

COSTAS DE CHILE



MEDIO NATURAL • GESTION COSTERA • INGENIERÍA OCEÁNICA • CAMBIO CLIMATICO

ESTEBAN MORALES GAMBOA
PATRICIO WINCKLER GREZ
MARIO HERRERA ARAYA

ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA

CONTENIDOS

1	PRÓLOGO	4
1.1	SOBRE LOS AUTORES	6
1.2	AGRADECIMIENTOS	7
2	LA NATURALEZA DE LA ZONA COSTERA.....	8
2.1	FACTORES HIDRODINÁMICOS.....	10
2.2	MORFOLOGÍA COSTERA	16
2.2.1	COSTAS ROCOSAS.....	16
2.2.2	COSTAS DE MATERIAL NO CONSOLIDADO	19
2.3	FORMACIONES GEOMORFOLÓGICAS TÍPICAS	21
2.3.1	COSTAS DE ACUMULACIÓN.....	22
2.3.2	COSTAS DE ABLASIÓN	35
2.3.3	OTROS TIPOS DE COSTAS INEXISTENTES EN CHILE	38
2.4	LOS PROCESOS EROSIVOS EN LA COSTA.....	40
2.4.1	FUENTES DE SEDIMENTOS.....	40
2.4.2	MECANISMO DE TRANSPORTE EN LA ZONA ROMPIENTE.....	40
2.4.3	MECANISMO DE TRANSPORTE A NIVEL DE GRANOS	42
2.4.4	TÉCNICAS DE ESTUDIO DE EVOLUCIÓN DE PLAYAS	46
2.4.5	EROSION NATURAL EN LAS COSTAS	55
2.4.6	EROSION PROVOCADA POR EL HOMBRE	58
3	EL BORDE COSTERO DE CHILE.....	62
3.1	MARCO DE REFERENCIA	62
3.2	DEMOGRAFÍA.....	65
3.3	CLIMATOLOGÍA	66
3.3.1	EL CLIMA EN CHILE.....	67
3.3.2	LA CLIMATOLOGIA DEL SECTOR ENTRE ARICA A COQUIMBO.....	69
3.3.3	SECTOR ENTRE COQUIMBO AL GOLFO DE PENAS	70
3.3.4	SECTOR ENTRE EL GOLFO DE PENAS HASTA CABO DE HORNO.....	70
3.4	OCEANOGRAFÍA.....	72
3.4.1	CORRIENTES OCEÁNICAS	72
3.4.2	MAREA ASTRONÓMICA	74
3.4.3	MAREA METEOROLÓGICA Y METEOTUNAMIS.....	79
3.4.4	OLEAJE.....	81
3.4.5	TSUNAMIS.....	82
3.4.6	NIVEL MEDIO DEL MAR	84
3.5	GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA	86
3.5.1	FORMACIÓN DEL RELIEVE.....	86
3.5.2	UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS PRINCIPALES	88
3.5.3	ACTIVIDAD SÍSMICA Y VOLCÁNICA	91
3.5.4	GEOMORFOLOGÍA LITORAL	93
3.5.5	GEOMORFOLOGIA SUBMARINA	102
3.6	SECTOR ANTARTICO CHILENO	104
4	LAS OBRAS MARÍTIMAS	107
4.1	CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LAS OBRAS MARÍTIMAS	107
4.2	DISEÑO DE OBRAS MARÍTIMAS	111
4.3	CONSTRUCCIÓN DE OBRAS MARÍTIMAS	116

4.4	OBRAS DE GESTIÓN Y PROTECCIÓN DEL LITORAL	117
4.4.1	MÉTODOS NO ESTRUCTURALES	117
4.4.2	MÉTODOS ESTRUCTURALES	121
4.5	ASPECTOS ECONÓMICOS	129
4.5.1	BENEFICIOS DE LA PROTECCIÓN DEL LITORAL	129
4.5.2	COSTOS DE LA PROTECCIÓN DEL LITORAL	130
4.6	EL SISTEMA PORTUARIO CHILENO	132
5	EL CAMBIO CLIMÁTICO	136
5.1	LA ATMÓSFERA	136
5.2	EL CAMBIO CLIMÁTICO	137
5.3	TENDENCIAS Y PROYECCIONES	139
5.3.1	TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR	140
5.3.2	ACIDIFICACIÓN	141
5.3.3	NIVEL MEDIO DEL MAR	141
5.3.4	OLEAJE	143
5.4	IMPACTOS EN EL BORDE COSTERO DE CHILE	144
5.4.1	PLAYAS	145
5.4.2	HUMEDALES COSTEROS	148
5.4.3	PUERTOS	149
5.4.4	CIUDADES COSTERAS	151
5.5	ADAPTACIÓN	153
5.5.1	MEJORA EN LOS REGISTROS OCEANOGRÁFICOS	153
5.5.2	EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN ZONAS COSTERAS	153
5.5.3	DISEÑOS DE INGENIERÍA CONSIDERANDO EL CAMBIO CLIMÁTICO	154
6	RECURSOS MINERALES Y ENERGÉTICOS	155
6.1	EXPLOTACIÓN DE ÁRIDOS	155
6.2	EXPLOTACIÓN DE MINERALES	155
6.3	EXPLOTACIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES	156
6.4	LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES	158
6.5	LAS ENERGÍAS MARINAS	159
6.5.1	LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ	160
6.5.2	LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ	162
6.5.3	LA ENERGÍA EÓLICA EN LA COSTA	164
6.6	LOS HIDRATOS DE METANO	165
7	EL ORDENAMIENTO JURÍDICO Y GESTIÓN DE LA ZONA COSTERA	170
7.1	PRINCIPIOS GENERALES	170
7.2	NORMATIVA INTERNACIONAL EN RESGUARDO DEL MEDIO MARINO Y COSTERO ...	170
7.2.1	LAS PRIMERAS NORMAS DESTINADAS A LA PROTECCIÓN DEL MEDIO MARINO	171
7.2.2	LA DETERMINACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD POR LA CONTAMINACIÓN MARINA	175
7.2.3	EL RECONOCIMIENTO DE LA PROTECCIÓN DE LA BIODIVERSIDAD MARINA	177
7.3	DEFINICIONES RELEVANTES PARA LA GESTIÓN DE LA COSTA	182
7.4	LA GESTIÓN DE LA COSTA	185
7.4.1	PARTICULARIDADES DEL TERRITORIO COSTERO	186
7.4.2	ESTRATEGIAS DE MANEJO Y GESTIÓN DE LA ZONA COSTERA	187
7.4.3	ACTORES RELEVANTES EN LA GESTIÓN DE LA ZONA COSTERA	189
7.5	ASPECTOS DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL	194
8	BIBLIOGRAFIA	201



1 PRÓLOGO

En estas últimas décadas, el Océano ha sido objeto de numerosas acciones de orden político, jurídicas, científicas y tecnológicas, las cuales han permitido comprender su naturaleza y mejorar las capacidades de gestión de sus recursos. Estas acciones se produjeron por circunstancias tales como el crecimiento demográfico, la expansión de la industria energética, la explotación de las pesquerías, el transporte marítimo y la intensificación de otros usos militares. En ocasiones, estas acciones han provocado impactantes desastres ambientales, generando una creciente sensibilidad sobre el deterioro del océano y de sus recursos.

El extraordinario auge que ha tenido el uso de la zona costera, por otra parte, ha captado el interés por la formulación de modelos orientados a su ordenación y gestión. Desde el punto de vista físico-natural, la zona costera es un área que alberga medios de distinta naturaleza (litosfera, hidrosfera salada y atmósfera) que interactúan en forma muy dinámica y compleja generando cambios biológicos, geomorfológicos y químicos en diferentes escalas temporales y espaciales. Ello es particularmente cierto en áreas marinas de alta productividad y gran diversidad biológica, las cuales son muy vulnerables. Desde el punto de vista de su gestión y ordenamiento, por otra parte, la zona costera es un espacio escaso y por lo mismo muy deseado debido, entre otros, a la existencia de recursos naturales, clima benigno, fertilidad en los suelos, convergencia de usos y actividades, concentración de los asentamientos humanos e infraestructuras y valor paisajístico. Finalmente, desde el punto de vista de los aspectos jurídicos y administrativos, es preciso destacar el carácter público de la mayoría de las zonas costeras del mundo, como así mismo la convergencia de numerosos organismos públicos que actúan en ella tanto en lo referido a las escalas nacionales, regionales como sectoriales. De allí la diversidad en las fórmulas para su administración y gestión.

El propósito del texto es poner a disposición de estudiantes y estudiosos de distintos campos disciplinarios -desde las ciencias ambientales hasta la ingeniería- un panorama de las cuestiones que surgen como consecuencia del cada día mayor uso de los litorales, facilitar un mejor entendimiento de los procesos naturales y de los eventuales conflictos que se generan con la intensificación del uso del borde costero. A falta de textos introductorios en español sobre la disciplina, hemos procurado escribir este libro con ejemplos en Chile y mediante un lenguaje simple, evitando el uso de fórmulas que pueden encontrarse en la literatura especializada.

En la actualidad el "libro" es un artefacto transportable en formato digital que cabe en un bolsillo. El acceso de dispositivos de lectura permite además la conexión instantánea y desde cualquier parte del mundo con poderosas bases de datos que incluyen películas e imágenes de alta calidad. Por ello, se incluyen recomendaciones de búsqueda en el portal Youtube que permite visualizar una gran cantidad de videos de naturaleza pública los cuales facilitan la comprensión y complementan las materias tratadas.

Ilustración 1: Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Naturales, Universidad de Valparaíso



Fuente: Gentileza de David Jara.

La Escuela de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso, en su permanente afán de contribuir hacia la mirada formativa y en la investigación asociada a las disciplinas que se preocupan del mar y su borde costero, ha querido apoyar esta importante publicación al desarrollo de los intereses marítimos del país con responsabilidad ético-profesional, social y medio ambiental. La Escuela, formada en la estación Montemar en 2001 (Ilustración 1), sigue formando profesionales de pregrado y postgrado en estas materias.

1.1 SOBRE LOS AUTORES

El Doctor Esteban Morales es graduado en la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso (PUCV). Sus estudios de especialidad y grados superiores fueron realizados en Europa, Estados Unidos de Norteamérica y Chile. Fue alumno de la Escuela Práctica de Altos Estudios de París, Francia (1971-1972) y efectuó cursos de post grado en el Instituto Oceanográfico de Mónaco (1970-1971). Su grado de Doctor lo obtuvo en la Universidad de París-Sorbonne (1972). En 1978 fue distinguido como Profesor de Intercambio en Estados Unidos con apoyo de la Fundación Fulbright. En 2007 se graduó como Magister en Historia y Relaciones Internacionales en la PUCV. Su actividad docente se ha desarrollado a partir de 1972 tanto en la PUCV, como en la Pontificia Universidad Católica de Chile, Universidad de Chile, Universidad Andrés Bello, Universidad de Valparaíso y en la Armada de Chile. Se desempeñó como profesor visitante en la Universidad José Tadeo Lozano, Colombia, en la Armada de Colombia y en la Universidad Estatal de Oregón, en Estados Unidos. En 1972 asume como el primer Director de la nascente carrera de Oceanografía en Chile. Durante quince años (1984-1999) se desempeñó como Decano de la Facultad de Recursos Naturales de la PUCV. En el año 2012 asume como Director del Centro de Estudios Oceánicos y Antárticos de la Universidad Andrés Bello. Ha participado en numerosas campañas oceanográficas en varios océanos del mundo. Es autor de estudios y publicaciones científicas en revistas tanto nacionales como extranjeras. Ha publicado siete textos utilizados en docencia universitaria. Entre 1974 a 1982 fue conductor y productor de programas relacionados con las ciencias del mar en televisión abierta. Ha sido Investigador y director de proyectos FONDECYT (4), FONDEF (2) y MESESUP (1). Es miembro del Comité Oceanográfico Nacional, representante ante la Autoridad de los Fondos Marinos de las Naciones Unidas con sede en Jamaica y asesor del Ministerio de Relaciones Exteriores de Chile en la problemática de la "Plataforma Continental Extendida" de las Naciones Unidas. Su última y más relevante actividad científica fue la de dirigir entre 2000 y 2004 el proyecto "Hidratos Submarinos. Una nueva fuente de energía para el siglo XXI". Es submarinista Honorario de la Armada de Chile.

El Doctor Patricio Winckler es Ingeniero Civil de la Universidad Técnica Federico Santa María (2002) y ha efectuado estudios de postrado en España, Finlandia, Inglaterra y Estados Unidos. Después de un inicio en la consultoría, ingresó en 2005 al grupo de ingeniería oceánica en la Universidad de Valparaíso, y en 2015 obtuvo un PhD in Civil and Environmental Engineering en Cornell University, Estados Unidos, bajo la dirección del Profesor Philip Liu. Ha sido investigador visitante en la Universidad Nacional de Singapur (2016) y en la Universidad de Tokio (2017-8), financiado por becas nacionales e internacionales (Fulbright, The Matsumae Foundation, Beca Alpha). Sus intereses abarcan una amplia gama de temas relacionados con la ingeniería costera, desde las condiciones ambientales hasta el diseño de obras costeras. A la fecha ha estado involucrado en más de 70 proyectos de ingeniería marítima y ha participado de varios comités consultivos para definir normas de diseño de edificaciones, políticas asociadas a riesgos naturales y aspectos relacionados con el impacto del cambio climático en el territorio costero. Ha escrito decenas de publicaciones, participado como coautor de un libro y de varios capítulos de libros y ofrecido conferencias en Estados Unidos, México, España, Korea, Singapur, Colombia, Perú y Japón. Es investigador asociado de CIGIDEN, y del Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos

del Ambiente Costero (COSTAR) de la Universidad de Valparaíso. Hoy comparte sus labores académicas con el arte. Sugiero visitar www.patowinckler.cl para ver algo de aquello.

El Profesor Mario Herrera posee es Biólogo Marino y Abogado, con diversas especializaciones y post títulos en materias sobre Gestión Integrada del Borde Costero, Derecho Ambiental e Instrumentos Jurídicos Internacionales para el Medio Ambiente, y derecho marítimo ambiental. En el ámbito laboral, el Profesor Herrera, se desempeñado por sobre 26 años en actividades técnicas y jurídicas asociadas al medio ambiente marítimo y al derecho ambiental marítimo, conjugándolos con su experiencia en biología marina y en el campo del derecho, tanto en el ámbito público, como asesor de la Autoridad Marítima Nacional, y en el terreno privado, inicialmente como investigador científico de instituciones ligadas al medio ambiente y de la Autoridad Marítima, y posteriormente como Subgerente de Medio Ambiente y Sustentabilidad de una consultora ambiental, y actualmente, como Gerente Legal de un Holding de empresas ligadas al quehacer medioambiental y de la innovación, en el ejercicio particular, como abogado litigante, y académico de la Universidad Valparaíso y de la Academia de Guerra Naval. Entre sus logros, han estado la contribución que ha efectuado en diversos instrumentos ambientales nacionales, la participación en la redacción de importantes convenios internacionales asociados a la contaminación de los buques, y más recientemente en la colaboración del capítulo sobre Ecosistemas Marinos y Borde Costero del Informe País, Estado del Medio Ambiente, Comparación entre los años 1999 y 2015, que fue coordinado por el Instituto de Políticas Públicas de la Universidad de Chile, entre otros. A su vez, el Profesor Herrera, además, ha sostenido un activa participación en la difusión del derecho ambiental y marítimo, a través de diversos artículos que han sido publicados fuera y dentro de Chile, tales como "Lecturas sobre Derecho del Medio Ambiente" y "Lecturas sobre Derecho de las Aguas", en Colombia, y colaborando en el Informe País: Estado del Medio Ambiente en Chile. Comparación 1999-2015", publicado en el 2017 por la Universidad de Chile.

1.2 AGRADECIMIENTOS

Este libro surge de conversaciones con muchos académicos, alumnos y profesionales que se desvelan por temas relacionados con la costa, el mar y el cambio climático. Agradecemos a los miembros del Equipo de Ingeniería Civil Oceánica y a los miembros del recientemente formado Centro de Observación Marino para estudios de Riesgos del Ambiente Costero (COSTAR-UV). Agradecemos al Profesor Erick Mas, de Tohoku University, por la información de los Tetraneos utilizados en Misaki port, a Patricio Rivera y David Jara por fotos de la Estación de Montemar y a Manuel Contreras-López, por las fotos de El Yali y Cartagena.

Mario Herrera desea agradecer, en primer lugar, a mis dos coautores, los profesores Winckler y Morales, quienes gentilmente me extendieron la invitación para a colaborarles en esta noble experiencia de transmitir nuestra experiencia al resguardo de nuestra costa nacional y de su medio marino. En segundo lugar, y con mayor emoción, deseo agradecer la paciencia y apoyo que siempre he recibido de mis tres mujeres, Marcela, María Jesús y María Paz, las cuales son mi soporte emocional para las aventuras que emprendo cada día.

2 LA NATURALEZA DE LA ZONA COSTERA

Para entender el comportamiento del territorio donde se desarrolla alguna obra o actividad costera, es necesario tener presente que dicho espacio está sometido a incesantes interacciones por parte de la litosfera, la atmósfera, la hidrosfera y la biosfera. Por ello, para cada intervención se requiere examinar cuidadosamente el rol tanto individual como de conjunto de cada uno de estos componentes a través de sus diversas manifestaciones.

Del mismo modo es necesario tener presente que la línea que delimita el espacio marítimo del terrestre no es inmutable, ya que dos veces al día (y una en ciertos mares), sube y baja al compás de la marea. Estas fluctuaciones diarias se acompañan de otras que ocurren a escala geológica y climática cuyos periodos más largos las hacen imperceptibles al ojo humano, y otras de período corto -como el oleaje- las cuales se generan por la interacción entre la atmósfera y el océano. El borde costero y la plataforma submarina adyacentes modifican determinan la mayor o menor intensidad de estos procesos. A estas acciones mecánicas fundamentales (como el oleaje, las corrientes y las mareas, entre otros), se unen los ataques derivados de las salinas aguas marinas y de los organismos marinos que por sus acciones químicas y biológicas constituyen un aspecto importante de la erosión de las costas.

El incremento del uso del territorio costero ha obligado a acuñar el concepto de “Borde Costero” o “Zona Costera”, que se define como una franja del litoral, de anchura variable, resultante del contacto entre la naturaleza y las actividades humanas que se desarrollan en terreno bajo la influencia del mar. A pesar de ser limitado, este espacio permite múltiples usos, que pueden ser exclusivos, excluyentes o compatibles, lo cual obliga a definir el mejor empleo de los mismos a fin de procurar un uso sustentable.

El desarrollo de la industria inmobiliaria, los cultivos marinos, la energía, el turismo y la actividad portuaria, por mencionar algunas de las actividades más recurrentes, ha promovido la ocurrencia creciente de controversias que se generan entre los diferentes usuarios. Para que los distintos usos de la zona costera sean compatibles, se requiere que tanto la Autoridad como los usuarios estén informados tanto de la complejidad de los fenómenos que allí ocurren, como de los potenciales efectos del cambio climático global en las costas. En efecto, los estudios científicos que abordan las variaciones del nivel del mar evidencian un aumento sostenido a nivel global, que a largo plazo puede ser responsable de una erosión costera generalizada en sectores poblados. A los efectos climáticos se deben agregar los movimientos tectónicos que pueden modificar en cuestión de minutos las cotas de nivel, tal como ha ocurrido en las costas de Chile luego de los terremotos de 1960 y 2010, entre otros (Ilustración 2). En suma, los fenómenos vinculados a los grandes sistemas de la estructura planetaria y su manifestación a escalas menores promueven la erosión y las inundaciones costeras a lo largo de toda la costa chilena, con independencia de su ubicación. En efecto, por ser un complejo sistema de interface entre litosfera, hidrosfera y atmósfera, la costa ostenta uno de los mayores índices de riesgo como consecuencia de altos niveles de peligro y vulnerabilidad.

El borde costero marca entonces una difusa transición entre el mar y la tierra que se produce en aguas poco profundas, sobre las plataformas sumergidas y los estuarios de todo el mundo. Los fenómenos costeros se inician allí con la mezcla, la separación y el transporte de los sedimentos, nutrientes y aguas continentales que escurren desde la tierra. Las olas, los vientos, las corrientes, el nivel del mar, el tipo de sedimento, la configuración de la costa y la batimetría adyacente se encargan entonces de modular la configuración de la costa. El movimiento de los sedimentos a lo largo de las orillas es sorprendentemente importante y pueden alcanzar volúmenes superiores al millón de metros cúbicos por año.

Ilustración 2: Erosión costera en playa Punta de Lobos, Pichilemu, activada inicialmente por la subsidencia ocurrida por los sismos del 27 de febrero y 11 de marzo de 2010, y acrecentada por cambios en el patrón de oleaje y la marea.



Fuente: Archivos personales.

Las aguas costeras albergan el quehacer cotidiano de la humanidad, pues en ellas se emplazan los puertos, las instalaciones que proveen energía y combustible, y actividades como la acuicultura, la recreación y la habitación humana. Albergan, asimismo, la mayor parte de la vida animal y vegetal del mar, además de depósitos petrolíferos, de gas y minerales. La rápida expansión del uso del mar por el hombre, el creciente tráfico sobre su superficie y el acceso a regiones cada vez más alejadas y profundas de los océanos está relacionada, en su mayor parte, con fenómenos que tienen lugar en las aguas de poca profundidad. A su vez, las acciones humanas, como la descarga de desechos, la pesca, el dragado y las construcciones de estructuras costeras, tienen su influencia en la ribera oceánica.

Las aguas costeras cubren las plataformas continentales de todo el mundo, abarcando un área de 29 millones de kilómetros cuadrados, que corresponde a un 5,5 % de la superficie del globo y un 8 % del área de los océanos. Las aguas someras están limitadas por líneas de costa que totalizan unos 400.000 kilómetros de longitud, con accidentes geográficos como las grandes bahías, los estuarios, los deltas, las lagunas litorales, los manglares, las dunas costeras y los arrecifes coralinos.

En el límite oceánico de las plataformas continentales se produce un talud continental escarpado y profundo. Por convención, se considera que la profundidad que limita el borde externo de la plataforma es de 200 metros, aunque en algunos lugares puede llegar a los 400 metros, como en la Antártica chilena. A nivel mundial, la profundidad media de las plataformas continentales es de unos

130 metros y su ancho alcanza al promedio de unos 74 kilómetros. En la actualidad, la delimitación de la zona costera, el suelo y subsuelo está sujeta a normativas legales tanto nacionales como internacionales, cada vez más complejas y que se han generado por los países ribereños, con la intención de salvaguardar y proteger, los numerosos recursos allí presentes.



2.1 FACTORES HIDRODINÁMICOS

En las costas abiertas al Océano Pacífico, el modelado de los paisajes costeros se debe en gran medida a los agentes mecánicos. Las olas hacen la mayor parte del trabajo geomorfológico, el cual se complementa con el accionar de las mareas y el viento. El rol de las mareas es el de cambiar el nivel del agua en forma periódica, lo que permite que la energía de las olas actúe sobre una amplitud vertical superior al del promedio del nivel del mar en cada sector. Las mareas generan también corrientes que erosionan, transportan y depositan los materiales no consolidados a lo largo de las costas.

Las olas no son otra cosa que una forma de conversión de la energía solar que se genera por el calentamiento diferencial de la atmósfera y del mar debido a la radiación solar. Ello produce corrientes atmosféricas que generan vientos, los que transportan la energía térmica desde los trópicos hacia los polos. El viento así generado produce olas superficiales que se desplazan en la misma dirección que sopla el viento. Cuando este incide sobre la superficie del agua, origina pequeñas ondulaciones que pueden acabar en olas las cuales transportan la energía eólica absorbida por el océano a grandes distancias, impactando finalmente a las costas, donde disipan su energía. Esta disipación de energía se manifiesta en la modificación de la costa, y es posible que en el futuro ella se transforme en una de las principales fuentes de energía limpia y segura.

Ilustración 3: El ciclo de vida del oleaje. En su nacimiento (izquierda), el oleaje es altamente irregular, con una gran cantidad de frecuencias, direcciones y alturas. Lejos de la zona de generación (centro) el mar de fondo es bastante más ordenado. En su deceso (derecha), el oleaje disipa energía en forma de turbulencia, moviendo arenas en costas arenosas y generando abrasión en costas rocosas.



Fuente: Archivos personales.

La mayor parte de la energía que llega a la costa está contenida en el oleaje generado por el viento, el cual asume dos modalidades comunes:

- Las marejadas (sea), que se caracterizan por olas sumamente irregulares y de cresta aguzada, comprendiendo una vasta escala de longitudes y frecuencias.
- El mar de fondo (swell), de apariencia más regular, semejante a una sinusoide, y que por lo general se encuentra fuera del alcance de los sistemas eólicos locales.

Cada ola tiene una longitud la cual puede medirse en base al período del oleaje, definido como el tiempo en que dos crestas de olas sucesivas pasan por un punto. Por su parte, la altura de la ola depende de la velocidad del viento, el fetch y la duración del viento. El fetch corresponde a la distancia que recorren las olas durante su formación. Cuando el fetch es grande, las olas son muy largas y sus crestas están muy separadas entre sí, mientras que si el fetch es pequeño, las olas son cortas y son de menor longitud. Por su parte la duración del viento es también importante en el tamaño de las olas pues cuanto más tiempo se mantenga un viento en una misma dirección, mayores olas generará.

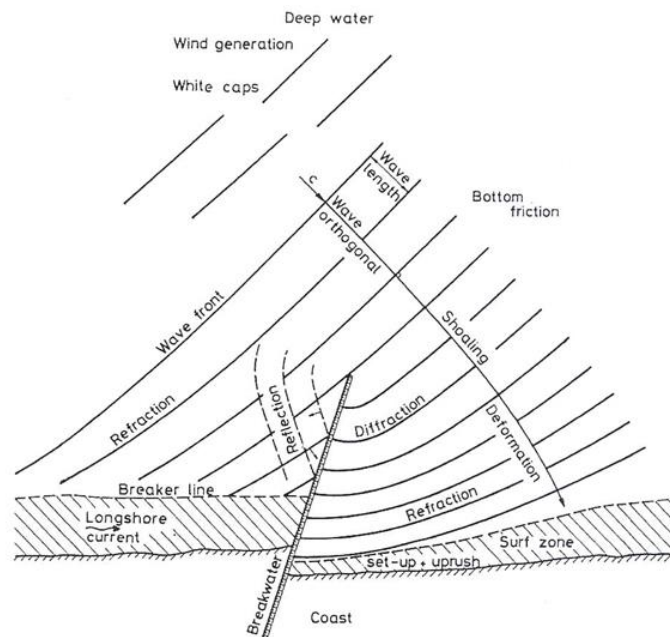
A medida que las olas se aproximan a la costa se transforman dramáticamente debido a los siguientes procesos (Ilustración 4):

- Asomeramiento
- Refracción
- Reflexión
- Difracción
- Rotura

En efecto, al disminuir la profundidad del agua y actuar el **asomeramiento**, el movimiento orbital de las partículas de agua es deformado pasando de una forma circular en aguas profundas, a una elipse en aguas intermedias y finalmente a un movimiento lineal de un lado a otro antes de romper.

Si las olas se aproximan con un ángulo (distinto del perpendicular) a la costa, se **refractan** cambiando su dirección y altura. La refracción es un fenómeno que relaciona la celeridad con la dirección de propagación de la onda, condicionando tanto la distribución de la energía como su dirección al arribar a la costa. Cuando una onda se aproxima en sentido oblicuo a la costa, las secciones del frente de ola "sienten" el fondo y experimentan una desviación progresiva que tiende a alinear al frente con los veriles. Un estado de mar conformado por un amplio espectro de ondas experimenta una refracción gradual de acuerdo a las componentes de frecuencia del mismo. Las bahías generan una divergencia de líneas de flujo y por ende, una disminución de la densidad de energía y la altura de ola, en tanto que en las penínsulas se propicia una amplificación en la altura de ola. La refracción del oleaje es la base para dos aspectos importantes de la evolución costera. El primero, es que las penínsulas tienden a ser erosionadas más rápidamente que los sectores adyacentes, como las bahías o las costas rectas, transformando una línea de costa inicialmente irregular a una más suave. El segundo es el de generar corrientes que transportan el sedimento erosionado de los promontorios a las caletas adyacentes, donde forman playas.

