elevadas (1).

Ventajas	Desventajas
2. No depende de las condiciones geológicas locales, por lo tanto no requiere de estudios hidrogeológicos previos a la implementación.	2. Este tipo de captación produce un mayor impacto ambiental a la biota marina porque extrae agua de la superficie donde se encuentra la mayor cantidad de vida marina, debido a la cercanía con la luz.
3. Si se utilizan los materiales adecuados en la cámara de succión y tubería de transporte la mantención es menor y una vez al año	3. La estructura del sistema de captación queda expuesta a la dinámica costera, por lo que se requiere de una evaluación estructural del muelle y, eventualmente, elementos de protección.
4. Sistema más económico en implementar que el sistema sumergido, además es más fácil hacer las mantenciones requeridas que en el sistema sumergido.	4. Al extraer grandes cantidades de caudales en la proximidad de la superficie marina, se reduce la biomasa disponible de los primeros eslabones de la cadena trófica que están compuesta por fitoplancton y zooplancton, provocando así una caída en la productividad global del ecosistema.

Tabla 14. Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas elevadas (2).

4.1.3 Captaciones abiertas directas

4.1.3.1 Descripción general

Las captaciones abiertas directas consisten en un depósito circular o cuadrado que se excava por debajo de la cota del agua de mar en el terreno y que se conecta al océano mediante un túnel horizontal natural o excavado. En la entrada al depósito se instala una rejilla para evitar el ingreso de vida marina y desechos. En la Figura 27 se muestra un esquema de una captación abierta directa típica.

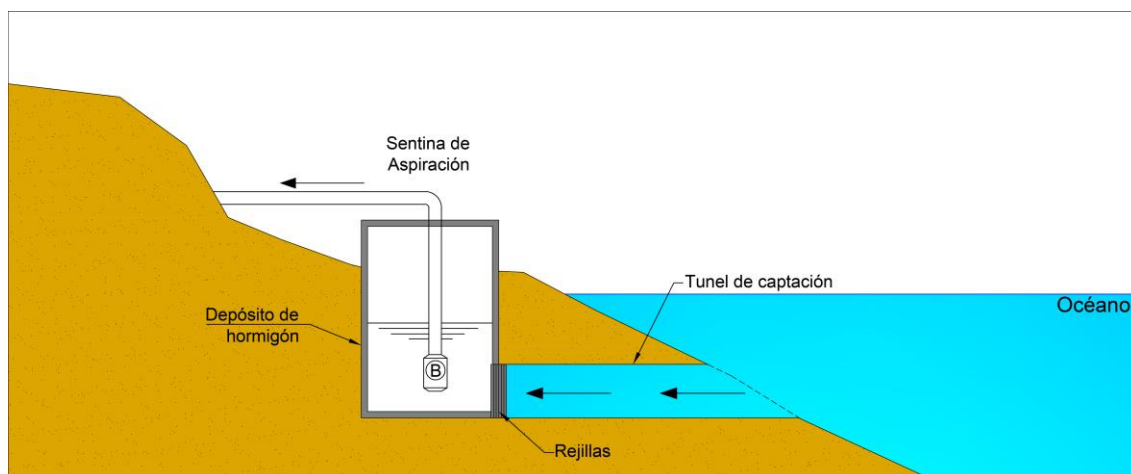


Figura 27. Esquema Sistema de Captación abierta directa (Elaboración propia).

Las captaciones abiertas directas se pueden instalar tanto en costas de arena con poco desnivel, como en costas rocosas, siendo esta última la condición más favorable, debido a que en el fondo rocoso la acción de las olas normalmente no causa una agitación significativa de sedimento ni elevada turbidez. Para evitar el arrastre de desechos y espuma, en caso de ser posible, es preferible que la entrada de agua esté al menos 2 metros por debajo del nivel de marea baja.

4.1.3.2 Capacidad de las captaciones abiertas directas

Las captaciones abiertas directas pueden extraer un caudal menor que las captaciones abiertas sumergidas y elevadas, sin embargo, tienen mayor capacidad que las captaciones cerradas.

4.1.3.3 Componentes de las captaciones abiertas directas

4.1.3.3.1 Sentina de aspiración

Depósito circular o cuadrado que se excava por debajo de la cota del agua de mar en el terreno. Puede diseñarse en hormigón armado (en el caso de playas de arena) o excavar directamente en la roca. El agua recolectada es transportada hacia su destino idealmente mediante bombas sumergibles.

4.1.3.3.2 Rejilla de ingreso

Se ubica en la entrada a la sentina de aspiración. Para el correcto funcionamiento de este sistema se debe realizar una limpieza periódica a la rejilla de ingreso, ya que al ser una captación ubicada en la zona de surf se acumulan bastantes desechos que pueden obstruir el sistema.

4.1.3.3.3 Túnel de captación

Túnel que conecta la sentina de aspiración con el océano. Puede ser natural o excavado.

4.1.3.4 Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas directas

En la tabla 15 se resumen las ventajas y desventajas de este tipo de captación abierta.

Ventajas	Desventajas
1. Sistema de captación más económico que las captaciones elevadas y sumergidas para caudales grandes.	1. Genera gran impacto ambiental a la biota marina. Además el sistema puede ser afectado por el crecimiento de algas, choritos, etc.

Tabla 15. Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas directas (1).

Ventajas	Desventajas
2. De las captaciones abiertas directas se puede obtener un caudal de producción elevado.	2. En comparación con los demás tipos de captaciones, el agua extraída en las captaciones abiertas directas es de peor calidad, debido a la cercanía con la superficie y por ubicarse en la zona de surf, donde el rompimiento de las olas levanta continuamente partículas desde el fondo aumentando la turbiedad. En general se requiere un gran sistema de tratamiento previo al proceso de desalación.
3. Ofrece flexibilidad de tamaños y caudales, dependiendo de las dimensiones del depósito y del túnel horizontal.	3. Este sistema es muy vulnerable a los fenómenos dinámicos del océano, tales como tsunamis y marejadas, debido a que se encuentra en la zona de surf y resaca.
4. Su construcción e implementación es más rápida que las otras captaciones abiertas.	4. Las captaciones abiertas directas son las menos recomendables para la desalinización de agua mediante osmosis inversa por su mala calidad y alta turbiedad.

Tabla 16. Ventajas y desventajas de las captaciones abiertas directas (2).

4.1.4 Recomendaciones generales para el diseño de captaciones abiertas

4.1.4.1 Selección de la ubicación de una captación abierta

Se debe tener en cuenta los siguientes factores al seleccionar la ubicación de la captación abierta de agua de mar (Voutchkov, N., 2013).

1. El potencial de erosión de las playas en el área de captación.
2. Ubicación y dirección de las corrientes submarinas.
3. Presencia y ubicación de posibles fallas activas sísmicas.
4. Estudios de topografía y geología del suelo de la masa de agua (perfil batimétrico).
5. Estudio de la ubicación de biota marina sensible a lo largo de la ruta de la tubería de transporte y cerca de la entrada de la captación.
6. Ubicación y tamaño de descargas existentes de aguas residuales sanitarias e industriales dentro de un radio de 1 km de la entrada de la captación.

7. Estudio de las características de las olas (altura, longitud de onda, velocidad) y la profundidad de impacto de las olas.
8. Estudio de los tipos y características de las mareas, corrientes superficiales y profundas y vientos.
9. En el caso de las captaciones abiertas sumergidas, realizar estudio de los rasgos topográficos del fondo marino.
10. Tráfico de barcos y buques.

Las captaciones abiertas deben ser emplazadas lejos de áreas que presenten: erosión de las playas, fallas sísmicas activas, olas altas, fuertes corrientes submarinas que transportan desechos, limos, organismos microscópicos (plancton y zooplancton), pasto marino y materiales fibrosos y áreas con alto tráfico de buques y barcos pesados. Si el lugar corresponde a una zona de biota marina sensible, se debe modificar el lugar de instalación de la cámara de captación o la tubería de transporte debe ser instalada mediante perforación direccional o tunelera bajo el fondo marino.

4.1.4.2 Recomendaciones de mantención para las captaciones abiertas

La calidad del agua y la biota marina pueden afectar la operación del sistema de captación. Los factores típicos incluyen la presencia de algas, aceites y grasas (del tráfico de barcos), aguas residuales y descargas de aguas pluviales, ambientes biológicamente activos (donde las algas, choritos, percebes, etc. son predominantes) y áreas expuestas a proliferación de algas como son las mareas rojas. Por esto es que las captaciones abiertas requieren una inspección regular bajo el agua y una periódica limpieza y mantención para mantener la eficiencia del sistema. Como antecedente de la importancia de la mantención del sistema de captación, en el año 2011 el 60% de la población de Antofagasta sufrió un corte en el suministro de agua potable debido a la obstrucción en la cámara de captación por la presencia inesperada de una microalga.

4.2 Captaciones cerradas de agua de mar

En las captaciones cerradas, el agua de mar o salobre es extraída desde la orilla de las playas o sectores cercanos, a través de lechos de arena saturada u otros estratos subterráneos permeables. A diferencia de las captaciones abiertas, la capacidad de las captaciones cerradas es limitada por las condiciones geomorfológicas locales.

Existen diversos tipos de captaciones cerradas de agua de mar. En general, los más utilizados son:

- | | |
|--------------------------------|--|
| 1) Pozos playeros verticales | 5) Pozos con perforación dirigida (PHD) |
| 2) Norias playeras | 6) Pozos horizontales radiales |
| 3) Pozos playeros horizontales | 7) Galerías de infiltración con cama filtrante |
| 4) Pozos inclinados | |

4.2.1 Pozos playeros verticales

4.2.1.1 Descripción general

Los pozos playeros verticales son el tipo de captación cerrada más utilizado. El requerimiento clave para poder utilizar este tipo de captación, es la presencia de una formación de acuífero costero que sea adecuadamente permeable y que este hidráulicamente conectado al océano, de manera que el agua marina puede infiltrarse.

Este tipo de pozo es perforado verticalmente hacia la roca subyacente o hacia el sistema de acuífero costero no consolidado. Generalmente, se construye mediante perforación e instalación de tubería de sostenimiento. Luego de terminar la perforación se instala un entubado, el cual se compone de una tubería superior unida a otra tubería que contiene cribas. Entre la tubería de sostenimiento y el entubado se rellena con un empaque de grava seleccionada que actúa como medio filtrante, para finalmente retirar la tubería de sostenimiento. Entre la grava y la superficie se rellena con un sello sanitario, generalmente de hormigón, para prevenir la contaminación de la superficie. En la figura 28 se muestra un esquema de un pozo playero vertical y sus componentes.

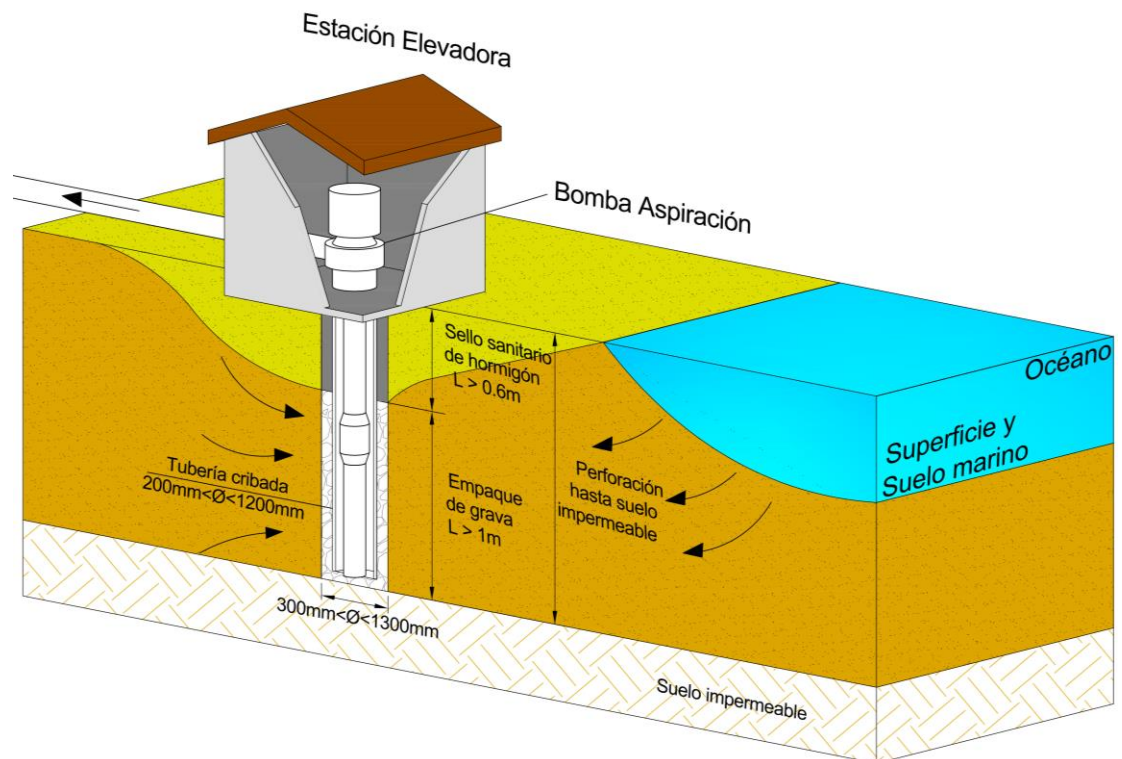


Figura 28. Esquema de Pozo playero vertical (Elaboración propia).

4.2.1.2 Capacidad de los pozos playeros verticales

La capacidad de los pozos playeros depende principalmente de tres factores:

1. La conductividad hidráulica o permeabilidad (K): es el factor utilizado para describir la velocidad con que el agua puede moverse a través de un medio permeable. Este valor depende del tipo y tamaño de material de los granos del sedimento y el tamaño de los poros que existe entre los granos.
2. La profundidad y la extensión del área de la formación del material filtrante (m).
3. La habilidad de la formación del material para recibir recarga de agua para apoyar el buen rendimiento del pozo.

El rendimiento del pozo se mide por su transmisividad (T), que corresponde al producto entre la potencia del acuífero (m) y la permeabilidad (K). La capacidad de producción del pozo vertical puede ser determinada mediante la siguiente expresión (Voutchkov, N., 2013):

$$Q_{\text{pozo}} = (T * A_0)/4,4$$

Donde Q_{pozo} : capacidad de producción del pozo [m^3/d]

T: Transmisividad del acuífero= $K*m$ [m^2/d]

K: Permeabilidad del acuífero [m/d]

m: Profundidad del acuífero [m]

A_0 : Depresión del acuífero [m]

Para determinar la capacidad real del pozo se deben realizar pruebas de bombeo y un estudio hidrogeológico que permita estimar la permeabilidad de la formación del material y las características del sustrato. Como rango general, el máximo rendimiento de un pozo playero individual es del orden de 50 [L/s], sin embargo, si las condiciones del suelo son de alto rendimiento, es decir, con un promedio de transmisividad de 80 [L/s m] (7.000 [$\text{m}^3/\text{d m}$]), el caudal del pozo puede llegar hasta los 100 [L/s].

Si es necesario extraer grandes caudales se puede instalar una batería de pozos, considerando un espaciamiento mínimo que depende de su radio de influencia. El radio de influencia R puede estimarse a partir de la granulometría del medio permeable (Tabla 17). Para maximizar la capacidad de los pozos playeros, es recomendable emplazarlos lo más cerca de la línea costera que sea posible. El impacto ambiental visual de esta alternativa puede reducirse implementando cámaras de válvulas enterradas.

Material	Tamaño grano [mm]	R [m]
Grava	10	1500
Gravilla	2 - 10	500 - 1000
Grava - Arena	1 - 2	400 - 500
Arena gruesa	0.5 - 1	200 - 400
Arena media	0.25 - 0.5	100 - 200
Arena fina	0.1 - 0.25	50 - 100
Arena muy fina	0.05 - 0.1	10 - 50

Tabla 17. Estimación del radio de influencia del pozo a partir de la granulometría del medio permeable (Missimer et al. 2013).

4.2.1.3 Componentes de los pozos playeros verticales

4.2.1.3.1 Perforación del pozo y tubería cribada

Las características físicas del pozo, como el diámetro y profundidad, son función de las características y potencial de rendimiento del acuífero. Sin embargo, usualmente la tubería cribada tiene un rango de diámetros entre 200 milímetros y 1.200 milímetros y la profundidad típicamente es menor a los 75 metros. El diámetro de la perforación del pozo debe ser al menos 10 centímetros mayor que el diámetro de la tubería cribada para poder instalar el empaque de grava.

En este tipo de captación la corrosión es un tema muy importante. Es necesario utilizar acero resistente a la corrosión para la tubería cribada, ya que de no ser así el desempeño del pozo se verá afectado y su vida útil será muy baja. La corrosión se puede monitorear mediante testigos que se dejan al fondo del pozo y se van retirando al pasar los años, estimando así el nivel de corrosión de toda la tubería cribada.

4.2.1.3.2 Empaque de grava

Se utiliza para mejorar el desempeño de la tubería cribada del pozo. En general, el empaque de grava se extiende al menos un 1 metro sobre la tubería cribada.

4.2.1.3.3 Sello sanitario

Relleno de hormigón que se ubica entre la superficie y el empaque de grava para prevenir la contaminación. Habitualmente se extiende al menos 0,6 metros sobre la parte superior del empaque de grava.

4.2.1.4 Ventajas y desventajas de los pozos playeros verticales

Los pozos playeros pueden ser una alternativa económica en comparación con las captaciones abiertas para caudales menores a 400 [L/s]. Usualmente los pozos verticales son menos costosos que los pozos horizontales, pero su rendimiento es menor, por ende, generalmente se

utilizan los pozos verticales para caudales menores a 250 [L/s]. En la tabla 18 se resumen las ventajas y desventajas de este tipo de captación cerrada.

Ventajas	Desventajas
1. La construcción de los pozos es relativamente simple y no tan costosa.	1. La capacidad de producción de los pozos playeros verticales depende altamente de las condiciones geológicas locales, por tanto, se hace necesario realizar un estudio hidrogeológico para determinar las propiedades del medio permeable.
2. Suministro de agua de mar prefiltrada con bajo nivel de sólidos en suspensión. Además, genera una protección pasiva para la biota marina.	2. Impacto ambiental en la construcción del pozo. Para poder instalar las tuberías que conectan el pozo con la planta desaladora o elevadora, es necesario excavar una zanja abierta, interviniendo la playa temporalmente.
3. Minimiza el crecimiento y acumulación de organismos marinos dentro de la tubería que transporta el agua.	3. Alta exposición a la corrosión. Se requiere que la tubería cribada sea de acero inoxidable y que al menos cada 5 años se le realice mantención.
4. La instalación de la captación está en el borde costero por lo que hace más fácil realizar las mantenciones.	4. Para grandes capacidades se requiere la implementación de varios pozos, aumentando costos e impacto ambiental visual, provenientes de las cámaras de válvulas requeridas.
5. Este sistema de captación elimina el posible arrastre por succión la colisión de la biota marina, optimizando la protección de los peces y la vida marina.	5. Los pozos verticales a lo largo de la playa pueden aspirar agua dulce subterránea de los acuíferos costeros, pudiendo así impactar la cuenca de aguas subterráneas y potencialmente acelerar la intrusión salina.

Tabla 18. Ventajas y desventajas sistema de captación mediante pozos playeros.

4.2.2 Norias playeras

4.2.2.1 Descripción general

Las norias son pozos someros de profundidades inferiores a los 20 metros, donde el agua se extrae mediante bombas sumergibles. Generalmente, las norias son construidas con revestimiento de hormigón y se instala alrededor un filtro de grava al igual que en los pozos playeros en un espesor de 50 centímetros.

Los pozos tipo noria generalmente se excavan a mano, por lo que el diámetro no puede ser inferior a 1,2 metros, pudiendo llegar hasta los 3 metros. Es recomendable emplazar las norias en sectores de la playa protegidos de la dinámica del océano.

4.2.2.2 Capacidad de las norias playeras

Los caudales obtenidos de las norias son inferiores a los obtenidos mediante pozos verticales playeros, pudiendo alcanzar como máximo 30 [L/s]. Se debe realizar una prueba de bombeo para poder determinar la capacidad máxima de la noria sin que esta se agote.

4.2.2.3 Ventajas y desventajas de las norias playeras

En la tabla 19 se resumen las ventajas y desventajas de este tipo de captación cerrada.

Ventajas	Desventajas
1. La construcción e implementación de las norias playeras es muy económica en comparación con todos los tipos de captación.	1. Esta captación es muy limitada con respecto a la capacidad de caudal que puede extraer. Es conveniente solo en el caso de requerir caudales muy bajos.
2. Suministro de agua de mar prefiltrada y con bajo nivel de sólidos en suspensión. Además, genera una protección pasiva para la biota marina.	2. La capacidad de producción de las norias playeras depende de las condiciones geológicas locales, por tanto, se hace necesario un estudio hidrogeológico para determinar las propiedades del medio permeable.

Tabla 19. Ventajas y desventajas sistema de captación mediante norias playeras.