Ilustración 4: Procesos costeros que experimenta el oleaje en la costa

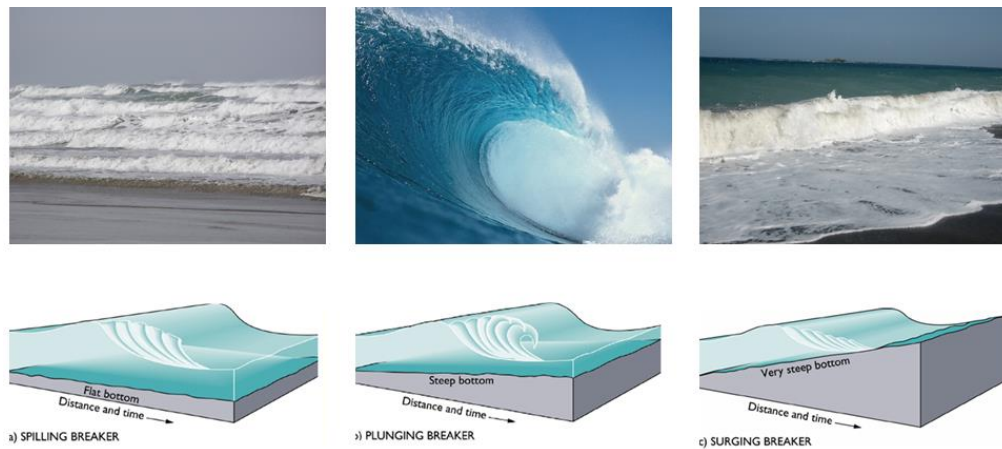


Fuente: Svendsen, I and Jonsson, I (1976). Hydrodynamics of Coastal Regions

La **difracción** es el efecto por el cual la energía se transmite a lo largo del frente producto de obstáculos naturales y antrópicos en el sentido de propagación de la onda. Cuando el oleaje es interrumpido por dichos obstáculos, se desvía en forma gradual de acuerdo a los diferentes períodos existentes en el tren de olas. En presencia de estos obstáculos, el oleaje también experimenta **reflexión**, invirtiendo su sentido de propagación.

La **rotura** se produce cuando la profundidad es comparable con la altura del oleaje. La pendiente de la playa genera distintos tipos de rompientes (Ilustración 5). En playas de pendiente suave, se produce una rotura en "descrestamiento" (*spilling*), que se caracteriza por la abundancia de espuma en las crestas y varias líneas de rompientes que cubren una zona extensa (Ilustración 8). La primera línea de rompiente puede estar a varios centenares de metros costa afuera y el agua entrante puede generar olas más bajas que vuelven a romper a profundidades menores. Por su parte, la rotura "en voluta" (*plunging*) se caracteriza por un vórtice de aire al romperse, bastante violento y que pierde su energía rápidamente. Por lo general, este tipo de rotura arrastra más sedimentos que la anterior. Finalmente la rotura "en colapso" (*surging*) se produce en zonas de pendiente muy pronunciada y se caracteriza por un arrastre de sedimento menor. Esta clasificación de rompientes también depende de la pendiente de las olas, esto es, la razón entre su altura y longitud.

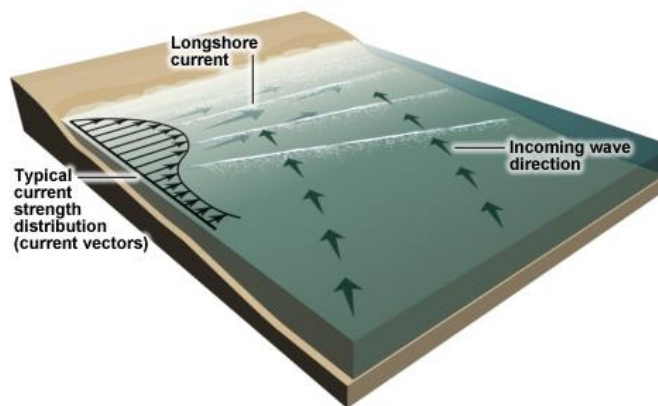
Ilustración 5: Tipo de rotura de oleaje



Fuente: Archivos personales.

En las costas arenosas, la rompiente transporta los sedimentos del fondo, comenzando de esta forma la conversión de energía del oleaje al trabajo geomorfológico que ocurre en profundidades inferiores a 20 metros. En costas rocosas o aquellas constituidas por defensas de origen antrópico, en contraste, la energía del oleaje se refleja y disipa en forma impulsiva contra las estructuras. Las mayores presiones son ejercidas cuando la cresta comprime el aire contenido entre el frente de ola y una pared vertical o acantilado. Este impacto es de corta duración pero su persistencia sostenida durante el ataque de muchas olas puede desplazar bloques de roca y desgastar las partículas del lecho.

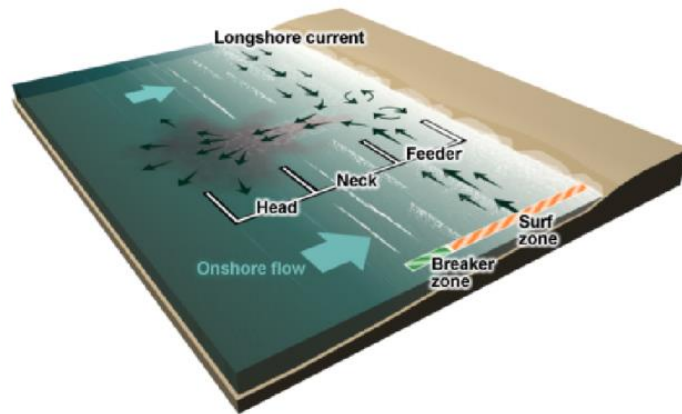
Ilustración 6: Corrientes litorales (longshore currents).



Fuente: The Comet program.

La zona de rompiente se caracteriza por fenómenos hidrodinámicos y morfológicos bastante complejos. Las corrientes generadas por el oleaje, denominadas corrientes litorales (*longshore currents*), están limitadas a la zona de resaca y se disipan rápidamente hacia el mar fuera de la línea de rompientes (Ilustración 6). Estas corrientes son generadas por las olas que rompen en un ángulo oblicuo en la costa y constituyen el mecanismo más eficiente de transporte de sedimentos en las playas.

Ilustración 7: Corrientes de retorno (rip currents).



Fuente: The Comet program.

Las corrientes de retorno (*rip currents*), por su parte, se producen cuando, debido a la incidencia casi normal del oleaje, se acumula un exceso de agua en las barras litorales que busca entonces una brecha para fluir al mar (Ilustración 7 e Ilustración 8). Estas corrientes transportan sedimentos a mayores profundidades, pero con volúmenes menores que las corrientes litorales debido a su relativo confinamiento y poca duración.

Ilustración 8: Rotura tipo spilling en Mehuín, Chile.



Fuente: Archivos personales.

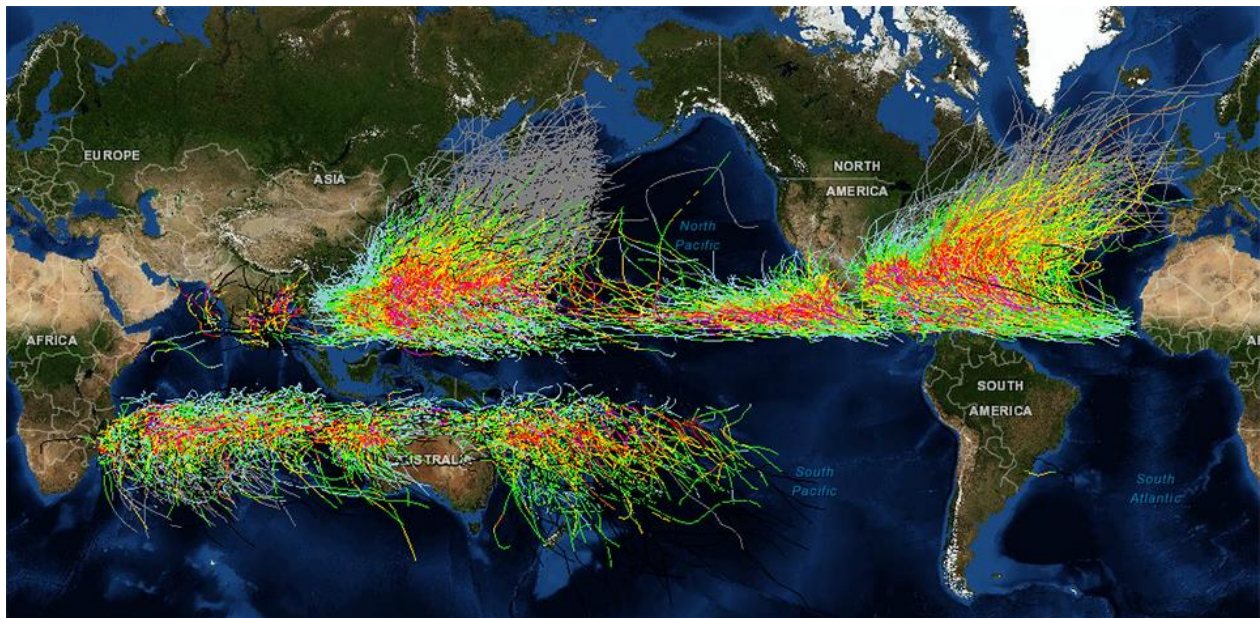
En algunos litorales se debe de tener presente además, la ocurrencia de tempestades, huracanes, ciclones, tifones¹ y tsunamis que amplifican las condiciones eólicas, modifican las

¹ Los huracanes, ciclones y tifones son esencialmente el mismo fenómeno meteorológico cuya denominación varía según el lugar donde se producen.

condiciones del oleaje y ocasionan aumentos breves del nivel del mar. Los huracanes, en todo caso, no afectan a las costas chilenas, como se observa en la.

Durante las tormentas, la baja presión atmosférica en combinación con el viento soplando hacia la costa, generan un aumento del nivel del agua, conocido como marea meteorológica. La magnitud de este fenómeno es determinada por la magnitud del viento, la velocidad de propagación de la tormenta y la batimetría del sector. Los huracanes, por ejemplo, se generan en una región de convergencia intertropical del hemisferio norte entre agosto y septiembre. Estos se inician bajo la influencia de los vientos del Este y los Alisios, girando hacia la derecha o la izquierda según el hemisferio. El viento rotatorio alcanza velocidades del orden de 250 kilómetros por hora en tanto que el centro de la baja presión puede elevar el nivel del mar en unos 5 a 7 metros. Si la marea meteorológica o el huracán coinciden además con una pleamar en lugares con estuarios y golfos relativamente cerrados, puede producirse un gran incremento del oleaje, inundando las ciudades y provocando cambios permanentes de la línea costera.

Ilustración 9: Tracks de los huracanes



Fuente: NOAA.



**cómo y porque se forman las olas
el oleaje del mar**

2.2 MORFOLOGÍA COSTERA

Morfológicamente, la línea de la costa se modifica constantemente como consecuencia del permanente contacto dinámico entre el aire, la tierra y la acción incesante de los movimientos del mar. Esta morfología, también, es consecuencia de un complejo conjunto de procesos geológicos. Así, en su momento, se vio afectada por la elevación del nivel del mar que se manifestó a partir de la fusión de los glaciares al final del Pleistoceno. Esta circunstancia permitió el ingreso de las aguas oceánicas con toda su dinámica hacia un paisaje existente que también había sido anteriormente afectado por las glaciaciones, la actividad volcánica y la tectónica. El litoral que hoy contemplamos además está siendo modificado por la acción antrópica dado el incremento del uso del borde costero y por el impacto del cambio climático. En esta sección introducimos conceptos fundamentales sobre las costas rocosas y las costas de material no consolidado.

2.2.1 COSTAS ROCOSAS

Los materiales que conforman la línea de la costa están constituidos por **rocas duras** (granito, basalto y dolerita), **rocas metamórficas** (gneis y esquisto) y **rocas sedimentarias** (cuarcita, pedernal, piedra caliza y creta). Concurren a su configuración, asimismo, rocas más blandas que son principalmente **formaciones sedimentarias**, como las areniscas poco cementadas, el limo y el esquisto arcilloso y los sedimentos compuestos de arcilla. Los limos y arcillas son materiales blandos y de grano fino, que cuando están humedecidos se conocen como lodo. También están presentes la arena y grava, que son acumulaciones sedimentarias sin cemento natural. Alrededor del 95% de las rocas ígneas del mundo son granitos y basaltos. El 5% restante son clases muy variadas de origen volcánico, que por lo general están compuestas por minerales que se disgregan rápidamente en el ambiente marino.

Las costas en que predominan rocas duras se caracterizan por una resistencia a la erosión mecánica del oleaje y al desgaste químico del agua de mar, con una tasa de descomposición muy baja. Ello ocurre en las costas acantiladas, que conforman una característica esencialmente permanente del paisaje. Hay costas sumamente estables en que la línea costera se encuentra a menos de 100 kilómetros de donde se encontraba 10 millones de años atrás.

Sin embargo, sin importar su condición, las rocas están sujetas a un proceso llamado **intemperismo**, que consiste en su disgregación por la acción química o física resultante de su exposición al aire y agua. Por ejemplo, a pesar de ser una roca muy dura que subsiste casi sin alteraciones a escala humana, el granito se disgrega gradualmente en un período largo de tiempo; sobre todo cuando se halla en terrenos húmedos ricos en materias orgánicas. En las zonas costeras el intemperismo se produce en tres situaciones: i) el **proceso subaéreo normal** de las superficies terrestres próximas a la costa, ii) el **intemperismo submarino** debido al agua marina y iii) el **intemperismo intermareal** de la zona de transición creada por la acción de las olas, humedad alternante y la acción de la espuma. Una manifestación del intemperismo es el de una verdadera corrosión debido a la impregnación de la roca por la espuma salina. De hecho, el desarrollo de cristales de sal produce la separación de los granos rocosos, abriendo alvéolos en las rocas.

Ilustración 10: Costa rocosa en Montemar, Viña del Mar. Al fondo, las dunas colgantes de Concón.



Fuente: Gentileza de David Jara.

El intemperismo submarino es mucho más lento que el subaéreo. Por su parte, las rocas de carbonatos, como el mármol, la piedra caliza, la creta y las formaciones de coral son especialmente susceptibles al intemperismo biológico. A ello se agrega que ciertos organismos segregan ácido que acelera la tasa de intemperismo del carbonato en varios órdenes de magnitud. Esos organismos medran en la zona intermareal, que es la que sufre los mayores efectos del sol, la turbulencia y los nutrientes. Por ello la zona intermareal es erosionada más rápidamente por agentes mecánicos, químicos y biológicos que otras de la costa rocosa.

Las rocas de carbonatos, como el mármol, la piedra caliza, la creta y las formaciones de coral son especialmente susceptibles al intemperismo biológico. A ello se agrega que ciertos organismos segregan ácido que acelera la tasa de intemperismo del carbonato en varios órdenes de magnitud. Esos organismos medran en la zona intermareal, que es la que sufre los mayores efectos del sol, la turbulencia y los nutrientes. Por ello la zona intermareal es erosionada más rápidamente por agentes mecánicos, químicos y biológicos que otras de la costa rocosa.

Las costas en que predominan rocas duras se caracterizan por una resistencia a la erosión mecánica del oleaje y al desgaste químico del agua de mar, con una tasa de descomposición muy baja. Ello ocurre en las costas acantiladas, que conforman una característica esencialmente permanente del paisaje. Hay costas sumamente estables en que la línea costera se encuentra a menos de 100 kilómetros de donde se encontraba 10 millones de años atrás.

Además de las costas de roca dura, hay acantilados en que el material consiste en piedra caliza y grava poco consolidada. Estos sectores de rocas blandas son algo más estables que las costas arenosas; pero están sujetas a la socavación del oleaje y a deslizamientos masivos de terreno desencadenados por terremotos. Un ejemplo de este tipo de deslizamientos causó el tsunami del fiordo Aysén, en las costas más australes de Chile, el 21 de Abril de 2007, y que terminó con la vida de 10 personas. La resistencia de un acantilado rocoso a la erosión por oleaje depende en gran parte de la estructura geológica de las rocas, por lo menos en el mismo grado que depende de la dureza de las mismas.

Cuando esos riscos se degradan, quedan reducidos a un ángulo de moderada estabilidad. Para garantizar su estabilidad, pueden ser protegidos con vegetación para que las raíces de las plantas ligen el material blando. De este modo los riscos degradados pueden mantenerse estables por largos períodos, siempre que el mar no socave la base y que se impida que hombres o los animales destruyan la vegetación.

La estructura de las rocas puede ser masiva como en el granito, que muy lentamente sufre los efectos del intemperismo. En ese caso el oleaje roe las rocas formando grandes bloques y capas, pero las fracturas naturales del lecho rocoso son pocas y la tasa de erosión es insignificante a escala humana. Por su parte, el granito que haya sido fracturado por movimientos geológicos del pasado tiene muchos planos débiles, y las olas ejercen un efecto hidráulico comprimiendo aire en los intersticios y rajando los bloques. Este mismo fenómeno se observa en las escolleras y diques hechos por el hombre, en cuyo caso el impacto de las olas ha movido bloques de hasta 20 toneladas. Otras rocas duras tales como el basalto suelen estar dispuestas en estructuras columnares duraderas, pero las uniones entre las columnas sufren los efectos de un lento intemperismo.

Las formaciones de resistencia intermedia y baja suelen ser las rocas sedimentarias que en su origen fueron depositadas como sedimento suelto y blando en las aguas de los mares, ríos y lagos. En el curso de las eras geológicas, esos sedimentos se han endurecido y litificado, es decir petrificado. Estos sedimentos endurecidos pueden datar de un período superior a los 30 millones de años, siendo usualmente más duros mientras más antiguos. Los que han sufrido los efectos del movimiento que dio forma a las montañas, por lo general, experimentaron un calentamiento que los hizo recrystalizar con el consiguiente endurecimiento, constituyendo hoy las llamadas rocas metamórficas.

La estructura de estas rocas es en general estratificada en capas. Depositadas originalmente sobre el lecho marino y levantadas por los movimientos tectónicos, estas rocas son erosionadas por el oleaje, formando escalinatas. Las capas más blandas se disgregan primero, provocando el colapso y la ruptura de las capas más duras. En los movimientos geológicos que han acompañado la formación de las montañas, los estratos son a menudo plegados, combados y ladeados. Como resultado de ello, muchos acantilados exhiben bandas oblicuas y hasta verticales. También en este caso las olas desintegran las capas blandas y luego las capas duras.

Al estudiar el potencial de deslizamiento de tales acantilados es importante determinar si la inclinación es hacia el mar o hacia la tierra. La inclinación hacia el mar favorece los deslizamientos de capas de dureza moderada, hasta que queda expuesta una capa de cierta dureza. Tras ello el acantilado se mantiene estable, a menos que otras acciones naturales o antrópicas aumenten su inclinación, en cuyo caso el seccionamiento puede debilitar la capa fuerte y provocar un deslizamiento. En contraste, cuando la inclinación es hacia la tierra, el acantilado suele ser mucho más escarpado y con las estratificaciones expuestas. Como las capas se inclinan hacia el propio acantilado, la tendencia al deslizamiento es mínima salvo que la masa rocosa esté seccionada transversalmente por grandes fracturas o fallas.

2.2.2 COSTAS DE MATERIAL NO CONSOLIDADO

Los materiales costeros constituidos por material no consolidado son los más expuestos a la erosión. Este es el caso de las playas, que consisten en gran parte por acumulaciones de material suelto, constituidos por cantos rodados o por arenas. Existen diversas escalas para clasificar el material no consolidado. De acuerdo a sus dimensiones, por ejemplo, estos materiales se pueden clasificar en **cantos**, con diámetros que exceden los 25 [mm], **arenas**, entre los 10 y los 25 [mm], **gravillas**, entre 5 a 10 [mm] y **gránulos**, entre 2 y 5 [mm]. Por su parte, las arenas se pueden clasificar en **arenas gruesas** entre 2 [mm] y 0,2 [mm] bajo lo cual hay polvo y los elementos más pequeños como los coloides, con tamaños inferiores a 0,001 [mm]. Otro ejemplo de clasificación es la Escala Wenworth (Ilustración 11).

Ilustración 11: Clasificación de sedimentos según Wentworth y la norma alemana DIN 4022.

[mm]	Wentworth/Doeglas	DIN 4022	[mm]
	Bloques		
63	muy grueso	Gravas	63
32	grueso		20
16	medio		6,3
8	fino		2
4	muy fino	Arena	0,63
2	muy grueso		0,2
1	grueso		0,063
0,5	medio		0,02
0,25	fino	Silt o Limo	0,0063
0,125	muy fino		0,002
0,063	muy grueso		
0,032	grueso		
0,016	medio	Arcilla	
0,008	fino		
0,004	muy fino		
0,002			

Fuente: <http://www.geovirtual2.cl>

La procedencia del material granular es muy variada, pudiendo ser transportado por el oleaje rompiente, las corrientes fluviales, o aportado desde antiguos glaciares cuaternarios.

Las arenas que se depositan en las playas pueden también ser transportadas por el viento (transporte eólico) y/o provenir de los ríos. Su composición mineralógica presenta una proporción de material marino a veces muy superior a la mineral, como es el caso de playas muy blancas y brillantes, de grano redondeado, y origen coralino.

En las playas, el material dominante es el cuarzo y el diámetro de los granos oscila entre 0,2 y 2 [mm]. Los de mayor tamaño corresponden al diámetro más frecuente de los cristales de cuarzo presentes en el granito. Normalmente, los granos inferiores a 0,2 [mm] son agudos debido al choque mecánico de los granos. Además del cuarzo, las arenas contienen minerales como mica, granate, anfíboles, piroxenos y minerales pesados, los cuales en algunas regiones son explotados comercialmente.

En ocasiones, los cantos rodados en costas sometidas a un fuerte oleaje ocupan la parte más alta de la playa o costa rocosa, producto de marejadas de gran intensidad. Pero en general, se

extienden en toda la zona de batida por el mar, llegando en lugares a sustituir a la arena en playas de reducida extensión enmarcadas por paredes rocosas. Este tipo de formaciones se conoce como playa de gravas (Ilustración 12).

Ilustración 12: Playa de gravas.



Fuente: Archivos personales.

Según sean las condiciones de resistencia al oleaje, los cantos rodados y gravas dan origen a acumulaciones de variada configuración topográfica, constituyendo en oportunidades istmos que enlazan islas rocosas a la tierra firme. Si estas restingas, cordones litorales o flechas llegan a cubrirse por dunas de arena reciben el nombre italiano de **tómbolo** (Ilustración 13). En el siglo XX el ser humano utilizó diques exentos artificiales que formaban tómbolos para combatir la erosión costera, práctica que está en retroceso debido al impacto ambiental asociado.

Las arenas normalmente provienen del continente a través de los ríos, de los fondos arenosos de la plataforma continental o de los farellones costeros. La permanencia de la arena en la playa depende de la mecánica del oleaje, el cual presenta marcadas diferencias entre invierno y verano. En efecto, al comenzar el otoño, las marejadas pueden arrastrar grandes volúmenes de arena, que se deposita en forma de barras a profundidades relativamente grandes. Al llegar la primavera, la playa vuelve a rellenarse con la arena de las barras, donde ha permanecido varios meses. Este ciclo de arena, activado por el denominado **transporte transversal**, puede variar si las corrientes litorales aportan o quitan arena a la playa.

La arena cenagosa está constituida por granitos de cuarzo y otros minerales revestidos por una cubierta de cieno. Este material es compacto, homogéneo y se encuentra en zonas abrigadas a las que la turbulencia del oleaje no es suficientemente alta para mantener partículas sólidas en suspensión. Las orillas de los estuarios que afloran durante la marea baja están constituidas por una matriz sedimentológica de arena, finos y elementos coloidales adheridos, que se caracteriza por ser blanda, de superficie tersa y sin vegetación. En los Países Bajos esta matriz de suelo se denomina como "slikke". En algunos lugares, la presencia de vegetaciones halófilas (que crecen en ambientes salinos) acaba por convertir la uniforme tersura del cieno en una estructura granulosa y porosa a la que la lluvia se encarga de extraer el exceso de sal. La vegetación invade estos espacios, los cuales en los Países Bajos o Bangladesh han sido convertidos en campos de cultivo, "polders".

Ilustración 13: Tómbola natural formado en playa Totoralillo.



Fuente: <http://www.visitchile.com/es/playa-totoralillo/>



2.3 FORMACIONES GEOMORFOLÓGICAS TÍPICAS

La costa corresponde a una transición entre la tierra emergida y el mar y se caracteriza, en Chile, por formaciones geomorfológicas entre las que destacan las playas, las dunas, los estuarios, los fiordos, los humedales, los deltas, los acantilados y las plataformas de abrasión. En otros lugares del mundo la costa se caracteriza también por la presencia de rías, formaciones coralinas y manglares. En esta sección introducimos cada una de estas formaciones.

Los litorales presentan una amplia gama de formas que se han estructurado tanto en función de la erosión marina como de las condiciones bioclimáticas existentes en cada uno de los paisajes geográficos del planeta. En consecuencia, la acción del mar sobre las formas iniciales ha permitido definir los diferentes tipos de costa tales como las denominadas formas de ablación que resultan de la acción destructiva del mar sobre los relieves costeros y las formas de acumulación que son el resultado de la sedimentación marina o de la actividad de los seres vivos.

Las costas de material no consolidado, constituyen en general las denominadas costas de acumulación y se localizan en costas bajas o adosadas a costas rocosas, presentando una diversidad que responde a las condiciones que presenta el medio que la ha acogido. Están representadas por los estuarios, los humedales, los deltas, las playas y las dunas litorales.

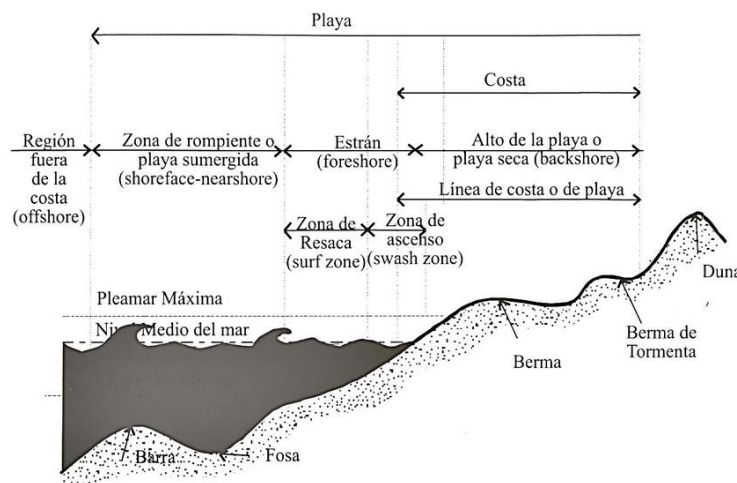
La línea de la costa en Chile se caracteriza por formaciones geomorfológicas entre las que destacan las playas, las dunas, los estuarios, los fiordos, los humedales, los deltas, los acantilados y las plataformas de abrasión. No se encuentran en Chile otros tipos de costa como las rías o manglares. Las formaciones coralinas, por su parte, son muy poco representativas en el Chile continental. A continuación se describen los diferentes tipos de costa presentes en el mundo, con énfasis en aquellas existentes en Chile.

2.3.1 COSTAS DE ACUMULACIÓN

2.3.1.1 Playas

Las playas son extensiones relativamente planas de arena o grava, ubicadas a orillas del océano, ríos o lagos, donde se transfiere la energía oceánica a tierra firme. Su constitución granular hace que sean susceptibles de modificar su forma como respuesta a las condiciones del oleaje, las mareas, las corrientes y la disponibilidad sedimentaria. Una playa es una acumulación de materiales que pueden ir desde arenas muy finas a gravas o cantos rodados. Se suele considerar como playa a la parte que queda al descubierto entre la pleamar y la bajamar, pero su extensión es mayor. Generalmente una playa comprende la playa sumergida, el estrán, la playa seca y la parte superior que se constituye por dunas o cordones litorales (Ilustración 14). La parte superior puede estar marcada por escalones relacionados con las sucesivas posiciones de la pleamar o con los efectos de marejadas anteriores.

Ilustración 14: Definición de partes de un perfil de playa.



Fuente: Vergara (2011).

El material que da pie a estas formaciones es suministrado por los aportes fluviales (Ilustración 15), por los acantilados o por la disociación realizada por el mar a partir de rocas previamente desagregadas. En su granulometría² pueden coincidir arenas, gravas y guijarros. Si la producción de residuos acumulados procede en gran parte del continente, el mar ejerce, a su vez, una acción de modelado generando arenas brillantes, guijarros redondeados y, en ocasiones, ovoides. Una selección muy elaborada sitúa las fases finas en la parte inferior de la playa y las de mayor tamaño en la parte superior, al nivel de las pleamares.

En costas bajas, los materiales aportados por el oleaje tienden a colmatar entrantes, haciendo desaparecer las irregularidades e iniciando el desarrollo de playas largas y rectilíneas. Cuando estas entrantes son de mayor dimensión, se desarrollan playas de acumulaciones tales como las "flechas litorales" (Ilustración 15a,b,c) que se edifican con los aportes de la deriva litoral

² La granulometría es la medición del tamaño de los granos de una matriz sedimentaria y el cálculo de la frecuencia de cada tamaño previsto en una escala granulométrica. Su objetivo es establecer el origen de los sedimentos y sus propiedades mecánicas.

procedentes de la playa o de los ríos colindantes. Cuando estos materiales se depositan, forman acumulaciones denominadas como "barras de antecosta" las cuales, en el tiempo, emergen tomando una forma de flecha con su punta alargada en el mismo sentido que la playa de la cual proceden estos sedimentos. Su forma de gancho hacia el interior se explica por la refracción sobre un fondo más bajo según se alejen del punto de enlace. Al generarse posteriores episodios de deriva, se van generando nuevas flechas, conformando sectores litorales de flechas compuestas. Otro tipo de acumulación litoral son los denominados cordones litorales libres, o "lidos", los cuales son acumulaciones construidas por el oleaje por delante de la costa en cadenas alargadas de varias decenas de kilómetros. Estos presentan dibujos arqueados como resultado del retroceso frontal más rápido que en los sectores extremos y generalmente son interrumpidos por pasos que permiten la circulación de corrientes de marea y el vertido de las aguas continentales.

Existen otras formaciones arenosas que se forman por la presencia de estructuras de origen antrópico cuyo objetivo es retener arena (Ilustración 16d,e), generar un encauzamiento de la desembocadura de un río (Ilustración 16f) o albergar un puerto (Ilustración 16g). Cuando una playa está asociada a un relieve litoral rocoso, suele ubicarse al fondo de una ensenada (Ilustración 16h,i), donde desarrolla un arco armonioso entre los acantilados que les sirven de apoyo. También existen playas en forma de media luna esculpidas en cordones litorales (Ilustración 16j) y playas que consisten en series de hundimientos regulares, abiertos hacia el mar, separados por crestas de bordes afilados en forma de cuerno.

Ilustración 15: El aporte de sedimentos proviene principalmente de los ríos. En la foto, la desembocadura del río Chaihuín y la flecha formada por la combinación de sedimentos abundantes y el oleaje, tomada desde un dron.

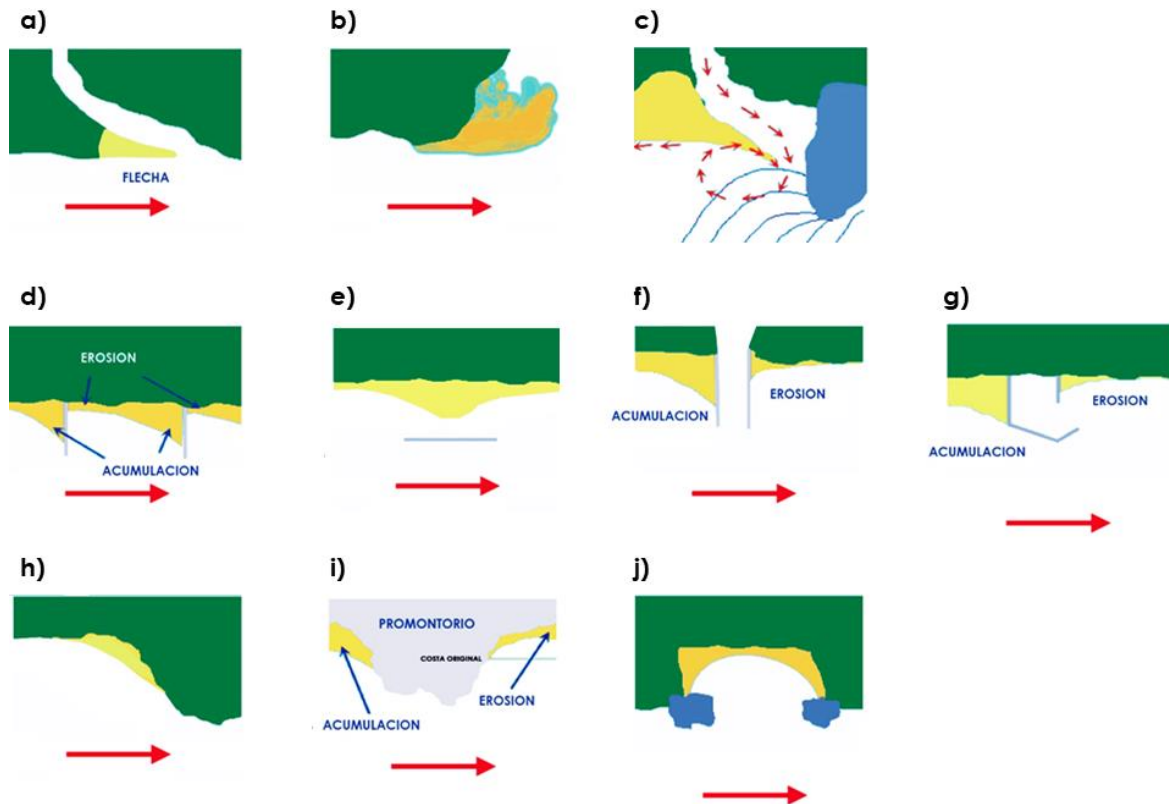


Fuente: Archivos personales.

A veces las playas no están plenamente ligadas a tierra firme, y forman lagunas en su parte posterior. Las dunas coronan frecuentemente la cresta del cordón y pueden formar, tras él,

verdaderos campos de vegetación. Los litorales de costa rocosa pueden ofrecer las más variadas formas de acumulación, pero la mayor variedad se da cuando los materiales de soporte son blandos y abundantes. Ello ocurre en llanuras y colinas glaciares, en áreas con rocas volcánicas poco consolidadas o en sectores con material coralino.

Ilustración 16: Diferentes formaciones arenosas en las costas. La flecha roja indica la dirección del transporte neto de sedimentos. Las formas verdes corresponden a terrenos estables. Las formas amarillas representan las zonas de acumulación. Las líneas en gris corresponden a estructuras de origen antrópico.



Fuente: Elaboración propia a partir de una presentación del Profesor José María Medina.

Mecanismos de transporte de sedimentos

El complejo movimiento de sedimentos en la zona de rotura del oleaje se puede entender como la combinación de un transporte transversal a la costa (*cross-shore transport*), controlado por el oleaje y un transporte longitudinal (*longshore transport*) debido a las corrientes inducidas por el oleaje, también conocido como deriva litoral. En las costas expuestas al océano, el aporte de sedimentos es principalmente resultado de la deriva litoral generada por el oleaje rompiendo en forma oblicua respecto de la costa y, en forma secundaria, por las corrientes mareales, de menor magnitud. Las condiciones del depósito se hallan influenciadas por la batimetría costera y por la presencia de obstáculos, como bajíos o escollos, que pueden reducir la capacidad de transporte. Naturalmente, la batimetría condiciona los procesos costeros que experimenta el oleaje (refracción, asomeramiento, difracción, reflexión y rotura) modificando su dirección, altura y potencial de transporte sedimentario.

La dinámica de evolución se halla profundamente marcada en las playas, a diferencia de lo que sucede en los acantilados, donde los procesos erosivos ocurren a escalas de tiempo mayores. En

estos últimos, el oleaje, las mareas y otros procesos hidrodinámicos de mayor complejidad originan el desgaste de la roca y la generación de arenas y guijarros.

Ilustración 17: Playa Reñaca en una mañana de otoño previa a la época de temporales.



Fuente: Archivos personales.

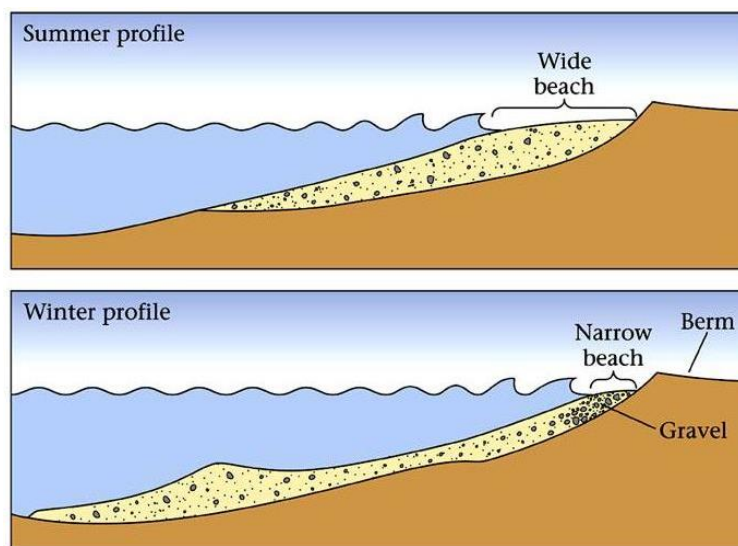
La influencia del oleaje

En los tramos de costa más abiertos al mar, las playas tienden a orientarse ortogonalmente a la dirección del oleaje, dado que esta condición origina la mínima deriva y permite la sedimentación de materiales más estables. En caso que el oleaje sea de baja energía y el viento fuerte, entonces este puede también jugar un rol en la forma en planta de la playa.

El ángulo de incidencia del oleaje tiene gran importancia en el sistema de circulación costera. Cuando hay una dirección de oleaje dominante, se produce un transporte neto de sedimentos a lo largo de la costa producto de las corrientes litorales (Ilustración 6), que se conoce como deriva o transporte litoral. Este proceso es fundamental en la formación de flechas litorales e islas barrera. La dirección del oleaje puede variar según la ubicación de las perturbaciones atmosféricas que lo generan, originando ocasionalmente componentes opuestas de deriva litoral en la misma playa a lo largo del año. Si la playa está en equilibrio dinámico, las diferentes componentes del transporte litoral se compensan. Si, por el contrario, predomina una dirección de oleaje, se produce la deriva litoral.

Durante el año, el clima de oleaje se modifica producto de las estaciones, siendo más intenso en invierno que en verano. Ello trae repercusiones en la forma de las playas. Por lo general, durante el oleaje menos energético del verano se produce un transporte neto de arenas hacia la parte alta de la playa, formando lo que se conoce como un “perfil de verano” con un ancho de playa relativamente grande (Ilustración 18, arriba). Cuando se producen marejadas en invierno, el oleaje en combinación con la marea meteorológica ponen en movimiento una fracción importante de los materiales de una playa, originando el adelgazamiento en la zona emergida y la formación de barras a profundidades mayores. Estas barras, características de un “perfil de invierno” (Ilustración 18, abajo), reducen la profundidad y promueven la rotura de las olas grandes que ocurren durante las tormentas. El hecho de que la playa modifique su forma ante cambios en las condiciones hidrodinámicas hace de este un sistema adaptativo y natural muy eficiente.

Ilustración 18: Perfiles de playa típicos de verano (arriba) e invierno (abajo).



Fuente: Marshak, S. (2011). Earth: Portrait of a Planet: Fourth International Student Edition.

Las playas con suministro adecuado de arena presentan bermas bien formadas (Ilustración 14), mientras que las deficitarias carecen prácticamente de ellas o muestran un límite erosivo entre la playa seca, la zona de rompiente y la berma. La berma suele destruirse total o parcialmente durante los temporales y, en general, presenta un perfil erosivo en invierno. La estructura interna de la berma consiste en laminación paralela horizontal o inclinada hacia el mar. En detalle, las láminas pueden mostrar micro secuencias de grano selección positiva cuyo espesor oscila entre 1 y 5 cm, cada una de las cuales registra un episodio de inundación de la berma. La berma crece pues, por un proceso de gradación vertical y alcanza una cota más elevada que el resto de la playa. El agua puede cubrir la berma en pleamar o cuando hay marea meteorológica, pero según va creciendo, es cada vez más difícil que permanezca sumergida. La tendencia a la acreción, no obstante, puede revertirse durante las marejadas.

En la superficie de la berma, se aprecian los restos de antiguas bermas y canales residuales generados después de que las barras se soldaran a aquellas. En conjunto forman las crestas de playa, separadas por suaves depresiones. En períodos de buen tiempo la berma está sujeta a una importante deflexión eólica por las brisas y vientos diurnos. El resultado es un activo transporte de arena que se acumula en las dunas costeras o es arrastrado hasta el mar, dejando tras de sí la acumulación de cantos y restos. Un factor limitante es el encostramiento superficial debido a las

sales que deja el agua al evaporarse, el cual protege la superficie y permite la acumulación de arena en ripples eólicos. Cuando se produce una nueva inundación, estas superficies suelen quedar marcadas por niveles de huecos de burbujas de aire.

La influencia de la marea

La posición de la rompiente varía con el nivel de la marea astronómica, que oscila con una periodicidad de 12.42 horas, que es el tiempo entre dos pleamares sucesivas en las costas chilenas. Es así que durante la pleamar, la línea de costa se desplaza hacia tierra y durante la bajamar lo hace hacia el mar (Ilustración 19). Ello permite al oleaje actuar sobre una zona más amplia, modificando continuamente la configuración de la playa.

Ilustración 19: Influencia de la marea astronómica en la rompiente del oleaje.



Fuente: <http://michaelmarten.com/books.php>.

Otro factor es la acción de los temporales locales que apilan agua sobre la costa producto de la marea meteorológica (Ilustración 20), permitiendo al oleaje atacar zonas altas de la playa y remover sedimento que las corrientes de resaca arrastran mar adentro. Las mareas pueden dar lugar a un amplio abanico de corrientes oblicuas o incluso paralelas a la costa que son usualmente menores en magnitud a las corrientes generadas por el oleaje y se caracterizan por tener mayor regularidad en el tiempo.

Ilustración 20: Marea meteorológica en Montemar, Viña del Mar.



Fuente: Gentileza de Mauricio Molina.

Estados morfodinámicos de las playas

La caracterización modal de los perfiles de verano e invierno descrita anteriormente puede complementarse con una descripción más detallada mediante los estados morfodinámicos que relacionan la forma de una playa -tanto en perfil como en planta- con la hidrodinámica local. De acuerdo a la clasificación de Wright y Short (1984), las playas se pueden clasificar, en función de parámetros del oleaje y de las características del sedimento, en i) disipativa, ii) de barra longitudinal y seno, iii) de barra y playa rítmicas iv) de barra transversal y corriente de retorno, v) de barra-canaleta o terraza de bajamar y vi) reflejante, según se muestra en la Ilustración 21. Conforme el oleaje y la marea se modifican en diferentes escalas de tiempo, también se modifica el estado morfodinámico de la playa.



Ilustración 21: Estados morfodinámicos de playas sin marea, según la clasificación de Wright y Short (1984).

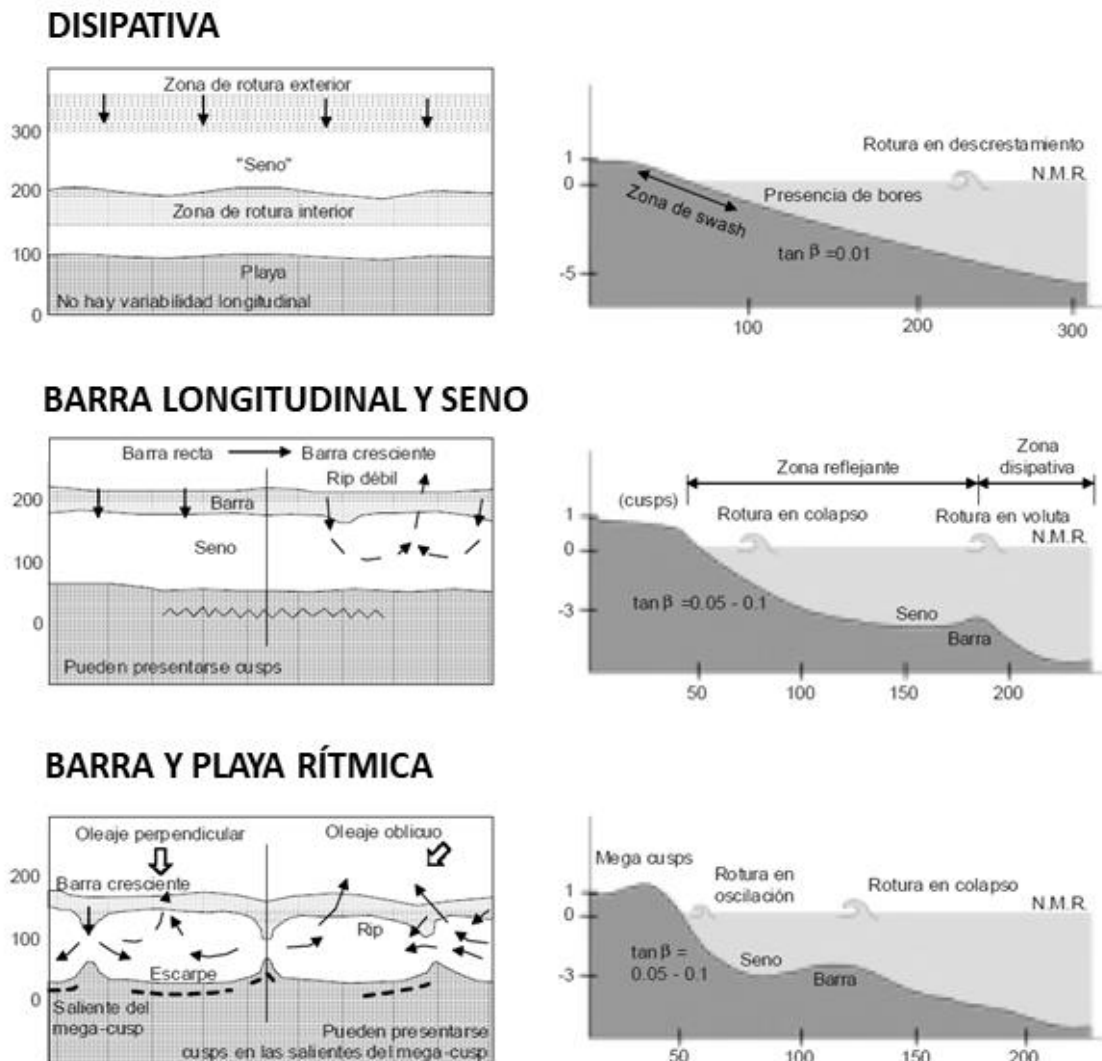
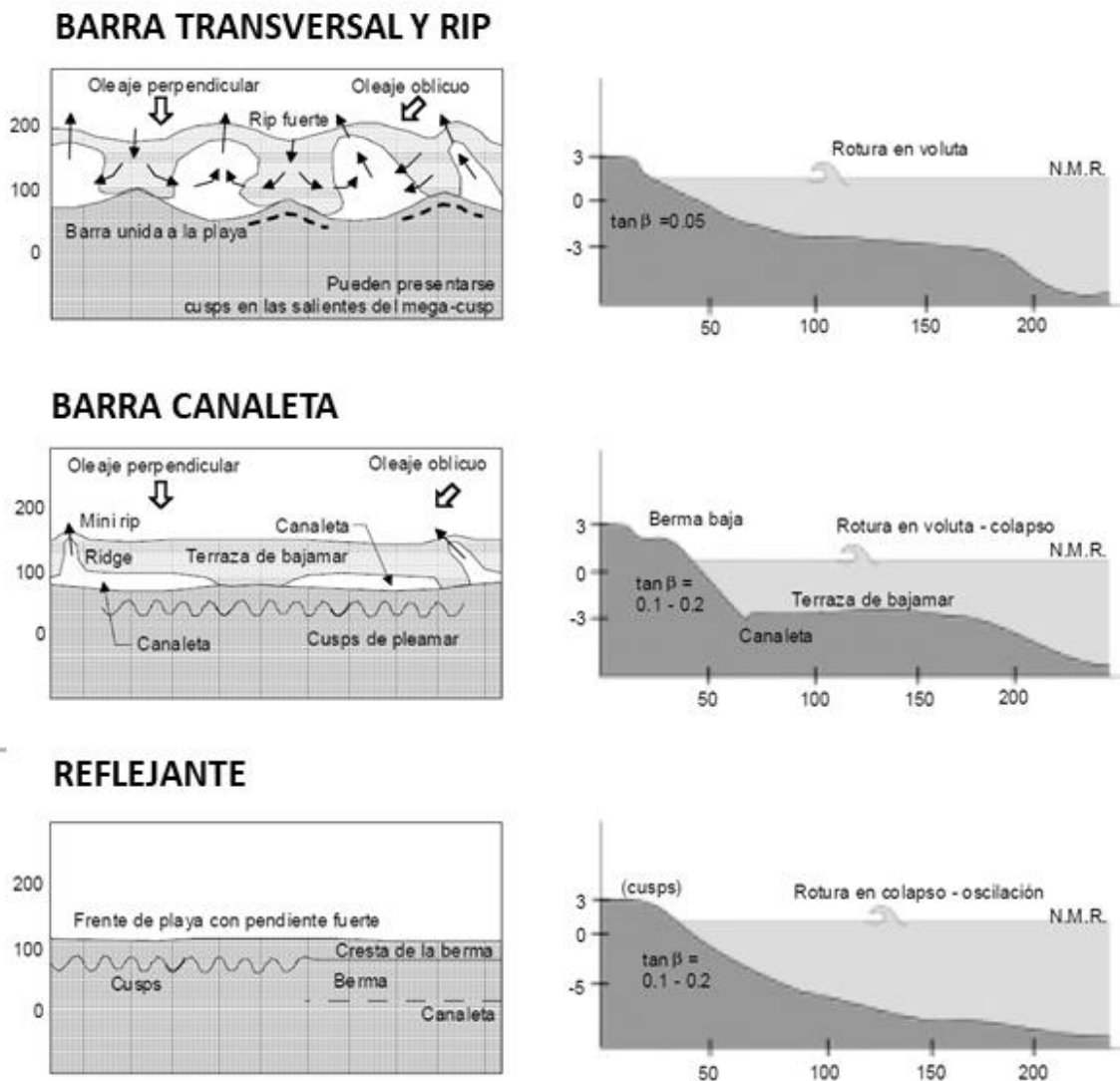


Ilustración 20 (cont.): Estados morfodinámicos de playas sin marea, según la clasificación de Wright y Short (1984).



Fuente: GIOC (2002).

2.3.1.2 Dunas

Las dunas se conforman por depósitos superficiales sueltos y no consolidados de sedimento fino. Se generan cuando, debido a la presencia de obstáculos topográficos, rocas o arbustos, el viento disminuye su velocidad y capacidad de transporte eólico, promoviendo la acumulación de las partículas en sectores calmos. A medida que el proceso persiste, el depósito inicial se incrementa en volumen y se transforma en una duna. Este proceso es promovido cuando las condiciones litorales crean un medio árido a causa del viento y las salpicaduras de aguas salada, que reducen la vegetación continental. Basta con que en las inmediaciones de la costa exista abundante material fluvial, arena cristalina o arena caliza proveniente de morrenas desarrolladas durante las recesiones cuaternarias del nivel del mar. Cuando el rango de mareas es débil, las dunas también pueden construirse a partir de la arena que la deriva litoral, provocada por el oleaje rompiente, suministra a las playas. En cualquier caso, la presencia de dunas es producto de una estrecha

relación con procesos geomorfológicos anteriores. Las condiciones de edificación de las dunas litorales se diferencian de aquellas ubicadas en regiones secas al interior del continente pues en la costa, el viento suele ser menos estable, la arena más húmeda y su movilización más difícil.

Ilustración 22: Dunas fósiles de Reñaca en la década de los cincuentas. Hoy esta duna se encuentra flanqueada por decenas de edificios de veinte pisos y más.



Fuente: Autor desconocido. Foto adquirida de un vendedor en Avenida Valparaíso.

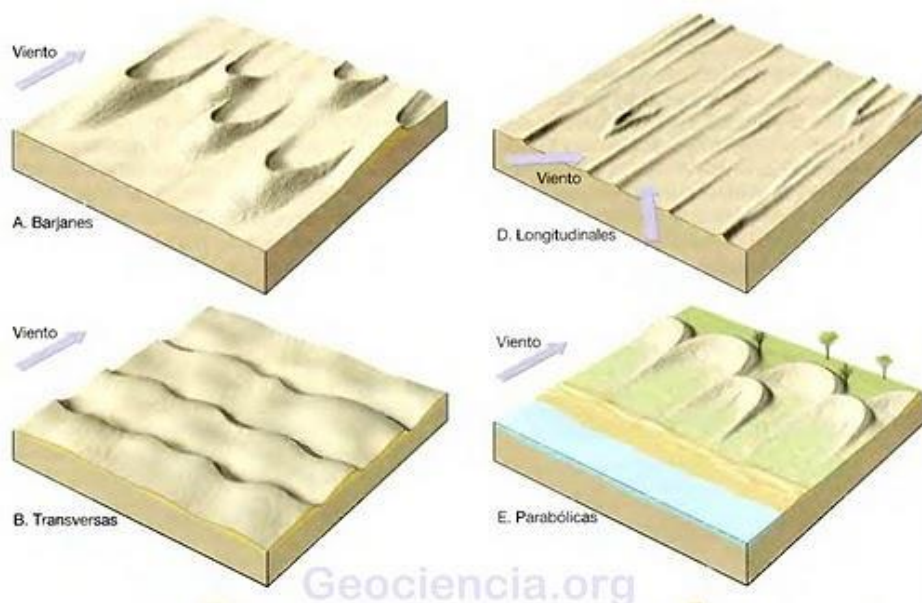
En general, las dunas adoptan modelos relativamente estables cuyo tamaño y forma dependen de la dirección y velocidad del viento, la disponibilidad de arena y la cantidad de vegetación. Las dunas costeras suelen ser frágiles debido al viento que abre brechas que desarraigan la vegetación en un proceso progresivo. Una clasificación estandarizada de las dunas se presenta en la Ilustración 23 y se resume a continuación:

- Las **dunas semilunares** (Barjanes) tienen crestas que se mueven continuamente apuntando a sotavento³. Este tipo de dunas se forma cuando los suministros de arena son limitados. Se desplazan en forma lenta, con migraciones anuales de hasta 15 metros medidas en terreno. Su forma de media luna es casi simétrica si el viento se mantiene relativamente constante, pero cuando eso no ocurre, una de las puntas se hace mayor que la otra.

³ Sotavento es la parte hacia donde se dirige el viento respecto a un punto u objeto.