4.2.3 Pozos playeros horizontales

4.2.3.1 Descripción general

Los pozos horizontales constan de dos partes fundamentales: un pozo vertical de hormigón armado y fondo de hormigón en masa, y un conjunto de drenes horizontales ubicados en uno o más niveles, conectados con el pozo vertical en el cual desaguan a través de válvulas de compuerta. Al igual que los pozos verticales, los pozos horizontales pueden ser ubicados cercanos a la línea costera, sin embargo, los drenes pueden ser proyectados fuera de la zona de influencia de la playa y la anteplaya. Esto permite que el porcentaje de agua de mar que es extraído sea maximizado.

Por lo general, para la construcción de este tipo de captación se utiliza el método de entubado inicio-fin. Este método consiste en hincar secciones de tuberías prefabricadas de hormigón armado, una a una. La excavación se realiza desde dentro del entubado, de manera que a medida que el suelo se va extrayendo el entubado de hormigón se va hincando por efecto de su propio peso. A continuación, se van colocando sobre ese entubado nuevas secciones de

tubería. Este proceso continúa hasta que la primera sección del entubado (la cual contiene los puertos para conectar los drenes) alcanza la elevación de diseño seleccionada para el emplazamiento de los drenes. En ese momento, se sella con hormigón el fondo del entubado para evitar que entre agua al sistema. Finalmente, los drenes horizontales se extienden hacia fuera a través de los puertos de montaje de la pared de la sección inferior del entubado central.

En la Figura 29 se muestra un esquema de un pozo horizontal típico.

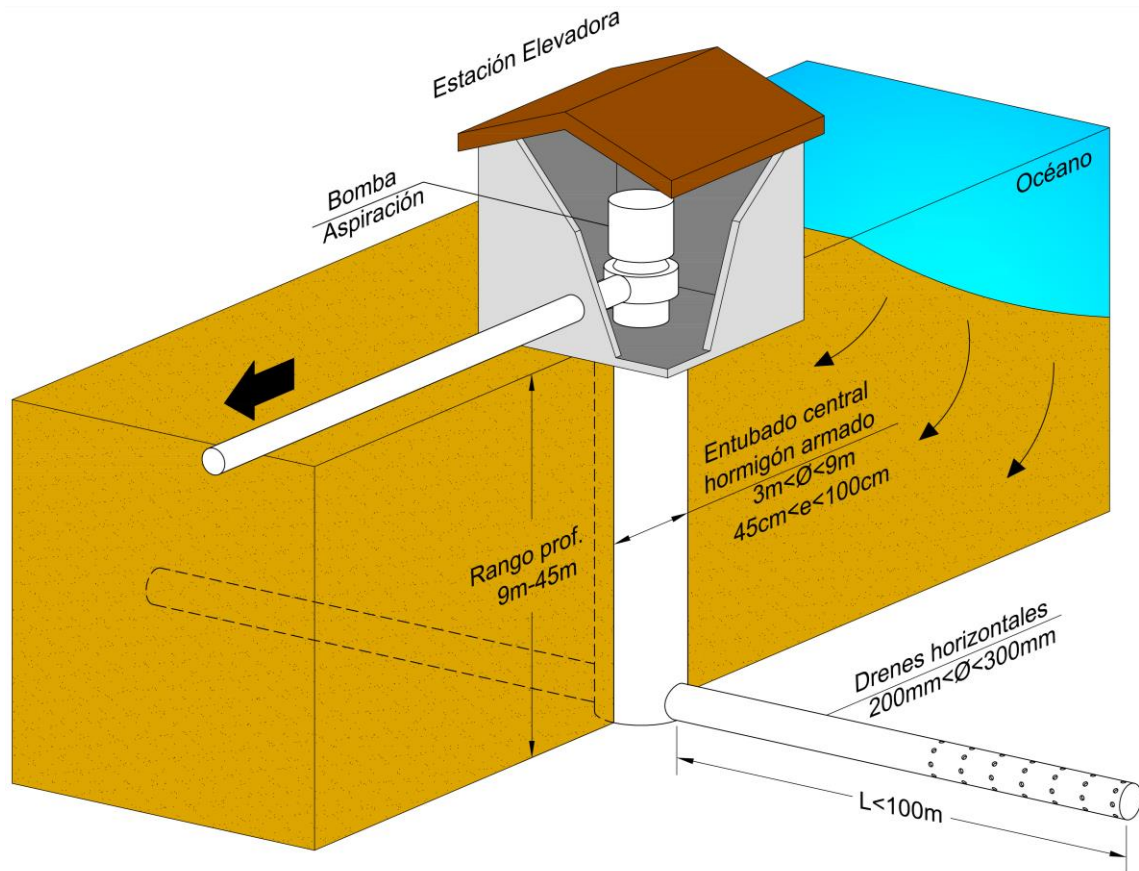


Figura 29. Esquema general del sistema de captación pozos horizontales (Elaboración propia).

4.2.3.2 Capacidad de los pozos playeros horizontales

Los drenes de esta captación, al ser horizontales, pueden ser instalados en la zona del acuífero de mayor eficiencia hidráulica, por lo que en general tienen capacidades mayores que los pozos playeros verticales. La capacidad dependerá del diámetro y largo de los drenes que se utilicen. Para determinar con precisión la capacidad real de un pozo horizontal, se requiere realizar un ensayo de producción en cada dren por separado y un aforo del pozo completo, sin embargo, como dato referencial, se han instalado pozos horizontales que alcanzan una capacidad de hasta 200 [L/s].

4.2.3.3 Componentes de los pozos playeros horizontales

4.2.3.3.1 Entubado central de hormigón

El entubado central de hormigón armado generalmente tiene de 3 a 9 metros de diámetro y un espesor que va desde los 45 a 100 centímetros. La profundidad del entubado depende de las condiciones geológicas de cada emplazamiento, pero por lo general es mayor a 9 metros y menor a 45 metros.

4.2.3.3.2 Drenes horizontales

Para determinar la cantidad, el largo y la ubicación de los drenes horizontales, se debe realizar un estudio hidrogeológico que permita estimar las propiedades del medio permeable. El diámetro de los drenes varía generalmente entre 200 y 300 milímetros y el largo se extiende hasta los 100 metros. El tamaño de las aberturas se selecciona con el fin de que la formación del suelo subterráneo se acomode e impida el ingreso de arena al sistema. De ser necesario la implementación de filtro artificial de grava se debe instalar alrededor de los drenes para prevenir la intrusión de arena al sistema. Los drenes de los pozos horizontales pueden construirse con una cierta inclinación hacia arriba, con el fin de penetrar de mejor manera en el acuífero.

4.2.3.4 Ventajas y desventajas de los pozos playeros horizontales

En la tabla 20 se resumen las ventajas y desventajas de este tipo de captación.

Ventajas	Desventajas
1. Al ser un pozo, el agua de mar que extrae ha sido prefiltrada, reduciendo así en gran medida o incluso eliminando la necesidad de pretratamiento antes del proceso de desalación.	1. El costo de los pozos horizontales es elevado, por lo que se recomiendan para caudales altos.
2. Suministro de agua de mar prefiltrada y con bajo nivel de sólidos en suspensión. Además, genera una protección pasiva para la biota marina.	2. La capacidad de producción de los pozos horizontales depende altamente de las condiciones geológicas locales y deben ser estudiadas en detalle antes de implementar este tipo de captación
3. Obtención de mayores caudales ya que los descensos dinámicos en los pozos horizontales son considerablemente menores que en los pozos verticales	3. Dependiendo de la ubicación y la profundidad de la arena sobre la captación, tormentas podrían exponer los componentes del pozo, causando daño al sistema

Tabla 20. Ventajas y desventajas del sistema de captación mediante pozos horizontales (1).

Ventajas	Desventajas
4. Cuando el espesor de acuífero saturado es pequeño los pozos horizontales son más adecuados que los pozos verticales.	4. Materiales aluviales poco profundos, limos y arcillas pueden impedir el flujo de agua hacia el pozo, reduciendo la capacidad del sistema.
5. Este sistema de captación elimina el posible arrastre por succión y la colisión de la biota marina, optimizando la protección de los peces y la vida marina.	5. Para grandes caudales, los pozos horizontales requieren de un gran diámetro del entubado central de hormigón y por lo tanto, requieren una cámara de bombas y válvulas de gran dimensión, generando un gran impacto visual. Se puede construir bajo arena, pero aumentarían considerablemente los costos.

Tabla 21. Ventajas y desventajas del sistema de captación mediante pozos horizontales (2).

4.2.4 Pozos inclinados

4.2.4.1 Descripción general

Los pozos inclinados son tuberías tipo dren construidas con un cierto ángulo respecto a la horizontal. Debido a que la tubería y el dren son instalados en ángulo, el dren probablemente atravesará múltiples capas geológicas dentro del acuífero costero, extrayendo así agua de diferentes cualidades desde distintas capas/niveles. Este tipo de captación se utiliza con el fin de extender la zona de los drenes del pozo lejos de la ubicación de la cámara de bombas. Esto permite que el pozo se perfora en la anteplaya, pero que la extracción de agua sea desde un punto fuera de la costa. En la Figura 30 se muestra un esquema de un pozo inclinado típico.

4.2.4.2 Capacidad de los pozos inclinados

El rendimiento de un pozo individual usualmente se encuentra entre los 50 y 150 [L/s] para longitudes superiores a 600 metros y diámetros de perforación de hasta 710 milímetros. Por lo general los pozos inclinados tienen una capacidad en conjunto que llega hasta los 650 [L/s].

La capacidad de los pozos inclinados puede disminuir con el tiempo. Se recomienda la implementación de varios pozos inclinados para permitir la rotación de los pozos durante la operación del mantenimiento y restauración del pozo.

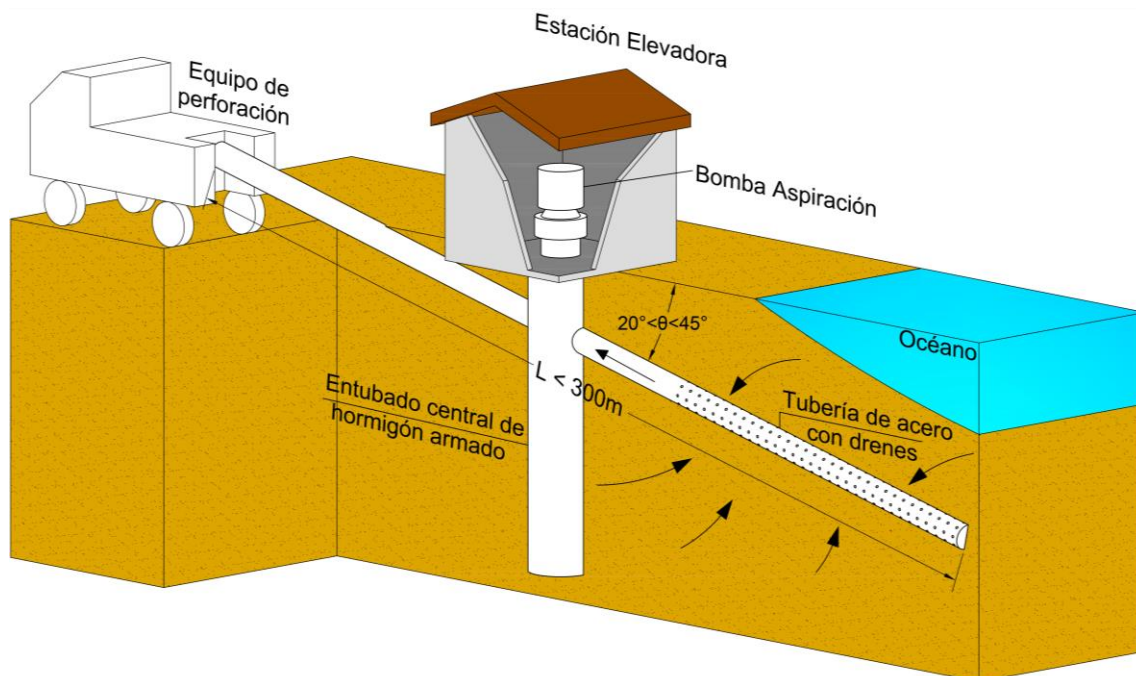


Figura 30. Esquema del sistema de captación mediante pozos inclinados (Elaboración propia).

4.2.4.3 Componentes de los pozos inclinados

4.2.4.3.1 Tubería de acero con drenes

Generalmente es instalada usando equipos de perforación rotatoria en un ángulo de hasta 25° con respecto a la horizontal. Dependiendo de las condiciones del suelo, el largo estimado para los pozos inclinados puede llegar a los 300 metros, sin embargo, hasta la fecha el pozo inclinado más largo construido tiene 105 metros.

4.2.4.3.2 Entubado central de hormigón armado

Múltiples pozos inclinados pueden conectarse a un entubado de hormigón central común para cubrir una mayor área de la costa con una sola instalación de bombeo.

4.2.4.3.3 Estación elevadora

Puede ser enterrada debajo de la arena de la playa para mitigar el impacto visual.

4.2.4.4 Ventajas y desventajas de los pozos inclinados

En la tabla 22 se describen las ventajas y desventajas de los pozos inclinados.

Ventajas	Desventajas
1. Esta captación ofrece protección a los organismos marinos en todas las fases de desarrollo (adultos, juveniles y larvas) evitando el arrastre por succión hacia el sistema de captación.	1. La capacidad de captación depende altamente de las condiciones geológicas locales, por lo tanto, requiere de un estudio cuidadoso previo a la implementación.
2. El fondo marino actúa como un filtro natural eliminando prácticamente todos los sólidos gruesos, floraciones de algas y partículas de tamaño hasta 50 μm provenientes del agua de mar.	2. Los sedimentos finos y limos pueden cubrir el fondo marino y crear una capa que puede impedir el flujo de agua que fluye vertical hacia el los drenes inclinados reduciendo la capacidad del pozo.
3. Minimiza el crecimiento y acumulación de organismos marinos, tales como percebes, en las superficies de la tubería de captación.	3. Materiales aluviales proco profundos, como limos y arcillas en el aluvial, pueden impedir el flujo de agua que se dirige en sentido horizontal y vertical al pozo reduciendo la capacidad del pozo.
4. Pueden proveer mayor capacidad de caudal que los pozos playeros verticales.	4. Los pozos inclinados pueden extraer agua dulce subterránea de los acuíferos costeros pudiendo impactar en la cuenca de aguas subterráneas y potencialmente acelerar la intrusión salina.
	5. Dependiendo de la ubicación y la profundidad de la arena sobre la captación, tormentas podrían exponer los componentes del pozo, causando daño al sistema.

Tabla 22. Ventajas y desventajas del sistema de captación mediante pozos inclinados.

4.2.5 Pozos con perforación horizontal dirigida (PHD)

4.2.5.1 Descripción general

Los pozos con perforación horizontal dirigida (PHD) son pozos con una inclinación no lineal. Se extienden desde el punto de entrada, que puede ser lejano a la costa, hasta la anteplaya. Su construcción requiere la utilización de un sistema de perforación drill rig.

El proceso de construcción consiste en realizar una perforación de pequeño diámetro desde un foso en el cual se introduce un cabezal de perforación inclinado (con hasta 20°). La localización tridimensional permite controlar en todo momento la situación y la dirección del cabezal, pudiendo incluso salvar obstáculos. Una vez realizado el sondeo piloto se procede al ensanche mediante un retroensanchador del diámetro deseado (hasta 600 milímetros). Por último, se introduce la tubería, lo que generalmente se hace desde las lejanías de la costa hacia la playa. Es necesario cementar un primer tramo, con el fin de captar solamente agua de mar, y el tramo

final a lo largo de unos 20 metros. Esta técnica es ideal para terrenos consolidados. En la figura 31 se muestra un esquema de un pozo con perforación horizontal dirigida (PHD) típico.

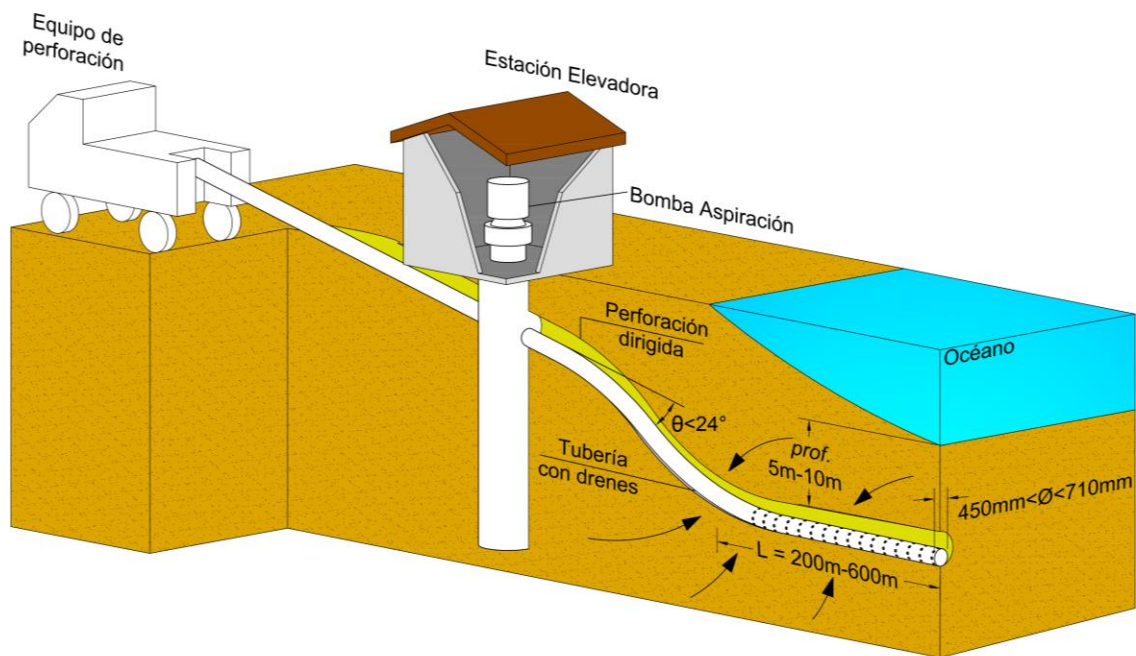


Figura 31. Esquema sistema de captación mediante pozos con perforación horizontal dirigida (Elaboración propia).

4.2.5.2 Capacidad

Los pozos con tecnología PHD se han utilizado con éxito en captaciones que exceden los 440 [L/s]. Una de las plantas desaladoras más grandes del mundo, la planta Canal Cartagena (ubicada en San Pedro del Pinatar, España), utiliza como sistema de captación pozos inclinados con perforación horizontal dirigida (PHD). Tiene una capacidad de producción de agua potable de 750 [L/s]. La captación se efectúa mediante 20 pozos PHD de 150 metros de largo y 355 milímetros de diámetro cada uno, organizados en forma de abanico. Cada pozo puede captar entre 100 y 140 [L/s]. Esta planta desaladora opera con un 45% de recuperación, es decir, de la captación total el 45% se transforma en agua potable.

La capacidad de los pozos con perforación horizontal dirigida puede disminuir con el tiempo. Se recomienda la implementación de varios pozos inclinados para permitir la rotación de los pozos durante la operación del mantenimiento y restauración del pozo.

4.2.5.3 Componentes de los pozos con perforación horizontal dirigida (PHD)

4.2.5.3.1 Tubería con drenes

Usualmente, las tuberías dren son instaladas a una profundidad entre 5 y 10 metros debajo de la superficie del fondo marino, en pozos separados mediante perforaciones con un largo que va

desde 200 a 600 metros en el acuífero costero. De esta forma se capta agua de mar y se evita la recolección de agua de acuíferos de agua dulce cercanos a la costa.

4.2.5.3.2 *Entubado central de hormigón armado*

Múltiples pozos inclinados pueden conectarse a un entubado de hormigón central común para cubrir una mayor área de la costa con una sola instalación de bombeo.

4.2.5.3.3 *Estación elevadora*

Puede ser enterrada debajo de la arena de la playa para mitigar el impacto visual.

4.2.5.4 ***Ventajas y desventajas de los pozos con perforación horizontal dirigida (PHD)***

Los pozos con perforación horizontal dirigida tienen las mismas ventajas y desventajas que los pozos inclinados, agregándose las siguientes:

Ventajas	Desventajas
1. Al ser una perforación dirigida, es posible salvar obstáculos en el trazado.	1. El costo de los pozos con perforación horizontal dirigida es más alto que el de los pozos inclinados tradicionales.

Tabla 23. Ventajas y desventajas del sistema de captación mediante pozos con perforación horizontal dirigida (PHD)

4.2.6 **Pozos horizontales radiales**

4.2.6.1 ***Descripción general***

Los pozos radiales, generalmente llamados “Ranney” debido a su inventor, son una variación de los pozos playeros horizontales, donde múltiples pozos colectores se acoplan con una estación de bombeo instalada encima del entubado central de hormigón armado. El uso de múltiples brazos implica que la producción de cada pozo radial puede ser significativamente mayor que la de un pozo vertical solitario. De requerirse más de un pozo radial, la distancia entre estos debe ser de al menos de unos 120 metros. En la figura 32 se muestra un esquema de un pozo horizontal radial típico.

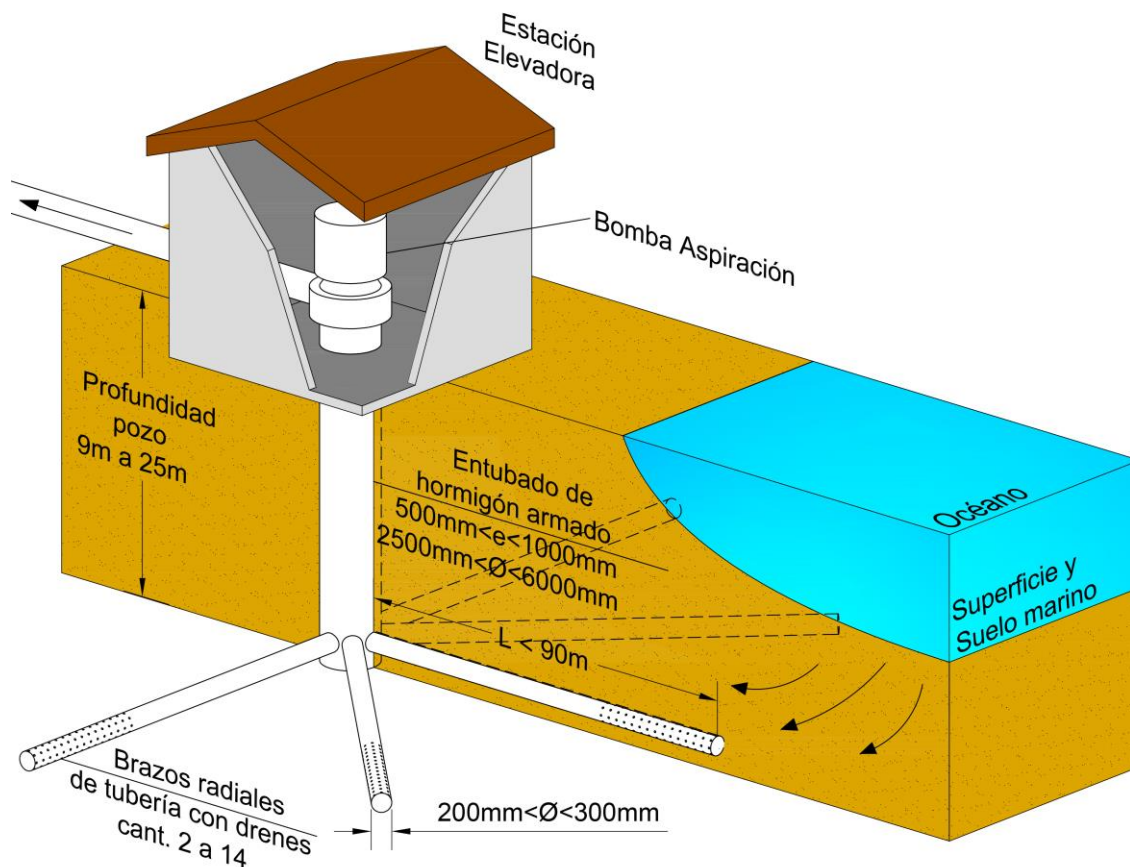


Figura 32. Esquema de captación mediante Pozos radiales horizontales (Elaboración propia).

4.2.6.2 Capacidad

Un pozo horizontal radial generalmente es diseñado para captar desde 100 [L/s] de agua de mar. Dependiendo del número de brazos radiales, la capacidad puede llegar hasta varios cientos de litros por segundo.

4.2.6.3 Componentes de los pozos horizontales radiales

4.2.6.3.1 Brazos radiales

El largo, ubicación y número necesario de los brazos radiales debe determinarse a partir de un estudio hidrogeológico, en el que se establecen las propiedades del medio permeable. Usualmente, el diámetro de los brazos radiales es de 200 a 300 milímetros, y sus longitudes se extienden hasta los 90 metros. El tamaño de la abertura de las cribas se selecciona para acomodar el tamaño de los granos de la formación del suelo subterráneo. De ser necesario, se puede instalar un filtro artificial de grava alrededor de las tuberías cribadas. En general, un pozo radial tiene de 2 a 14 brazos radiales orientados hacia el mar.

4.2.6.3.2 Entubado central

El entubado central del pozo, generalmente se construye de hormigón armado, y puede tener un diámetro de 2.5 a 6 metros, con un espesor de pared aproximado entre 0.5 y 1 metros. La profundidad del entubado de hormigón armado varía conforme a las condiciones del sitio en específico, pudiendo tener de 9 a 25 metros.

4.2.6.3.3 Estación de bombeo

La estación de bombeo de la captación se puede diseñar con bombas sumergibles con el fin de reducir al mínimo los niveles de ruido. Sin embargo, las captaciones de pozos radiales medianas y grandes frecuentemente emplean bombas de turbina verticales u horizontales, debido a su mayor eficiencia y menor energía requerida.

4.2.6.4 Ventajas y desventajas de los pozos horizontales radiales

Ventajas	Desventajas
1. Esta captación ofrece protección a los organismos marinos evitando el arrastre por succión hacia el sistema de captación.	1. La capacidad de producción de los pozos horizontales radiales depende altamente de las condiciones geológicas locales y deben ser estudiadas con detalles antes de implementar este tipo de captación.
2. Potencial de filtración natural y reducción de sólidos en suspensión y algas de la fuente de agua al proceso de desalación.	2. Los sedimentos finos y limos pueden cubrir el fondo marino y crear una capa que puede impedir el flujo de agua que fluye vertical hacia el los drenes inclinados reduciendo la capacidad del pozo.
3. Minimiza el crecimiento y acumulación de organismos marinos, tales como percebes, en las superficies de la tubería de captación.	3. Materiales aluviales proco profundos, como limos y arcillas en el aluvial, pueden impedir el flujo de agua que se dirige en sentido horizontal y vertical al pozo reduciendo la capacidad del pozo.
4. Esta captación puede ser instalada en alta mar, donde se encuentra el material aluvial más conveniente.	4. Los pozos radiales pueden extraer agua dulce subterránea de los acuíferos costeros pudiendo impactar en la cuenca de aguas subterráneas y potencialmente acelerar la intrusión salina.
5. Proveen mayor capacidad de agua que las captaciones con pozos verticales playeros, por lo que reduce la cantidad de pozos verticales requerida.	5. Dependiendo de la ubicación y la profundidad de la arena sobre la captación, tormentas podrían exponer los componentes del pozo, causando daño al sistema.

Tabla 24. Ventajas y desventajas del sistema de captación mediante pozos horizontales radiales (1)

Ventajas	Desventajas
6. Reduce en gran medida, o incluso elimina, la necesidad de pretratamiento antes del proceso de desalación.	6. Para grandes caudales los pozos radiales requieren de un gran diámetro del entubado central de hormigón, requiriendo de una cámara de bombas y válvulas de gran dimensión, generando un gran impacto visual. Se puede construir bajo arena, pero aumentarían considerablemente los costos.

Tabla 25. Ventajas y desventajas sistema de captación mediante pozos horizontales radiales (2).

4.2.7 Galerías de infiltración con cama filtrante

4.2.7.1 Descripción General

Este tipo de captación consiste en un lecho de filtración de arena sumergida ubicado en la parte inferior de la masa de agua superficial del mar. Se construye excavando el suelo sedimentario no consolidado (conformado por capas de arena, grava, cantos rodados y arcilla) o roca, para luego, instalar una serie de tuberías ranuradas conectadas a un manifold. Finalmente, se rellena con un medio poroso para formar un filtro artificial sobre las tuberías ranuradas. Las excavaciones deben realizarse lejos de la zona de surf y en áreas con suficiente profundidad de agua para proteger la integridad de la estructura. En algunas ocasiones puede ser necesario usar enrocados para proteger a la galería de la erosión.

Generalmente son implementadas cuando las captaciones de pozos no pueden ser utilizadas debido a condiciones hidrológicas desfavorables. Por ejemplo, son adecuados para captaciones donde la permeabilidad del suelo subterráneo es relativamente baja, o donde el espesor de los sedimentos de la playa es insuficiente para poder instalar una captación de pozo tradicional.

En la figura 33 se muestra un esquema de una galería de infiltración típica.

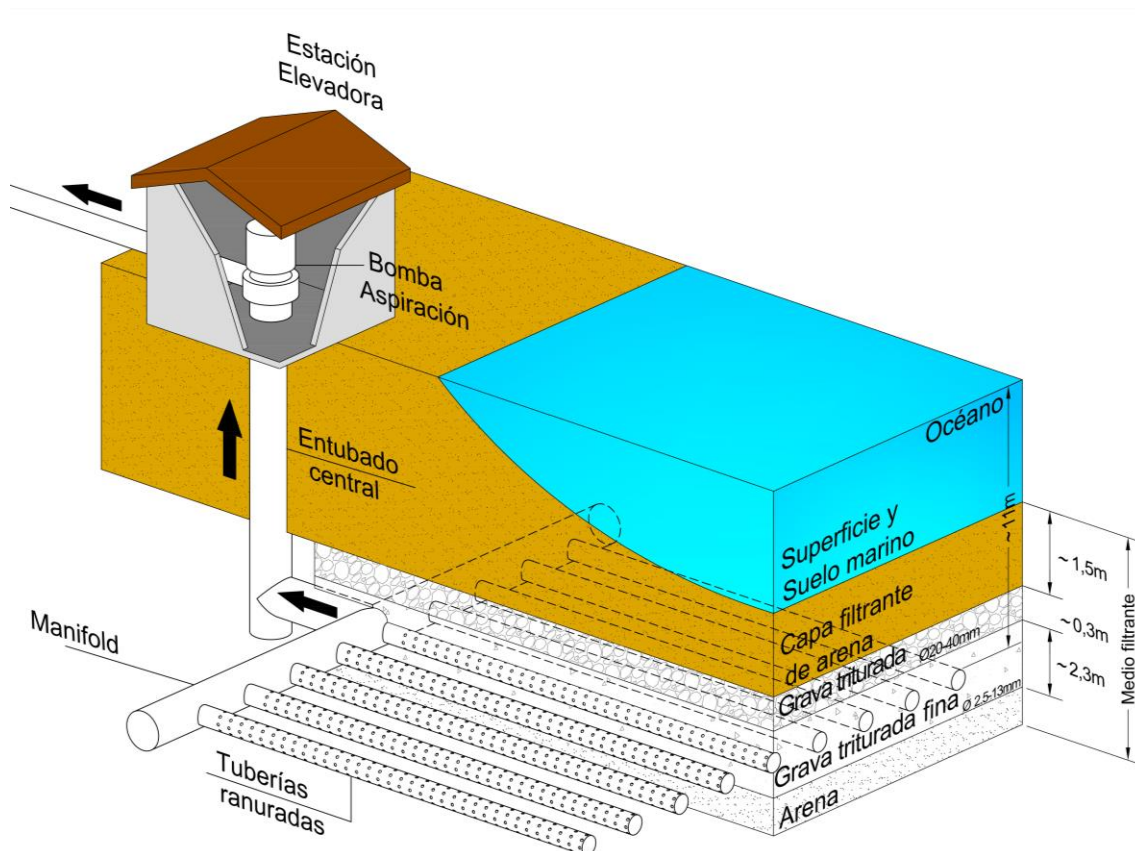


Figura 33. Esquema de captación mediante galerías de Infiltración (Elaboración propia).

Las galerías de infiltración pueden ser implementadas en el borde costero o bajo el lecho marino. Ambas alternativas producen un impacto ambiental mínimo durante la construcción inicial.

4.2.7.1.1 Descripción galería de infiltración en el lecho marino

Las galerías de infiltración en el lecho marino deben ser instaladas en lugares donde el fondo marino contenga arena limpia, desprovista de concentraciones significativas de barro. Es importante para su buen desempeño no instalar las galerías en lugares donde el fondo sea fangoso, como por ejemplo en la desembocadura de ríos, ya que estos podrían obstruir la parte superior de la galería. La presencia de corrientes es una condición favorable para el funcionamiento de este tipo de captación, ya que mantienen los sedimentos de grano fino en suspensión y mueven el sedimento alrededor del fondo, agitando de ese modo la parte superior del filtro ayudando a limpiarlo.

Las galerías de infiltración en el lecho marino pueden ser técnicamente complejas de construir, ya que, en alta mar el fondo marino está compuesto por sedimento no consolidado. Por lo tanto, la construcción requiere el uso de tablestacas, dragados y el bombeo temporal de agua para poder instalar las tuberías ranuradas y el medio filtrante.

4.2.7.1.2 Descripción galería de infiltración en el borde costero

Las galerías de infiltración en el borde costero pueden ser más convenientes que las galerías en el lecho marino, ya que pueden ser diseñadas y construidas para tener un sistema de auto-limpieza. La galería de infiltración se construye dentro de la zona intermareal de la playa, donde la energía mecánica de la rompiente de las olas es utilizada para limpiar continuamente la superficie del filtro (Missimer, T., 2013). Para el correcto funcionamiento de esta captación la línea costera debe tener una altura de ola significativa y un rango de marea razonable para permitir la función de auto-limpieza.

Las galerías de infiltración se pueden construir solo en playas de arenas o gravas que tengan suficiente espesor para proteger las tuberías ranuradas y eliminar el riesgo de daños durante las tormentas, ya que el espesor requerido para el medio filtrante es mayor que en el caso de las galerías construidas en el lecho marino. Los costos de construcción son menores en las galerías instaladas en el borde costero y además, tienen un impacto ambiental menor durante su construcción.

4.2.7.2 Capacidad

Las galerías de infiltración pueden suministrar grandes cantidades de agua, llegando a ser comparables con las capacidades de las captaciones abiertas. Actualmente, existen plantas con capacidades mayores a 250 [L/s] que utilizan galerías de infiltración. La planta desaladora más grande existente que utiliza este sistema de captación es Fukuoka, en Japón, con una capacidad de 580 [L/s]. La galería de infiltración está construida en el lecho marino, y utiliza un área de 20.000 [m²] aproximadamente (313,6 metros de largo y 64,2 metros de ancho), con una velocidad de infiltración de 0,25 [m³/h m²].

4.2.7.3 Componentes del sistema

4.2.7.3.1 Tuberías ranuradas

Las tuberías ranuradas tienen las mismas características que las de los pozos horizontales tradicionales.

4.2.7.3.2 Entubado central

Las tuberías ranuradas de captación se conectan a una estación elevadora mediante un entubado central que puede ser de hormigón armado o acero, de características similares a los de las demás captaciones cerradas.

4.2.7.3.3 Medio filtrante

El medio filtrante está compuesto por una capa de arena de aproximadamente 1.5 metros, una capa de grava triturada de tamaño de grano entre 20 y 40 milímetros de 30 centímetros de espesor y una capa de grava triturada de tamaño de grano entre 2.5 y 13 milímetros de hasta 2.3 metros de espesor. Al bombear en el sistema, el agua de mar se introduce en la excavación

y se filtra a través del medio granular que actúa como sistema de pretratamiento (las partículas grandes son eliminadas). La tasa de carga superficial del medio filtrante generalmente está en el rango de 0,48 [m³/h m²] a 0,72 [m³/h m²]

Los espacios entre los poros dentro de la capa filtrante se tapan con el tiempo, por lo que es necesario realizar mantenciones periódicas para eliminar las partículas y el crecimiento biológico, y restaurar de esta manera la porosidad. Para mantener un buen desempeño y rendimiento de la captación, se recomienda remover la arena superficial del medio filtrante, a una tasa de aproximadamente 2,5 centímetros cada 6 a 12 meses. Después de tres años, la arena erosionada debe ser reemplazada con arena nueva a la misma profundidad inicial.

4.2.7.4 Ventajas y desventajas de las galerías de infiltración

En la tabla 26 se resumen las ventajas y desventajas de este tipo de captación cerrada.

Ventajas	Desventajas
1. Captación de mayor capacidad con respecto a los otros tipos de captaciones cerradas.	1. Construcción (inversión inicial) muy costosa.
2. Pretratamiento integrado mediante capas granulares filtrantes. Reduce los sólidos en suspensión y las algas, por lo que no se requiere de un sistema de pretratamiento sofisticado.	2. Sedimentos finos pueden entrar a la galería de infiltración y tapan la galería. Se requiere mantenciones periódicas para conservar la eficiencia de la filtración.
3. Minimiza el crecimiento y adhesión de organismos marinos a las tuberías de la captación.	3. Sedimentos finos y limos pueden cubrir el suelo submarino y crear una capa que puede impedir que el agua fluya verticalmente hacia la galería de infiltración reduciendo la capacidad.
4. Como esta captación consiste en construir un filtro alrededor de una pantalla de tuberías ranuradas, puede ser aplicado en un amplio rango de entornos geológicos.	4. Captación vulnerable a la erosión y la acción del oleaje, que puede remover la arena de grano gruesa instalada en el medio filtrante y reemplazarla con arena de grano fino natural, alterando las propiedades hidráulicas del medio filtrante y disminuyendo su capacidad. Es necesario realizar una mantención periódica (de elevado costo) para mantener la capacidad hidráulica.

Tabla 26. Ventajas y desventajas sistema de captación mediante galerías de infiltración (1).

Ventajas	Desventajas
5. Protege pasivamente a la biota marina del arrastre por succión y colisión.	5. Construcción típicamente destructiva, por lo que tiene un mayor impacto ambiental inicial.

Tabla 27. Ventajas y desventajas sistema de captación mediante galerías de infiltración (2).

4.2.8 Recomendaciones generales para el diseño de captaciones cerradas

El diseño de una obra de captación cerrada debe considerar un estudio hidrogeológico que contemple los siguientes pasos que permiten establecer la capacidad de la obra y la calidad del agua captada.

1. Elaboración de mecánica de suelos para obtener la granulometría del pozo.
2. Perfil geológico para obtener muestras del depósito de la formación del acuífero. Prueba de bombeo inicial para los análisis de: gasto variable, gasto constante y recuperación del pozo. La prueba debe durar como mínimo 72 horas.
3. Instalar uno o más pozos de observación para monitorear y detectar cambios potenciales del flujo y la calidad del agua subterránea.
4. Recolectar muestras suficientes de agua para el análisis de la calidad de agua, con énfasis en los contenidos de hierro, magnesio, sílice, dióxido de carbono, arsénico y sulfuro de hidrógeno. La calidad y cantidad de los componentes varía por estación del año, por lo que se deben tomar muestras estacionales.

4.3 Ejemplos de sistemas de captación de agua de mar utilizados en la actualidad

En los últimos años la captación de agua de mar como alternativa de solución a la escasez de recursos hídricos dulces ha aumentado significativamente alrededor del mundo. En la siguiente tabla se encuentran algunas de las plantas desaladoras existentes en el mundo, su capacidad y el tipo de captación utilizado.

Propietario	Ubicación	Tipo de Captación	Capacidad
Parque Golden Gate State	San Francisco, California, USA	Pozos radiales	380 m ³ /d (4,4 L/s)
Isla Santa Catalina	California, USA	Pozos playeros verticales	570 m ³ /d (6,6 L/s)

Tabla 28. Plantas de captaciones existentes en el mundo (Mackey. E et al, 2011) (1).

Propietario	Ubicación	Tipo de Captación	Capacidad
Distrito Municipal de agua Marin	Corte Madera, California, USA	Captación elevada de agua de mar con pantalla de captación rotatoria	760 m ³ /d (8,8 L/s)
Sand City	Sand City, California, USA	Pozos playeros verticales	980 m ³ /d (11,3 L/s)
Hotel Hyatt	Grand Cayman Island	Pozos playeros verticales	1.900 m ³ /d (22 L/s)
Distrito de Agua Municipal de Orange County	Dana Point, California, Usa	Pozos inclinados	1.900 m ³ /d (22 L/s)
Blue Hills	Nassau, Bahamas	Pozos playeros verticales	2.300 m ³ /d (22,6 L/s)
Planta de energía Diablo Canyon	Avila Beach, California, USA	Captación abierta	2.600 m ³ /d (30 L/s)
Marina Coast Water District	Marina, California, USA	Pozos playeros verticales	2.650 m ³ /d (30,7 L/s)
Emiratos Arabes Unidos	Emiratos Arabes Unidos	Captación abierta elevada	3.800 m ³ /d (44 L/s)
Bahía Morro	Bahía Morro, California, USA	Pozos playeros verticales	5.300 m ³ /d (63,4 L/s)
Antigua	Antigua	Captación abierta sumergida	9.500 m ³ /d (110 L/s)
N.V Energie en Watervoorziening Rijnland	Leiden, Netherlands	Pozos radiales	9.800 m ³ /d (113,4 L/s)
Base Naval U.S	Bahía Guantanamo, Cuba	Captación abierta con pantalla de captación rotatoria	19.000 m ³ /d (220 L/s)
Ghar Lapsi	Malta	Pozos playeros verticales	24.000 m ³ /d (278 L/s)
Veolia	Kindasa, Arabia Saudita	Captación abierta	26.500 m ³ /d (306,7 L/s)
Bahía Palma	Mallorca, España	Pozos playeros verticales	42.000 m ³ /d (486,1 L/s)
Refinería Pemex	Salina Cruz, México	Pozos radiales	45.500 m ³ /d (526,6 L/s)
Fukuoka District Waterworks Agency	Fukuoka, Japón	Galería de infiltración en el lecho marino	50.000 m ³ /d (578,8 L/s)

Tabla 29. Plantas de captaciones existentes en el mundo (Mackey. E et al, 2011) (2).