- Las **dunas longitudinales** (*seifs*) se caracterizan por la forma alargada en la dirección de sotavento. Al parecer este tipo de dunas procede de barjanes que se han anclado parcialmente. Observaciones en terreno han mostrado que formas de tamaño menor, como una pequeña vegetación, pueden retener el extremo de un barján, permitiendo al otro extremo girar libremente y convertirse en un *seif*.
- Las **dunas transversas** se forman en regiones donde los vientos predominantes son uniformes, la vegetación es dispersa y hay abundante arena. Estas dunas conforman una serie de crestas separadas por depresiones y orientadas en ángulo recto con respecto al viento predominante.
- Las **dunas parabólicas** se establecen donde la vegetación cubre parcialmente el terreno, los vientos soplan al interior y el suministro de arena es abundante. Su forma se asemeja a la de los barjanes, excepto en que sus extremos apuntan en dirección contraria al viento. Por su parte, si la cubierta vegetal se interrumpe en algún punto, la deflación crea una depresión. De esta forma la arena es transportada fuera de la depresión y depositada como un reborde curvo que se hace más alto a medida que la depresión aumenta.
- Existen otros tipos de dunas como las denominadas de **estrella** o de **dorso de ballena**.

Ilustración 23: Tipos de dunas.



Fuente: Geociencia.org.

Finalmente, cuando aumenta la distancia entre la duna y la línea de costa, la disminución de la velocidad del viento, la menor alimentación de arena y el aumento de la vegetación frenan el avance de las dunas, fijándolas.

 **YouTube** Las Dunas como se forman

2.3.1.3 Estuarios

Los estuarios corresponden al tramo terminal de los sistemas fluviales y son propios de costas con mareas. De hecho su nombre, de raíz latina "aestus", significa marea. Desde el punto de vista morfológico, un estuario asocia procesos continentales y fluviales con fenómenos hidrodinámicos como la penetración de las mareas y el encuentro del agua de mar con aguas fluviales. De todo ello resulta un medio caracterizado por una extraordinaria biodiversidad. La mezcla del agua salada del mar con el agua dulce de la cuenca, afecta la sedimentación y la ecología, generando contrastes entre la parte alta y la parte baja del río, el cauce y los bordes del estuario. Invadidos por el mar, los estuarios se diferencian de los deltas, en los cuales, a la inversa, es el río y sus sedimentos son los que penetran en el mar. Difieren asimismo de los fiordos, que son valles sumergidos cuya topografía está marcada por el movimiento de los glaciares.

Los estuarios clásicos tienen forma de embudo, es decir, se van abriendo progresivamente hacia la desembocadura. Pueden presentar sinuosidades menores en el curso, pero siempre subordinadas al progresivo ensanchamiento. Proporcionalmente, la influencia del río es menos importante que el plano de agua de la bahía que se abre al mar. En esta configuración, la penetración de la marea puede ser muy profunda, amplificándose tierra adentro. En casos donde los estuarios están encajonados río abajo por una angostura, franjas de rocas más resistentes o *horsts*, el río desemboca en una rada abrigada. La penetración de la marea se ve, por consiguiente, obstaculizada y la subida de las aguas mitigada en la rada. Finalmente, existen estuarios cerrados por una flecha de arena que emerge entre cabos y que crea una rada en la que desembocan las aguas continentales.



2.3.1.4 Humedales

Los humedales costeros, usualmente separados del océano por playas o cordones de arena denominados también flechas, juegan un rol fundamental en los ciclos reproductivos de algunos animales, el crecimiento de las plantas y la subsistencia de comunidades en sus riberas (Jaramillo et al., 2015). Estos sistemas son parte de un delicado equilibrio en el cual el hombre y el cambio climático juegan un rol fundamental. En la sección 5.4.2 se profundiza sobre el impacto del cambio climático en los humedales chilenos.

Ilustración 24: Humedal en Cartagena, Región de Valparaíso.



Fuente; Gentileza de Manuel Contreras-López.

2.3.1.5 Deltas

Un delta es un depósito de sedimentos en forma triangular formado en la desembocadura de un río que vierte sus aguas aun lago o al mar. El depósito de sedimentos se debe a aluviones que acumulan material donde el río encuentra al mar. Los sedimentos depositados pueden avanzar sobre la plataforma sumergida en una extensión considerable. Normalmente se desarrollan en zonas calmas donde las corrientes litorales no son capaces de transportar los sedimentos a lo largo de la costa. Su proceso de construcción es complejo y trae como consecuencia la formación de canales, albuferas, marismas y redes de pequeños riachuelos.

En un delta se distinguen tres partes: el protodelta que se forma en la parte que da al mar, el frente deltaico formado por capas inclinadas que avanzan debido a la acumulación sobre las capas del prodelta y la llanura deltaica, constituida por capas depositadas encima de la plataforma deltaica. Estas formaciones consideran áreas de acumulación emergidas y sumergidas. Así por ejemplo, el delta del Níger cubre 17.600 [km²] de superficie emergida a la que se añaden una orla costera y barras a lo largo de 1.600 [km²]. Su parte exterior cuenta con 4.500 [km²] de materiales que llega hasta los 8-15 kilómetros de profundidad, englobando en conjunto un total de 34.000 [km²]. El delta del Mississippi, por su parte, se extiende sobre 34.000 [km²] emergidos y el del Yangtsé, en China, es aún mayor.

La distribución geográfica de un delta ofrece indicios sobre la modalidad de su formación. Los ríos Nilo, Po, Tíber y Ródano en las orillas del Mediterráneo, el Danubio en el mar Negro, el Volga

en el Caspio y el Amur-Daria en el mar de Aral, demuestran la eficacia de los regímenes hidrológicos de regiones semiáridas en zonas con rangos de marea pequeños. En regiones subtropicales e intertropicales con regímenes pluviométricos que facilitan el trabajo geomorfológico se encuentran grandes deltas como los de los ríos Níger, Indo, Ganges, Mékong, Yangtse y Amarillo. Otra región con deltas originados por acciones morfogenéticas continentales se localiza en la zona fría del hemisferio norte, donde destacan el Lena en Siberia, además de varios deltas en Alaska y la Columbia Británica.

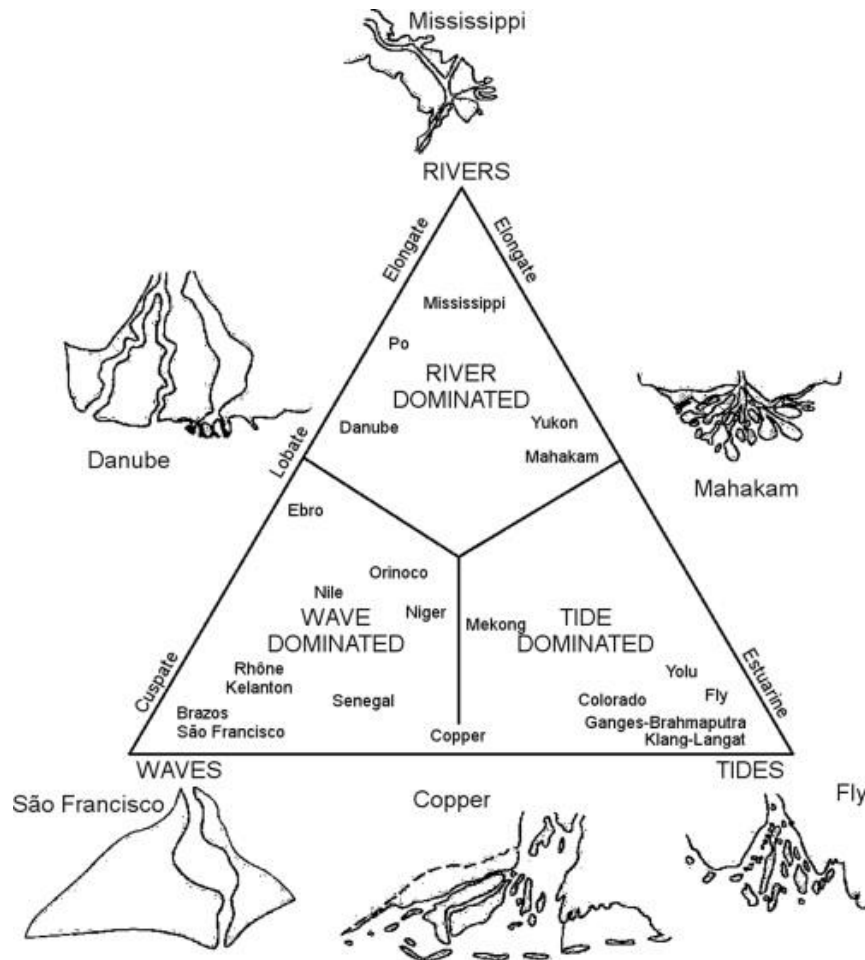
Aunque favorable, la ausencia de mareas no basta para formar deltas. En los grandes ríos, por ejemplo, dominan factores como la pendiente de la plataforma continental. De hecho, el delta no se forma cuando la pendiente es demasiado fuerte, como en el río Amazonas, o cuando se presenta cañones submarinos, como en el río Congo. En cambio, la formación del delta se promueve cuando la pendiente es suave, especialmente si se ve afectada por la subsidencia; esta última pudiendo estar relacionada con la propia acumulación de material. En consecuencia, los deltas son resultado de un equilibrio geomorfológico caracterizado por factores como el transporte fluvial, la subsidencia, las mareas y los aluviones fluviales, que dependen a su vez del clima y del eustatismo.

La sedimentación se debe a la pérdida de capacidad de transporte de los aluviones fluviales al encontrarse con el mar. La acumulación en el fondo del canal origina a su vez un obstáculo, de manera que el fenómeno se retroalimenta. Esta barra crece río arriba debido a la disminución de la pendiente del canal, y hacia la desembocadura, donde el curso de agua se enfrenta a fuerzas antagónicas del oleaje y la superficie horizontal del mar. Mientras la evacuación y redistribución de residuos estén garantizadas, las formas se mantienen embrionarias y sumergidas. Ello genera un cono de suave pendiente en el eje del canal que, en un estadio ulterior, puede derivar en la aparición de divisiones y bancos móviles que afloran durante el estiaje. Si la emersión es más permanente, puede nacer una vegetación que fija el terraplén y constituye islas a ambos lados de los canales.

La sedimentación en los deltas tiene una evolución característica. Al ser más rápida la corriente en el eje que en las orillas del canal central, durante las crecidas se conforman levantamientos naturales en ambas riberas. Estos levantamientos sufren eventualmente tajos que permiten la creación de nuevos canales y el abandono de otros. El oleaje, por su parte, tiene la función de redistribuir las arenas en el frente exterior del delta, generando flechas y crestas prelitorales. Cuando varias crestas se forman con rapidez, delimitan cubetas externas debido a la interferencia de los levantamientos fluviales y litorales. Es frecuente ver cómo estas últimas se apoyan en los brazos fluviales los que, perdiendo su eficacia, se hallan sometidos al ataque marino.

Existen numerosas clasificaciones de los deltas. Una de ellas se basa en el proceso sedimentario dominante (Ilustración 25); otras se basan en elementos de tipo zonal. La más conocida es fundamentalmente descriptiva. En general se distinguen los deltas lobulados o multilobulados en los que predominan las acciones fluviales, los deltas con formas digitadas y aquellos en forma de pata de gallo. Los deltas que unen lóbulos convexos y medias lunas aparecen entre los brazos de desembocadura cuando la erosión marina es importante. Los deltas redondeados se generan cuando las corrientes litorales son fuertes. Finalmente, cuando existe preponderancia de las fuerzas litorales y el río no es capaz de modificar el trazado de la costa, se conforman los deltas atrofiados o encerrados.

Ilustración 25: Clasificación de los deltas en función del proceso sedimentario dominante.



Fuente: Witek & Czechowski (2015).



2.3.2 COSTAS DE ABLASIÓN

Las costas de ablación enfrentan océanos con un oleaje de alta energía que, en el transcurso de los siglos, genera litorales rocosos como las que se encuentran en gran parte de Chile. En este tipo de costas se encuentran los acantilados y las plataformas de erosión litoral.

2.3.2.1 Acantilados

Los acantilados son formas litorales que se originan por la acción erosiva del oleaje sobre la base del terreno costero. A medida que la erosión progresa, las rocas se desmoronan y el acantilado retrocede, dejando una superficie relativamente plana y horizontal que se conoce como plataforma de abrasión. El término acantilado se usa muchas veces para designar el conjunto de elementos surgidos de la propia forma continental y el tramo vertical que sufre de la acción marina. La litología y el buzamiento son responsables de la diversidad de formas que los

acantilados presentan. En su base expuesta, el oleaje con la ayuda de los guijarros forma grutas y bancales, además de desplomes continuos o localizados que endurecen la pendiente y hacen retroceder al frente rocoso. Las condiciones favorables para este trabajo mecánico proceden de la heterogeneidad del terreno, de las líneas de debilidad y de las diferencias litológicas. La Ilustración 26 muestra los farellones costeros ubicados unos 15 kilómetros al norte de Antofagasta, donde destaca el monumento natural de La Portada.

Ilustración 26: La Portada de Antofagasta.



Fuente: Archivos personales.

Las superficies planas y rocosas al pie de los acantilados son testimonio de su retroceso. Esta explicación supone la existencia de plataformas litorales delante del acantilado, lo que a su vez exige una hipótesis de la estabilidad del nivel del mar y del litoral. Sin embargo, observaciones más cuidadosas demuestran la existencia de plataformas escalonadas y heterogéneas debidas a procesos como la abrasión mecánica, la descomposición, la desagregación, la acumulación y la dispersión de los residuos por las corrientes. En cualquier caso, cuando se trata de roca heterogénea es raro que una plataforma se muestre perfectamente regular y muy desarrollada.

 **Los acantilados más grandes del mundo**

2.3.2.2 Rias

Las rías nacen de un valle o de un conjunto ramificado de ellos todavía reconocible río arriba. Estas formaciones se extienden por todo el globo, a excepción de regiones donde ha existido una importante actividad glacial. Las rías se han formado a partir de ríos que excavaron grandes valles en los que el sistema fluvial fue parcialmente invadido por el mar. Aunque el encajamiento de los valles se considera como esencial en su definición, es necesario también que la longitud de sus lados sea mucho mayor que la anchura. Si esto no se cumple, se trata más bien de una bahía o de una ensenada.

Existen diferentes tipos de rías. El caso más sencillo está representado por el valle inferior de un río inundado que ha tomado la forma de embudo y donde el retroceso de las vertientes, o la tectónica, han contribuido a su formación. Las denominadas rías en forma de botella se

caracterizan por la intervención de estructuras de tipo longitudinal, como flexuras y fallas, que llevan a una configuración original con estrechamiento o angostura hacia el exterior. Otro tipo de rías, dominadas por la tectónica, se caracterizan por cursos de agua muy pequeños, trazados rígidos y bordes a veces paralelos. Por último, hay rías nacidas de la inundación de cubetas de alteración hacia las que convergen diferentes cursos de agua.

De acuerdo al tipo, a la velocidad de sedimentación interior y a la exposición al oleaje, las costas de ría evolucionan de diferente modo. A menudo, y sobre todo en un medio tropical, su colmatación crea marismas. Si se trata de ríos activos, aparecen río arriba deltas interiores. Los salientes y bordes exteriores, por el contrario, parecen tallados en forma de acantilados, que dada la edad aún reciente de las rías, corresponden a suaves escarpaduras.



2.3.2.3 Fiordos

Un fiordo es una entrante costera, larga y escarpada, que se ha originado como resultado de la intensa glaciación en un sistema fluvial que existió en un área montañosa cerca del mar. Los valles originalmente emergidos habrían sido hundidos por el peso de los glaciares, permitiendo la entrada del mar al derretirse el hielo.

Los fiordos son formas mayores en el relieve litoral, excediendo en algunos casos la centena de kilómetros, y presentando centenares de metros de profundidad bajo el nivel actual del mar. Suelen estar precedidos de numerosos islotes rocosos. No todos presentan, sin embargo, pendientes verticales continuas o elevadas como el Sognefiord noruego, la fosa tectónica de WijdeBay en el Spitsberg o en el fiordo Francisco José de Groenlandia oriental. Los más notables se sitúan en sectores de macizos antiguos y zócalos de fuerte relieve como en Groenlandia, Noruega, el archipiélago de Spitsberg y al Nordeste de la tierra de Baffin. El sur de Chiloé, la geomorfología está dominada por fiordos (Ilustración 27).

Aunque su origen glaciario no se discute, sí se plantean algunas consideraciones sobre su localización, muchas veces facilitada por la tectónica o por la erosión diferencial. En el caso de los fiordos mayores, puede pensarse en una preparación previa a la instalación del hielo en valles preglaciares, en valles inundados tras una preparación del terreno subaérea o en antiguos estuarios que han sido transformados por el hielo. Sólo los fiordos más cortos son obra únicamente de los glaciares. La acción del mar es en ellos limitada y su colmatación es lenta a causa de su profundidad. En general, los fiordos presentan un umbral que da al mar y que corresponde a la zona de la morrena frontal donde disminuye el poder del hielo al alcanzar el mar.

Ilustración 27: Estero Mitchell, en la Región Aysén del General Carlos Ibañez del Campo.



Fuente: Archivos personales.



2.3.3 OTROS TIPOS DE COSTAS INEXISTENTES EN CHILE

2.3.3.1 Formaciones coralinas

Algunos bordes costeros están constituidos por asociaciones biológicas donde los elementos dominantes son las colonias de madréporas. Estos organismos viven en simbiosis con algas unicelulares denominadas Zooxantelas, que obtienen carbono por fotosíntesis del gas carbónico disuelto en el agua y expulsan el oxígeno no utilizado del que respiran las madréporas. Las Zooxantelas contribuyen así a la localización de formas coralinas. La asociación se completa con algas calcáreas incrustantes del grupo de las coralináceas, pertenecientes a la familia de las Lithotamnium. Estas algas aportan el cimiento necesario para la aglutinación de colonias. A este sistema se añaden gasterópodos, equinodermos y foraminíferos.

Los corales se forman en aguas con temperaturas superiores a 18°C, idealmente de 25° a 30°C, y aguas bastantes saladas. Las Zooxantelas exigen por su parte mucha luz para la fotosíntesis. La agitación del agua es otra condición indispensable para renovar el oxígeno y conferir valor nutritivo al medio, pero no puede ser excesiva para preservar los corales. Para muchas especies, asimismo, una excesiva turbiedad es nociva.

Hoy, los corales activos se distribuyen en las Bermudas, en el Norte del Mar Rojo, en Hawái, en el Sudoeste de Australia, en Madagascar y en el Brasil Oriental. Su área se reduce sensiblemente en la costa occidental de los continentes –como la Chilena– a causa de las corrientes frías que vienen de los polos. No están presentes en los sectores de los grandes deltas y en lagunas de agua estanca.

En cuanto a su forma, existen múltiples familias de formaciones coralinas. El atolón corresponde a un anillo de coral típico de 1 a 60 kilómetros de diámetro cuya estructura comprende varios elementos. Por el lado exterior presenta un talud escarpado que tiende al desplome a causa del empuje lateral de los corales que luchan por la luz, el oxígeno y el alimento. El talud se rodea de escombros soldados a la construcción principal por medio de algas calcáreas, de forma compacta, que son sometidas a la acción del oleaje. El borde externo es la parte más elevada de la construcción, siendo más alto a barlovento que a sotavento. Este anillo presenta canales de 3 a 4 kilómetros de ancho que presentan cavidades, cavernas o túneles de donde surgen géiseres y plataformas en forma de pilón construidas por algas. Una pendiente interna suave conduce a una laguna interior, que encierra generalmente una playa y colonias de coral vivo, sobre todo en sectores abrigados. Su fondo arenoso se halla frecuentemente erizado por pináculos o arrecifes de pendiente abrupta, constituidos por corales vivos.

Otra familia corresponde a las construcciones lineales. Los más conocidos son los arrecifes barrera, edificados por varios a centenares de kilómetros en las costas de islas no coralinas. La gran barrera australiana en Queensland, por ejemplo, forma una cinta de 200 a 500 kilómetros de ancho y 1500 kilómetros de largo, con grandes discontinuidades. Otras barreras se ubican en las islas Marshall, Tuamutu, Fidji y en Nueva Caledonia. Su morfología se compone de bloques y elementos detríticos más pequeños. Su borde exterior, escarpado, está provisto de espolones de coral vivo que alcanzan entre 30 y 80 kilómetros de longitud, separados por intervalos de 10 a 30 kilómetros. Tras ellos se perfila una playa al borde de una laguna, de la que surgen en ocasiones cayos, antes de pasar a los fondos más profundos.



2.3.3.2 Manglares

En costas tropicales y subtropicales de aguas tranquilas y poco profundas se encuentran los manglares, verdaderos bosques sobre fango cuya altura alcanza entre 5 a 20 kilómetros. En los manglares maduros y salvo por los canales de drenaje, la vegetación es casi impenetrable. Estos bosques están conformados por los géneros Rhizophora, Avicennia y Conocarpus, cuyas raíces en forma de arco dan resistencia en los fondos blandos y bajo condiciones de pleamar. Los manglares se extienden en bandas paralelas al litoral de bajamar, caracterizadas por un entrelazamiento inextricable que conforma un importante elemento de captación de sedimentos. En Chile, estas formaciones son inexistentes.



2.4 LOS PROCESOS EROSIVOS EN LA COSTA

En esta sección presentamos los procesos erosivos que ocurren en la costa, comenzando por las fuentes y los mecanismos de transporte que los movilizan. Se repasan las técnicas de estudio, incluyendo el balance sedimentológico, la percepción remota, los levantamientos en terreno y el uso de trazadores. Finalmente, se revisa las causas y consecuencias de la erosión natural en las costas y aquella provocada por el hombre.

2.4.1 FUENTES DE SEDIMENTOS

La mayor parte del sedimento que constituye la costa proviene de los ríos que conectan paisajes en erosión al interior de las cuencas, seguido en volúmenes considerablemente menores, por la erosión directa del oleaje y el transporte eólico. La granulometría y la composición química del sedimento que proviene de los ríos están determinadas por la naturaleza de la roca madre y de los procesos que ocurren durante el transporte fluvial desde la fuente a la desembocadura. La erosión y desprendimiento de grandes masas de roca en los acantilados marinos, por su parte, produce inicialmente sedimento mal clasificado, que es graduado por tamaño y peso específico en forma muy eficiente por el oleaje y las corrientes litorales. Durante la sedimentación, los materiales pasan por diferentes procesos entre los que destacan el intemperismo, el transporte, la depositación y la litificación.

La sedimentación comienza cuando los fragmentos son dislocados de la roca madre por el intemperismo, el cual ocasiona un cambio del estado masivo al estado clástico, desintegrando las rocas en fragmentos menores debido a procesos físicos, químicos y biológicos. El intemperismo físico modifica el tamaño de las partículas, el área de la superficie y el volumen de la roca madre, sin que tenga lugar un cambio significativo de su composición. El intemperismo químico, por su parte, genera un cambio de las propiedades químicas y un aumento del volumen total, debido este último tanto por la menor densidad de los nuevos compuestos, como por la porosidad adicional del material. El intemperismo biológico es semejante al químico pues origina cambios tanto del estado de agregación como de la composición química.

El denominado complejo de intemperismo es el producto final de estos mecanismos y es la fuente principal de material detrítico arrastrado mecánicamente y transformado en sedimentos clásticos por agentes geológicos. El material disuelto es acarreado por las corrientes litorales en forma de arrastre de fondo y suspensión, por las corrientes oceánicas como transporte en suspensión y por los hielos, entre otros procesos menores. Los fragmentos no consolidados que deja el intemperismo quedan, por su parte, disponibles para ser movidos por las corrientes más energéticas.

2.4.2 MECANISMO DE TRANSPORTE EN LA ZONA ROMPIENTE

Los sedimentos se transportan a lo largo de las playas debido a la acción del oleaje, las corrientes, las mareas y el viento, siendo el primero el más importante en las costas expuestas al Océano Pacífico. Este transporte masivo de arena, análogo a un “río de arena” en la zona rompiente (Inman & Sheldon, 1965), tiene por consecuencia la erosión o acreción de un determinado sector de la costa. Se estima que más del 90% del transporte de arena se produce entre la línea costera y la línea exterior del oleaje rompiente.

El transporte se produce de dos formas. La primera, denominada transporte transversal, ocurre de manera perpendicular a la línea costera debido al oleaje rompiente. La segunda, denominada transporte litoral o longitudinal, ocurre en forma paralela a la costa debido a la corriente litoral

producida por el oleaje. La magnitud de ambos tipo de transporte de arenas depende de las características del oleaje, esto es, de su energía y de su orientación respecto de la línea costera (Ilustración 28).

2.4.2.1 Transporte transversal de sedimentos

El transporte transversal es causado por el flujo turbulento que ocurre en la rompiente, el cual pone en suspensión y advecta los sedimentos del fondo. De este modo, los sedimentos tienden a ser desplazados hasta el límite superior que alcanza la ola rompiente (*runup*) y hasta el límite inferior costa afuera, durante la resaca (*rundown*). La magnitud del transporte hacia y desde la costa depende asimismo del grosor de la arena y de la pendiente de la playa. Es difícil de estimar la cantidad de arena que se mueve pues para ello se requiere de levantamientos batimétricos costosos, o modelaciones numéricas de difícil calibración. Sin embargo, pueden obtenerse estimaciones estudiando los cambios de nivel de la arena mediante varillas clavadas en el lecho marino, el uso de drones topográficos, la comparación de imágenes satelitales o vuelos aerofotogramétricos y el acople de modelos de oleaje, corrientes y morfodinámica (ver sección 2.4.4).

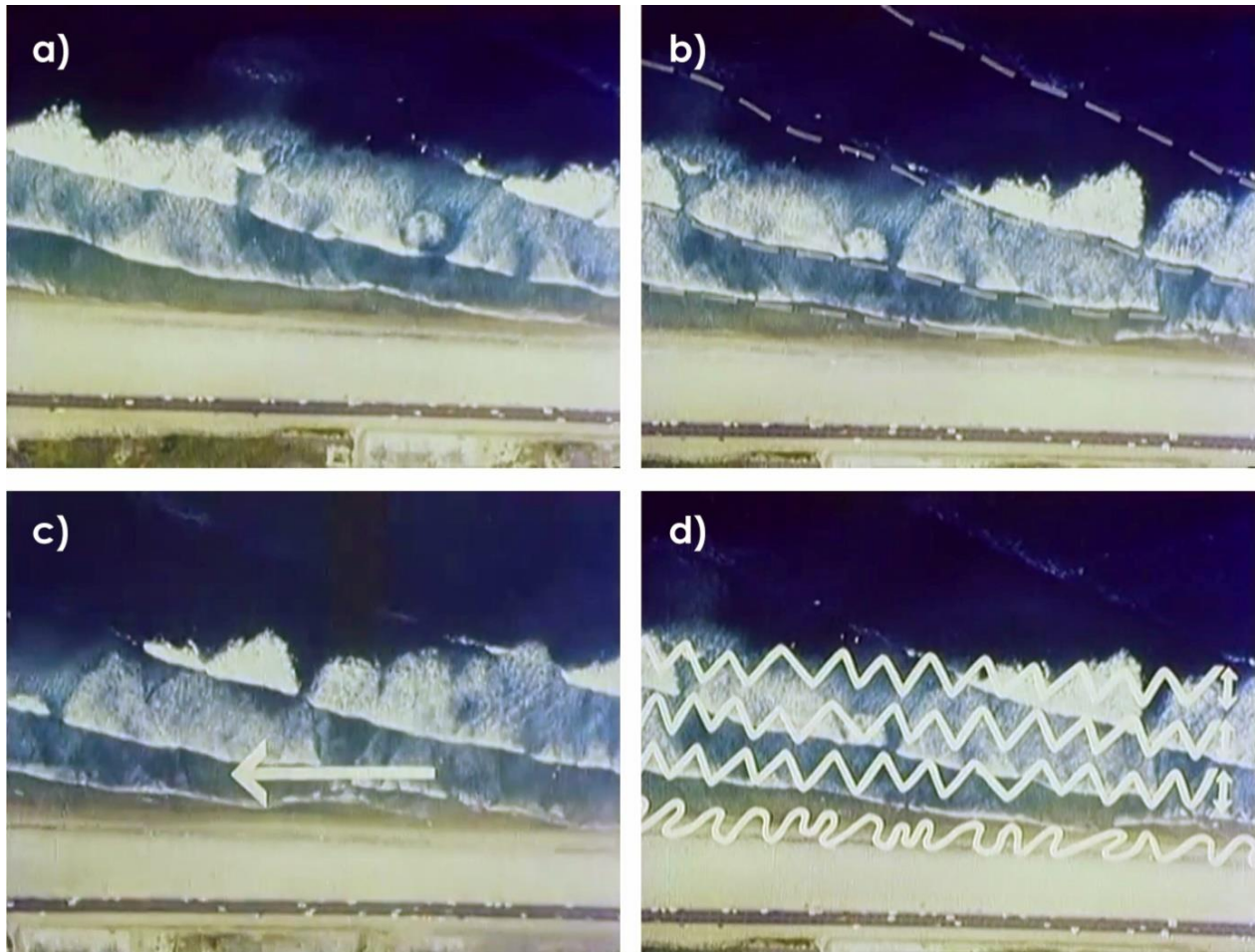
2.4.2.2 Transporte longitudinal de sedimentos

Cuando la acción de las olas sobre una costa es oblicua (Ilustración 28a,b), la rompiente produce tanto un movimiento oscilatorio con periodos de entre 3 a 30 segundos y una corriente longitudinal que permanece relativamente constante durante un estado de mar⁴. El transporte longitudinal de sedimentos en la rompiente se compone, por tanto, del movimiento longitudinal provocado por las corrientes litorales, usualmente inferiores a 1 [m/s] (Ilustración 28c), y del zigzaguo de la arena producto del *runup* y *rundown*, este último controlado por la gravedad y por tanto paralelo a la pendiente de la playa (Ilustración 28d). En general, el movimiento zigzagueante de la arena a lo largo de la playa es menor que el transporte debido a las corrientes litorales. La excepción ocurre cuando el oleaje es aproximadamente perpendicular a la playa, en cuyo caso el transporte longitudinal es casi nulo. Desde luego, ambos tipos de transporte interactúan y pueden intensificar la remoción de arena en un tramo de playa.