Propietario	Ubicación	Tipo de Captación	Capacidad
Pembroke	Malta	Pozos playeros verticales	45.000 m ³ /d (625 L/s)
Veolia	Sur, Oman	Captación abierta y pozos playeros verticales	79.500 m ³ /d (920,1 L/s)
Aqualectra Production	Santa Barbara, Curacao	Galería permeable	83.000 m ³ /d (860,4 L/s)
Tampa Bay Water	Tampa, Florida, USA	Captación abierta elevada	95.000 m ³ /d (1.099,5 L/s)
Desalcott	Point Lisas, Trinidad y Tobago	Captación abierta con cajón de succión	109.000 m ³ /d (1.261,6 L/s)
San Pedro del Pinatar	Cartagena, España	Pozos Horizontales	132.000 m ³ /d (1.527,8 L/s)
Junta de Servicios Públicos	Tuas, Singapore	Captación abierta	136.000 m ³ /d (1.574,1 L/s)
Sydney Water	Kurnell, Australia	Captación abierta sumergida con pantalla pasiva cíclica	250.000 m ³ /d (2.893,5 L/s)
Veolia	Ashkelon, Israel	Captaciones abiertas con múltiples cámaras de succión	840.000 m ³ /d (9.722,2 L/s)

Tabla 30. Plantas de captaciones existentes en el mundo (Mackey. E et al, 2011) (3).

5 PROPUESTA DE MÉTODO DE EVALUACIÓN PARA LA PLANIFICACIÓN DE UN SISTEMA DE CAPTACIÓN DE AGUA DE MAR

Como metodología de evaluación se propone dividir el análisis en dos etapas: En primer lugar, evaluar las potenciales ubicaciones para el sistema de captación y, en segundo lugar, determinar el tipo de obra de captación más adecuado para las condiciones particulares del sector elegido. En ambas evaluaciones se propone utilizar un análisis multi-criterio.

5.1 Evaluación de alternativas para el emplazamiento del sistema de captación de agua de mar

5.1.1 Criterios de evaluación

Considerando la información reunida en los capítulos previos y algunos aspectos operacionales adicionales, se proponen los siguientes ítems como criterios de evaluación.

Ref.	Ítem
3.1	Propiedades de la columna de agua
3.2	Condiciones hidrodinámicas
3.2.1	Corrientes
3.2.2	Mareas
3.2.3	Oleaje
3.3	Borde costero
3.3.1	Geomorfología del borde costero
3.3.2	Características generales de las playas
3.3.3	Vulnerabilidad frente a Tsunamis
3.4	Biota marina
	Aspectos operacionales
	Impacto al turismo
	Actividad pesquera y/o portuaria
	Accesibilidad
	Conectividad a la red de conducción

Tabla 31. Criterios de evaluación para análisis multicriterio de alternativas de emplazamiento de la captación de agua de mar.

Se propone evaluar cada criterio en una escala de 1 a 5, donde 1 es muy desfavorable y 5 muy favorable. A continuación, se describe las características que son consideradas deseables y/o indeseables en cada caso.

5.1.1.1 Propiedades de la columna de agua

En general, la evaluación de las propiedades de la columna de agua dependerá del uso que se le quiera dar al agua captada. En el caso que se proyecte una planta desaladora, Voutchkov, N. (2013) recomienda los rangos de valores mostrados en la tabla 32.

Parámetro	Valor de diseño mínimo	Valor de diseño máximo	Valor de diseño promedio
Salinidad [mg/L]	32.500	34.500	33.500
Temperatura °C	10	26	18

Tabla 32. Rangos de diseño de las propiedades de la columna de agua para captaciones que abastecen una planta desaladora. (Voutchkov N., 2013)

5.1.1.2 Corrientes

La presencia de corrientes moderadas (entre 10 y 30 [cm/s]) es una característica favorable para el funcionamiento de algunos tipos de captación y para la dilución de la pluma de descarga en los casos en que se proyecta además una planta desaladora. Sin embargo, corrientes con velocidades demasiado altas pueden encarecer el diseño estructural de la captación.

5.1.1.3 Mareas

Es deseable que la amplitud de mareas sea lo más baja posible. Variaciones importantes en el nivel del mar pueden afectar el funcionamiento de algunos tipos de captación o encarecer el costo de la obra.

5.1.1.4 Oleaje

En general, es deseable que en el área exista un oleaje poco energético y con baja altura significativa. El tipo de oleaje más adecuado para la instalación de una captación de agua de mar es el oleaje tipo surging (onduladas).

5.1.1.5 Geomorfología del borde costero

Deben evitarse geomorfologías accidentadas como acantilados, plataformas de abrasión, cañones submarinos, etc. En general, deben preferirse las playas de arena que suelen formarse en las bahías de bolsillo, protegidas del viento y el oleaje.

5.1.1.6 Características generales de las playas

En cuanto a la distribución del sedimento, deben preferirse playas que presenten depósitos profundos de arenas o gravas permeables. Puede obtenerse una idea de la profundidad del depósito evaluando la existencia de afloramientos de roca en las cercanías de la playa.

Desde el punto de vista morfodinámico, deben preferirse playas reflectivas, que suelen estar ubicadas en sectores protegidos del oleaje directo.

5.1.1.7 Vulnerabilidad frente a tsunamis

Las obras de captación de agua de mar se ubican en la playa o anteplaya, por lo que es prácticamente imposible seleccionar una ubicación en una zona no inundable. Sin embargo, debe intentarse proyectar la plata elevadora y/o desaladora fuera de área en riesgo de inundación por tsunami.

5.1.1.8 Biota marina

Sectores con gran cantidad de organismos bentónicos, que suelen adherirse a sustratos duros como las tuberías, son considerados desfavorables. Sin embargo, debe tenerse en cuenta en la evaluación que siempre pueden tomarse medidas para proteger a la biota marina, por lo que en general, la mayor restricción es evitar zonas protegidas.

5.1.1.9 Impacto al turismo

En general, deben evitarse playas con alta afluencia de público o sectores de interés turístico. Esta condición muchas veces es difícil de cumplir, por lo que debe considerarse en la evaluación que es posible construir gran parte de las instalaciones enterradas o sumergidas.

5.1.1.10 Actividad pesquera y/o portuaria.

En general, deben evitarse caletas de pescadores o sectores con actividad portuaria y movimiento de barcos. Al igual que en el caso del impacto al turismo, debe considerarse en la evaluación que es posible construir gran parte de las instalaciones enterradas o sumergidas.

5.1.1.11 Accesibilidad

Es importante también considerar la accesibilidad terrestre al sector que se está estudiando. Si es necesario construir caminos o pagar servidumbres de paso, el costo total del proyecto puede aumentar significativamente.

5.1.1.12 Conectividad a la red de conducción

Finalmente, es necesario considerar la conectividad a la red de conducción existente. De ser necesario construir largas líneas adicionales, el costo total del proyecto puede aumentar significativamente.

5.1.2 Valoración relativa de las variables

Como se vio en el apartado previo, son múltiples los factores que se deben considerar en la selección del emplazamiento de una captación de agua de mar, sin embargo, es necesario tener en cuenta que, en la gran mayoría de los casos, no existirá una ubicación que cumpla con

todas las condicionantes. Por esta razón, es importante definir una escala que permita comparar la relevancia de cada uno de los criterios de evaluación.

Para determinar la importancia relativa de cada ítem, se realizó una jerarquización de las variables, mostrada en la tabla 33. Para la elaboración del cuadro, se consideró la siguiente escala:

1 si la variable de la fila es menos importante que la variable de la columna

3 si la variable de la fila es de igual importancia que la variable de la columna

5 si la variable de la fila es más importante que la variable de la columna

Para determinar la importancia relativa de las variables se consideró su efecto sobre tres criterios; en orden descendente de importancia: factibilidad, costo inicial, y operación o mantención. Se asignó la mayor importancia a factibilidad, ya que corresponde a variables que pueden volver inviable el proyecto. Por otro lado, se consideró que la operación o mantención de la obra es menos relevante que el costo inicial, ya que los costos acumulados de operación y mantención durante la vida útil de la obra no deberían ser superiores a la inversión inicial. Es decir, una variable que afecte el costo inicial de la obra es más importante que una variable que afecte la operación o mantención, pero menos importante que una que afecte la factibilidad del proyecto. Finalmente, ponderando las notas asignadas a cada criterio por su importancia relativa, es posible obtener el puntaje total de cada alternativa de emplazamiento.

Los resultados de la jerarquización de variables, presentados en la Tabla 33, muestran que los factores más relevantes en la selección del emplazamiento son la geomorfología del borde costero y las características de las playas. Esto es consistente con los criterios adoptados, ya que estas variables tienen una fuerte influencia en la factibilidad de la instalación de un sistema de captación de agua de mar. Por otro lado, los factores menos relevantes están asociados con la operación y mantención de la obra. Finalmente, variables que afectan mayoritariamente la inversión inicial, como la conectividad al sistema de agua potable existente, obtuvieron puntajes intermedios.

Finalmente, en el proceso de evaluación, una nota de 1 a 5 es asignada a cada variable y ponderada por su importancia relativa. La alternativa que obtiene el puntaje ponderado más alto corresponde a la solución óptima de acuerdo con los criterios definidos.

Grupo de selección	Propiedades de la Columna de agua	Corrientes	Mareas	Oleaje	Geomorfología del Borde Costero	Características de las Playas	Vulnerabilidad frente a Tsunamis	Biota Marina	Impacto al Turismo	Impacto a la Actividad Pesquera y/o Portuaria	Accesibilidad	Conectividad al Sistema de AP existente	Importancia Relativa del Grupo [%]	
Propiedades de la Columna de agua		1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	3.3
Corrientes	5		5	1	1	1	3	1	1	1	3	3	25	6.4
Mareas	3	1		1	1	1	1	1	1	1	1	1	13	3.3
Oleaje	5	5	5		1	3	3	3	1	1	3	1	31	7.9
Geomorfología del Borde Costero	5	5	5	5		3	5	5	5	5	5	5	53	13.5
Características de las Playas	5	5	5	5	3		5	5	5	5	5	5	53	13.5
Vulnerabilidad frente a Tsunamis	5	3	5	3	1	1		3	3	3	3	3	33	8.4
Biota Marina	5	5	5	3	1	1	3		1	1	3	1	29	7.4
Impacto al Turismo	5	5	5	5	1	1	5	3		3	3	3	39	9.9
Impacto a la Actividad Pesquera y/o Portuaria	5	5	5	5	1	1	5	3	3		3	3	39	9.9
Accesibilidad	5	3	5	3	1	1	3	3	3	3		1	31	7.9
Conectividad al Sistema de AP existente	5	3	5	3	1	1	3	3	3	3	3		33	8.4
													392	100.0

Tabla 33. Valoración relativa de las variables para la selección del emplazamiento del sistema de captación de agua de mar.

5.2 Selección del tipo de obra de captación de agua de mar

Considerando los aspectos relevantes definidos en el capítulo 3, las características generales, capacidades, ventajas y desventajas de cada tipo de captación, y la experiencia de su uso en diferentes instalaciones alrededor del mundo, se propone la siguiente pauta de evaluación para ser utilizada en análisis multicriterio que permitan pre seleccionar, en la etapa de diseño conceptual, la alternativa más adecuada para un sitio en particular.

5.2.1 Criterios de evaluación

En la tabla 34 se detallan los criterios de evaluación propuestos para la selección del tipo de captación de agua de mar más adecuado para la ubicación previamente seleccionada.

Ref.	Ítem
3.2	Condiciones Hidrodinámicas
3.2.1	Corrientes
3.2.2	Mareas
3.2.3	Oleaje
3.3	Borde Costero
3.3.1	Geomorfología del borde costero
3.3.2	Características generales de las playas
3.3.2.1	Distribución del sedimento
3.3.2.3	Perfil morfodinámico de la playa
3.3.3	Vulnerabilidad frente a Tsunamis
3.4	Interacción con la Biota Marina
4	Características del tipo de captación
	Uso del Agua
	Caudal requerido
	Impacto a la actividad pesquera
	Impacto durante la construcción
	Impacto visual permanente
	Cotos Estimados

Tabla 34. Criterios de evaluación para análisis multicriterio de alternativas de captación de agua de mar.

Se propone evaluar cada criterio en una escala de 1 a 5, donde 1 es muy desfavorable y 5 muy favorable. En los casos en que el criterio analizado no tenga ninguna influencia, se asignará nota 5.

Cada criterio debe ser evaluado según las características particulares de cada tipo de captación, descritas en el capítulo 4. Sin embargo, a continuación se entregan recomendaciones de carácter general para los factores más relevantes.

5.2.1.1 Condiciones hidrodinámicas

Las condiciones hidrodinámicas son influyentes principalmente en las captaciones abiertas, sin embargo, también son relevantes en las captaciones cerradas del tipo galerías de infiltración bajo el lecho marino. Considerando las características y requisitos de funcionamiento de estos tipos de captación, en la siguiente tabla se presentan diferentes características hidrodinámicas y su calificación (adecuada o no adecuada) para su implementación. Se incluye un ejemplo visual o esquema de referencia con el objetivo de facilitar el reconocimiento de la característica durante una inspección de terreno.

5.2.1.1.1 Corrientes

Característica hidrodinámica	Condición	Ejemplo visual o esquemático
a. Zona de corriente de resaca.	No adecuada	
b. Zona de corriente de deriva costera	Adecuada	
c. Corrientes submarinas fuertes	No adecuada	

Tabla 35. Corrientes adecuadas y no adecuadas para la implementación de captaciones abiertas y galerías de infiltración en el lecho marino.

5.2.1.1.2 Oleaje

Característica hidrodinámica	Condición	Ejemplo visual o esquemático
a. Olas de gran altura significativa.	No Adecuada	
b. Olas de vuelco (plunging)	No adecuada	
c. Olas de derrame (spilling)	No adecuada	
d. Olas onduladas (surging)	Adecuada	

Tabla 36. Oleaje adecuado y no adecuado para la implementación de captaciones abiertas y galerías de infiltración en el lecho marino.

5.2.1.1.3 Mareas

Es deseable que las mareas tengan la menor amplitud posible. Una variación importante en el nivel del mar implica que la captación abierta o galería de infiltración bajo el lecho marino debe proyectarse a una mayor profundidad y distancia de la costa para cumplir con las condiciones de operación, aumentando sus costos.

En general, las mareas no tienen gran influencia en las captaciones cerradas.

5.2.1.2 Borde costero y características generales de las playas

En general, las características del borde costero y las playas que se deben considerar para evaluar la factibilidad de instalar una captación abierta o una captación cerrada son diferentes en cada caso. Por esta razón se analizan de forma separada.

5.2.1.2.1 Condiciones favorables del borde costero y playas para captaciones cerradas

Si bien para determinar la transmisividad del acuífero costero es necesario realizar un estudio hidrogeológico, existen ciertas características visuales que indican que el suelo tiene buena permeabilidad. En la siguiente tabla se resumen diferentes tipos de playas donde, en primera instancia, sería factible la instalación de algún tipo de captación cerrada.

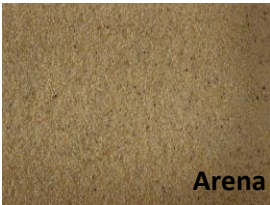
Características sedimentos	Condición geológica	Ejemplo visual
a. Playas con existencia de roca permeable adyantes a la playa en estudio.		
b. Playas con depósitos de arena permeables, gravas o una combinación de estas. En general playas estables.	 	

Tabla 37. Tipos de sedimentos de las playas adecuadas para la implementación de captaciones cerradas.

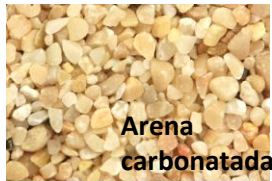
Características sedimentos	Condición geológica	Ejemplo visual
c. Playas que contengan caliza y dolomita.	 Caliza  Dolomita	
d. Playas que contengan cuarzo o arenas carbonatadas y con un bajo porcentaje de barro.	 Cuarzo  Arena carbonatada	

Tabla 38. Tipos de sedimentos de las playas adecuadas para la implementación de captaciones cerradas (2).

Además de la permeabilidad, interesa conocer la profundidad del depósito de sedimento para estimar la dimensión y cantidad de pozos que se necesitarán. Puede obtenerse una idea de la profundidad del depósito evaluando la existencia de afloramientos de roca en las cercanías de la playa.

Las captaciones cerradas del tipo galerías de infiltración bajo el lecho marino, además requieren de otras condiciones para su implementación. En la siguiente tabla se especifica qué tipo de playa es adecuada en primera instancia.

Tipo de playa	Condición	Ejemplo visual
a. Playas disipativas	No Adecuada	
b. Playas reflectivas	Adecuada	

Tabla 39. Tipos de playas para implementación de galerías de infiltración.

5.2.1.2.2 Condiciones favorables del borde costero y playas para captaciones abiertas

En general las captaciones abiertas no tienen limitación de implementación en ningún tipo de playa, excepto en las playas erosionadas. Sin embargo, es importante analizar cuidadosamente el fondo marino. En la siguiente tabla se encuentran ejemplos donde no es adecuado implementar captaciones abiertas.

Rasgo Topográfico	Ejemplo visual o esquemático
a. Fondos marinos con cañones submarinos. Rasgo se puede visualizar con Google Earth. (Cañón submarino del Bio Bio)	

Tabla 40. Tipos de fondos marinos que no son adecuados para la implementación de captaciones abiertas (1).

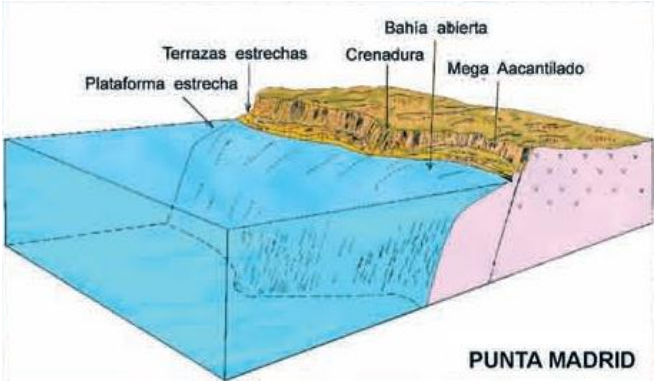
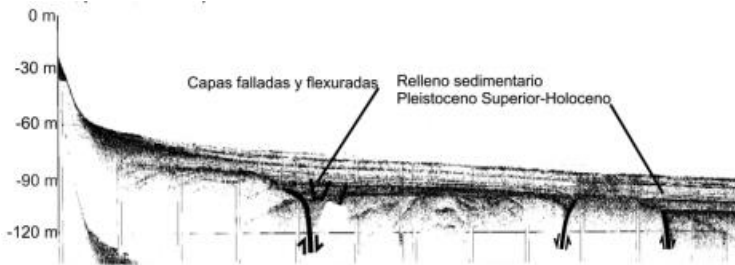
Rasgo Topográfico	Ejemplo visual o esquemático
b. Fondos marinos que presenten erosiones activas.	
c. Fondos marinos que presenten una plataforma continental angosta y con inclinación pronunciada.	
d. Fondos marinos que presenten a su alrededor fallas sísmicas.	
e. Fondos marinos con pasto y materiales fibrosos. Este rasgo no es fácil de percibir, se requiere de un buzo.	

Tabla 41. Tipos de fondos marinos que no son adecuados para la implementación de captaciones abiertas (2).

5.2.1.3 Vulnerabilidad frente a tsunamis

En general, las captaciones cerradas no son susceptibles a sufrir daños por tsunamis, a excepción de las galerías de infiltración, donde el paso de las olas y el arrastre de sedimentos y basura pueden dañar el lecho filtrante.

En el caso de las captaciones abiertas, las instalaciones se encuentran mucho más expuestas al impacto de las olas, por lo que son más susceptibles a sufrir daños. Dentro de las captaciones abiertas, las captaciones sumergidas son las menos vulnerables, mientras que las captaciones abiertas y directas son las más expuestas.

5.2.1.4 Interacción con la biota marina

Las captaciones cerradas no tienen una interacción directa ni un impacto sobre la biota marina del sector, ya que el agua se extrae mediante pozos excavados en la orilla.

En el caso de las captaciones abiertas, es necesario tomar medidas de protección para evitar el arrastre de organismos o la obstrucción de las tuberías, las que se describen en el capítulo 4.

5.2.1.5 Características del tipo de captación

5.2.1.5.1 Uso del agua

Dependiendo del uso que se le quiera dar al agua captada, será necesario realizar diferentes procesos de pre tratamiento o desalación. Como se vio en apartados previos, las captaciones cerradas entregan agua prefiltrada, ya que el medio permeable actúa como filtro para sólidos y organismos marinos, por lo que en general son más adecuadas para los usos en que se requerirá realizar procesos de desalación (Agua potable, industria, riego, etc.). Por otro lado, en aplicaciones como la minería o las termoeléctricas suelen requerirse grandes caudales, por lo que en general suelen utilizarse captaciones abiertas.

Considerando la información previa, y la experiencia en el uso de captaciones de agua de mar alrededor del mundo, se propone la siguiente recomendación:

Uso del agua captada requerido	Tipo de Captación recomendado	
Agua Potable	1. Norias. 2. Pozos verticales playeros. 3. Pozos radiales. 4. Galería de infiltración.	5. Pozos horizontales. 6. Pozos inclinados. 7. Pozos inclinados con PHD.
Industriales	1. Batería de pozos verticales. 2. Captación abierta sumergida. 3. Captación abierta elevada. 4. Batería de pozos radiales.	5. Captación abierta directa. 6. Batería de pozos inclinados. 7. Batería de pozos inclinados con PHD.