La velocidad de una corriente litoral, y por ende, la tasa potencial de transporte de sedimentos depende, entre otros factores, de la pendiente de la playa, de las propiedades del sedimento y del oleaje. Éste se caracteriza, como primera aproximación, por el período, la altura y la dirección, de entre los cuales los parámetros predominantes en el transporte sedimentario son los dos últimos. La tasa real de transporte de sedimentos, por su parte, puede ser igual a la tasa potencial en caso de haber sedimentos abundantes, o menor en caso de haber escasez de fuentes de material.

⁴ Un estado de mar corresponde al intervalo de tiempo durante el cual es posible asumir que las propiedades estadísticas del oleaje son estacionarias. Esta definición supone que, debido a la inercia del fenómeno, existe un equilibrio entre las fuerzas generadoras y restauradoras que intervienen en los procesos de generación y propagación del oleaje.

Ilustración 28: Mecanismos de transporte de sedimentos en la zona rompiente. a) zona rompiente, b) frentes del oleaje experimentando refracción, asomeramiento y rotura, c) corriente longitudinal forzada por el oleaje rompiente y d) trayectoria de partículas individuales producto del transporte transversal y longitudinal.



Fuente: Adaptado de Inman & Sheldon (1965).

2.4.3 MECANISMO DE TRANSPORTE A NIVEL DE GRANOS

2.4.3.1 Velocidad terminal de sedimentación de partículas

El transporte de los sedimentos puede ser determinado conociendo la velocidad terminal de sedimentación de las partículas (V) y las propiedades del oleaje. Esta velocidad se determina mediante la ley de Stokes, que surge del balance de fuerzas entre el peso de una partícula y la resistencia que ejerce el fluido sobre la partícula al caer en un líquido sin movimiento, denominada también fricción.

Esta ley considera a un grano de sedimento como una esfera de diámetro (d), atraída hacia abajo con una fuerza que depende de su volumen, de la aceleración de la gravedad y de la diferencia entre su densidad y la del fluido. Si la esfera es muy pequeña -de un diámetro inferior a 0.1 mm- la resistencia ejercida por el fluido es proporcional al diámetro, la velocidad de la partícula y la viscosidad del fluido. Al igualar estas fuerzas se obtiene que la velocidad terminal de sedimentación es proporcional al cuadrado del diámetro de la partícula, esto es $V = C_1 d^2$. El

coeficiente C_1 reúne las densidades de la partícula y del fluido, la aceleración de la gravedad y la viscosidad del fluido. Esta expresión es la forma más simple de la denominada Ley de Stokes.

Si la esfera es relativamente grande, las fuerzas viscosas se vuelven despreciables. En este caso la resistencia al movimiento es proporcional a su densidad, el cuadrado de su diámetro y el cuadrado de su velocidad. Igualando el peso y esta nueva expresión para la resistencia permite concluir que la velocidad terminal de sedimentación es proporcional a la raíz cuadrada del diámetro de la partícula, esto es $V = C_2\sqrt{d}$, donde C_2 reúne varias constantes. Esta segunda relación es la forma más sencilla de lo que se denomina Ley de impacto.

2.4.3.2 Régimen laminar y turbulento

En función de la relación entre las fuerzas de inercia (proporcionales a la velocidad) y la gravedad, el flujo de un fluido (y las consecuencias sobre el transporte de sedimentos) se puede clasificar en dos clases:

- El flujo laminar es un movimiento relativamente lento en el cual cada vena del líquido conserva su identidad y fluye suavemente al lado de las venas vecinas. Es un tipo de movimiento que se encorva suavemente alrededor de las irregularidades que encuentra en su trayectoria, en vez de formar remolinos a su paso.
- El flujo turbulento se caracteriza por el movimiento caótico de un fluido en el que las partículas se mueven en trayectorias desordenadas e impredecibles. El flujo se caracteriza por fluctuaciones de velocidad y dirección respecto de la corriente media, fluctuaciones que son ocasionadas por remolinos generados por obstáculos o por la misma naturaleza inestable del flujo a altas velocidades.

Para establecer si un flujo es laminar, de transición o turbulento, se recurre al número de Reynolds (Reynolds, 1883), definido como $Re = Vl/\nu$, donde ν es la viscosidad cinemática, V una velocidad característica y l una dimensión típica de un flujo. El número de Reynolds representa el cociente entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas. Así, un régimen turbulento se da para Re altos que ocurren cuando las fuerzas inerciales dominan por sobre las viscosas. En contraste, un régimen laminar se da cuando las fuerzas viscosas son superiores a las inerciales. La definición del umbral sobre el cual el régimen se torna turbulento depende del fenómeno físico a estudiar. Por ejemplo, para tuberías de sección circular, donde $l = D$ es el diámetro de la tubería, el flujo es laminar para $Re < 2100$ y turbulento para $Re > 10000$.

Una característica importante del movimiento turbulento es su capacidad de transportar masa, cantidad de movimiento, energía y sólidos en suspensión transversalmente a las líneas de flujo. Las fluctuaciones del flujo dan origen a una mezcla de estas cantidades en el fluido y se escalan con la intensidad de la turbulencia. El movimiento turbulento caracteriza a los flujos generados por el viento en atmósfera (transporte eólico) y por las olas, las corrientes fuera y dentro de la zona de rompiente (transporte hidráulico). El transporte de sedimentos efectuado por estos agentes depende fundamentalmente de las características del movimiento turbulento y de la velocidad terminal de sedimentación.

2.4.3.3 Mecanismos de transporte a nivel de granos

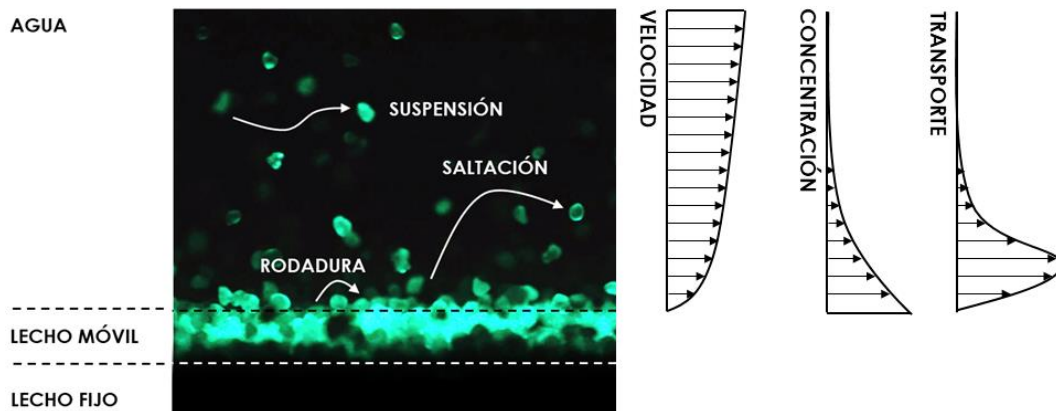
Cuando el flujo actúa sobre un fondo arenoso, los granos pueden rodar sobre el lecho, ser levantados por las fluctuaciones verticales de velocidad en lo que se conoce como saltación, o ser suspendidos en la columna de agua (Ilustración 29). A continuación se describen cada uno de estos mecanismos:

Rodadura

El movimiento por rodadura tiene su iniciación cuando el arrastre generado por el flujo vence a las fuerzas gravitacionales y cohesivas que tienden a mantener quietas a las partículas en el lecho. Cuando la velocidad media del flujo es relativamente baja, las partículas ruedan junto con el fluido, pero si ella aumenta, puede provocar saltación o suspensión. La rodadura depende de la forma de las partículas, siendo las esféricas más propensas a experimentar este tipo de movimiento que aquellas de canto anguloso. También intervienen el tamaño, la densidad y (por tanto) el peso de las partículas, siendo las partículas más pesadas de la matriz las que ruedan por el fondo. Así, para un tamaño, forma y densidad dados, las esferas ruedan con mayor facilidad y se adelantan a las partículas de menor esfericidad. El efecto neto de estos factores, combinado con la intensidad y la escala de turbulencia, generan una segregación compleja del material en el lecho.

Mientras permanezcan iguales las condiciones de flujo, el transporte por rodadura continúa en un estado de equilibrio dinámico, que es aquel que ocurre cuando dos procesos que se oponen ocurren al mismo paso. En este caso, los procesos son el esfuerzo de corte, que desestabiliza el lecho, y el peso, que actúa como fuerza restauradora. Cuando hay una reducción de la velocidad media o de la intensidad de la turbulencia, las partículas más grandes, más densas y de menor esfericidad son dejadas atrás.

Ilustración 29: Izquierda: Mecanismos de transporte de granos en un lecho móvil ubicado sobre agua. Derecha: Distribución vertical de velocidad media del flujo, concentración de los sólidos en suspensión y transporte de sedimentos en suspensión (para sedimentos finos, la concentración y el transporte en suspensión es más uniforme en la profundidad).



Fuente: Elaboración propia.

Saltación

La saltación es una forma de transporte en la cual las partículas avanzan a lo largo del lecho en una serie de saltos cortos e interrumpidos. Si la fluctuación vertical de la velocidad es mayor que su velocidad terminal de sedimentación, la partícula es expulsada del lecho a la columna de agua y eventualmente vuelve por la acción de la gravedad. En este proceso las partículas pequeñas son puestas en movimiento más fácilmente que las grandes.

El movimiento de saltación corresponde a una fase intermedia entre el transporte por rodadura y el por suspensión. Las partículas que no son suficientemente grandes para mantenerse en el

lecho ni suficientemente pequeñas para ser arrastradas en suspensión, pueden ser levantadas momentáneamente sobre el fondo y adquirir transitoriamente la velocidad del flujo, moviéndose en una serie de saltos. Ejemplos de saltación corresponden al movimiento de arena efectuado por el viento en las dunas, aquel generado en los ríos por el caudal o el generado en los estuarios por las corrientes mareales.

Suspensión

Este mecanismo tiene lugar cuando la intensidad de la turbulencia es mayor que la velocidad de asentamiento y las partículas son transportadas en forma independiente del lecho. Una partícula suspendida en una corriente turbulenta no sigue una trayectoria uniforme y suave, como lo haría en una corriente laminar, sino que se mueve en forma aleatoria.

El transporte en suspensión depende, en principio, de la concentración del material en suspensión, de la velocidad del flujo y la distancia al lecho (Ilustración 29, derecha). También influyen las fuerzas cohesivas que se desarrollan entre partículas pequeñas colindantes, además de los pequeños vórtices generados por partículas mayores a 0.2 milímetros, que actúan como obstáculos en el fondo. Cuando la fuerza desestabilizadora sobrepasa un valor crítico, la partícula es puesta en movimiento en forma de rodadura, saltación o suspensión. Las partículas más propensas a la suspensión son las más pequeñas, menos esféricas y menos densas. Aunque debido a la cohesión las partículas muy pequeñas son más difíciles de dislocar que los granos de arena fina, el movimiento de grandes partículas sobre el lecho disloca comúnmente a las partículas más finas, haciendo que se unan a la carga en suspensión. El comportamiento de las partículas una vez en suspensión es una función principalmente de la velocidad terminal de sedimentación. Por ejemplo, aunque se requiere una fuerza mayor para suspender partículas de arcilla que pequeños granos de arena, estos se asientan rápidamente y la arcilla permanece en suspensión a causa de su menor velocidad terminal de sedimentación.

Las observaciones del material en suspensión han demostrado que la concentración de las partículas es mucho mayor cerca del lecho que cerca de la superficie (Ilustración 29, derecha). Además, el perfil vertical de concentración depende del tamaño de las partículas. Así, la concentración del material muy fino puede ser casi igual en toda la columna de agua, mientras que las partículas más gruesas -como las de limo y arena fina- exhiben gradientes bien definidos entre la superficie y el fondo.

Para un diámetro dado, la cantidad de material que cae es proporcional al producto del gradiente vertical de concentración y la velocidad terminal de sedimentación. La cantidad de material que se eleva, por el contrario, depende de la difusión turbulenta en sentido vertical. Cuando el movimiento ascendente debido a la turbulencia se vuelve igual al movimiento descendente debido al peso, existe un equilibrio dinámico y el transporte permanece constante. La deposición ocurre cuando, producto de la disminución de la velocidad media del flujo, disminuyen la intensidad y la escala de turbulencia, haciendo que el gradiente de concentración pierda su equilibrio a favor de las partículas que se asientan. Esta explicación, no obstante, excluye la eventual presencia de flujos ascendentes que, al advectar las partículas, se suman al efecto de la difusión turbulenta. Este tipo de flujos advectivos se observa en los ríos o canales mareales altamente energéticos, como el Canal Chacao.

Para un tamaño dado de partícula, las esferas se asientan con mayor rapidez que los discos debido a que ofrecen menor resistencia al flujo. Asimismo, los minerales pesados se depositan con mayor rapidez que los minerales menos densos. Así, las partículas más planas y livianas se elevan más alto y/o permanecen en suspensión por mayor tiempo que las partículas esféricas o más pesadas, las cuales tienden a permanecer cerca del fondo o se depositan.

Sumado a estos efectos de corto plazo, existen procesos de mayor escala que tienen lugar cuando las partículas colisionan unas contra otras durante su transporte, especialmente cerca de la fuente de sedimentos. A medida que las partículas ruedan y se deslizan a lo largo de un río o de una zona rompies, sus aristas desaparecen por desprendimiento o abrasión, aumentando su redondez. Si las condiciones son extremadamente vigorosas, las partículas pueden partirse en fragmentos, dando origen a aristas ásperas y a cambios bruscos en el tamaño y en la forma de las mismas. En condiciones normales de transporte, la rotura es menos importante que la abrasión y las partículas tienden a formar cantos redondeados.



2.4.4 TÉCNICAS DE ESTUDIO DE EVOLUCIÓN DE PLAYAS

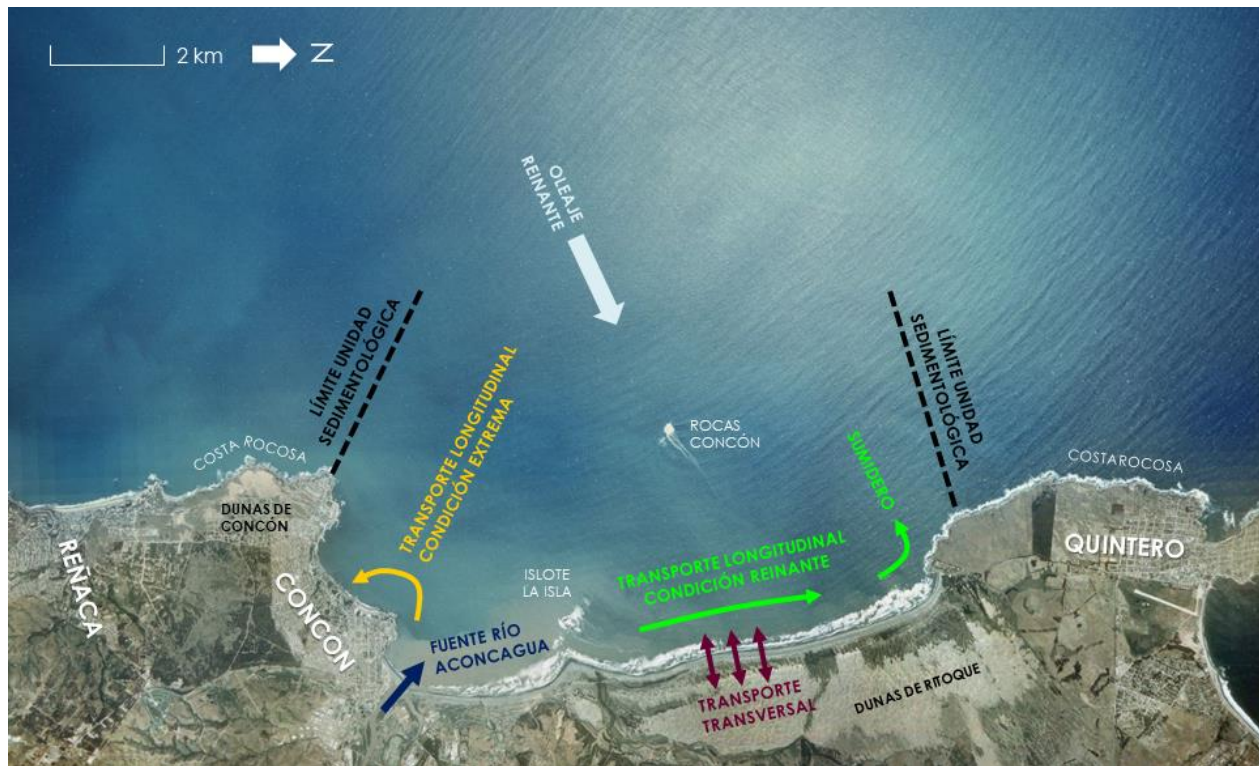
Para calcular las tasas de transporte litoral y ver los impactos en la evolución de playas se aplican varios métodos, entre los que destacan el balance sedimentológico, los sistemas de percepción remota, los levantamientos en terreno, la modelación numérica y el uso de trazadores, entre otros. El transporte de arena se mide o estima comúnmente a lo largo de un año, de modo de capturar el comportamiento morfodinámico de verano e invierno. Usualmente se consigna como un volumen de arena que pasa por un punto de medición, en $[m^3/año]$.

2.4.4.1 Balance sedimentológico

Una práctica común para evaluar los cambios en la costa es utilizar el denominado balance sedimentológico. Esta herramienta se basa en la cuantificación de las fuentes, sumideros y transporte, a partir de los cuales se puede estimar la erosión o el depósito de sedimentos y correlacionarlo con los cambios topográficos en una zona de estudio. En la Ilustración 30 se presenta un esquema conceptual con el balance sedimentológico en la bahía de Concón, en cuyo extremo norte se encuentran las dunas de Ritoque. Usualmente el balance se aplica a la fracción pesada de sedimentos que se transporta por deriva litoral en la zona de rompies. La fracción de finos en suspensión se difunde y advecta en la columna de agua y requiere para su estudio de otras técnicas, como la modelación numérica.

Las fuentes de información típicamente utilizadas para evaluar el cambio morfológico en la costa son las cartas hidrográficas, fotografías aéreas, registros del relleno de playas, registros de dragado y levantamientos geológicos. Cuando se dispone de datos históricos es posible determinar específicamente las tendencias de la erosión o de la acumulación. Si se trata de una región vasta puede hacerse un inventario de la erosión costera en diferentes tramos de ella. Las principales fuentes de datos son en este caso todas las fotografías aéreas que se hayan tomado de la región. En algunos casos pueden utilizarse cartas topográficas y náuticas antiguas si se considera que sus datos son fidedignos.

Ilustración 30: Balance sedimentológico en la bahía de Concón y Dunas de Ritoque.



Fuente: Elaboración propia.

Si mediante el balance sedimentológico se concluye que en un tramo de la costa se acumula más arena que la que pueden mover las olas, la línea costera acrecerá como ocurre (por ejemplo, en la desembocadura de los ríos que forman deltas). Por otra parte, si el suministro de arena es menor que la cantidad que puede mover el oleaje, la costa se erosionará. Cuando existe un equilibrio aproximado entre el suministro de sedimento y la capacidad de transporte litoral, la línea costera se mantiene relativamente constante. Por supuesto, hay factores externos, como los cambios de nivel del mar, el cambio en el suministro de sedimentos o la obstrucción de rompeolas, que pueden modificar bastante esa estabilidad. Si por algún motivo, el suministro de sedimento en un tramo de playa se reduce (aumenta), se espera que ocurra una fuerte erosión (acreción). La ruptura del equilibrio puede resultar de factores como la alteración de los sistemas de drenajes, la construcción de edificaciones costeras, la estabilización de la post-playa y tierras altas producto de programas de conservación de suelos, la intervención de los ríos mediante presas o la extracción de arena. Si bien estos últimos corresponden a la categoría de erosión provocada por el hombre, cabe destacar que las desembocaduras y deltas de los ríos están sumamente expuestos a los grandes cambios naturales del suministro de sedimentos.

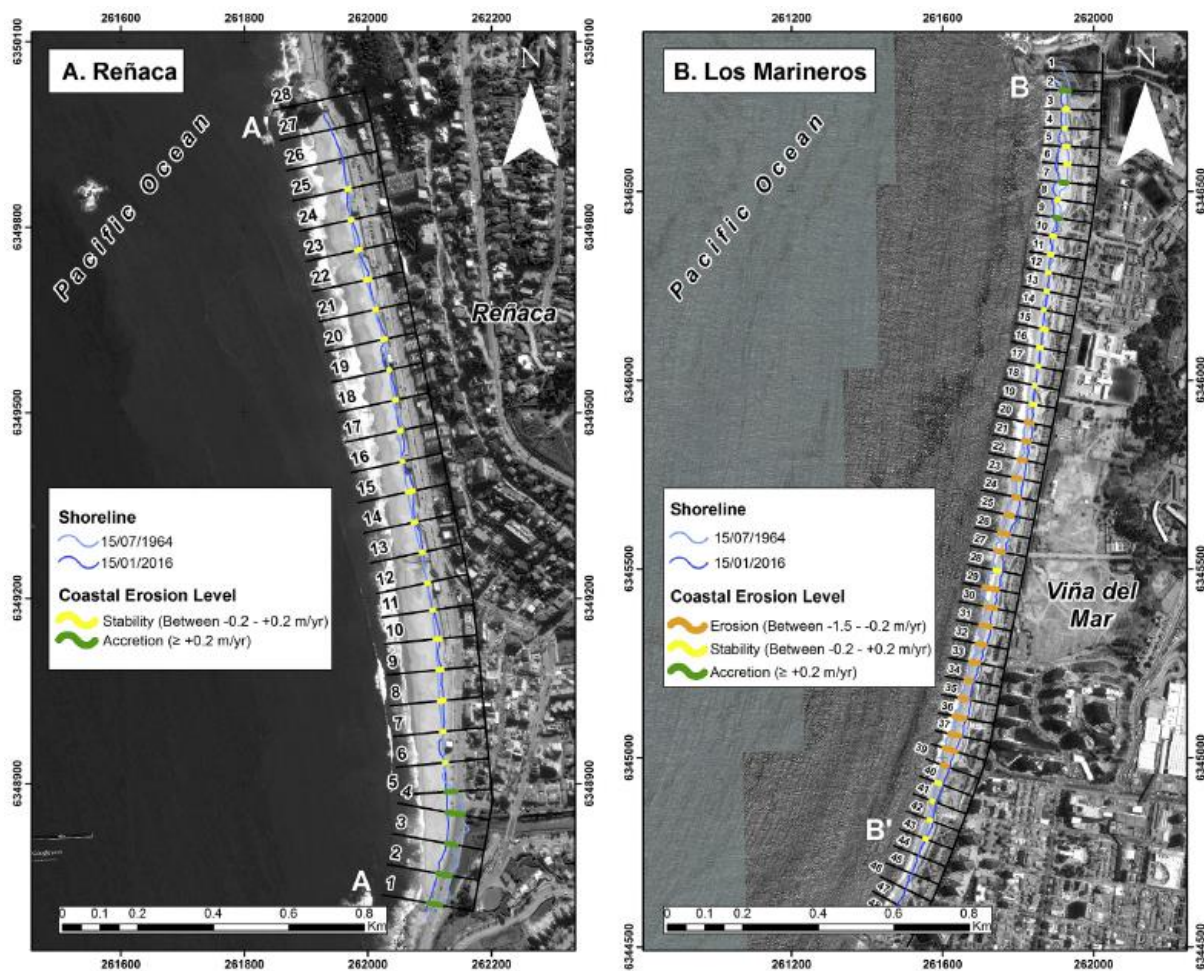
2.4.4.2 Técnicas de percepción remota

La percepción remota, o *remote sensing*, es la disciplina que busca obtener información de un objeto a partir de datos adquiridos mediante algún dispositivo que no está en contacto físico con dicho objeto. En el caso de los estudios de evolución de playas, se recurre a series superpuestas de fotografías aéreas y/o satelitales de la zona de interés. Para lograr un buen resultado, se requiere fotografías tomadas en forma anual, aunque en la medida que retrocedemos en el tiempo es más difícil contar con esa resolución espacial. Si se busca estudiar la posición de la

línea de costa, es necesario además conocer la hora en que se tomó dicha fotografía, de modo de estimar el nivel de marea instantáneo que desplaza la posición de la línea de costa con una periodicidad conocida (Ilustración 19).

El análisis consiste en establecer puntos fijos en tierra, reconocibles en todas las fotografías, que servirán de referencia entre mediciones sucesivas para cuantificar la magnitud de la erosión o acumulación producida durante el período considerado. La distancia entre dos puntos de referencia en la serie permite por tanto calcular las dimensiones en la fotografía. Los resultados del estudio pueden presentarse mediante mapas que señalen las zonas de la costa donde se haya experimentado estabilidad, erosión, acumulación, o alternancia entre alguno de estos estados. El empleo de mapas de esa clase permite determinar el carácter general de cualquier sector de la línea costera en estudio.

Ilustración 31: Cambios en la línea de costa en las playas de Reñaca (A) y Los Marineros (B), en la bahía de Valparaíso. Los cambios se calculan mediante perfiles paralelos entre sí, y aproximadamente perpendiculares a la costa, a partir de los cuales se evalúan las condiciones de estabilidad (*stability*), acumulación (*accretion*) y erosión (*erosion*) para el período comprendido entre 1964 y 2016. Se observa que para el período, la playa Reñaca es relativamente estable, en tanto que la playa Los Marineros es estable en su tramo norte y erosiva en su tramo sur. El pivoteo de esta última se debe posiblemente a cambios históricos en la dirección del oleaje en aguas profundas (Ilustración 112).

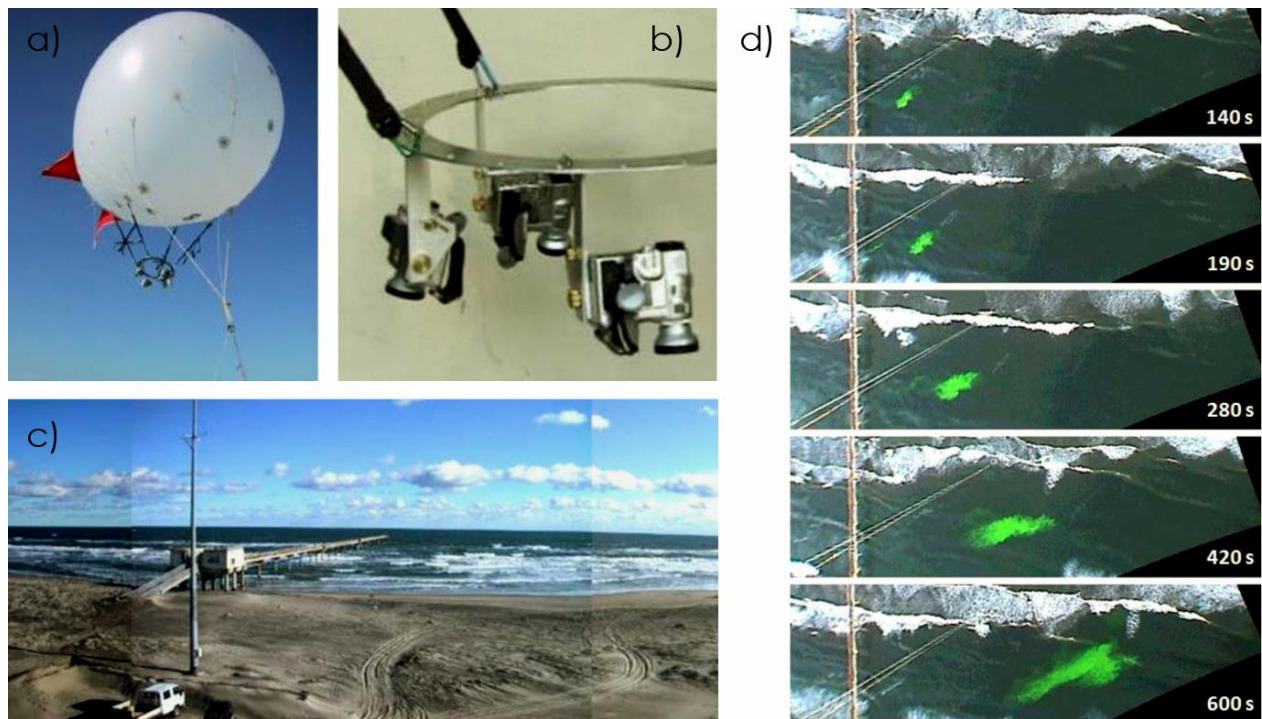


Fuente: Martínez et al. (2018).

En la Ilustración 31 se muestra un ejemplo de este tipo de estudios para las playas de Reñaca y Los Marineros, en la bahía de Valparaíso. En este caso, se considera que un tramo de playa es estable si la distancia horizontal en que se desplaza la línea de costa es inferior a 20 [cm/año], erosiva si ésta retrocede más de 20 [cm/año] y acumulativa si avanza más de dicho valor. Estos valores, no obstante, dependen de los criterios definidos por diversos autores. Cabe también notar que las estimaciones de tasas de movimiento de la línea de playa son valores promedio durante el período del estudio (por lo común varias décadas), y no permiten, salvo que se cuente con muchas fotografías durante un año, evaluar la variación estacional de una playa.

Otro tipo de estudios que se efectúan para comprender cómo se mueve el agua, e inferir el movimiento del sedimento en suspensión se basa en el seguimiento de trazadores naturales o artificiales radiactivos y no radiactivos. En la Ilustración 32 se muestra el estudio de la hidrodinámica costera de una playa bastante dinámica en Japón mediante el uso de fluorescina, a partir de la cual se puede inferir la morfodinámica costera a corto plazo, esto es del orden de minutos a horas. El uso de trazadores es también fundamental para el diseño de sistemas de captación y descarga de efluentes en el mar, como emisarios submarinos de aguas servidas, descargas de residuos industriales líquidos (RILES), sistemas de enfriamiento de plantas térmicas, sistemas de regasificación de gas natural licuado o derrames de hidrocarburos.

Ilustración 32: Estudio de la hidrodinámica costera mediante un trazador en una playa de Japón, consistente en un globo aerostático (a) sobre el cual se monta cámaras (b). El sistema se amarra a un muelle (c). Las imágenes (d) capturan la fluorescina (trazador verde) cada cierto tiempo y requieren de un proceso de rectificación de imágenes. Hoy en día el globo y las cámaras pueden ser reemplazados por drones.



Fuente: Takegawa et al. (2003)

2.4.4.3 Levantamientos topo-batimétricos

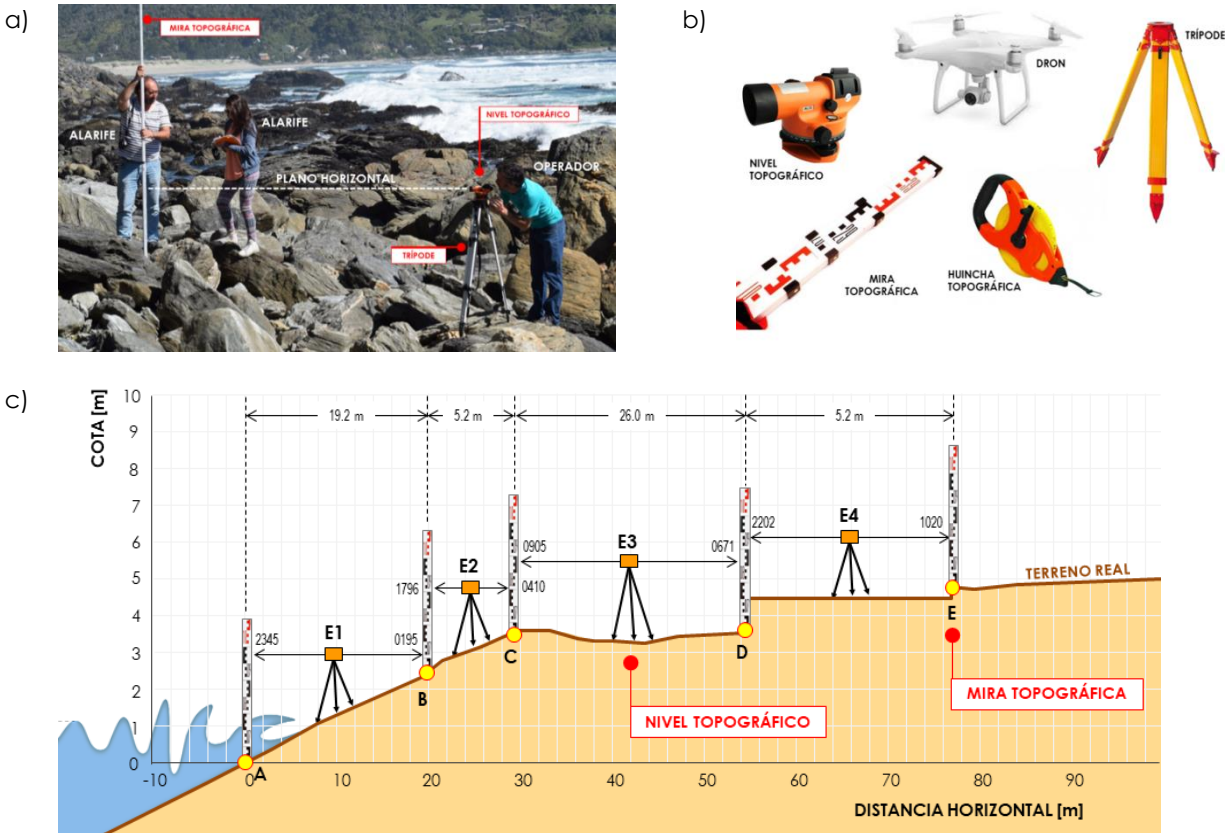
Los levantamientos en terreno en la zona costera requieren de dos tipos diferentes de mediciones para el mar y la tierra. En el mar se utilizan técnicas de medición batimétricas que se efectúan

desde embarcaciones cuando las condiciones oceanográficas lo permiten, mientras que en tierra se recurre a técnicas topográficas.

La topografía es la disciplina que estudia el conjunto de principios y métodos que tienen por objeto la representación gráfica de la superficie terrestre, tanto en sus formas naturales como aquellas generadas por el hombre. La topografía se suele dividir en la planimetría, que se orienta a la representación de la superficie sobre un plano paralelo al horizonte, y la altimetría, que representa las distancias verticales, o cotas, respecto del plano de referencia considerado usualmente como el nivel medio del mar. La topografía se restringe a superficies planas que se limitan a pequeñas extensiones de terreno, en tanto que la geodesia permite cubrir áreas mayores donde la curvatura de la tierra cobra importancia.

La Ilustración 33 muestra un esquema de medición altimétrica comúnmente utilizado para la medición de perfiles de playa o costas rocosas. Los instrumentos comúnmente utilizados para las mediciones topográficas son los niveles, taquímetros, estaciones totales y drones, además de equipamiento de apoyo como las miras, huinchas y trípodes, entre otros (Ilustración 33b).

Ilustración 33: Mediciones altimétricas en zonas costeras. a) Medición altimétrica con nivel efectuada en la costa rocosa de Pucatrihue, en la Provincia de Osorno. b) Instrumentos típicos para medición topográfica. c) Esquema de medición altimétrica con nivel orientada a definir la geometría de un perfil de playa en Los Marineros, Viña del Mar. El terreno real es representado mediante los puntos A, B, C, D y E, donde se ubican las miras topográficas.



Fuente: Elaboración propia.

Tanto para mediciones en mar y tierra, se utiliza usualmente un sistema de coordenadas cartesiano en el cual x e y representan la posición en el plano horizontal y z corresponde a la cota, o distancia vertical respecto del plano de referencia. Los mapas utilizan el sistema de representación de planos acotados, mostrando la elevación del terreno mediante líneas que conectan los puntos de igual cota, denominadas curvas de nivel en topografía y veriles o isóbatas en batimetría. En topografía se utiliza como plano de referencia el Nivel Medio del Mar (NMM), en tanto que en la batimetría se utiliza el Nivel de Reducción de Sondas (NRS), que en Chile corresponde al plano determinado por la mayor bajamar en sicigias estando la Luna en el perigeo. El hecho de que las mediciones de topografía y batimetría sean efectuadas respecto de diferentes planos de referencia obliga a llevar los datos correspondientes a planos y cotas de referencias comunes, durante el post-proceso de la información.

Ilustración 34: Carta náutica electrónica de la bahía y puerto de Valparaíso.



2.4.4.4 Modelación física y numérica

Un modelo corresponde a la representación simplificada de un fenómeno que interesa comprender o predecir, y se alimenta de datos de campo obtenidos mediante percepción remota, levantamientos en terreno u otras fuentes de información. La complejidad de los fenómenos naturales que ocurren en la costa -donde confluyen el agua, el aire, los sedimentos y las obras marítimas- nos obliga a retener los procesos dominantes y descartar aquellos que tienen una relevancia menor. Los modelos permiten determinar la importancia relativa de dichos procesos y predecir escenarios futuros ante intervenciones humanas o cambio climático, entre otros.

En la ingeniería oceánica se utilizan comúnmente modelos físicos y modelos numéricos, que son complementarios entre sí. Los primeros son representaciones de un sistema real a escala y bajo condiciones controladas en un laboratorio (Ilustración 35). En los modelos físicos se escalan en forma simultánea las dimensiones, la cinemática (desplazamientos, velocidad y aceleración) y la dinámica (fuerzas) del prototipo en tamaño real a un modelo a escala usualmente menor, donde se ejecutan las observaciones. Los modelos físicos tienen la ventaja de permitir la visualización real de los procesos costeros, pero presentan la limitación de descartar algunas fuerzas secundarias que no se pueden representar al reducir el tamaño de la realidad que representan.

Debido a la dificultad y costo de estudiar los procesos morfodinámicos mediante modelos físicos, especialmente para escalas de tiempo del orden de años a décadas, se recurre a la modelación numérica como una herramienta de ayuda para entender la dinámica de estos sistemas. Los modelos numéricos, representan los principios de conservación de la masa, momentum y energía mediante ecuaciones que permiten caracterizar la evolución de las propiedades del flujo en el espacio y el tiempo. En el caso de los estudios de playas y desembocaduras, se deben acoplar modelos de oleaje, corrientes, transporte de sedimentos y evolución de playas que deben ser calibrados y validados para que ofrezcan una buena caracterización morfodinámica (Ilustración 36).

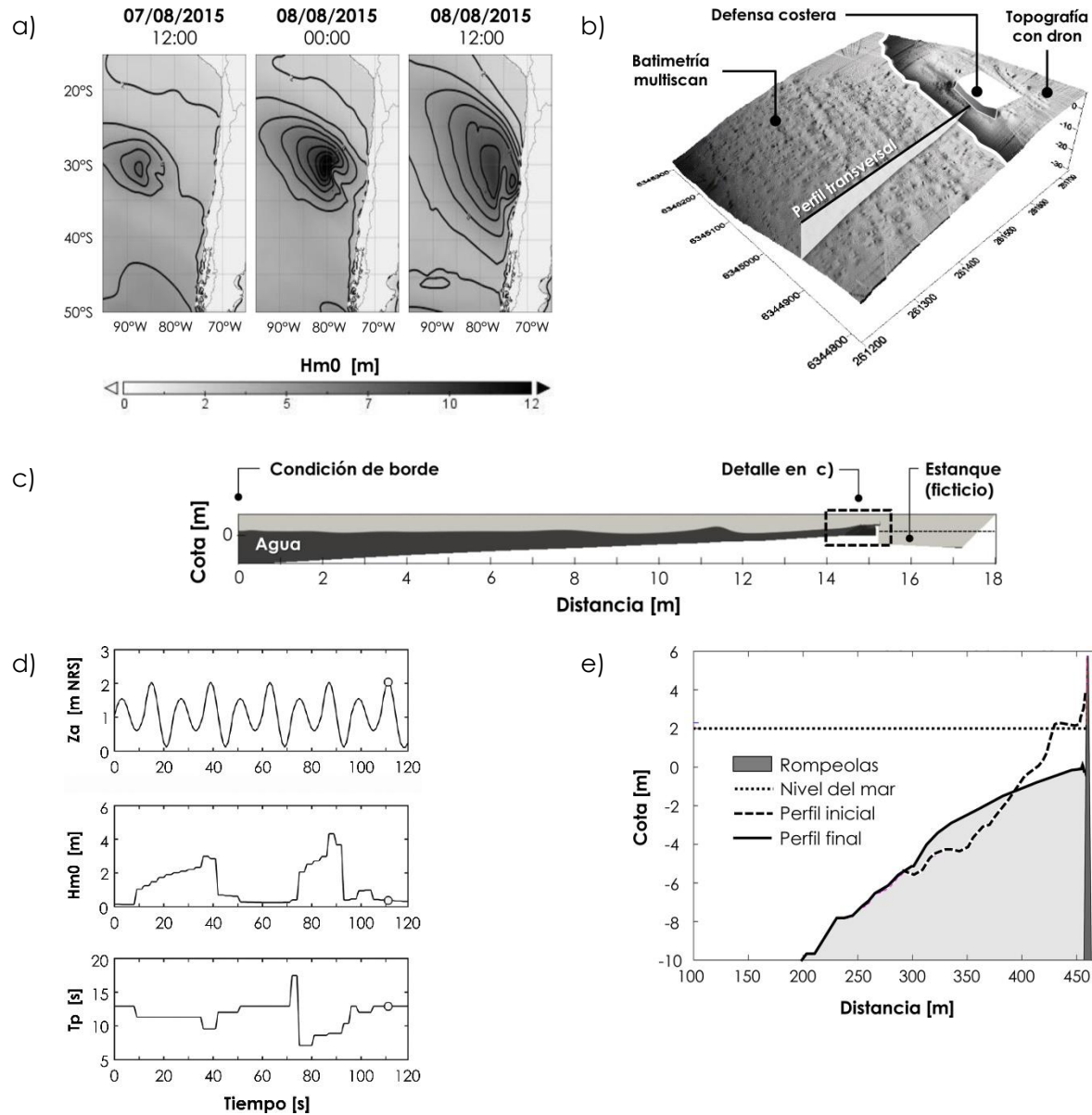
En lugares donde no hay fuentes de información, es posible determinar las tasas de transporte litoral sobre la base de la medición o modelado de las condiciones locales del oleaje, especialmente considerando los parámetros de altura, período y el ángulo de la rompiente respecto de la costa. Los estudios pueden basarse en un esquema híbrido, donde la modelación física se utiliza para validar los modelos numéricos, que posteriormente se utilizan para evaluar muchos más casos que en la práctica no serían factibles mediante modelación física, por los costos y plazos que ésta implica. Los estudios se pueden efectuar a escala horaria, diaria, anual o interanual, dependiendo del proceso que interese estudiar.

Ilustración 35; Modelación física de la morfodinámica de Playa Lisera, desarrollada en el Instituto Nacional de Hidráulica, Peñaflo.



Fuente: Gentileza de Karla González, Directora del INH. En la foto se muestran los ingenieros Danilo Omeñaca (abajo), Esteban Hernández (izquierda arriba) y Max Borchert (derecha arriba).

Ilustración 36: Modelos de propagación de oleaje y de respuesta morfodinámica de playa para la marejada del 8 de agosto de 2015 en Viña del Mar. a) altura significativa de oleaje obtenida del modelo Wavewatch III. b) Vista tridimensional de la topobatimetría levantada en el sitio, incluyendo un perfil utilizado en la modelación. c) Modelo olaFOAM, a escala 1:30, utilizado para el cálculo de sobrepaso en la defensa costera. El agua, el aire y el fondo marino se representan con negro, gris y blanco, respectivamente. d) Series de tiempo de las forzantes de marea astronómica Z_a y oleaje; este último especificado mediante altura significativa H_{m0} y el período peak T_p a 20 [m] de profundidad. e) Respuesta de playa al momento de máxima socavación luego transcurridas 111 horas de modelación.



Fuente: Elaboración propia.

Documental sobre Erosión Costera

2.4.5 EROSION NATURAL EN LAS COSTAS

La posición de la línea costera en un momento dado es resultado de interacciones entre los sedimentos y procesos costeros asociados al oleaje, al viento, a la marea y al nivel del mar. La erosión natural puede entenderse, entonces, como un proceso geológico por el cual la naturaleza tiende a equilibrar estas interacciones. Cuando estas permanecen relativamente constantes en el tiempo, se desarrolla lo que denomina como un perfil de equilibrio de la playa. El entorno costero, no obstante, está caracterizado por i) tendencias a largo plazo, ii) variaciones cíclicas regulares, iii) variaciones cíclicas irregulares, iv) cambios abruptos y v) fenómenos que a veces no somos capaces de describir, y que podemos denominar como ruido. Estos ciclos naturales hacen que un perfil de equilibrio de playa se alcance durante periodos relativamente cortos de tiempo durante los cuales las condiciones oceanográficas experimentan variaciones poco significativas.

Ilustración 37: Descomposición de una serie de tiempo de nivel del mar mediante un modelo aditivo, donde las diferentes componentes se consideran independientes.



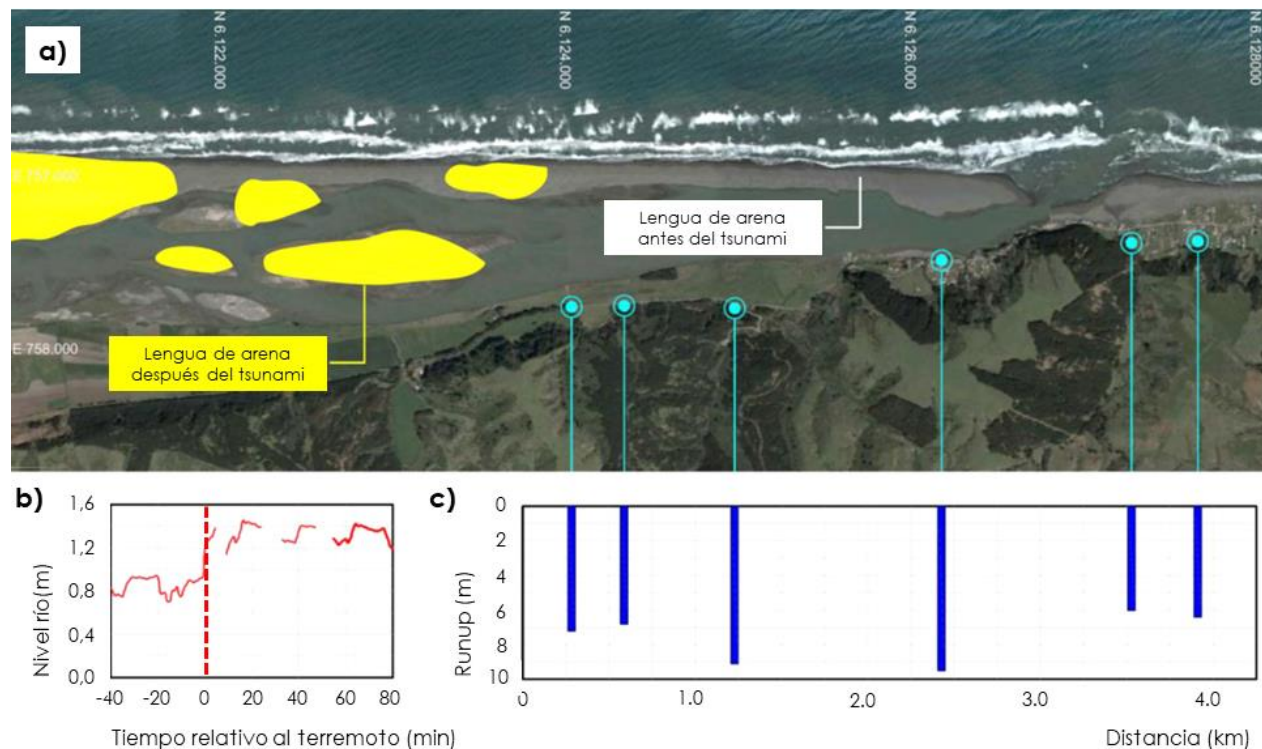
Fuente: Elaboración propia.

Si aplicamos esta idea al nivel del mar en una localidad (Ilustración 37), podemos decir que la variación a largo plazo está asociada al cambio climático (del orden de décadas a milenios) o al período intersísmico (del orden de décadas a centurias) que ocurre entre dos terremotos de gran magnitud. Las variaciones cíclicas regulares pueden atribuirse, por ejemplo, al ciclo diario de las mareas (12,42 horas), al ciclo característico de las mareas de sicigias y cuadraturas (14 días) o a las oscilaciones estacionales (1 año). Las variaciones cíclicas irregulares se asocian, por su parte, a una marea meteorológica debida al descenso sostenido de la presión atmosférica y

vientos hacia la costa (del orden de horas) o a un meteotsunami activado por fluctuaciones rápidas de la presión atmosférica (5 minutos a 2 horas). También, y a mayor escala temporal, está el aumento del nivel del mar durante la fase cálida del ciclo Niño Oscilación del Sur –ENOS– o su reducción durante la fase opuesta, denominada la Niña (del orden de años). Los cambios abruptos pueden atribuirse a sollevamientos o subsidencias cosísmicas que ocurren durante un terremoto (del orden de segundos), cambios de la posición de un mareógrafo cuando las series son muy largas o el impacto de un tsunami, o a intervenciones antrópicas. El ruido puede estar asociado a errores instrumentales, a procesos físicos que desconocemos, o aquellos que alteran el nivel del mar a otras escalas de tiempo, como el oleaje. Naturalmente, que este tipo de división de escalas puede ser aplicado a la posición de la línea de costa, que está íntimamente relacionada con el nivel del mar, o a cualquier variable en el ámbito de las geociencias.

El movimiento de sedimentos en el perfil de la playa se produce en forma diferente según suba o baje el nivel del mar. El aumento del nivel tiende a erosionar la playa seca y a acrecentar la playa sumergida (Ilustración 14). Su descenso, por el contrario, ocasiona la acreción en la parte superior de la playa. Las mareas, por ejemplo, generan una variación de la zona de la playa que se encuentra expuesta al oleaje y del nivel de saturación, o contenido de agua, del lecho sedimentario. Una pleamar promueve la rotura del oleaje en una zona más alta que una bajamar; del mismo modo, durante una sicigia, los niveles de la playa expuestos a esa acción son más altos que durante una cuadratura. Así, se produce erosión de la playa en pleamar, la que puede verse aumentada durante las sicigias o con la ocurrencia de una marea meteorológica.

Ilustración 38: Movimientos masivos de sedimentos en la desembocadura del río Mataquito, producto del tsunami y la subsidencia costera provocada por el terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile Central. a) Imágenes satelitales de la lengua de arena antes y después del tsunami. b) Nivel de río aguas arriba de la desembocadura, mostrando el aumento producto de la subsidencia costera. c) Mediciones de runup (cota de inundación respecto del nivel del mar) producido por el tsunami.



Fuente: Elaboración propia.

Cabe notar que no todos estos cambios conducen a una erosión neta significativa a largo plazo. Incluso la erosión causada por las marejadas, los tsunamis o la subsidencia cosísmica puede ser compensada una vez que se reestablecen las nuevas condiciones de equilibrio del sistema. La Ilustración 38, por ejemplo, muestra los movimientos masivos de sedimentos y el cambio abrupto de la forma de la desembocadura del río Mataquito, producto del tsunami y la subsidencia costera provocada por el terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile Central. Al cabo de un par de años, la desembocadura recuperaría parcialmente su forma, mostrando cuán dinámicos y adaptables son estos sistemas sedimentológicos ante las condiciones oceanográficas. La Ilustración 39, por su parte, muestra una línea de costa ubicada en Punta de Lobos, en las cercanías de Pichilemu, que producto del efecto conjunto de la subsidencia costera del mismo terremoto y un año Niño muy intenso durante 2016 y 2017, retrocedió, acomodándose a nuevas condiciones de equilibrio dinámico. Cabe notar que el río Mataquito se ubica a 60 [km] al sur de Punta de Lobos y constituye, junto al río Maule las fuentes de aporte sedimentario de dicha playa.

El tiempo de recuperación de un sistema sedimentológico en la costa puede abarcar semanas, meses o incluso años, siendo mayor en las playas de arena más gruesa pues son menos volubles al desplazamiento provocado por la hidrodinámica. Salvo en condiciones excepcionales en que la arena es desplazada lejos de la zona de rompiente –como durante un huracán o una marejada fuerte– la playa tiende a mantener una posición cercana al perfil de equilibrio a lo largo del tiempo. Los cambios eustáticos, esto es la variación global del nivel del mar respecto a los continentes, pueden también llevar a una erosión neta a largo plazo.

Ilustración 39: Erosión natural en Punta de Lobos, 6 [km] al sur de Pichilemu, producida inicialmente por la subsidencia del terreno producto del terremoto del 27 de febrero de 2010 en Chile Central, y acrecentada durante el ciclo El Niño de 2016-2017, que se asoció a un aumento del nivel del mar y a marejadas intensas y frecuentes. a) ilustra la posición aproximada de la línea de costa, ubicada varias decenas de metros de la posición actual. b) muestra el escarpe del orden de 6 m provocado por la erosión.



Fuente: Elaboración propia.

En una línea costera estable, se mantiene un equilibrio aproximado entre el suministro de sedimento y la capacidad de transporte litoral. Si el aporte sedimentario de un sector de la playa se reduce, el oleaje puede ocasionar una fuerte erosión mediante los mecanismos de transporte transversal o litoral. El suministro de sedimento puede reducirse como resultado de modificaciones naturales o de origen antrópico en el curso de ríos o en los sistemas de drenaje. La sensibilidad a estos cambios naturales es bastante clara en el caso de los deltas (sección 2.3.1.5): Cuando un río cambia su curso, algunos tributarios del delta son abandonados, pierden su sedimento y se erosionan como resultado de la acción del oleaje. En otros lugares se crean nuevos deltas que avanzan hacia el océano producto del aumento del suministro de sedimento, que supera los

efectos erosivos de las olas. Los efectos del oleaje son más pronunciados en las regiones de micromareas (Ilustración 25).