Tabla 42. Recomendación tipo captación por uso requerido (1).

Uso del agua captada requerido	Tipo de Captación recomendado	
Minería	1. Batería de pozos verticales. 2. Captación abierta sumergida. 3. Captación abierta elevada. 4. Batería de pozos radiales.	5. Captación abierta directa. 6. Batería de pozos inclinados. 7. Batería de pozos inclinados con PHD.
Termoeléctricas	1. Captación abierta sumergida. 2. Captación abierta elevada.	3. Captación abierta directa.
Riego	1. Batería de pozos verticales. 2. Batería de pozos horizontales. 3. Pozos radiales.	4. Pozos inclinados. 5. Pozos inclinados con PHD. 6. Galería de infiltración.
Ganadería	1. Norias. 2. Pozos verticales playeros. 3. Pozos radiales.	4. Pozos horizontales. 5. Captación abierta directa.
Acuicultura	1. Pozos verticales Playeros. 2. Pozos horizontales. 3. Pozos radiales. 4. Captación abierta sumergida.	5. Galería de infiltración. 6. Pozos inclinados. 7. Pozos inclinados con PHD.
Recreación	1. Norias. 2. Pozos verticales playeros. 3. Captación abierta directa.	4. Pozos horizontales. 5. Pozos radiales.

Tabla 43. Recomendación tipo captación por uso requerido (2).

5.2.1.5.2 Capacidad requerida

Considerando las capacidades descritas previamente para cada tipo de captación, se propone la siguiente recomendación:

Capacidad de agua requerida	Tipo de Captación recomendado	
$Q < 30 \text{ [L/s]}$	1. Norias playeras.	2. Pozos verticales playeros.
$30 \text{ [L/s]} < Q < 100 \text{ [L/s]}$	1. Pozos verticales playeros.	2. Pozo horizontal.
$100 \text{ [L/s]} < Q < 150 \text{ [L/s]}$	1. Batería de pozos verticales playeros. 2. Pozo horizontal. 3. Pozo inclinado.	4. Pozo inclinado con PHD. 5. Pozo radial.

Tabla 44. Recomendación tipo de captación por capacidad requerida (1).

Capacidad de agua requerida	Tipo de Captación recomendado	
150 [L/s] < Q < 200 [L/s]	1. Batería pozos verticales playeros. 2. Pozo horizontal. 3. Pozo inclinado.	4. Pozo inclinado con PHD. 5. Pozo radial. 6. Captación abierta directa.
200 [L/s] < Q < 500 [L/s]	1. Batería pozos verticales playeros. 2. Batería Pozos horizontales. 3. Batería Pozos inclinados. 4. Pozo inclinado con PHD.	5. Batería Pozos radiales. 6. Galería de Infiltración. 7. Captación abierta directa.
500 [L/s] < Q < 1000 [L/s]	1. Galería de Infiltración. 2. Batería pozos inclinados. 3. Batería pozos inclinados con PHD.	4. Captación abierta sumergida. 5. Captación abierta elevada. 6. Captación abierta directa.
Q > 1000 [L/s]	1. Captación abierta sumergida. 2. Captación abierta elevada.	3. Captación abierta directa.

Tabla 45. Recomendación tipo de captación por capacidad requerida (2).

5.2.2 Valoración relativa de las variables

Al igual que en el caso de la selección del emplazamiento, son múltiples los factores que se deben considerar en la selección del tipo de captación de agua de mar más adecuado. Sin embargo, es necesario tener en cuenta que, en la gran mayoría de los casos, no existirá una captación que cumpla con todas las condicionantes. Por esta razón, es importante definir una escala que permita comparar la relevancia de cada uno de los criterios de evaluación.

Para determinar la importancia relativa de cada ítem, se realizó una jerarquización de las variables, mostrada en la tabla 46. Para la elaboración del cuadro, se consideró la siguiente escala:

1 si la variable de la fila es menos importante que la variable de la columna

3 si la variable de la fila es de igual importancia que la variable de la columna

5 si la variable de la fila es más importante que la variable de la columna

Al igual que en la sección anterior, se consideraron tres criterios para determinar la importancia relativa de las variables; en orden descendente de importancia: factibilidad, costo inicial, y operación o mantención. Sin embargo, en este caso se evalúa el efecto de las características particulares del emplazamiento previamente seleccionado sobre los diferentes tipos de captación. Nuevamente se asignó la mayor importancia a factibilidad, ya que corresponde a variables que pueden volver inviable el proyecto. Por otro lado, se consideró que la operación o mantención de la obra es menos relevante que el costo inicial, ya que los costos acumulados de operación y mantención durante la vida útil de la obra no deberían ser superiores a la inversión inicial. Es decir, una variable que afecte el costo inicial de la obra es más importante que una variable que afecte la operación o mantención, pero menos importante que una que afecte la factibilidad del proyecto. Finalmente, ponderando las notas asignadas a cada criterio por su importancia relativa, es posible obtener el puntaje total de cada alternativa de emplazamiento.

Los resultados de la jerarquización de variables, presentados en la Tabla 46, muestran que los factores más relevantes en la selección del tipo de captación para una ubicación previamente determinada son la geomorfología del borde costero y el caudal requerido. Nuevamente, esto es consistente con los criterios adoptados, ya que estas variables tienen una fuerte influencia en la factibilidad de la instalación de un sistema de captación de agua de mar. Por otro lado, el uso del agua, que se asocia a la operación de la obra, obtuvo uno de los puntajes más bajos. El factor menos relevante es el impacto durante la construcción, ya que es considerado un efecto de corto plazo, que afectara levemente el costo inicial del proyecto debido a las medidas de mitigación durante las obras. Finalmente, el costo estimado obtuvo un puntaje intermedio.

Finalmente, en el proceso de evaluación, una nota de 1 a 5 es asignada a cada variable y ponderada por su importancia relativa. La alternativa que obtiene el puntaje ponderado más alto corresponde a la solución óptima de acuerdo con los criterios definidos.

Grupo de Selección	Corrientes	Mareas	Oleaje	Geomorfología Costera	Distribución del Sedimento	Perfil morfodinámico de la playa	Vulnerabilidad frente a Tsunamis	Interacción con la biota marina	Uso del Agua	Caudal requerido	Impacto a la actividad pesquera y/o portuaria	Impacto durante la Construcción	Impacto visual permanente	Costo Estimado	Importancia Relativa del Grupo [%]	
Corrientes		5	3	1	1	1	3	3	3	1	1	5	1	1	29	5.4
Mareas	1		1	1	1	1	3	3	3	1	1	3	1	1	21	3.9
Oleaje	3	5		1	1	1	3	3	3	1	1	5	3	1	31	5.7
Geomorfología Costera	5	5	5		3	3	3	5	5	3	5	5	5	5	57	10.5
Distribución del Sedimento	5	5	5	3		3	5	5	5	5	3	5	3	3	55	10.1
Perfil morfodinámico de la playa	5	5	5	3	3		5	5	5	3	3	5	3	5	55	10.1
Vulnerabilidad frente a Tsunamis	3	3	3	3	1	1		3	3	1	1	5	1	1	29	5.4
Interacción con la biota marina	3	3	3	1	1	1	3		3	1	1	5	1	1	27	5.0
Uso del agua	3	3	3	1	1	1	3	3		1	1	5	1	1	27	5.0
Caudal requerido	5	5	5	3	1	3	5	5	5		5	5	3	3	53	9.8
Impacto a la actividad pesquera y/o portuaria	5	5	5	1	3	3	5	5	5	1		5	1	1	45	8.3
Impacto durante la Construcción	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1		1	1	15	2.8
Impacto visual permanente	5	5	3	1	3	3	5	5	5	3	5	5		1	49	9.0
Costo Estimado	5	5	5	1	3	1	5	5	5	3	5	5	1		49	9.0
															542	100.0

Tabla 46. Valoración relativa de las variables para la selección del tipo de captación de agua de mar.

6 EJEMPLO DE APLICACIÓN: ABASTECIMIENTO DE AGUA POTABLE DE LAS LOCALIDADES DE PAPUDO Y LA LIGUA

6.1 Definición del problema

En los últimos años, el déficit de oferta de agua dulce en las zonas Centro y Norte de Chile ha comenzado a generar problemas con el abastecimiento de agua potable en algunas ciudades. Una de las localidades más afectadas por el problema de las sequías, ha sido la ciudad de La Ligua. Como caso de estudio, para ejemplificar el procedimiento propuesto en este trabajo, se plantea analizar la factibilidad técnica de abastecer esta localidad con captaciones de agua de mar y desalinización.

Históricamente, La Ligua se abastecía mediante pozos excavados en la misma localidad, los que además abastecían a Papudo mediante una línea de conducción de aproximadamente 20 kilómetros. Sin embargo, tras el extenso periodo de sequía que afecta a la zona Central de Chile, fue necesario realizar obras para llevar agua desde Con-Con a Papudo y luego a La Ligua. Actualmente, La Ligua se abastece con agua potable que proviene del Estanque Papudo, el que se alimenta de la producción de agua potable de Concón, a aproximadamente 55 kilómetros de distancia. El agua es transportada desde el Estanque Papudo por una tubería de aproximadamente 20 kilómetros de largo, llegando al estanque de carga el Traro. Luego es conducida hasta el estanque El Rayado, mediante una reelevación de altura por la Booster El Rayado. En la figura 34 se muestra un esquema de la matriz de producción.



Figura 34. Matriz de producción entre Papudo y La Ligua (Google Earth).

La infraestructura existente, que permite inyectar agua potable directamente a la matriz de producción que une a Papudo y La Ligua, sugiere que la captación de agua de mar en Papudo podría considerarse como una solución viable al problema de abastecimiento de ambas localidades.

6.2 Estimación del caudal de extracción requerido

Para determinar el caudal que es necesario extraer mediante la captación de agua de mar, se requiere estimar el caudal de consumo de La Ligua y Papudo y las pérdidas en la matriz de producción y distribución. En la tabla 47 se resume la información relevante de estas localidades en el año 2016.

Localidad	Población hab	Dotación consumo L/hab/día	Pérdidas Producción	Pérdidas Distribución	Qmax h Distribución L/s
La Ligua	21.137	148,9	24,7%		95,0
Papudo	16.392	139,6	17%	20%	81,4
TOTAL					176,4

Tabla 47. Población, dotación de consumo y porcentaje de pérdidas en La Ligua y Papudo (Datos proporcionados por ESVAL).

Es importante considerar que la población, y por lo tanto, el consumo de agua potable, van aumentando año a año. En la tabla 48 se muestra la proyección de caudal a 10 años (hasta el año 2026) realizada por ESVAL.

Localidad	Población hab	Dotación consumo L/hab/día	Pérdidas Producción	Pérdidas Distribución	Qmax h Distribución L/s
La Ligua	24.166	158,4	24,7%		115,5
Papudo	21.520	262,4	17%	20%	108,4
TOTAL					223,9

Tabla 48. Proyección de la población, dotación de consumo y porcentaje de pérdidas en La Ligua y Papudo al año 2026 (Datos proporcionados por ESVAL).

En general, las plantas desaladoras tienen una eficiencia aproximada del 50%, es decir, del total de agua de mar captada, se produce un 50% de agua desalada y un 50% de salmuera (agua con alta concentración de sales). Por esta razón, es necesario captar el doble del caudal que se desea producir. Para el caso las localidades de Papudo y La Ligua, la proyección de la demanda al año 2026, considerando pérdidas en la conducción de producción y distribución, se estima en 224 [L/s], por lo que el caudal de extracción requerido, considerando un margen de seguridad, es de 500 [L/s].

6.3 Caracterización de los sectores en estudio

6.3.1 Definición de los sectores

Para determinar sectores en los que en primera instancia sería factible instalar una captación de agua de mar, es necesario considerar dos factores: la cercanía con las actuales instalaciones de la sanitaria concesionaria Esval S.A y; la existencia de espacio suficiente para la instalación

de una planta desaladora. De acuerdo a Voutchkov, N. (2013), el área requerida para instalar una planta desaladora se puede estimar a partir de la capacidad de captación según:

Capacidad de captación		Área típica requerida	
m ³ /día	L/s	m ²	Ha
1.000	11,6	800-1.600	0,08-0,16
5.000	57,9	2.500-3.200	0,25-0,32
10.000	115,7	4.500-6.100	0,45-0,61
20.000	231,5	10.100-14.200	1,01-1,42
40.000	463,0	18.200-24.300	1,82-2,43
100.000	1.157,4	26.300-34.400	2,63-3,44
200.000	2.314,8	36.400-48.600	3,64-4,86
300.000	3.472,2	58.700-83.000	5,87-8,30

Tabla 49. Emplazamiento típicamente requerido según capacidad de la planta de desalación (Voutchkov N., 2013).

De acuerdo a esto, para un caudal de captación de 500 [L/s] se necesitan aproximadamente 18.000 [m²].

Considerando estos criterios y las características geomorfológicas de la zona, se seleccionaron los tres sectores indicados en la figura 35.

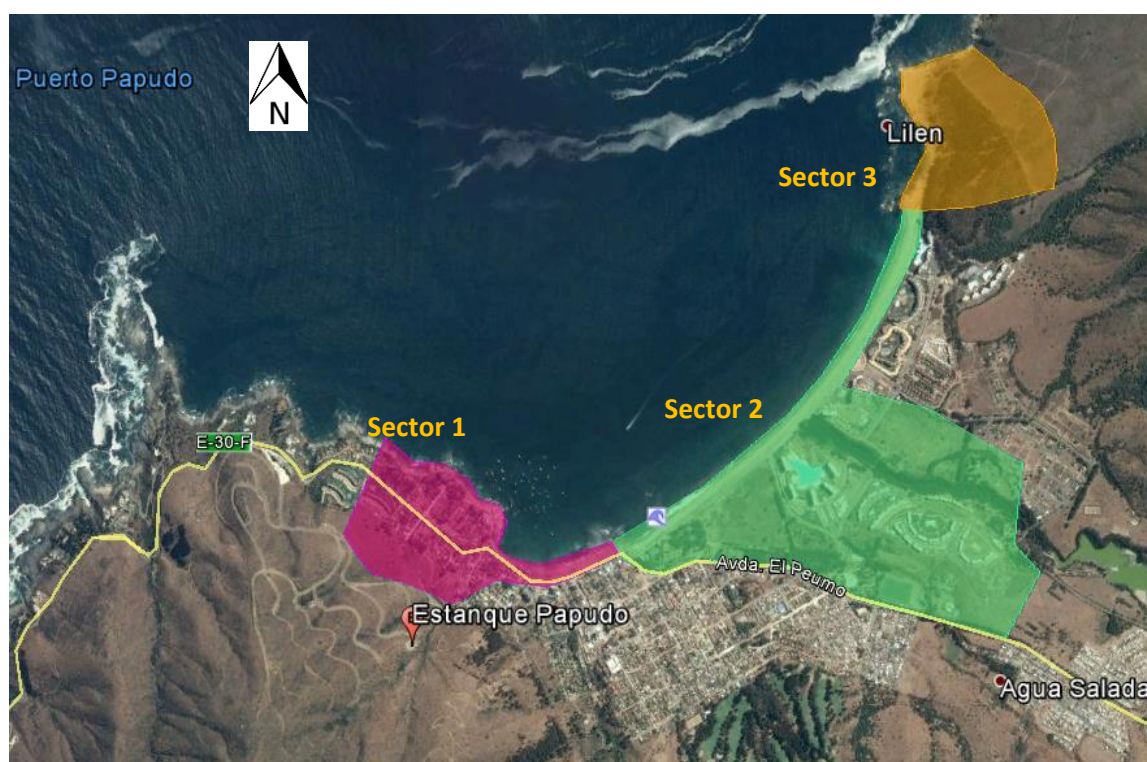


Figura 35. Esquema ubicación zonas de estudio.

6.3.2 Descripción general de los sectores

Durante el mes de septiembre se realizó una visita a terreno para levantar información de la zona. A continuación, se describen las características generales de cada sector.

6.3.2.1 Sector 1: Playa Papudo Sur

El Sector 1 se encuentra aledaño a la Avenida el Peumo, calle principal de Papudo, bordeando un paseo peatonal turístico. Corresponde a una playa poco extensa rodeada por dos afloramientos de roca. En el tramo central existe una caleta de pescadores artesanales.



Figura 36. Vista general del sector 1.

Al Oeste de la zona de pescadores, se observa una pequeña playa rodeada de afloramientos de roca. En caso de ser necesaria una sentina para captación abierta, podría instalarse aledaña a una cámara de inspección (C.I) de Esval ubicada a unos metros de la playa. En este mismo lugar existe una descarga de aguas servidas de emergencia que puede afectar la calidad del agua captada en algunas ocasiones.

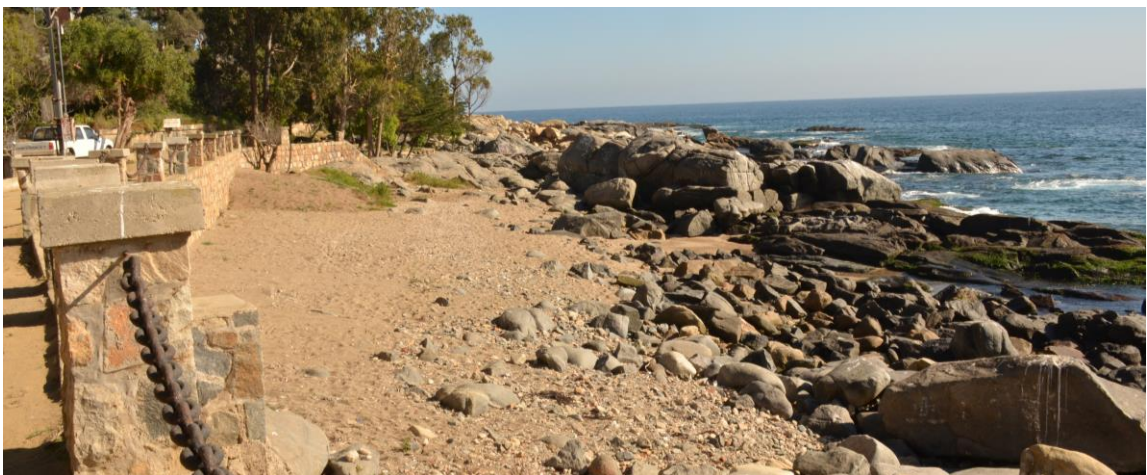


Figura 37. Vista general del extremo oeste del sector 1.



Figura 38. Vista terreno cercano a la orilla en la zona Oeste del sector 1.



Figura 39. Vista a descarga de agua servida de emergencia en sector 1.

6.3.2.2 Sector 2: Playa Papudo

Este sector comprende casi toda la playa Papudo, de casi 2 kilómetros de extensión. Comienza en el afloramiento de roca en el norte del Sector 1 y culmina con un denso afloramiento de roca correspondiente al inicio del sector 3 en la playa Lilén. La playa Papudo es un lugar altamente turístico, concentrando gran cantidad de visitas durante el verano.



Figura 40. Vista panorámica de la playa Papudo.

En los sectores aledaños a la playa, existen múltiples terrenos donde ubicar las instalaciones de la planta elevadora y la planta desaladora, sin embargo, se observa un importante desarrollo inmobiliario con gran cantidad de edificios de veraneo. Por otro lado, en medio de la extensión de la playa se encuentra la desembocadura del Estero Agua Salada.



Figura 41. Vista hacia el oriente de la desembocadura del Estero Agua Salada.



Figura 42. Vista hacia el nororiente de la desembocadura del Estero Agua Salada.

6.3.2.3 Sector 3: Playa Lilén

En el inicio del sector 3, inmediatamente al norte del desarrollo inmobiliario Punta Pullay y al final de la playa Papudo, el borde costero presenta una franja de playa de arena más angosta con abundantes afloramientos rocosos. La playa se encuentra rodeada por un bosque introducido de Eucaliptus y Pino, que caracteriza el paisaje de este sector y contribuye a delimitar visualmente el fin de la Playa.



Figura 43. Vista hacia el Poniente en el inicio de la playa Lilén.

En este sector existe abundante espacio para la instalación de la planta desaladora y la planta elevadora, y no se observan construcciones cercanas.



Figura 44. Vista hacia el Oriente de la Playa Lilén.

6.3.3 Propiedades de la columna de agua

Los valores de salinidad, temperatura y densidad en la columna de agua deben determinarse a partir de pruebas en terreno. Sin embargo, de acuerdo a la información recopilada en el capítulo 3, se espera que los valores en la región de Valparaíso se encuentren dentro de los siguientes rangos:

Propiedad	Rango
Salinidad	32 - 35 [gr/L]
Temperatura	12 - 18 [°C]
Densidad	1025 [Kg/m ³]

Tabla 50. Rangos esperados de valores de propiedades de la columna de agua.

Los 3 sectores en estudio son aledaños, por lo que las propiedades de la columna de agua no deberían variar significativamente, aun cuando se pueden presentar ligeras alteraciones en las cercanías de la desembocadura del Estero Agua Salada

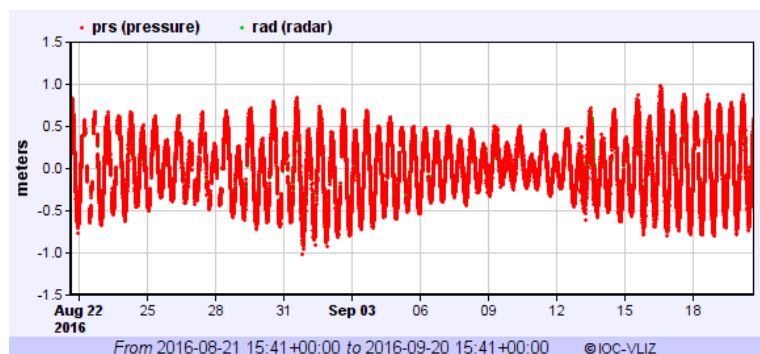
6.3.4 Condiciones hidrodinámicas

6.3.4.1 Corrientes

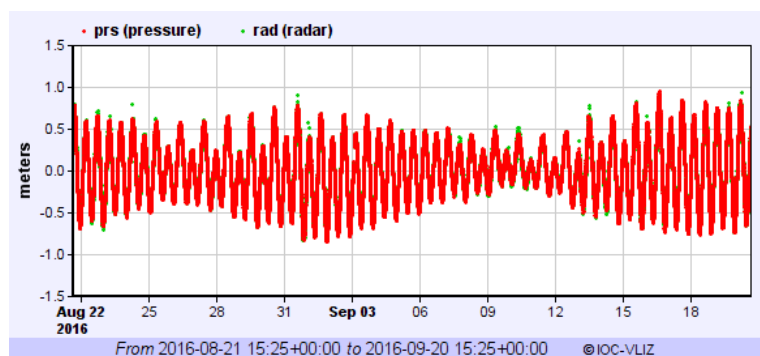
La velocidad y dirección de las corrientes existentes en la bahía de Papudo deben determinarse a partir de pruebas en terreno. En general, en las costas abiertas del litoral central de Chile se observan magnitudes de corrientes del orden de 20 a 25 [cm/s]. Para estas magnitudes moderadas, no se esperan cargas hidrodinámicas significativas sobre las obras de captación y descarga producto de las corrientes, como tampoco transporte de sedimentos de importancia debido a las mismas.

6.3.4.2 Mareas

Las estaciones de medición del nivel del mar más cercanas a la bahía de Papudo son las estaciones de Quintero y Pichidangui. En la figura 45 se muestra la variación del nivel del mar en un periodo de 30 días en ambas estaciones.



(i) Estación Pichidangui



(ii) Estación Quintero



Figura 45. Variación del nivel del mar en Quintero y Pichidangui

Se observa que las amplitudes máximas de marea son del orden de 1 metro.

6.3.4.3 Oleaje

Las características del oleaje en la bahía de Papudo deben determinarse a partir de pruebas en terreno y un estudio especializado. En general, en la zona central de Chile se observan con mayor frecuencia olas de hasta 2.5 metros (frecuencia acumulada de observación: 88%) con dirección SW, sin embargo, con oleaje de tormenta pueden observarse olas de más de 4 metros con dirección NW.

Las características particulares del oleaje son diferentes en cada sector definido. Por esta razón se describen por separado.

6.3.4.3.1 Sector 1

El sector 1 está protegido del oleaje incidente del SW, por lo que durante la visita a terreno se observaron alturas significativas pequeñas. Sin embargo, debe considerarse que durante una tormenta el oleaje incidente del NW puede alcanzar alturas cercanas a los 4 metros.

Desde el punto de vista hidrodinámico, el oleaje puede clasificarse como tipo spilling (Olas de derrame). En la figura 46 se muestra una foto del oleaje en el sector.



Figura 46. Ola tipo spilling en el Sector 1.

6.3.4.3.2 Sector 2

Al igual que el Sector 1, el Sector 2 está protegido del oleaje incidente del SW, pero abierto al oleaje del NW. Durante la visita a terreno se observaron alturas significativas mayores que en el Sector 1, las que van aumentando a medida que se avanza hacia el norte, donde se comienza a perder la protección de la bahía.

Desde el punto de vista hidrodinámico, el oleaje puede clasificarse como tipo plunging (Olas de vuelco). En la figura 47 se muestra una foto del oleaje en el Sector 2.



Figura 47. Ola tipo plunging en el Sector 2.

6.3.4.3.3 Sector 3

El Sector 3 queda fuera de la protección de la bahía, por lo que está abierto al oleaje del SW y NW. Desde el punto de vista hidrodinámico, el oleaje se ve influenciado por la presencia de abundantes afloramientos de roca, por lo que no presenta una estructura clara. Sin embargo, sus características generales permiten clasificarlo como un oleaje tipo surging (Olas de derrame). En la figura 48 se muestra una foto del oleaje en el sector.



Figura 48. Oleaje en el Sector 3.

6.3.5 Geomorfología del borde costero

La bahía de Papudo corresponde a una típica bahía de bolsillo protegida del oleaje dominante del SW, con playas de arena y la desembocadura de un río. Si bien los tres sectores en estudio pertenecen a la misma bahía, presentan características geomorfológicas diferentes por lo que se describen por separado.

6.3.5.1 Sector 1: Playa Papudo Sur

En el extremo norte del sector 1, al sur de la playa Papudo, el borde costero presenta un afloramiento rocoso no muy abundante, seguido inmediatamente por una franja de playa de arena. Al sur Oeste de la playa, nuevamente se presenta un afloramiento rocoso más abundante, lo que permite inferir que el depósito de arena en este sector no debe ser muy profundo (menos de 10 metros).



Figura 49. Vista general extremo norte del sector 1.

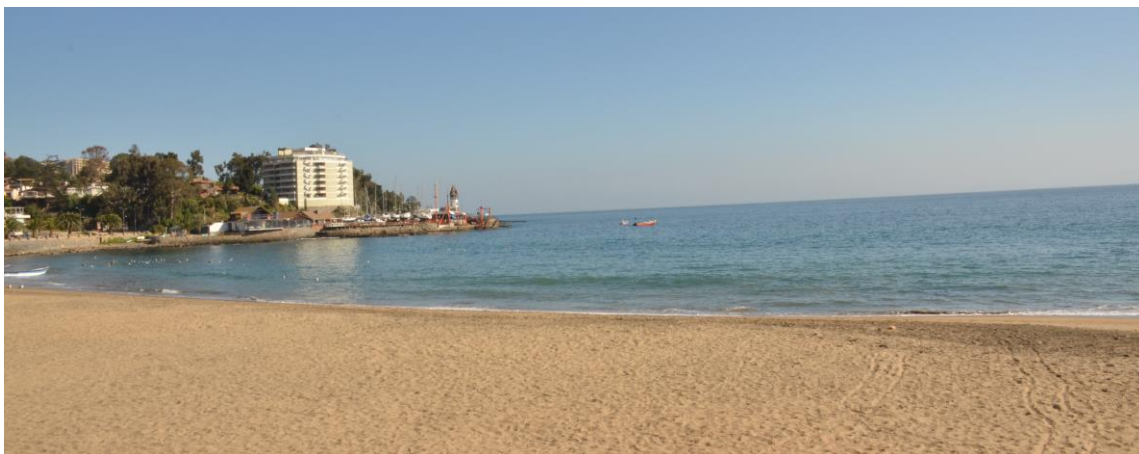


Figura 50. Vista general de la zona central del sector 1.

Al Oeste del Sector 1, se observa un afloramiento de roca abundante con una pequeña playa de arena gruesa y grava. En el extremo sur oeste de la zona, existe una saliente que se extiende en el mar compuesta por rocas erosionadas.

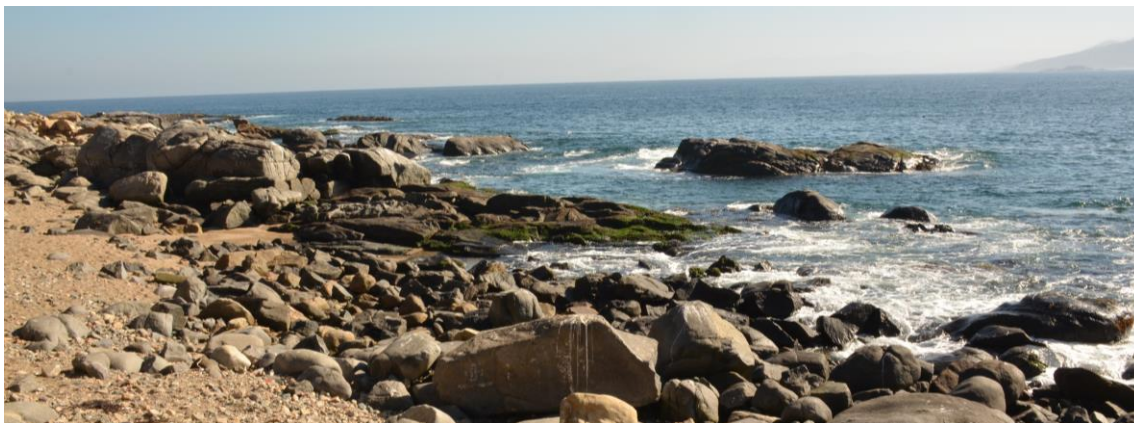


Figura 51. Vista general de la zona Sur Oeste del sector 1.

6.3.5.2 Sector 2: Playa Papudo

Este sector se caracteriza por tener una amplia y ancha faja de arena a lo largo de toda la costa, sin presencia de afloramientos rocosos intermedios, lo que permite inferir que el depósito de arena tiene profundidades superiores a los 10 metros. La extensa playa se encuentra rodeada por el afloramiento de roca que marca el inicio del sector 1 en el sur, y el afloramiento de roca que indica el inicio de la playa Lilén en el norte (Sector 3).



Figura 52. Vista de la playa Papudo hacia el Sur (Sector 2).



Figura 53. Vista hacia el norte de la playa Papudo (Sector 2)



Figura 54. Vista hacia el norte, final de la playa Papudo (Sector 2).

6.3.5.3 Sector 3: Playa Lilén

En el inicio del sector 3, el borde costero se caracteriza por presentar una franja de playa más angosta, compuesta por arena gruesa, grava y conchas marinas, y con bastantes afloramientos rocosos. La abundante cantidad de afloramientos rocosos permite inferir que el depósito de material permeable tiene poca profundidad.



Figura 55. Vista hacia el norte de la playa Lilén.



Figura 56. Vista hacia el Sur del afloramiento rocoso.



Figura 57. Vista hacia el Norte desde la punta de la playa Lilén.

6.3.6 Características generales de las playas

La distribución del sedimento y las características morfodinámicas de las playas varían en los 3 sectores en estudio, por lo que se describen por separado.

6.3.6.1 Sector 1: Playa Papudo Sur

En cuanto a la distribución del sedimento, la playa en el tramo norte del Sector 1 está compuesta por arena de grano medio en la superficie, el que aumenta a tamaño grueso a mayor profundidad.



Figura 58. Arena del tramo norte del Sector 1.

En el extremo Sur-Oeste del sector 1, la playa se caracteriza por tener arena gruesa y gran cantidad de grava.



Figura 59. Arena gruesa y grava del extremo Sur-Oeste del Sector 2.

Desde el punto de vista morfodinámico, se puede observar una zona de swash muy estrecha, sin zona de rompiente. Las olas rompen directamente en la cara de la playa, generando una pendiente pronunciada. De acuerdo a estas características, la playa del sector 1 clasifica como Playa Reflectiva.

6.3.6.2 Sector 2: Playa Papudo

Al igual que el tramo norte del sector 1, la playa Papudo presenta arena de tamaño medio en la superficie, con presencia de grava y arena gruesa a mayor profundidad.

En cuanto al perfil morfodinámico, la playa Papudo mantiene las características descritas en el Sector 1. En la figura 60 se puede apreciar la zona de swash estrecha y la pronunciada pendiente generada por la rompiente de las olas, características de una playa Reflectiva.

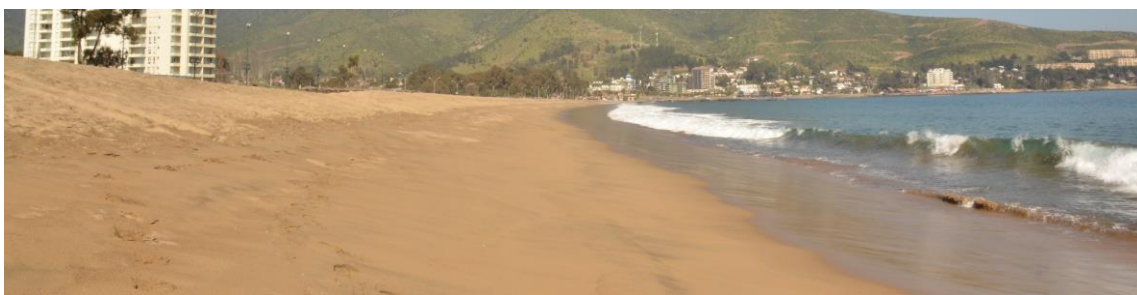


Figura 60. Vista general de la Playa Papudo (Sector 2).

6.3.6.3 Sector 3: Playa Lilén

El sedimento de la playa Lilén está compuesto por arena gruesa, grava y gran cantidad de conchas marinas.



Figura 61. Sedimento de la Playa Lilén (Sector 3).

Desde el punto de vista morfodinámico, la playa se ve influenciada por la presencia de afloramientos rocosos. Reúne características de playas Reflectivas y playas Disipativas, por lo que se clasifica como Playa Intermedia.

6.3.7 Vulnerabilidad frente a tsunamis

En la figura 62 se muestra la carta de inundación por tsunami de Papudo referida al evento de 1906, elaborada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). Se indican solamente las áreas en riesgo de inundación. Para determinar velocidades de flujo y alturas de inundación requeridas para el diseño estructural de las obras, es necesario realizar un análisis detallado que queda fuera del alcance de este trabajo. Se puede observar que el Sector 2 es la zona con mayor área en riesgo de inundación, lo que podría afectar las obras anexas en el evento de un tsunami. Por otro lado, el Sector 1 correspondería a la zona más protegida.

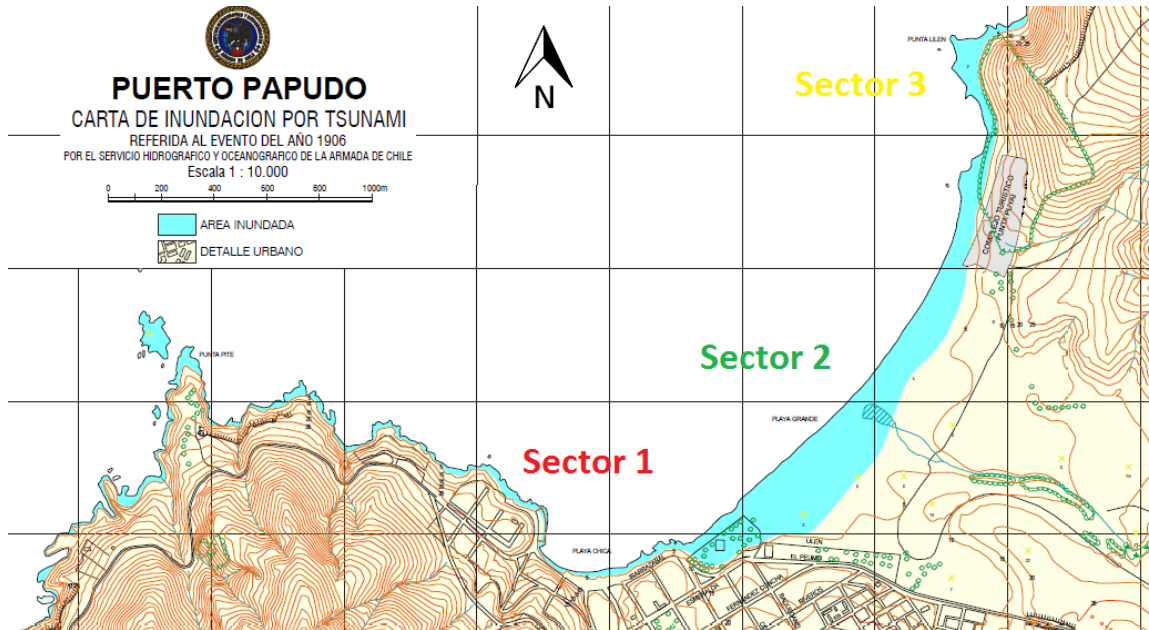


Figura 62. Carta de inundación por tsunami de Papudo (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada)

6.3.8 Biota marina

Papudo se encuentra en el límite norte del Litoral Central de Chile. Esta zona se caracteriza por tener una fuerte actividad pesquera, debido a la amplia variedad de especies marinas que es posible encontrar. Es importante conocer los organismos que habitan el sector para evitar dañarlos o que estos interfieran con el sistema de captación.

El sistema bentónico en esta zona está compuesto principalmente por esponjas marinas, bosques de algas y mariscos como machas, choritos, cholgas, ostiones, ostras, almejas, erizos y locos (en veda por peligro de extinción). Estas especies suelen adherirse a sustratos duros, como rocas o tuberías, por lo que deben tomarse las medidas adecuadas para evitar que obstruyan la captación o se produzca un impacto a su población. También es posible encontrar algunas especies de peces como lenguados, corvinas, merluzas róbalo y congrios.

Por otro lado, el sistema pelágico está compuesto principalmente por peces, como reinetas, jureles, sardinas, sierras y albacoras. En general, considerando las dimensiones típicas de estas especies, se estima que las velocidades de natación van desde los 100 [cm/s].

6.3.9 Impacto al turismo

El turismo es la principal actividad económica de Papudo. Los tres sectores tienen diferentes características turísticas, por lo que se describen por separado.

6.3.9.1 Sector 1: Playa Papudo Sur

Este sector se caracteriza por bordear el paseo peatonal de la Avenida El Peumo, importante atractivo turístico de la ciudad. Además, se observan casas de veraneo y restaurantes a un costado de la caleta de pescadores.

6.3.9.2 Sector 2: Playa Papudo

La playa Papudo es el principal atractivo turístico de la ciudad, recibiendo gran cantidad de visitantes durante el verano. En los terrenos aledaños a la playa en este sector, se observa gran cantidad de proyectos inmobiliarios de veraneo.

6.3.9.3 Sector 3: Playa Lilén

El sector de playa Lilén, al encontrarse más alejado y con menos accesibilidad no presenta gran actividad turística. No se observa actividad hotelera ni casas de veraneo en las cercanías.

6.3.10 Actividad pesquera y portuaria

En general, la zona de Papudo no presenta actividad portuaria. La actividad pesquera se concentra en el Sector 1, donde se encuentra una pequeña caleta de pescadores artesanales.

6.3.11 Accesibilidad y conectividad a la red de conducción

La accesibilidad terrestre y la conectividad a la red de conducción se describe para cada sector por separado.

6.3.11.1 Sector 1: Playa Papudo Sur

El sector 1 cuenta con excelente accesibilidad terrestre, ya que se encuentra adyacente a la Avenida El Peumo.

En cuanto a la conectividad con la red de conducción, el Sector 1 es el más cercano al Estanque Papudo, desde donde se bombea el agua hacia La Ligua. En esta alternativa se requeriría construir una línea de impulsión de aproximadamente 700 metros para conectar la captación con el estanque. La planta desaladora podría ubicarse a un costado del Estanque Papudo, en alguno de los terrenos desocupados existentes.

En la figura 63 se muestra un esquema de la infraestructura existente, y las obras que se requerirían para conectarse al sistema de conducción en el Sector 1.



Figura 63. Esquema de proyección de obras necesarias en el sector 1.

6.3.11.2 Sector 2: Playa Papudo

La accesibilidad con vehículos terrestres a la playa Papudo es algo más limitada. Las calles públicas permiten llegar hasta el acceso sur de la playa, sin embargo, los caminos que conectan con el tramo central y extremo norte son privados y pertenecen a los complejos habitacionales aledaños a la playa.

A cerca de un kilómetro de la orilla de la playa está ubicada la planta de tratamiento de agua potable de Esval, donde existe espacio suficiente para la instalación de la planta desaladora. En este caso, sería necesario construir una conducción de aproximadamente 1300 metros para conectar la zona de extracción con la planta desaladora y la impulsión existente.

En la figura 64 se muestra un esquema de la infraestructura existente, y las obras que se requerirían para conectarse al sistema de conducción en el Sector 2.



Figura 64. Esquema de proyección de obras necesarias en el sector 2.

6.3.11.3 Sector 3: Playa Lilén

El sector de Lilén no tiene buena accesibilidad terrestre, ya que no existen caminos públicos que permitan llegar hasta la playa.

En cuanto a la conectividad con la red existente, la línea de conducción más cercana corresponde a la impulsión de la planta de tratamiento de agua potable de Esva. Al igual que en el caso del Sector 2, la planta desaladora podría instalarse a un costado de la planta de tratamiento, sin embargo, en este caso sería necesario construir una línea de conducción de aproximadamente 2.500 metros para conectar la zona de extracción.

En la figura 65 se muestra un esquema de la infraestructura existente, y las obras que se requerirían para conectarse al sistema de conducción en el Sector 3.



Figura 65. Esquema de proyección de obras necesarias en el sector 3.