El sistema sedimentológico costero también puede verse afectado por modificaciones de origen antrópico, como la estabilización de terrenos colindantes a las playas que resulta de medidas de protección costera, los programas de conservación del suelo y/o vegetación, la construcción de presas hidroeléctricas o embalses en los ríos y la extracción de arena para la construcción. Estas modificaciones se detallan en la sección 2.4.6.

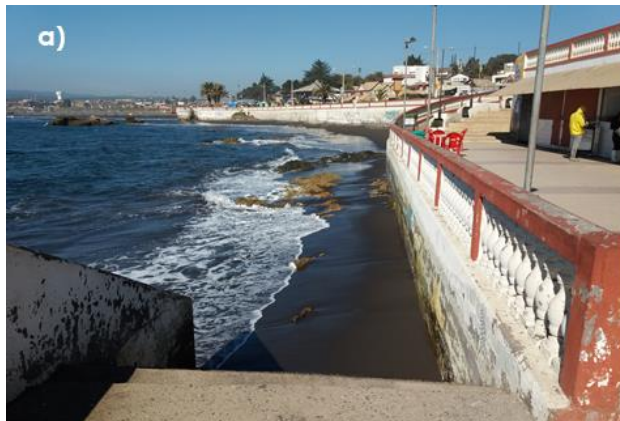
La vegetación terrestre y aquella de origen acuático en las aguas próximas a la playa influyen directamente en la reducción de la erosión al conglomerar el sedimento y al reducir la turbulencia cerca de la superficie sedimentaria. En los sitios donde la vegetación costera es densa -como en dunas, manglares, y bancos de algas- la erosión y el transporte de sedimento se lentifican. En ciertas lagunas y bahías tropicales, los manglares y las hierbas de marisma pueden acelerar la sedimentación fracciones finas como el limo y la arcilla. La pérdida natural de vegetación debida a sequías o desertificación, o aquella debida a la acción del hombre, puede provocar erosión en ciertos casos.



2.4.6 EROSION PROVOCADA POR EL HOMBRE

Las actividades antrópicas provocan erosión cuando interfieren con los procesos costeros naturales. Según la distancia a la costa, estas acciones pueden clasificarse como aquellas que se efectúan tierra adentro, en la zona litoral y en la costa propiamente tal. Al interior del continente se desarrollan actividades tales como la construcción de presas, la extracción de áridos del lecho fluvial y la alteración de los sistemas de drenaje. En la zona litoral se efectúan acciones como la deforestación del suelo, la explotación forestal, la extracción de áridos, la construcción de obras costeras (Ilustración 40) y la descarga de residuos sólidos. Finalmente en la línea de costa también se extraen arenas y gravas para dragados.

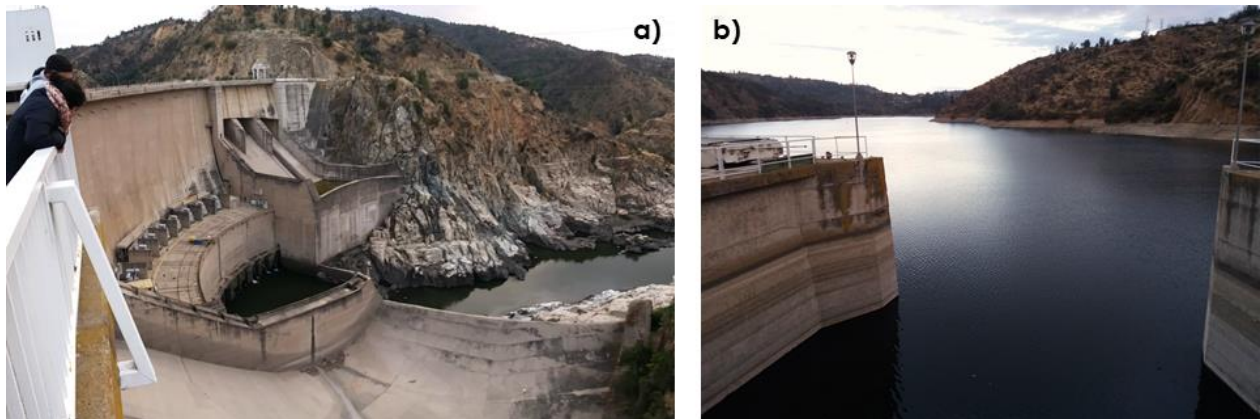
Ilustración 40: Erosión de origen antrópico debida, en parte, a la construcción de muros verticales sobre playas. a) Caleta de pescadores de Pichilemu, donde la rampa de varado de botes se encuentra inutilizada por el descenso de la playa. b) Playa al sur de la caleta de Algarrobo, donde antiguamente existía una playa arenosa.



Fuente: Elaboración propia.

Las presas se construyen en los ríos con fines de riego, generación de electricidad, control de inundaciones y formación de embalses. Por formar parte principal del sistema de drenaje de las tierras altas, los ríos son una importante fuente primaria de suministro de sedimento, que puede ser interrumpido por estas construcciones. Cuanto más baja sea la presa y más frecuente el vaciamiento de aguas y sedimentos, menor será el efecto erosivo en la costa. En efecto, las presas de riego que son bajas y tienen mecanismos de derrame pueden retardar el suministro sedimentario a corto plazo, pero la pérdida es pequeña a largo plazo. Con la retención de sedimentos en las presas se genera, asimismo, una erosión del lecho del río aguas abajo que en parte compensa la pérdida de sedimento aguas arriba de las mismas. Esta erosión, nociva para las obras fluviales, requiere de acciones de ingeniería adicionales para la protección de la ribera. La Ilustración 41 muestra la central hidroeléctrica Rapel, cuyo muro tiene 112 metros de alto y 350 metros de extensión. La central puede generar 377 MW y almacenar 695 millones de metros cúbicos de agua. Sus efectos aguas abajo, sin embargo, no han sido estudiados a la fecha.

Ilustración 41: Central hidroeléctrica Rapel. a) muestra el muro de doble curvatura que alberga la sala de máquinas y los vertederos tipo salto de ski que se utilizan para regular el nivel en años lluviosos. Se observa la roca madre aguas debajo de la presa producto del potencial erosivo del caudal de salida. b). Espejo de agua aguas arriba de la presa que da forma al lago Rapel.



Fuente: Elaboración propia.

Las arenas y gravas extraídas del lecho fluvial, de las playas y de la zona litoral constituyen una fuente importante de material de construcción en muchos países. Dicha extracción genera un efecto análogo al de las presas, pues reduce la provisión de sedimento y promueve la erosión del río aguas abajo del sitio de empréstito. Si la extracción se efectúa en el tramo más alto de la cuenca, hay posibilidad de que la erosión del lecho fluvial aguas abajo compense la pérdida de sedimento, lo cual depende de la magnitud de la extracción. Pero si la arena se extrae en las cercanías de la desembocadura, es improbable que la erosión aguas abajo compense la pérdida de sedimentos, generando un déficit neto en el suministro de las costas. La extracción de sedimentos es evidente en los grandes ríos de la zona central de Chile, como el Aconcagua, el Maipo y el Bío-Bío. El suministro de sedimento se distribuye también sobre la costa y el litoral por el escurrimiento natural de las lluvias. Los sistemas de drenaje hechos por el hombre pueden interferir con este proceso, pues al concentrar el agua de lluvia ocasionan una erosión localizada y acrecencia en otros lugares si son mal diseñados.

La eliminación excesiva de las plantas para uso como combustible y el exceso de pastoreo son causa de deforestación en las zonas costeras. La disminución de la cubierta vegetal que liga físicamente y coloniza los sedimentos se traduce en un mayor escurrimiento del agua en la superficie. La falta de vegetación también acentúa la erosión al exponer al sedimento al viento

y el oleaje. Por ejemplo, las antedunas que forman una línea defensiva contra esas acciones pueden ser destruidas por el pastoreo excesivo. Los cambios de la cubierta vegetal pueden retardar o acentuar la erosión, lo cual depende de si la nueva vegetación liga a los sedimentos con más o menos fuerza que la anterior.

La arena y la grava se explotan en las costas de muchos países en desarrollo, pues la tecnología es relativamente sencilla. Los depósitos de esos materiales acumulados en las playas constituyen una fuente de suministro de sedimento, la cual es mermada por la extracción para fines constructivos. Un proceso similar ocurre cuando los urbanizadores alteran indiscriminadamente el perfil de la playa para desarrollos inmobiliarios los cuales, idealmente, debieran ejecutarse lejos de la zona influenciada por los agentes oceánicos. El grado en que la extracción de arena influye en la erosión costera depende de varios factores. Si bien esta puede no ser la causa primordial de la erosión costera en gran escala, tiene un efecto local que será más marcado cuanto más pronunciada sea la deriva litoral. No obstante, cuando la extracción considera grandes volúmenes de arena, puede ser causa de erosión uniforme en toda la extensión de la playa. Por otra parte, el efecto erosivo de la extracción puede pasar inadvertido durante temporadas de oleaje suave, y solo aflorar ante la ocurrencia de eventos extremos.

Por lo general, las excavaciones efectuadas para la construcción de edificaciones destruyen la ligazón del sedimento al eliminar los revestimientos superficiales y aumentar el escurrimiento de las lluvias. Esta práctica tiene sobre la erosión un efecto parecido al de la desvegetación. Una vez construidas, las estructuras refuerzan el terreno y provocan una reducción del suministro de sedimento, que queda inmovilizado bajo las fundaciones.

Paradójicamente, las estructuras destinadas a impedir la erosión costera pueden contribuir a generar erosión aguas abajo de las mismas, o socavación en sus contornos. Estas estructuras pueden ser perpendiculares o paralelas a la costa, siendo denominadas como espigones (Ilustración 16d) o diques exentos (Ilustración 16e), respectivamente. Por lo general, su función es de proteger el terreno y las propiedades en tierra firme. La magnitud de la socavación depende de diversos factores naturales como las condiciones del oleaje, las características del sedimento, el perfil de la playa, además de factores relacionados como la geometría, permeabilidad y porosidad de la estructura. Las estructuras verticales y altamente reflejantes, como los malecones que albergan paseos costeros, promueven la socavación (Ilustración 40). Esta es menor cuando el frente de la estructura no presenta singularidades en su geometría, tiene pendientes suaves y su estructura es más permeable. Cuando las estructuras son demasiado voluminosas y próximas al agua puede producirse una causa adicional de obstrucción de la deriva litoral, generando una acumulación de sedimentos aguas arriba y erosión aguas debajo de la estructura.

Las zonas costeras suelen emplearse también para descargar residuos sólidos con el objetivo de ganar terreno al mar para instalaciones portuarias. Los rellenos modifican la pendiente y la orientación de la playa, pudiendo también obstruir la deriva litoral, lo cual produce acreencia deriva arriba y erosión deriva abajo (Ilustración 16g). El influjo de aguas cloacales y residuos cenagosos provenientes de zonas urbanizadas, por su parte, no influyen en la erosión de la costa puesto que por su peso constituyen sedimentos en suspensión.

La extracción de arenas depositadas en el litoral puede reducir el suministro de sedimento del sistema. Esta actividad altera la geometría del fondo, modificando el patrón de propagación del oleaje y concentrando la energía en lugares puntuales de la costa. La extracción puede aminorar la capacidad del lecho para absorber la energía del oleaje y acrecentar en consecuencia la incidencia de este sobre la línea costera. Es necesario, asimismo, considerar los dragados que se desarrollan para trazar y mantener canales de navegación, o garantizar la profundidad de sitios de atraque en puertos. Cuando el dragado se efectúa en sentido perpendicular a la costa, modifica la tasa de acumulación de sedimento en las inmediaciones de la obra, promoviendo la

erosión deriva abajo. Por otra parte, la descarga de material dragado en lugares ubicados aguas arriba de una zona potencialmente erosiva puede atenuar el retroceso de la línea de costa.

Al planificar toda actividad extractiva debe por tanto tenerse en cuenta estos procesos mediante estudios que cuantifiquen la dinámica litoral en una franja costera. El presupuesto sedimentario, que no es más que la aplicación del principio de conservación de la masa de sedimentos del litoral (sección 2.4.4.1), requiere del cálculo de las fuentes (crédito), sumideros (débito) y el balance en un compartimento sedimentario dado. La aplicación de este concepto permite obtener información útil para hacer frente a los problemas de la erosión en las playas, porque una vez determinada la fuente de pérdida de sedimento pueden adoptarse medidas correctivas.



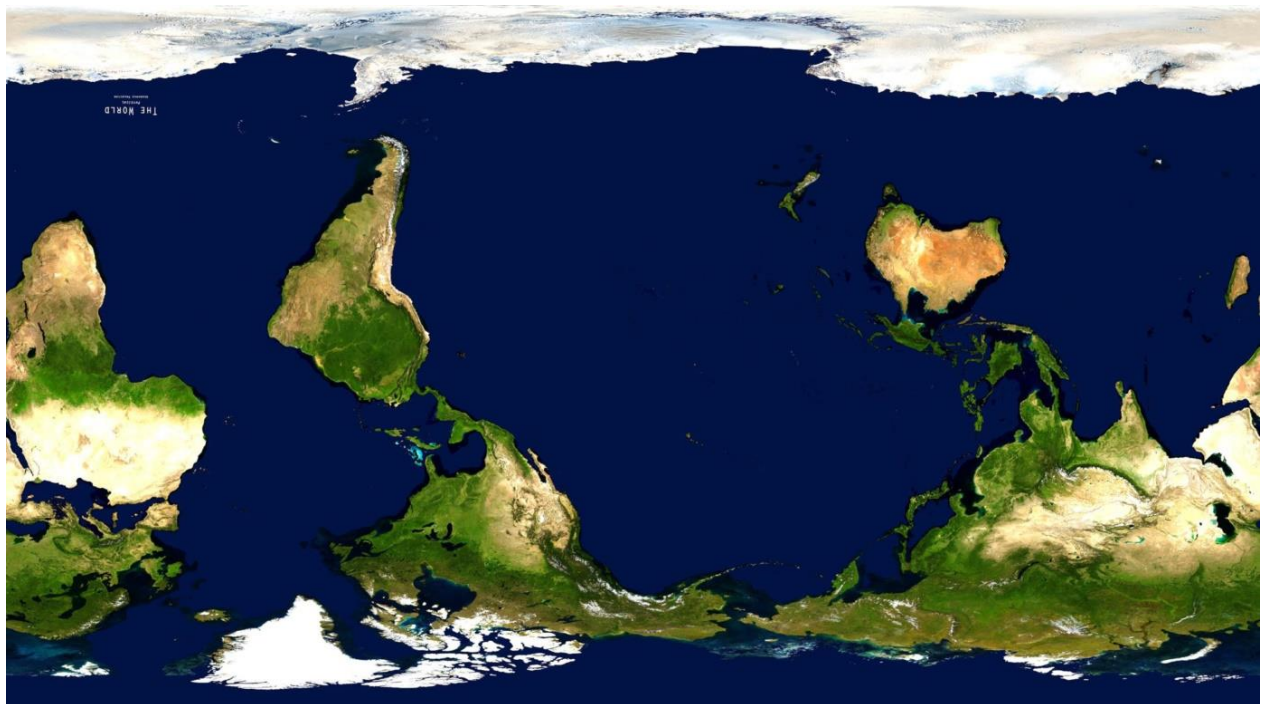
3 EL BORDE COSTERO DE CHILE

3.1 MARCO DE REFERENCIA

El borde costero de Chile enfrenta al Océano más grande de la Tierra (Ilustración 42). La zona costera y la plataforma continental adyacente están definidas por fenómenos naturales que dan a cada una de ellas un conjunto de características propias. Los límites de estas zonas, que se modifican en diferentes escalas de tiempo, permiten la existencia de procesos activos de intercambio altamente dinámicos en este extenso litoral.

A escala oceánica, esta compleja dinámica se hace evidente con la persistencia de la corriente de Humboldt, relacionada con la fuerza con que llega al continente la “Deriva del Oeste”. Esta deriva resulta a su vez del fortalecimiento del giro anti ciclónico causado por el centro de altas presiones del Pacífico Sur. Estos procesos dependen también de la penetración de las aguas oceánicas, las cuales modifican los procesos de surgencia costera, cuya intensidad aumenta con los vientos procedentes del suroeste. La surgencia es el ascenso vertical de agua profunda, rica en nutrientes, producida por la acción combinada de corrientes geostroficas y vientos regulares a lo largo de una costa. Este fenómeno ocurre en pocos lugares en el mundo y es responsable de la intensa actividad pesquera en el norte de nuestro país. Menos permanente pero sí muy significativa es la influencia de aguas subecuatoriales durante los eventos de “El Niño”. La literatura especializada ha denominado a las zonas presentes en el Mar de Chile como el Frente Ecuatorial, la Convergencia Subtropical, la Deriva del Oeste y la Convergencia Antártica o Frente Polar.

Ilustración 42: Mosaico de fotografías satelitales del mundo (donde se no se muestran nubes). La fotografía está en proyección Equirectangular. A diferencia de la mayoría de los mapas, éste se centra en el Océano Pacífico y muestra el norte hacia abajo.



Fuente: Adaptado de <http://www.worldmapsonline.com/>

La influencia de esta gran masa oceánica se manifiesta prácticamente en todo el territorio, puesto que Chile continental tiene un ancho máximo de 300 kilómetros y apenas 90 en su parte más angosta. Este extenso litoral de nuestro país se extiende desde la latitud 18°16'S hasta los 56° 30'S, y alcanza una longitud de 4.200 kilómetros. Su eje central es el meridiano 70°W en su límite norte, desplazándose paulatinamente hasta el Meridiano 74°W en el extremo sur. Esta particular configuración física constituye el marco donde en forma creciente se manifiesta el uso antrópico del borde costero, lo que se evidencia en el extraordinario auge de los desarrollos inmobiliarios, de los cultivos marinos en la industria del salmón y del turismo.

A ello se debe además la instalación de plantas eólicas, termoeléctricas y desalinizadoras de agua de mar, la actividad portuaria y de cabotaje, que en conjunto hacen del litoral una de las unidades geográficas de mayor importancia para el desarrollo de un país netamente ribereño como el nuestro. De hecho, los puertos cumplen un rol estratégico para la integración comercial de Chile con el mundo pues transfieren en torno al 90% del comercio internacional (SEP, 2006).

Ilustración 43 Mosaico de fotografías satelitales del Chile.



Fuente: South_America_satellite_orthographic.jpg

En este contexto, los rasgos geológicos, edafológicos, climatológicos, geomorfológicos, geofísicos y oceanográficos juegan un rol decisivo, estructurando condiciones complejas que afectan a la población ribereña. De hecho, el territorio continental muestra varias zonas climáticas, desde los márgenes subtropicales en el norte hasta las regiones sub-polares del extremo austral, que lo hace único a nivel mundial.

Así por ejemplo en la formación de los suelos han intervenido un conjunto de condiciones climáticas, geológicas, geomorfológicas y ambientales. La condición montañosa de Chile trae como consecuencia que la mayor parte de éstos sean suelos jóvenes en su evolución. Asimismo, la actividad volcánica presente en gran parte de la Cordillera de Los Andes, incorpora materiales que generan un rejuvenecimiento de los suelos. Este fenómeno se suma a la erosión provocada por la actividad fluvial en las laderas de los valles medios, promoviendo un aumento de la sedimentación y por ende el rejuvenecimiento de los suelos en Chile.

Adicionalmente, el relieve constituye un factor importante en la distribución de la población. Más del 60% de la superficie del país presenta altitudes considerables que dificultan el asentamiento. Como consecuencia de ello, la población ha tendido a ocupar áreas relativamente bajas y planas ubicadas de preferencia en la depresión intermedia. La disponibilidad de agua es otro factor con influencia importante, asociado a las condiciones climáticas existentes. La preferencia del

colonizador hispano por el ambiente mediterráneo contribuye en parte a explicar la localización de las ciudades en zonas con ventajas comparativas en términos de pendientes, climas y suelo.

Políticamente el país se organiza en regiones con una capital regional que actúa como centro administrativo y regulador de sus actividades. Las regiones se subdividen en provincias, que son unidades territoriales intermedias con características económicas semejantes. A su vez, las provincias están constituidas por unidades territoriales menores, llamadas Comunas, en donde las acciones gubernamentales se ejercen en forma más directa. Es notable que, a excepción de la Región Metropolitana, todas las regiones tengan un borde costero.

Los factores que han influido en la actual distribución de la población nacional están ligados a las etapas históricas de poblamiento y a la centralización político-administrativa. Desde la Conquista en adelante se produjo la ocupación del centro del país, expandiéndose desde allí a los extremos norte y sur, pero manteniendo una centralización político-administrativa desmesurada en Santiago, capital del país. Es notable desde un punto de vista demográfico, que un tercio de la población se concentre en esta ciudad, ubicada en una depresión longitudinal, a espaldas del océano.

Adicionalmente, el relieve constituye un factor importante en la distribución de la población. Más del 60% de la superficie del país presenta altitudes considerables que dificultan el asentamiento. Como consecuencia de ello, la población ha tendido a ocupar áreas relativamente bajas y planas ubicadas de preferencia en la depresión intermedia. La disponibilidad de agua es otro factor con influencia importante, asociado a las condiciones climáticas existentes. La preferencia del colonizador hispano por el ambiente mediterráneo contribuye en parte a explicar la localización de las ciudades en zonas con ventajas comparativas en términos de pendientes, climas y suelo.

Ilustración 44: Plantas termoeléctricas en Huasco. En la zona norte, este tipo de plantas queman carbón para generar energía que se utiliza en la gran minería.



Fuente: Archivos personales.

En la formación de los suelos interviene un conjunto de condiciones climáticas, geológicas, geomorfológicas y ambientales. La condición montañosa de Chile trae como consecuencia que la mayor parte de éstos sean suelos jóvenes en su evolución. Asimismo, la actividad volcánica presente

en gran parte de la Cordillera de Los Andes, incorpora materiales que generan un rejuvenecimiento de los suelos. Este fenómeno se suma a la erosión provocada por la actividad fluvial en las laderas de los valles medios, promoviendo un aumento de la sedimentación y por ende el rejuvenecimiento de los suelos en Chile.

3.2 DEMOGRAFÍA

La **demografía** es la ciencia que estudia, mediante técnicas estadísticas, las poblaciones humanas según su estado y distribución en un momento determinado o según su evolución histórica.

De acuerdo con resultados preliminares del censo de 2017, el Instituto Nacional de Estadística estimó que la población de Chile alcanzó 17.373.831 habitantes, lo que implica un aumento del 15% respecto del censo de 2002. La población que vive en los 100 municipios costeros representó el 25% en 2002 (3.953.562 habitantes), cifra que sin embargo no proporciona detalles sobre la población que vive en zonas costeras ubicadas a menos de 10 kilómetros sobre el nivel del mar, y que se denominan LECZ⁵ en la literatura especializada (McGranahan et al., 2007).

Las estimaciones de la población urbana, rural y total, así como el área en las LECZ, están disponibles a nivel de país para 1990, 2000 y 2010 en CIESIN (2013). Estas estimaciones muestran que las LECZ en Chile cubren 7.865 [km²] y representan el 1,09% del territorio (Tabla 1). El porcentaje de tierra en las LECZ es mucho más pequeño que para el Mundo y América Latina (Tabla 2), hecho que se explica por las terrazas costeras comparativamente altas que resulta de la actividad tectónica.

Las cifras indican que en 2010, 214.863 habitantes vivían en las LECZ, lo que corresponde al 1,2% de la población. De estos, 71,3% correspondió a zonas urbanas y 28,3% a zonas rurales. La población chilena en las LECZ también es menor que para el mundo y América Latina, donde representan el 10% y el 6%, respectivamente. Entre 1990 y 2010, la población en estas zonas aumentó en un 30,4% y la densidad creció de 21 a 27 [hab/km²]. Estas cifras históricas y la predicción para 2100 son consistentes con las tendencias globales que muestran rápidos incrementos en la población costera y el consiguiente aumento del riesgo de desastres relacionados con el cambio climático (Church et al., 2013).

Tabla 1: Extensión territorial en zonas urbanas y rurales ubicadas bajo los 10 metros sobre el nivel medio del mar. Se incluye la comparación con estadísticas de América Latina y el Mundo. La data fue extraída de CIESIN (2013).

Tipo	Chile			América Latina	Mundo ^(b)
	LECZ [km ²]	Total [km ²]	LECZ / Total [%]	LECZ / Total [%]	LECZ / Total [%]
Total	7.865	721.447	1,09 %	2 %	2 %
Urbana	154	12.028	1,28 %	7 %	8 %
Rural	7.711	709.419	1,09 %	-	-

(a) La superficie de Chile es 2.006.096 km² (INE, 2016) incluyendo el territorio insular y la Antártica. Excluyendo la Antártica el territorio cubre 755.838 km².

(b) McGranahan et al. (2007).

⁵ LECZ: Low Elevation Coastal Zones.

Entre los factores naturales presentes en nuestra geografía, el clima juega un papel importante, que marca tres zonas poblacionales. La zona desértica en el norte (18°S ~ 30°S) está escasamente habitada, con la excepción de algunas ciudades costeras con 150 a 300 mil habitantes como Arica, Iquique, Antofagasta y La Serena. Considerando los territorios interiores, esta zona alberga menos de un 9% de la población del país. Los asentamientos urbanos se han desarrollado en torno a la actividad minera, la cual dio origen a poblaciones que se establecieron en torno a los yacimientos ubicados al interior, pero que en los últimos decenios se han desplazado hacia ciudades costeras.

Tabla 2: Población y densidad ubicadas bajo los 10 kilómetros sobre el nivel medio del mar en 1990, 2000 y 2010, además de predicciones en 2100. La data fue extraída de CIESIN (2013).

Tipo	Población				Densidad	
	Año	LECZ [hab]	Total [hab]	LECZ / Total [%]	LECZ [hab/km²]	Total [hab/km²]
Total	1.990	164.725	13.171.967	1,25 %	21	18
	2.000	189.054	15.403.485	1,23 %	24	21
	2.010	214.863	17.269.525	1,24 %	27	24
	2.100	330.022	29.503.039	1,12 %	42	41
Urbana	1.990	113.632	5.750.094	1,98 %	738	478
	2.000	132.645	6.962.873	1,91 %	861	579
	2.010	153.190	8.041.294	1,91 %	995	669
	2.100	238.005	12.368.161	1,92 %	1.545	1.028
Rural	1.990	51.093	7.421.873	0,69 %	7	10
	2.000	56.409	8.440.612	0,67 %	7	12
	2.010	61.673	9.228.231	0,67 %	8	13
	2.100	92.017	17.134.878	0,54 %	12	24

La mayor disponibilidad de recursos naturales y las mejores condiciones climáticas de la zona central (30°S ~ 42°S), han contribuido a una mayor diversidad de la actividad económica, resultando en una mayor homogeneidad en la distribución y ocupación del territorio. Esta zona abarca gran parte de la población costera en las grandes áreas metropolitanas de Valparaíso y Concepción, con casi 1 millón de personas cada una, y ciudades más pequeñas como Puerto Montt y Valdivia. Si se considera el territorio continental, esta región abarca el 91% de la población del país.

La parte más meridional del país (42°S ~ 55°S) es casi inhóspita debido a las duras condiciones climáticas y la compleja geomorfología. Esta zona presenta formaciones vegetales en sectores casi impenetrables, de difícil manejo y suelos poco aptos para la agricultura, lo que dificulta su explotación y limita el asentamiento permanente de la población. La excepción es la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes, conocida como la Patagonia Chilena, en donde se da una ganadería ovina a gran escala y una explotación petrolera de orden menor. Estas características hacen que la población se encuentre dispersa en pequeños núcleos, y solo Coihaique y Punta Arenas constituyan centros urbanos de consideración. En su conjunto, esta zona solo alcanza al 1,7% de la población nacional.