6.4 Evaluación de las alternativas para el emplazamiento del sistema de captación de agua de mar

Para evaluar las alternativas para el emplazamiento del sistema de captación de agua de mar se realizó el análisis multicriterio propuesto en el capítulo 5, considerando las características particulares de cada uno de los sectores definidos en la bahía de Papudo. Cada uno de los criterios se evaluó en una escala de 1 a 5, siendo 1 muy desfavorable, y 5 muy favorable. El puntaje de cada variable es ponderado por la importancia relativa obtenida en la jerarquización de variables realizada en el capítulo 5. De acuerdo con este análisis y los criterios adoptados, la ubicación óptima para instalar el sistema de captación de agua de mar es el Sector 2: Playa Papudo.

En la Tabla 51 se muestran los puntajes asignados a cada variable, su importancia relativa, y el puntaje final obtenido por cada sector. En general, se observa que los tres sectores tienen condiciones hidrodinámicas similares, sin embargo, el Sector 2 presenta condiciones geomorfológicas y una playa de características muy favorables, las que corresponden a los factores más relevante de acuerdo con la jerarquización de variables realizada en la sección 5.1. Por otro lado, al corresponder a una playa altamente concurrida durante los meses de

verano, el impacto al turismo es una condición muy desfavorable. Sin embargo, este efecto puede ser reducido con la utilización de captaciones cerradas.

Ref.	Ítem	Importancia Aspecto	Calificación		
			Sector 1	Sector 2	Sector 3
3.1	Propiedades de la columna de agua	3.3%	3	4	4
3.2	Condiciones Hidrodinámicas				
3.2.1	Corrientes	6.4%	5	5	5
3.2.2	Mareas	3.3%	4	4	4
3.2.3	Oleaje	7.9%	5	4	3
3.3	Borde Costero				
3.3.1	Geomorfología del borde costero	13.5%	3	5	2
3.3.2	Características generales de las playas	13.5%	4	5	3
3.3.3	Vulnerabilidad frente a Tsunamis	8.4%	4	2	3
3.4	Biota Marina	7.4%	3	3	3
5.1	Aspectos Operacionales				
	Impacto al Turismo	9.9%	1	2	4
	Actividad Pesquera y/o Portuaria	9.9%	1	5	5
	Accesibilidad	7.9%	5	3	2
	Conectividad al sistema AP existente	8.4%	4	3	2
Calificación General			3.38	3.83	3.19

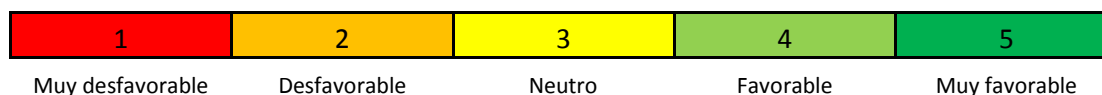


Tabla 51. Análisis multicriterio para seleccionar el emplazamiento del sistema de captación de agua de mar en la localidad de Papudo.

6.5 Selección del tipo de captación más adecuado

Para seleccionar el tipo de captación de agua de mar más adecuado para las condiciones particulares del sector seleccionado, se realizó el análisis multicriterio propuesto en el capítulo 5. Cada uno de los criterios se evaluó considerando las características de los tipos de captación descritos en el capítulo 4, asignando una nota de 1 a 5, siendo 1 muy desfavorable, y 5 muy favorable. En los casos en que el criterio analizado no tiene ninguna influencia, se asignó nota 5. Al igual que en el caso anterior, cada puntaje es ponderado por la importancia relativa de cada variable.

En la Tabla 52 se muestran los puntajes asignados a cada variable, su importancia relativa, y el puntaje final obtenido por cada tipo de captación.

Ref.	Ítem	Importancia Aspecto	Calificación Captaciones Abiertas			Calificación Captaciones Cerradas					
			Sumergida	Elevada	Directa	Norias	Pozo vertical	Pozo Horizontal	Pozo Radial	Pozo Inclinado	Galería de Infiltración
3.2	Condiciones Hidrodinámicas										
3.2.1	Corrientes	5.4%	5	5	5	5	5	5	5	5	4
3.2.2	Mareas	3.9%	5	5	5	5	5	5	5	5	4
3.2.3	Oleaje	5.7%	5	5	4	5	5	5	5	5	4
3.3	Borde Costero										
3.3.1	Geomorfología del borde costero	10.5%	4	3	2	5	4	4	4	4	3
3.3.2	Características generales de las playas										
3.3.2.1	Distribución del sedimento	10.1%	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3.3.2.3	Perfil morfodinámico de la playa	10.1%	5	5	5	5	5	5	5	5	5
3.3.3	Vulnerabilidad frente a Tsunamis	5.4%	3	1	1	4	4	4	4	4	1
3.4	Interacción con la Biota Marina	5.0%	3	2	2	5	5	5	5	5	4
5.2	Criterios de Evaluación										
5.2.1	Uso del Agua	5.0%	3	3	2	5	5	5	5	5	5
5.2.2	Caudal requerido	9.8%	5	5	4	1	2	3	4	4	4
5.1	Aspectos Operacionales										
	Impacto a la actividad pesquera	8.3%	4	2	3	5	5	5	5	5	5
	Impacto durante la construcción	2.8%	3	1	2	4	3	2	2	3	1
	Impacto visual permanente	9.0%	5	1	2	4	4	4	4	4	4
	Cotos Estimados	9.0%	3	1	4	5	4	3	3	2	2
Calificación General			4.27	3.24	3.41	4.44	4.31	4.29	4.39	4.33	3.81

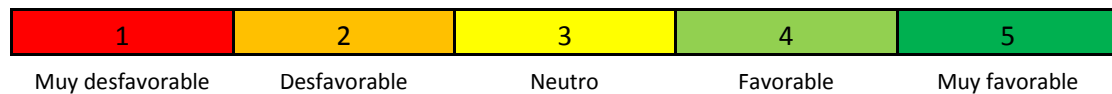


Tabla 52. Análisis multicriterio para seleccionar el tipo de captación de agua de mar.

De acuerdo a los resultados del análisis, la captación sumergida es el tipo de captación abierta más adecuado para el Sector 2: Playa Papudo. Las condiciones hidrodinámicas son idénticas para los tres tipos de captaciones abiertas, sin embargo, la geomorfología del borde costero es más favorable para una captación abierta debido a la pendiente del fondo marino. En cuanto a la vulnerabilidad frente tsunamis, la captación elevada es la más desfavorable debido a la exposición de la estructura tipo muelle a la acción de las olas. Por otro lado, la captación abierta sumergida tiene un menor impacto a la actividad pesquera y visual, ya que la tubería de captación va por el fondo marino y puede construirse alejada de las zonas de pesca. Tanto la captación elevada como sumergida requieren de importantes obras anexas y excavaciones, por lo que tienen un gran impacto visual.

En el caso de las captaciones cerradas, las norias y el pozo radial son los tipos de captación que obtuvieron el puntaje más alto. Como se comentó en secciones previas, las captaciones cerradas no se ven afectadas por las condiciones hidrodinámicas, y ofrecen una mayor protección a la biota marina. En general, las norias y los cuatro tipos de pozos tienen características similares, diferenciándose principalmente en la capacidad, el impacto durante la construcción y los costos estimados. El pozo radial puede lograr una capacidad mayor que el pozo horizontal, sin embargo, tiene un impacto mayor durante la construcción que el pozo inclinado. Al considerar las ponderaciones asignadas de acuerdo con la jerarquización de variables, el pozo radial junto a las norias aparecen como las soluciones más adecuadas.

Con el objetivo de realizar una evaluación económica preliminar y comparar los costos de las captaciones abiertas y cerradas, se realizará un pre diseño de las tres alternativas mencionadas previamente.

6.6 Prediseño de las obras de captación de agua de mar

6.6.1 Captación abierta sumergida

En la tabla 53 se presenta un resumen de los requerimientos, materiales y las consideraciones de diseño para la captación abierta sumergida.

Ítem	Sub-Item	Criterio
Caudal De Captación	Abastecimiento Papudo y La Ligua	500 [L/s]
Eficiencia	Eficiencia de la planta desaladora	50%
Calidad de agua	Ubicación obra de toma	Entre los veriles -20 y -25 [m] NRS

Ítem	Sub-Item	Criterio
Cámara de captación y rejilla	Resguardos	Superficie: al menos 10 [m] bajo el nivel de agua mínimo esperado en el punto de captación. Fondo: deberá considerarse un resguardo mínimo de 4 [m] sobre el fondo marino
	Velocidad de succión	Se limitará a 0,15 m/s, con escurrimiento horizontal
	Crecimiento Marino	Aumento del diámetro exterior de las barras de la rejilla
	Material	Cámara de captación: Hormigón armado Rejilla: acero galvanizado con protección catódica
Tubería de transporte	Velocidad de escurrimiento	Se limitará a 2 [m/s] al interior de la tubería
	Material	HDPE (polietileno de alta densidad)
Pérdida de carga	Pérdidas Friccionales	Para establecer la cota mínima de la sentina de impulsión, se considerará propiedades de tubería envejecida con un Coeficiente de Hazen Williams de 140

Tabla 53. Requerimientos, materiales y consideraciones de diseño para la captación abierta sumergida.

El pre diseño consiste en definir los elementos del sistema a utilizar y sus dimensiones. Los principales elementos de este tipo de captación son: Cámara de captación, sentina, tubería de transporte, sistema de bombeo e impulsión hacia la planta desaladora.

6.6.1.1 Cámara de captación

Para la cámara de captación se utilizará el cajón de succión, que es el sistema más utilizado en la actualidad.

El área de ingreso de agua requerido se define en función del caudal de captación y la velocidad de succión de diseño.

Q [m ³ /s]	v [m/s]	A _{req} [m ²]
0.5	0.15	3.33

Tabla 54. Área de ingreso de agua requerida para la cámara de captación

Considerando la altura recomendada de 1 metro, y un porcentaje de aperturas de 50% (Debido al aumento del diámetro exterior de las rejillas por el crecimiento de organismos marinos), se determina el diámetro de 2 metros requerido para la cámara de captación.

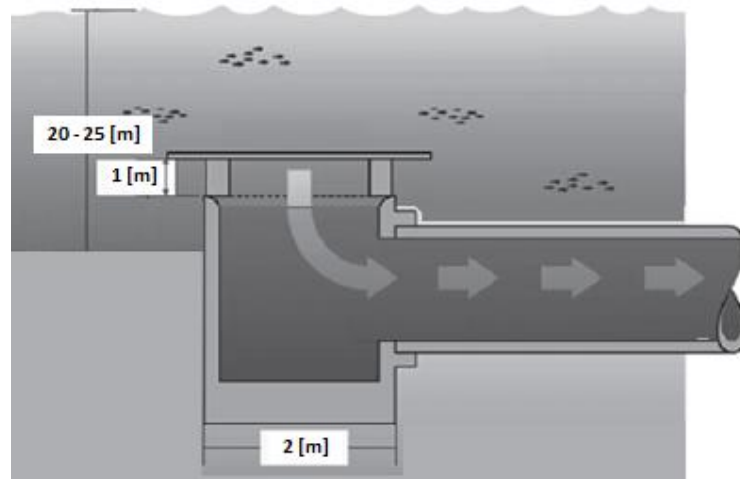


Figura 66. Esquema prediseño cajón de succión para captación abierta sumergida.

6.6.1.2 Sentina y tubería de transporte

El dimensionamiento de la sentina y la tubería de transporte están relacionados, por lo que se analizan en conjunto.

Para el dimensionamiento del volumen de la sentina, se consideró un ciclo de bombeo de 10 minutos. El volumen de regulación mínimo recomendado se obtiene de la siguiente expresión:

$$Vol = Q_{req} * t$$

Donde,

Q_{req} : Caudal de extracción requerido [m^3/s]

t : Ciclo de bombeo [s]

Por lo tanto, el volumen de regulación requerido para la sentina es 300 m^3 . Para determinar la profundidad de la sentina se debe considerar la línea de carga de la tubería y por lo tanto, las pérdidas por fricción en la misma. A mayor pérdida de carga mayor será la profundidad requerida para la sentina.

6.6.1.2.1 Pérdidas de carga en la tubería de transporte

Las pérdidas por fricción en las tuberías de transporte e impulsión se obtienen mediante la ecuación de Hazen Williams, con la siguiente expresión:

$$h_f = J * L = 10,67 * \left(\frac{Q}{C_{HW}} \right)^{1,852} * \frac{L}{D^{4,87}}$$

Donde,

Q: Caudal que pasa por la tubería [m/s].

C_{HW} : Coeficiente de Hazen Williams, depende del material de la tubería.

L: Largo de la tubería [m].

D: Diámetro interno de la tubería [m].

Para estimar el largo de la tubería de transporte, se consideró una pendiente de la costa de 2.5%, lo que implica que, para alcanzar las profundidades apropiadas para la cámara de captación, el tramo sumergido de la tubería debe tener una longitud aproximada de 1000 metros. Además, se consideró un tramo enterrado en la playa de 70 metros para llegar hasta la sentina.

Como material para la tubería de transporte se recomienda utilizar HDPE Clase PN10, debido a la exposición directa que tendrá al agua de mar. El coeficiente de Hazen Williams en este caso es $C_{HW} = 140$. Por otro lado, el diámetro de la tubería queda limitado por la velocidad máxima y mínima establecida. Se analizan tres diámetros de tubería de HDPE clase PN10, obtenidos de catálogo norma DIN, y se determinan las pérdidas en cada caso.

D_{ext} [mm]	e [mm]	D_{int} [mm]	V [m/s]	H_f [m]
710	42,1	625,8	1,63	3,3
800	47,4	705,2	1,28	1,8
900	53,3	793,4	1,01	1,0

Tabla 55. Pérdidas de carga estimadas para tres diámetros de tuberías de HDPE Clase PN10.

A mayor diámetro, mayor es el costo de suministro e instalación de la tubería de transporte, mientras que, a mayor pérdida de carga, mayor es la profundidad requerida para la sentina. Teniendo en cuenta estos dos factores, se considera que la alternativa más adecuada es el diámetro 800 [mm].

Para el diseño de la sentina, se propone utilizar secciones prefabricadas circulares de hormigón armado. El diámetro requerido para la sentina depende del volumen de regulación y del espaciamiento que requieren las bombas de succión. Debido a que el caudal de extracción es bastante grande y que se elevará agua de mar con residuos, se propone utilizar cinco bombas sumergibles del tipo aguas servidas.

Descripción	Diseño
Funcionamiento	4+1 (una bomba de reserva)
Bomba sumergible	Amarex KRT (KSB) Q=125 [L/s] H=30 [m]

Tabla 56. Descripción de las bombas para la captación abierta sumergida.

Estas bombas requieren de un espaciamiento mínimo de 1 metro. Considerando este requisito, y el volumen de regulación requerido, se propone un diámetro de 9 metros, una altura 5

metros para alcanzar el volumen de regulación requerido. Sin embargo, a esta altura se tiene que sumar las pérdidas de carga y la variación de marea.

Variable	Altura [m]
Variación de marea	1
Altura Cota terreno	3
Pérdida de carga	1,8
Altura requerida sentina	5
Nivel mínimo requerido por las bombas	0,4
TOTAL	11,2

Tabla 57. Altura requerida para la sentina.

Se considera además que la sentina cuente con un desarenador.

6.6.1.3 Impulsión hacia la planta desaladora

Para la tubería de impulsión hacia la planta desaladora se utilizan diámetros más pequeños debido a que este tramo es impulsado por las bombas. Se considera una velocidad máxima de 2 [m/s] y los siguientes materiales para cada tramo.

Tramo	Largo [m]	Material	Diámetro [mm]	
			Interior	Exterior
Cruce bajo Estero	120	Acero Inoxidable	700	
Borde Estero	1280	HDPE PN10	705,2	800

Tabla 58. Especificación tuberías para la impulsión hacia la planta desaladora.

6.6.2 Captaciones cerradas

En la tabla 59 se presenta un resumen de los requerimientos, materiales y las consideraciones de diseño para las captaciones abiertas.

Ítem	Sub-Item	Criterio
Caudal De Captación	Abastecimiento Papudo y La Ligua	500 [L/s]
Eficiencia	Eficiencia de la planta desaladora	50%
Calidad de agua	Medio filtrante de grava	Espesor mínimo 0,5 [m] para norias y pozos radiales
	Sello Sanitario	Mayor a 0,6 [m] para norias y pozos radiales.

Entubado Central	Material	Norias: Hormigón armado de espesor 0,3 m. Pozos radiales: Hormigón armado 0,5 [m]
Resguardo impacto visual	Instalación bombas y válvulas	Se instalarán dentro de los pozos en ambos casos.
Emplazamiento	Distancia entre pozos	50 metros

Tabla 59. Requerimientos, materiales y consideraciones de diseño para las captaciones cerradas.

6.6.2.1 Noria Playera

El pre diseño consiste en definir el número de norias a utilizar, su espaciamento y conexión, y los elementos y sus dimensiones. Los elementos principales de esta captación son: Entubado central, sistema de bombeo, e impulsión hacia la planta desaladora.

Para realizar el diseño detallado de las norias se requiere realizar un estudio hidrogeológico del sector seleccionado. Sin embargo, en la etapa de diseño conceptual, es posible utilizar valores aproximados basados en estudios realizados en sectores aledaños y la experiencia del diseñador. Considerando las características del sedimento del Sector 2: Playa Papudo y los resultados de estudios realizados por Esval en sectores cercanos, se estima que el rendimiento del acuífero es de 8 [L/s/m] (buen rendimiento).

6.6.2.1.1 Número de norias

Considerando que el acuífero tiene buen rendimiento, se estima que cada noria tendría una capacidad de 50 [L/s], por lo que se necesitaría una batería de 10 norias. Como medida de seguridad, ante la eventualidad de que una bomba falle, se considera la construcción de una noria extra como apoyo, en funcionamiento 10+1.

6.6.2.1.2 Entubado Central

Para el entubado central se utiliza hormigón armado, con el fin de evitar la corrosión que podría afectar a un entubado de acero. Para facilitar la construcción se recomienda utilizar secciones prefabricadas.

De acuerdo a las recomendaciones del capítulo 4, el diámetro de la noria debe estar entre los 1.2 y 3 [m], por lo que se propone utilizar un diámetro de 1.8 [m]. Para determinar la profundidad requerida se utiliza la siguiente expresión:

$$Q_{util} = R * Q_{ext}$$

Donde,

Q_{util} : Caudal útil [L/s]

R: Porcentaje del caudal que es efectivo

Q_{ext} : Caudal extraído [L/s] = $q \cdot P$

q : Rendimiento [L/s/m]

P : Altura de tubo con perforaciones (Barbacanas)[m]

Se considera que el porcentaje de caudal de explotación es de 80% ($R = 0.8$), por lo tanto:

$$50 \left[\frac{L}{s} \right] = 0.8 * \left(8 \left[\frac{L}{s}{m} \right] * P \right) \rightarrow P = 7.8 [m]$$

Luego, se define la profundidad del entubado con barbacanas en 8 metros. Finalmente, para determinar la profundidad de excavación de la noria, se deben considerar los siguientes aspectos adicionales:

Variable	Altura [m]
Variación de marea	1
Altura Cota terreno	3
Profundidad del entubado con barbacanas	8
TOTAL	12

Tabla 60. Profundidad del entubado con barbacanas en las norias.

6.6.2.1.3 Espaciamiento entre norias

De acuerdo a la tabla 17, para arenas finas se recomienda un radio de influencia de 50 a 100 [m]. En este caso se considera un radio de influencia $R = 50$ [m].

6.6.2.1.4 Sistema de bombeo

Cada noria tendrá una bomba, una válvula de compuerta y una válvula de retención. En la tabla 61 se detallan los elementos propuestos para el sistema de bombeo.

Descripción	Diseño
Bomba sumergible $Q=50$ [l/s] $H=30$ [m]	Amarex KRT (KSB)
Válvula de corte de compuerta	PN 10 D=150 [mm]
Válvula de retención	PN 10 D=150 [mm]

Tabla 61. Sistema de bombeo para las norias playeras

6.6.2.1.5 Conexión de las norias

Para conectar las norias e impulsar el caudal total hacia la planta desaladora se utiliza un manifold. Este elemento consiste en una tubería larga con varias entradas para tuberías más angostas por un costado, y una salida común para el total del caudal extraído por las

norias por el otro. Para el espaciamiento entre norias definido, el largo del manifold requerido es de 500 metros.

Se propone ubicar las norias simétricamente, utilizando como eje la desembocadura del Estero Agua Salada. De esta manera, el caudal que se debe considerar para la tubería central del manifold es el correspondiente a 5 norias. Para el dimensionamiento de la tubería central y las tuberías de entrada del manifold, se considera una velocidad máxima de 2 [m/s].

En la siguiente tabla se encuentran los diámetros definidos y sus velocidades:

Tramo	Largo [m]	Material	Caudal [L/s]	Diámetro [mm]	Velocidad [m/s]
Entrada desde las norias	1	Acero Inoxidable 316	50	200	1,59
Tubería central	500		250	400	1,99
Salida hacia impulsión	20		500	600	1,77

Tabla 62. Especificación del manifold para las norias playeras.

6.6.2.1.6 Impulsión hacia la planta desaladora

Para la tubería de impulsión hacia la planta desaladora se utilizan diámetros más pequeños debido a que este tramo es impulsado por las bombas. Se considera una velocidad máxima de 2 [m/s] y los siguientes materiales para cada tramo.

Tramo	Largo [m]	Material	Diámetro [mm]		Velocidad [m/s]
			Interior	Exterior	
Unión manifold con impulsión	20	Acero Inoxidable	600	610	1,77
Borde Estero	1280	HDPE PN10	555,3	630	2,07

Tabla 63. Especificación tuberías para la impulsión hacia la planta desaladora

6.6.2.2 Pozo radial

El pre diseño consiste en definir los elementos del sistema a utilizar y sus dimensiones. Los principales elementos de este tipo de captación son: Entubado central, sistema de bombeo, brazos radiales, e Impulsión hacia la planta desaladora.

6.6.2.2.1 Entubado central y sistema de bombeo

El diseño del entubado central y el sistema de bombeo está relaciona, por lo que se analizan en conjunto.

El entubado central se proyecta en hormigón armado con un espesor de 0.5 metros. Las bombas para la impulsión se instalarán dentro del entubado central, por lo que para determinar el diámetro del pozo es necesario definir las bombas que se utilizaran. Debido a que el caudal de extracción es bastante grande y que se elevará agua de mar, se recomienda utilizar cinco bombas sumergibles del tipo aguas servidas.

Descripción	Diseño
Funcionamiento	4+1 (una bomba de reserva)
Bomba sumergible Q=125 [L/s] H=30 [m]	Amarex KRT (KSB)

Tabla 64. Descripción de las bombas para el pozo radial.

Cada bomba a instalar requiere de un espaciamiento de 1 metro para su correcto funcionamiento. Por lo tanto, el diámetro mínimo requerido para el entubado central es de 5 metros.

6.6.2.2.2 Brazos radiales

Para realizar el diseño detallado de los brazos radiales, se requiere realizar un estudio hidrogeológico que determine la transmisividad del acuífero. Sin embargo, al igual que en el caso de las norias, en la etapa de diseño conceptual es posible utilizar valores aproximados basados en estudios realizados en sectores aledaños y la experiencia del diseñador. Considerando las características del sedimento del Sector 2: Playa Papudo, y drenes de diámetro 300 milímetros, se estima que el rendimiento del acuífero es de 5 [L/s/m]. Este valor es menor que en el caso de las norias debido al menor diámetro utilizado en los drenes.

Existen múltiples combinaciones de número de brazos radiales y largo de drenes que satisfacen el caudal requerido. Considerando el ancho de la playa, se propone utilizar drenes de 20 metros de largo, lo que implica utilizar cinco brazos radiales.

6.6.2.2.3 Impulsión hacia la planta desaladora

Para la tubería de impulsión hacia la planta desaladora se utilizan diámetros más pequeños debido a que este tramo es impulsado por las bombas. Se considera una velocidad máxima de 2 [m/s] y los siguientes materiales.

Tramo	Largo [m]	Material	Diámetro [mm]		Velocidad [m/s]
			Interior	Exterior	
Borde Estero	1300	HDPE PN10	555,3	630	2,07

Tabla 65. Especificación tuberías para la impulsión hacia la planta desaladora.

6.6.3 Evaluación económica de las alternativas

Con el objetivo de comparar los costos estimados de cada una de las alternativas propuestas, se realizó una evaluación económica.

6.6.3.1 Presupuesto captación abierta sumergida

En la tabla 66 se muestra el presupuesto elaborado para la captación abierta sumergida.

Partida	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	
				Unitario \$	TOTAL \$
1	INSTALACIÓN DE FAENAS				58,652,470
1.1	Instalación de faena	mes	4	5,469,210	21,876,840
1.2	Movilización y desmovilización	gl	1	29,169,790	29,169,790
1.3	Preparación de accesos	gl	1	7,605,840	7,605,840
2	OBRAS DE CAPTACIÓN				1,217,021,500
2.1	Montaje tubería HDPE (mar) , DN=800mm				
2.1.1	Soldadura termofusión	ml	1000	621,090	621,090,000
2.1.2	Junta dilatación	ml			
2.1.3	Montaje y lanzamiento tubería	ml			
2.2	Montaje tubería HDPE (tierra) DN=700mm				
2.2.1	Soldadura termofusión	ml	70	90,450	6,331,500
2.2.2	Junta dilatación	ml			
2.2.3	Montaje y lanzamiento tubería	ml			
2.3	Obras de Hormigón Armado				
2.3.1	Suministro lastres rectangulares de hormigón	ml	1000	107,200	107,200,000
2.3.2	Suministro pernos inoxidables para lastres	ml	1000		
2.3.3	Cámara de captación	uni	1	482,400,000	482,400,000
3	SENTINA				88,762,100
3.1	Excavaciones y Obra de hormigón armado	ml	10.2	500,000	5,100,000
3.2	Bombas Amarex KRT Q=125 L/s H=30 m (KSB)	uni	5	16,432,420	82,162,100
3.3	Válvula de corte DN=800 mm	uni	1	1,500,000	1,500,000
4	MOVIMIENTOS DE TIERRA				289,718,478
4.1	Excavaciones Submarinas Tubería HDPE				
4.1.1	Excavación en arena (mar)	ml	1000	201,000	201,000,000
4.1.2	Limpieza fondo línea (material suelto mar)	ml			
4.2	Excavaciones Terrestres tubería HDPE				
4.2.1	Excavación en arena	m3	588	9,000	5,292,000
4.2.2	Entibación con paneles metálicos	m2	196	15,500	3,038,000
4.3	Rellenos				
4.3.1	Relleno con material seleccionado de la zanja	m3	550	13,000	7,150,000
4.3.	Retiro y transporte de excedentes	m3	38	10,000	380,000
4.4	Excavaciones impulsión				
4.4.1	Excavación terreno tubería impulsión	m3	3444	8,500	29,274,000
4.4.2	Relleno con material seleccionado de la zanja	m3	3048	13,000	39,626,071
4.4.3	Retiro y transporte de excedentes	m3	396	10,000	3,958,407
5	MONTAJE DE IMPULSIÓN				117,000,000
5.1	Tubería HDPE PE100, PN10, con uniones termofusionadas, D=630mm	ml	1280	75,000	96,000,000
5.2	Tubería de Acero D=600 [mm]	ml	120	175,000	21,000,000
6	SUMINISTROS				284,400,000
6.1	Suministro de tubería de HDPE PN10 D=800 mm	ml	1070	120,000	128,400,000
6.2	Suministro de tubería de HDPE PN10 D=630 mm	ml	1280	90,000	115,200,000
6.3	Suministro de tubería de Acero D=600 mm	ml	120	340,000	40,800,000
	SUBTOTAL GENERAL				2,055,554,548
	GASTOS Y UTILIDADES		45%		924,999,547
	TOTAL				2,980,554,095

Tabla 66. Presupuesto captación abierta sumergida.

6.6.3.2 Presupuesto norias playeras

En la tabla 67 se muestra el presupuesto elaborado para las norias playeras.

Partida	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	
				Unitario \$	TOTAL \$
1	INSTALACIÓN DE FAENAS				53,183,260
1.1	Instalación de faena	mes	3	5,469,210	16,407,630
1.2	Movilización y desmovilización	gl	1	29,169,790	29,169,790
1.3	Preparación de accesos	gl	1	7,605,840	7,605,840
2	OBRAS DE CAPTACIÓN				128,768,310
2.2	Elementos de estructuración	uni	11	11,706,210	128,768,310
2.2.1	Entubado de Hormigón armado D=1,8 [m]	ml	12	200,000	2,400,000
2.2.2	Empaquetado de grava	ml	8	30,000	240,000
2.3	Sistema de Bombeo				
2.3.1	Bombas Amarex KRT Q=50 L/s H=30 m (KSB)	uni	1	8,216,210	8,216,210
2.3.2	Válvula de compuerta de cierre elastomérico D=150 [mm]	uni	1	450,000	450,000
2.3.3	Válvula de retención D=150 [mm]	uni	1	400,000	400,000
3	UNIÓN NORIAS				187,200,000
3.1	Manifold de Acero D=400 [mm] con 11 Bridas	uni	1	187,200,000	187,200,000
4	MOVIMIENTOS DE TIERRA				140,705,289
4.1	Excavaciones Norias				
4.1.1	Excavación en arena para norias	m3	408	9,000	3,672,000
4.1.2	Excavación en arena para manifold	m3	2400	9,000	21,600,000
4.1.3	Entibación con paneles metálicos para manifold	m2	1200	15,500	18,600,000
4.1.4	Relleno con material seleccionado de la zanja	m3	2325	13,000	30,219,823
4.2	Excavaciones impulsión				
4.2.1	Excavación terreno tubería impulsión	m3	3149	8,500	26,764,800
4.2.2	Relleno con material seleccionado de la zanja	m3	2787	13,000	36,229,551
4.2.3	Retiro y transporte de excedentes	m3	362	10,000	3,619,115
5	MONTAJE DE IMPULSIÓN				99,500,000
5.1	Tubería HDPE PE100, PN10, con uniones termofusionadas, D=630 mm	ml	1280	75,000	96,000,000
5.2	Tubería de Acero D=600 mm	ml	20	175,000	3,500,000
6	SUMINISTROS				122,000,000
6.1	Suministro de tubería de HDPE PN10 D=630 mm	ml	1280	90,000	115,200,000
6.2	Suministro de tubería de Acero D=600 mm	ml	20	340,000	6,800,000
	SUBTOTAL GENERAL				731,356,859
	GASTOS Y UTILIDADES		45%		329,110,586
	TOTAL				1,060,467,445

Tabla 67. Presupuesto norias playeras.

6.6.3.3 Presupuesto pozo radial

En la tabla 70 se muestra el presupuesto elaborado para el pozo radial.

Partida	Descripción	Unidad	Cantidad	Precio	
				Unitario \$	TOTAL \$
1	INSTALACIÓN DE FAENAS				53,183,260
1.1	Instalación de faena	mes	3	5,469,210	16,407,630
1.2	Movilización y desmovilización	gl	1	29,169,790	29,169,790
1.3	Preparación de accesos	gl	1	7,605,840	7,605,840

2	OBRAS DE CAPTACIÓN				192,512,100
2.2	Elementos de estructuración				
2.2.1	Entubado de Hormigón armado D=5 [m]	ml	15	500,000	7,500,000
2.2.2	Empaquetado de grava	ml	100	120,000	12,000,000
2.2.3	Brazos radiales tipo dren	ml	100	900,000	90,000,000
2.3	Sistema de Bombeo				
2.3.1	Bombas Amarex KRT Q=125 L/s H=30 m (KSB)	uni	5	16,432,420	82,162,100
2.3.2	Válvula de compuerta de cierre elastomérico D=150 [mm]	uni	1	450,000	450,000
2.3.3	Válvula de retención D=150 [mm]	uni	1	400,000	400,000
3	MOVIMIENTOS DE TIERRA				166,576,115
3.1	Excavaciones Pozo radial				
3.1.1	Excavación en arena para entubado central	m3	565	9,000	5,089,380
3.1.2	Excavación en arena para brazos radiales	m3	4000	9,000	36,000,000
3.1.3	Entibación con paneles metálicos para brazos radiales	m2	200	31,000	6,200,000
3.1.4	Relleno con material seleccionado de la zanja	m3	3972	13,000	51,632,434
3.2	Excavaciones impulsión				
3.2.1	Excavación terreno tubería impulsión	m3	3198	8,500	27,183,000
3.2.2	Relleno con material seleccionado de la zanja	m3	2830	13,000	36,795,638
3.2.3	Retiro y transporte de excedentes	m3	368	10,000	3,675,663
4	MONTAJE DE IMPULSIÓN				97,500,000
4.1	Tubería HDPE PE100, PN10, con uniones termofusionadas, D=630 mm	ml	1300	75,000	97,500,000
5	SUMINISTROS				117,000,000
5.1	Suministro de tubería de HDPE PN10 D=630 mm	ml	1300	90,000	117,000,000
	SUBTOTAL GENERAL				626,771,475
	GASTOS Y UTILIDADES		45%		282,047,164
	TOTAL				908,818,638

Tabla 68. Presupuesto pozo radial

Los resultados del análisis económico muestran una gran diferencia en los costos de las captaciones abiertas y las captaciones cerradas. Mientras el costo del pozo radial es comparable al costo de las norias, el presupuesto de la captación abierta es casi tres veces mayor. Esta diferencia se explica por el alto costo que significa la construcción de una tubería sumergida en el lecho marino.

A pesar de que la construcción de una noria individual tiene un costo bajo, en casos donde el caudal requerido es relativamente alto, el costo total se multiplica llegando a valores similares al de pozos profundos. En el caso de aplicación analizado, el costo de las 11 norias requeridas para satisfacer la demanda incluso supera el valor de un pozo radial con 5 brazos.

Desde el punto de vista económico, para el caso de estudio analizado, la captación abierta sumergida es la menos conveniente, mientras las norias playeras y el pozo radial tienen un costo total muy similar. Considerando el resultado del análisis multicriterio, donde las norias playeras obtuvieron un puntaje más elevado, estas se seleccionan como la alternativa más adecuada para el sistema de captación de agua de mar.

7 Conclusiones

La revisión bibliográfica y recopilación de información de la geomorfología costera y oceanografía de Chile muestran que tanto en la Zona Norte como en la Zona Central del país existen sectores con características adecuadas para la instalación de sistemas de captación de agua de mar. La metodología de evaluación multicriterio propuesta permite determinar de manera simple y ordenada, y utilizando información de carácter general que puede obtenerse de visitas a terreno o la bibliografía existente, la ubicación y el tipo de captación más adecuado para una localidad en particular. De acuerdo con la jerarquización de variables propuesta, los factores más relevantes en el proceso de evaluación corresponden a la geomorfología del borde costero y las características de las playas. La información reunida en el capítulo 3 permite obtener una idea general de estas características en la costa de la zona Centro y Norte de Chile. De esta manera, es posible estimar los resultados que se obtendrían en los estudios hidrogeológicos detallados, y tomar decisiones a nivel de ingeniería conceptual en la etapa de pre diseño.

En la actualidad, existen numerosas alternativas de obras de captación, las que se adaptan a las diferentes características del borde costero, capacidad y calidad de agua requerida. Las condiciones geológicas e hidrogeológicas son relevantes en el diseño de las captaciones cerradas, sin embargo, no tienen gran influencia en el diseño de las captaciones abiertas. Por el contrario, las características de la dinámica costera son muy importantes en el diseño de las captaciones abiertas, pero tienen poca relevancia para el diseño de las captaciones cerradas. Por otro lado, el diseño de las obras de protección del sistema de captación y la biota marina requiere de un estudio de la hidrodinámica costera. El oleaje, corrientes, mareas, vientos y tsunamis son particularmente importantes para el diseño hidráulico y estructural de las captaciones abiertas y cerradas del tipo galerías de infiltración.

En el caso de estudio de la localidad de Papudo y La Ligua, se utilizó la metodología de evaluación multicriterio propuesta. Se consideró la información de carácter general descrita en el capítulo 3, y la información levantada durante una inspección de terreno. En primer lugar, se determinó que el sector más adecuado para la extracción del agua de mar en la bahía de Papudo corresponde a la playa Papudo Sur. En general, se observó que los tres sectores analizados tienen condiciones hidrodinámicas similares, sin embargo, el Sector 2 presenta condiciones geomorfológicas más favorables. La playa de dicho sector cuenta con una amplia y ancha faja de arena a lo largo de toda la costa, sin presencia de afloramientos rocosos intermedios, lo que permite inferir que el depósito de arena tiene profundidades superiores a los 10 metros. La mayor desventaja de la ubicación seleccionada es el impacto al turismo, sin embargo, este problema puede ser reducido utilizando captaciones cerradas.

De acuerdo con los resultados del análisis, la captación sumergida es el tipo de captación abierta más adecuado para el sector seleccionado. Las condiciones hidrodinámicas son idénticas para los tres tipos de captaciones abiertas, sin embargo, la geomorfología del borde costero es más favorable para una captación abierta debido a la pendiente del fondo marino.

En cuanto a la vulnerabilidad frente tsunamis, la captación elevada es la más desfavorable debido a la exposición de la estructura tipo muelle a la acción de las olas. Por otro lado, la captación abierta sumergida tiene un menor impacto a la actividad pesquera y visual, ya que la tubería de captación va por el fondo marino y puede construirse alejada de las zonas de pesca. Tanto la captación elevada como sumergida requieren de importantes obras anexas y excavaciones, por lo que tienen un gran impacto visual.

En el caso de las captaciones cerradas, las norias y el pozo radial son los tipos de captación que obtuvieron el puntaje más alto. Como se comentó en secciones previas, las captaciones cerradas no se ven afectadas por las condiciones hidrodinámicas, y ofrecen una mayor protección a la biota marina. En general, las norias y los cuatro tipos de pozos tienen características similares, diferenciándose principalmente en la capacidad, el impacto durante la construcción y los costos estimados. El pozo radial puede lograr una capacidad mayor que el pozo horizontal, sin embargo, tiene un impacto mayor durante la construcción que el pozo inclinado. Al considerar las ponderaciones asignadas de acuerdo con la jerarquización de variables, el pozo radial junto a las norias aparecen como las soluciones más adecuadas.

Los resultados del análisis económico muestran una gran diferencia en los costos de las captaciones abiertas y las captaciones cerradas. Mientras el costo del pozo radial es comparable al costo de las norias, el presupuesto de la captación abierta es casi tres veces mayor. Por otro lado, a pesar de que la construcción de una noria individual tiene un costo bajo, en casos donde el caudal requerido es relativamente alto, el costo total puede aumentar considerablemente. En el caso de aplicación analizado, el costo de las 11 norias requeridas para satisfacer la demanda incluso supera el valor de un pozo radial con 5 brazos. Estos resultados muestran la importancia de seleccionar adecuadamente el tipo de captación dependiendo del caudal requerido.

Desde el punto de vista económico, para el caso de estudio analizado, la captación abierta sumergida es la menos conveniente, mientras las norias playeras y el pozo radial tienen un costo total muy similar. Considerando el resultado del análisis multicriterio, donde las norias playeras obtuvieron un puntaje más elevado, estas se seleccionan como la alternativa más adecuada para el sistema de captación de agua de mar.

8 Referencias

1. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. 2015. Desalinización: Tecnologías, usos e impacto medio ambiental. Departamento de Estudios, Extensión, y Publicaciones, Asesoría Técnica Parlamentaria. Chile.
2. Cisternas, L., Moreno, L. 2014. El agua de mar en la minería. Fundamentos y aplicaciones. RIL editores. Santiago, Chile. 234 pp.
3. De Miguel, M. 2016. 2016. Sistemas de captación en desaladoras de agua de mar (I). Tomas abiertas. <http://www.iagua.es/blogs/mario-miguel-bello/sistemas-captacion-desaladoras-agua-mar>
4. Díaz-Naveas, J. & J. Frutos (eds). 2010. Geología Marina de Chile. Comité Oceanográfico Nacional de Chile - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso - Servicio Nacional de Geología y Minería de Chile. 115 pp.
5. Dirección de Estudios y Políticas Públicas. 2015. Proyección del consumo de agua en la minería del cobre 2026. Comisión chilena del cobre. 26 pp.
6. Guillén, J. Geología de la zona litoral. Institut de Ciencies del Mar. Barcelona, España.
7. Instituto Geográfico Militar. 1983. Geografía del Mar Chileno. 227 pp.
8. Minería Chilena. 2016. Catastro de plantas desalinizadoras y sistemas de impulsión de agua de mar. Grupo Editorial Edittec.
9. Mingez, O. 2015. Métodos de excavación sin zanjas. Tesis de magister. Universidad Politécnica de Madrid. 81 pp.
10. Missimer, T., Ghaffour, N., Dehwah, A., Rachman, R., Maliva, R., Amy, G. 2013. Subsurface intakes for seawater reverse osmosis facilities: Capacity limitation, water quality improvement, and economics. The International Journal on the Science and Technology of Desalting and Water Purification. ISSN: 0011-9164. 51 pp.
11. Okamoto, Y. 2015. The International Desalination Association World Congress on Desalination and Water Reuse 2015/San Diego, CA, USA. 18 pp.
12. Pankratz, T. An overview of seawater intake facilities for seawater desalination. Texas Water. 12pp.
13. Sánchez-Barriga, M., Pita, E. 2011. Estructuras de toma de agua de mar. XI jornadas españolas de costas y puertos. Las Palmas de Gran Canaria.

14. Tarbuck, E. J., Lutgens, F. K., y Tasa, D. 2005. Ciencias de la Tierra; una introducción a la geología física. Pearson Educación S. A., Madrid. 736 pp.
15. Voutchkov, N. 2013. Desalination Engineering: Planning and Design 1st Edition. Mc Graw Hill. 642 pp.
16. Werlinger, C. 2004. Biología Marina y Oceanografía: Conceptos y procesos. Fondo Nacional del Libro y la Lectura. Editorial Trama. 650 pp.
17. White paper. Junio 2011. Overview of desalination plant intake alternatives. Watereuse association. 17 pp.
18. www.mardechile.cl. 2005. Los Océanos (Libro virtual).
http://www.mardechile.cl/index.php?option=com_content&task=blogcategory&id=47