3.3 CLIMATOLOGÍA

La climatología es una ciencia de la tierra que estudia del clima y sus variaciones a lo largo del tiempo. El clima, por su parte, es la descripción estadística del tiempo atmosférico en términos de valores medios y variabilidad de cantidades como la temperatura, la precipitación, el viento y la presión atmosférica. Según la OMM⁶, el período normal para la estimación del clima en una localidad es de 30 años.

3.3.1 EL CLIMA EN CHILE

En Chile, el clima tiene su origen en procesos que se desarrollan en la extensa superficie oceánica que enfrenta, por lo que se debe poner especial atención en el funcionamiento del sistema océano-atmósfera. En este capítulo hacemos una descripción de los diferentes climas que, de norte a sur, caracterizan nuestro país (Ilustración 45). El hecho de cruzar latitudes a lo largo de 4.200 kilómetros hace que Chile sea único en cuanto a la variedad de climas.

El clima depende también de los sistemas que predominan en diferentes zonas. Por ejemplo, la Baja Térmica Continental que se origina en la meseta amazónica, contiene una masa de aire tropical que en invierno se retira, afectando sólo ocasionalmente al norte y zona central del país. Una cuña de esta baja térmica se desplaza en verano al sur, alcanzando incluso a la región de Aysén. Se acompaña de un aumento en la temperatura, de la formación de bajas relativas y de pantanos barométricos, que en conjunto forman grandes mantos de stratus a lo largo del país, cubriendo desde la cordillera de la costa hasta unos 50 kilómetros en el océano. Estos mantos nubosos, que reciben el nombre de camanchaca en la pampa del norte, persisten por períodos largos y generan lloviznas sin viento significativo. Su ingreso al territorio se manifiesta cuando el margen del APS se debilita y se retira sobre el océano.

Descendiendo latitudinalmente, aparece un segundo sistema climático ubicado desde los 40° ~ 50° hasta el paso de Drake, en el que predomina una circulación ciclónica intensa y un flujo sin contrapeso de masas de aire polar marítimo, que provoca lluvias y frío. El aire polar marítimo se va recalentando al avanzar hacia menores latitudes sobre el océano, por lo que se torna inestable y húmedo. La circulación lleva estas masas de aire originadas sobre el mar hacia el continente, proceso que se facilita en la zona austral por la casi inexistente cadena montañosa y el desmembramiento del territorio en numerosos archipiélagos. Esta condición climatológica es responsable de los frentes de mal tiempo que recorren grandes distancias sobre el océano. En su camino, son sometidos a procesos de estabilización sobre las aguas frías sub antárticas y de subsidencia anti ciclónica, por lo que alcanzan la costa del país con un carácter ocluido. Estas perturbaciones tienen efectos de corta vida y viajan en invierno hacia el norte, hasta alcanzar las costas entre los 42°S y los 27°S, desplazando el aire polar desde altas a bajas latitudes. Desde los 27°S hacia el norte, el APS impide su acceso, en tanto que desde el 42°S al sur conforman la situación climática regular. El arribo de estas perturbaciones se manifiesta entre mayo y septiembre, aunque en ocasiones se presenta en verano. Otras perturbaciones se originan en las vaguadas oceánicas establecidas entre los centros anticiclónicos y, aunque en forma menos significativa, en las bajas pre litorales ubicadas frente a la costa.

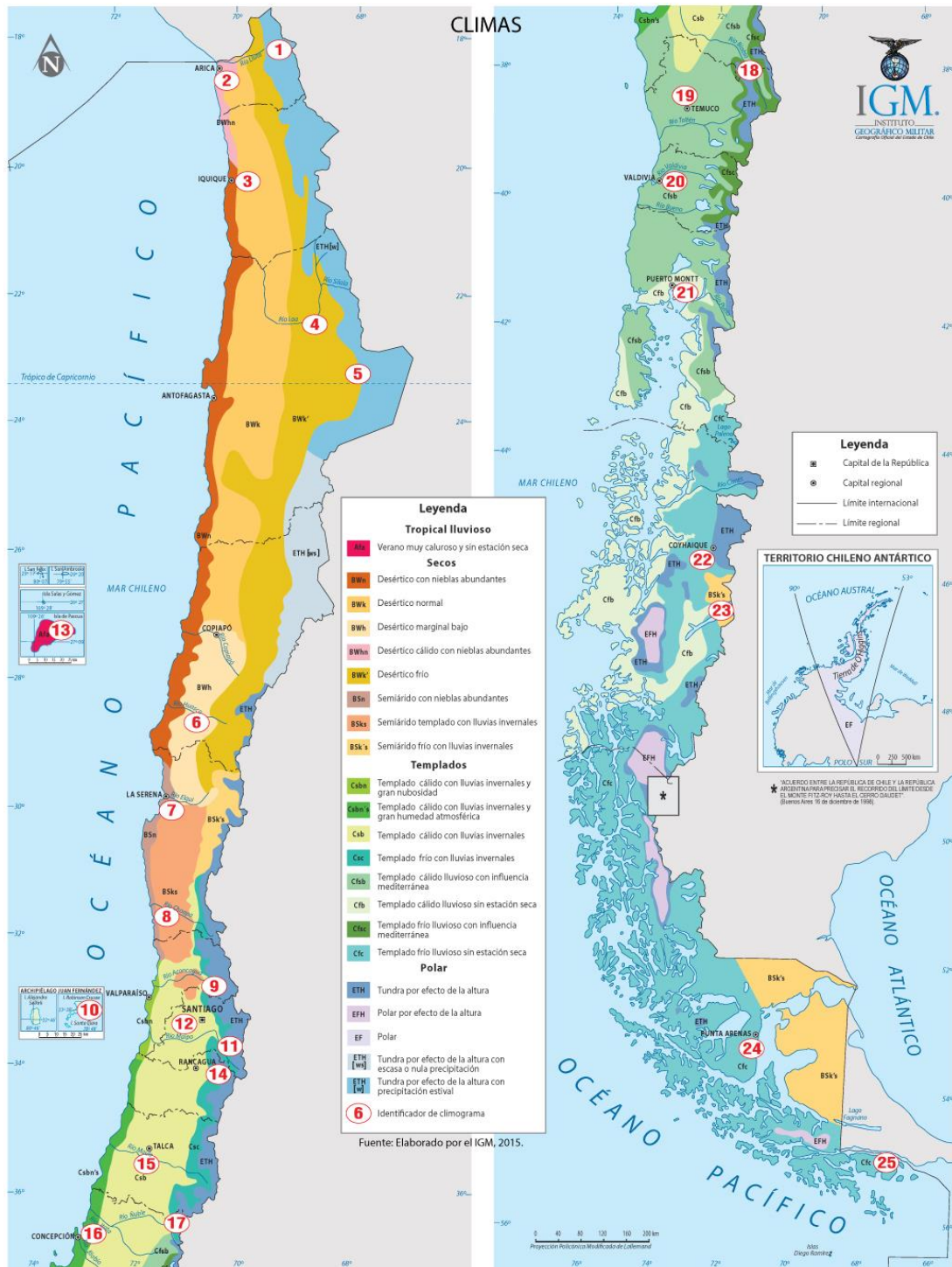
Otro elemento climático de importancia es el denominado Frente Polar, el cual se ubica a la cuadra⁷ del Golfo de Penas. Haciendo centro en este punto, sufre desplazamientos latitudinales de acuerdo con la estación del año y regula la trayectoria de las depresiones que afectan nuestro litoral. En verano, el frente se desplaza al sur y en conjunto con el APS limitan la trayectoria de los centros de baja presión desde los 50°S al sur, sintiéndose sus efectos hasta Chiloé por la costa y Temuco y Victoria en el interior. Al igual que el Anticiclón Oriental del Pacífico Sur (APS), en

⁶ OMM: Organización Meteorológica Mundial

⁷ En lenguaje marino, "a la cuadra" significa frente a la costa.

invierno se desplaza al norte, promoviendo el ingreso de los ciclones de baja presión entre Constitución y Ráper. Ocasionalmente estas depresiones se desplazan a latitudes de entre 33°S y 34°S, incluso un poco más al norte de Juan Fernández. Ello ocurrió, por ejemplo, en los años 1965 y 2015, donde el viento máximo registrado en Valparaíso fue del orden de los 50 nudos desde el noroeste.

Ilustración 45: Mapa climático de Chile.



Una vez que las depresiones se han formado, inician un movimiento con dirección general este, con ligeras desviaciones al norte y sur. Su penetración se manifiesta en el territorio, cuando el margen del APS se debilita y se retira sobre el océano. En verano, debido a que el APS se encuentra desplazado a latitudes más altas, las depresiones se desplazan al sur y las trayectorias de sus vórtices fluctúan entre los paralelos 50°S y 60°S. Normalmente los efectos alcanzan hasta Chiloé, pudiendo ocasionalmente llegar hasta Corral, en los 40°S. En invierno, en contraste, el APS se sitúa en latitudes más bajas y las depresiones se forman más al norte. La trayectoria de los vórtices fluctúan entre los paralelos 40°S y 50°S.

En régimen de los vientos en la costa de Chile está regularizado por dos tipos de circulación:

- **Circulación anticiclónica**, originada por el margen oriental del anticiclón del Pacífico
- **Circulación ciclónica** de las depresiones migratorias que impactan en el litoral centro-sur.

Este sistema varía con las estaciones. En verano, los vientos del S y SW se experimentan a lo largo de casi todo el litoral, los cuales van disminuyendo de intensidad y retirándose de Coquimbo al norte, a medida que avanza el invierno. Por su parte, los vientos SW en verano, y particularmente en la zona costera, experimentan durante el día un notorio aumento de su intensidad, la cual va disminuyendo paulatinamente después de la puesta del sol. Esta anomalía es de carácter térmico, alcanzando ocasionalmente intensidades de 30 a 35 nudos. A su vez en invierno, en este mismo litoral central y sur, predominan los vientos del 4^{to} cuadrante⁸, dependiendo su dirección e intensidad de la ubicación del lugar con respecto al centro de baja presión que afecte a esa zona. Estos vientos de circulación ciclónica se manifiestan principalmente con dirección N o NW con una intensidad media que fluctúa entre 15 y 20 nudos, pero que pueden sobrepasar los 30 nudos con características de temporal. Los vientos de dirección W son más moderados.

3.3.2 LA CLIMATOLOGIA DEL SECTOR ENTRE ARICA A COQUIMBO

En la zona norte del país, el clima se caracteriza por la presencia del Anticiclón Oriental del Pacífico Sur (APS), que se ubica entre los 20°S ~ 40°S y los 80°W ~ 100°W. En esta región predominan las altas presiones superficiales con valores del orden de 1.028 [mb] en el verano y valores menores en el periodo invernal. El centro de este sistema, el anticiclón, se desplaza entre los 35°S en el periodo cálido y entre 25°S a 30°S en los meses de otoño e invierno. La presencia del APS ha conformado el desierto más árido del mundo, ya que impide la llegada de ciclones que traen lluvias, y que sólo ocasionalmente llegan en invierno.

El APS es un centro de altas presiones, estacionado en el Pacífico Sur. Su masa de aire es tropical marítima y presenta lentos desplazamientos estacionales en latitud. En invierno, su margen definido en la isóbara 1.017 [hPa], bordea el territorio desde los 40°S al norte y desplaza hacia el interior la baja térmica mencionada. Durante el verano se desplaza al sur y alcanza muchas veces el paralelo 60°S, desviando la trayectoria de las depresiones hacia el paralelo 50°S. En la costa chilena, el APS no produce grandes perturbaciones y generalmente trae buen tiempo. En verano, origina en la zona central una fuerte circulación de viento con dirección sur y suroeste⁹ y días

⁸ Los cuadrantes se utilizan para dividir en 4 la dirección desde donde viene el viento. El primer, segundo, tercer y cuarto cuadrante corresponden a las direcciones entre 0° a 90°, 90° a 180°, 180° a 270° y 270° a 360°, donde el ángulo 0° corresponde al norte y el ángulo se mide en sentido horario. Así, un viento proveniente del SW corresponde a la dirección 225°, y por tanto al tercer cuadrante.

⁹ En la meteorología, el viento se denomina por la dirección desde donde sopla.

generalmente asoleados. Estos antecedentes permiten asegurar que entre Arica y Coquimbo el clima muy regular a lo largo del año.

3.3.3 SECTOR ENTRE COQUIMBO AL GOLFO DE PENAS

El sector comprendido entre Coquimbo y la Isla Mocha es afectado por fuertes vientos del SW entre octubre y marzo, que suelen alcanzar hasta 35 nudos en horas de la tarde y ocasionar marejadas locales. Estos vientos que soplan del mar a la tierra se deben a una fuerte absorción calórica en el continente durante las primeras horas de la mañana. Desde mayo a septiembre, el sector es afectado por depresiones migratorias, cuya mayor frecuencia ocurre entre junio y agosto.

Por su parte las condiciones climáticas entre el Canal de Chacao y el Golfo de Penas son menos benignas que en las zonas norte y centro, debido a que esta región de bajas presiones se sitúa al sur del APS. El sistema isobárico oscila latitudinalmente durante las estaciones del año, siguiendo el movimiento estacional del Sol. El predominio anticiclónico alcanza su posición más austral entre enero a febrero y su posición más septentrional, entre julio y agosto. Este extremo del continente está afectado, a menudo, por las perturbaciones atmosféricas que se desplazan hacia el este, con violentos temporales de invierno que pueden también ocurrir en las otras estaciones. Las áreas de mayor frecuencia de temporales se encuentran distantes de la costa. Al sur de los 40°S y por los 90°W, la frecuencia de las tempestades es casi el doble que en la costa.

Las precipitaciones son extremadamente variables a medida que se avanza hacia el sur, alcanzando en Valdivia a más de 2.700 [mm] anuales. La mayoría de los lugares de la costa continental y de las islas situadas al sur del Canal de Chacao reciben más de 2.000 [mm] de agua caída durante el año. Dada la naturaleza montañosa de esta costa, las cantidades de agua caída durante el año difieren considerablemente de un punto a otro. Por ejemplo, en isla Guafo llueve alrededor de 3 días de cada 4, y su media anual es de solo 1.500 [mm], mientras que en Melinka llueve sólo uno de cada dos días.

Se puede decir que en esta región hay dos estaciones: verano e invierno. El verano comienza usualmente en septiembre, con vientos reinantes del noroeste que en invierno empiezan a rolar al suroeste. En verano los días son paulatinamente más largos y el Sol rompe algunas veces la nubosidad. Durante los meses de diciembre, enero y febrero, dominan los vientos intensos del suroeste. El cielo no llega a despejarse del todo, lo que ocurre sólo en los días de calma. Las lluvias en esta estación, son frecuentes y se presentan bajo la forma de fuertes y copiosos chubascos. A medida que se aproxima el invierno los vientos se hacen persistentes del 4^{to} cuadrante, acompañados de lluvias torrenciales y mangas de granizo tan espesas que oscurecen la atmósfera. Se producen así, las cerrazones.

3.3.4 SECTOR ENTRE EL GOLFO DE PENAS HASTA CABO DE HORNOS

En la región patagónica el verano abarca de octubre a marzo, y el invierno de abril a septiembre. La época más serena del año ocurre entre febrero y abril, cuando soplan los vientos del 3^{er} y 4^{to} cuadrantes, con algunos intervalos de calma que suelen prolongarse de 3 a 4 días. Ocasionalmente se dejan sentir también vientos del 2^{do} cuadrante, que rara vez alcanzan gran intensidad. En mayo suelen observarse marejadas fuertes, originadas por los temporales que se desarrollan en alta mar. En mayo y junio caen las primeras nieves, que continúan durante todo el invierno. Las nevadas son a veces muy espesas, hasta el punto de no permitir mayor visibilidad que unos 100 kilómetros. El paisaje cambia progresivamente, desde el verdor del verano a un

manto de nieve que puede extenderse hasta la cima de las montañas. En la parte norte de la región, la línea de nieves perpetuas se encuentra normalmente a los 1.100 kilómetros de altitud, bajando a unos 800 kilómetros en su parte sur. Con la entrada del verano, desaparece gradualmente la nieve, lo que produce el aumento del caudal de los arroyos y torrentes que drenan las cuencas. Los meses de junio y julio son los peores del año, pues vienen acompañados de grandes nevazones. Los mejores son septiembre, por sus calmas y vientos del este, y diciembre por sus días largos y despejados. El mal tiempo parece ser el estado normal de la región, que se interrumpe transitoriamente con episodios de buen tiempo.

Entre el Golfo de Penas y la boca occidental del Estrecho de Magallanes, los vientos del norte y sur disminuyen en frecuencia. En las aguas interiores, los vientos tienden a soplar a lo largo de los canales debido a la topografía, en tanto que las costas están más expuestas a los vientos dominantes. El efecto de la orografía sobre el patrón local del viento es importante en la zona austral de Chile, dado que éste tiende a aumentar su velocidad siguiendo la dirección de los senos, esteros, canales y valles. Los chubascos asociados a estos vientos se conocen con el nombre de "williwaws".

El mejor tiempo entre el golfo de Penas y los islotes Evangelistas, es cuando los vientos soplan del noreste al sureste. Los peores vientos, en contraste, son los del noroeste al suroeste pues forman olas hasta de 8 metros de altura, que subsisten varios días hasta que sopla el viento norte. Los temporales más frecuentes en estas costas y archipiélagos son los del noroeste y este, que duran mucho tiempo y generan mar arbolada (Ilustración 46).

El extremo austral del territorio se encuentra situado en las vecindades del frente polar, a una latitud subantártica bajo la influencia de la corriente fría de Humboldt, que contribuye a mantener una uniformidad climática característica de las zonas heladas del globo. La mayoría de las depresiones que afectan la región se forman en alta mar, entre los paralelos 50°S y 55°S, se desplazan hacia el este y frecuentemente hacen impacto en el territorio austral.

Ilustración 46: Escala de Beaufort

Grado	Denominación	V NUDOS	Estado de la Mar	Símbolo
0	Calma	<1	Mar lila como un espejo	
1	Ventolina	1-3	Mar rizada. Pequeña ondulación	
2	Flojito (brisa muy débil)	4-6	Pequeñas olas cortas. Mar rizada	
3	Flojo (brisa débil)	7-10	Las olas empiezan a romper. Mar rizada	
4	Bonacible (brisa moderada)	11-16	Olas bajas, algo largas. Marejadilla	
5	Fresquito (brisa fresca)	17-21	Olas largas. Algunos rociones. Marejada	
6	Fresco (brisa fuerte)	22-27	Grandes olas que rompen. Crestas blancas. Peligro para embarcaciones menores. Mar gruesa	
7	Frescachón (viento fuerte)	28-33	Espuma longitudinal por el viento. Mar muy gruesa	
8	Temporal (viento duro)	34-40	Olas altas que rompen. Espuma en bandas. Mar arbolada	
9	Temporal fuerte (muy duro)	41-47	Olas muy gruesas. El mar ruge. Mala visibilidad por rociones y espuma	
10	Temporal duro (temporal)	48-55	Olas muy gruesas. Superficie del mar blanca. El mar ruge intensamente. Espuma en el aire	
11	Temporal muy duro (borrasca)	56-63	Olas muy grandes. Mar blanca. Navegación imposible	
12	Temporal huracanado (huracán)	> 64	Aire lleno de espuma y de rociones. Visibilidad casi nula	

Fuente: www.masmar.net/esl/Apuntes-N%C3%A1uticos/Meteorolog%C3%ADa/El-viento.-Direcci%C3%B3n.Gradiente-de-presi%C3%B3n-y-el-viento.Simbolos.-Escala-de-Beaufort



3.4 OCEANOGRAFÍA

La **oceanografía** es la ciencia que estudia los mares y los océanos, desde el punto de vista físico, químico y biológico y geológico, así como su fauna y su flora. En esta sección introducimos las características típicas de las corrientes oceánicas, la marea astronómica, la marea meteorológica, el oleaje, los tsunamis y el nivel medio del mar frente a las costas de Chile.

3.4.1 CORRIENTES OCEÁNICAS

Tal como ocurre con las diferentes zonas climáticas a nivel continental, en el océano se han establecido fronteras que limitan zonas del Frente Ecuatorial, la Convergencia Subtropical, la Deriva del Oeste y la Convergencia Antártica o Frente Polar.

- El **Frente Ecuatorial** representa el límite norte del Pacífico Suroriental y constituye un verdadero freno para la penetración de la corriente de Humboldt en latitudes próximas al ecuador. Abarca una franja de cerca de 100 millas de ancho y se sitúa entre los 2°N y 3°S. Este frente oceánico se caracteriza por un fuerte gradiente térmico y salino. Situado en torno a los 80°W y 90°W entre las costas de Ecuador y las islas Galápagos, se manifiesta como un brusco cambio en la densidad en una banda a lo largo de la superficie oceánica, separando agua fría y salinas de la corriente de Humboldt de aguas cálidas y menos salinas en la región norte. Su localización, sin embargo, varía estacionalmente y su influencia no va más allá de los primeros 100 kilómetros en profundidad.
- La **Convergencia Subtropical** representa el límite entre las aguas oceánicas subtropicales cálidas y salinas que se superponen a la corriente de Humboldt y a la región influenciada por las aguas frías y menos salinas de origen subantártico. Se halla bien definida en la región oceánica, pero sufre cambios de posición en la región costera, tanto estacionalmente como por la presencia de fenómenos de mayor escala. Su posición normal frente a las costas de Chile se sitúa, en promedio, entre Caldera y Coquimbo (27°S y 30°S).
- Más al Sur, y coincidente con la zona del frente polar, se localiza la **Deriva del Oeste**, que arrastra aguas del Pacífico Central hacia el continente. Al actuar como una barrera, ésta produce un quiebre de este verdadero "río" de agua entre los 42°S y 43°S, originando la corriente de Humboldt que circula en dirección ecuatorial, y la corriente del Cabo de Hornos que se dirige hacia las zonas polares.
- Finalmente, la **Convergencia Antártica o Frente Polar** se localiza al Sur de los 50°S, experimentando una clara inflexión austral al aproximarse al continente. Este rasgo recibe, asimismo, el nombre de Frente Polar. A partir de este límite y hacia el Polo Sur se presenta el océano Antártico como una unidad diferente.

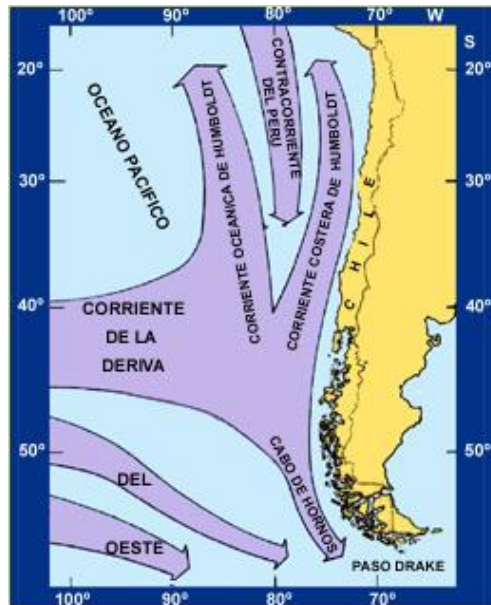
Este sistema de corrientes oceánicas divide las aguas en las siguientes zonas con características propias: La **Zona Norte Subtropical** que se extiende entre el límite marítimo con Perú y el área de la Convergencia Subtropical, cuyo centro promedio en la costa chilena se sitúa a la altura de Coquimbo (30°S). La **Zona Central Transicional** que abarca desde la Convergencia Subtropical hasta

los 43°S, donde se hace sentir con mayor intensidad la penetración de la Deriva del Oeste, que da origen a la corriente de Humboldt. La **Zona Sur-Antártica** que se extiende al sur de los 43°S y comprende la región de influencia de la corriente del Cabo de Hornos hasta la Convergencia Antártica o Frente Polar (36°S). Finalmente, la **Zona Antártica** comprende las aguas situadas al Sur de la Convergencia Antártica, en el denominado océano Austral, y que circunda el territorio Chileno Antártico.

En el océano se presentan una gran cantidad de movimientos a diferentes escalas. La dinámica decrece desde sistemas de escala planetaria como las grandes corrientes oceánicas, pasando por las corrientes de marea, ligadas a movimientos verticales del nivel del mar, a los movimientos superficiales ligados a las olas. En la escala menor, la turbulencia contribuye a la difusión de las diversas propiedades del agua de mar. Además, estos movimientos se encuentran ligados a la presión atmosférica distribuida sobre la superficie terrestre. En términos latitudinales, se presentan las siguientes características en la circulación oceánica de nuestra costa (Ilustración 47):

- En la zona norte, el sistema de corrientes superficiales se caracteriza por un flujo al norte constituido por la **corriente oceánica de Humboldt** más afuera, un flujo intermedio en dirección sur conocido como la **contracorriente de Perú-Chile** y un flujo en dirección norte, bastante alejado de la costa, que corresponde a la **corriente costera de Humboldt**.
- La costa central aparece dominada por un sistema de corrientes y contracorrientes que fluyen paralelas a la costa, interactuando en forma compleja.
- La zona sur subantártica es una de las menos conocidas. Una de las características más importantes de la circulación en esta región, corresponde a la división de la deriva del Oeste a la altura de los 43°S. Este fenómeno, único en el hemisferio sur, es el resultado del bloqueo del continente americano a la libre circulación de la deriva del oeste.
- La circulación oceánica que pasa por el sur de Tierra del Fuego es conocida como corriente del cabo de Hornos, y se desplaza al este, hasta el meridiano de las islas Diego Ramírez. En este punto, esta corriente gira al noreste, hacia el estrecho de Le Maire y la isla de los Estados, apartándose así del cuerpo principal de la corriente antártica del océano Pacífico; la cual, conserva un rumbo más cargado al este. La corriente del cabo de Hornos pasa, finalmente, a unirse con la corriente de las islas Malvinas (Falkland). La intensidad de la corriente del cabo de Hornos es variable, y tira hacia todos los rumbos del compás.

Ilustración 47: Sistema de corrientes frente a las costas de Chile

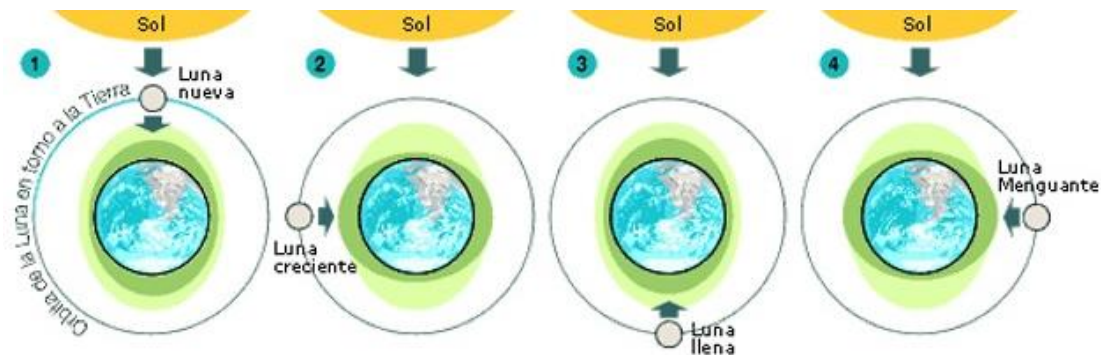


Fuente: desconocido

3.4.2 MAREA ASTRONÓMICA

Las mareas son el resultado del balance entre la atracción gravitacional de la Tierra, la Luna y el Sol y la fuerza centrípeta que experimentan dichos cuerpos durante su trayectoria. Debido a su proximidad y a pesar de su masa, la fuerza de atracción gravitacional que ejerce la Luna es en torno a dos veces la que genera el Sol, y por tanto domina en la formación de mareas. Cuando el Sol y la Luna están alineados, lo que se conoce como **marea de sicigia**, el rango de mareas es mayor¹⁰ (Ilustración 48). Cuando, por el contrario, ambos cuerpos celestes se encuentran en ángulos ortogonales respecto de la tierra, se genera una **marea de cuadratura**, cuya amplitud es menor.

Ilustración 48: Mareas de sicigias y cuadratura durante el ciclo lunar de 28 días.

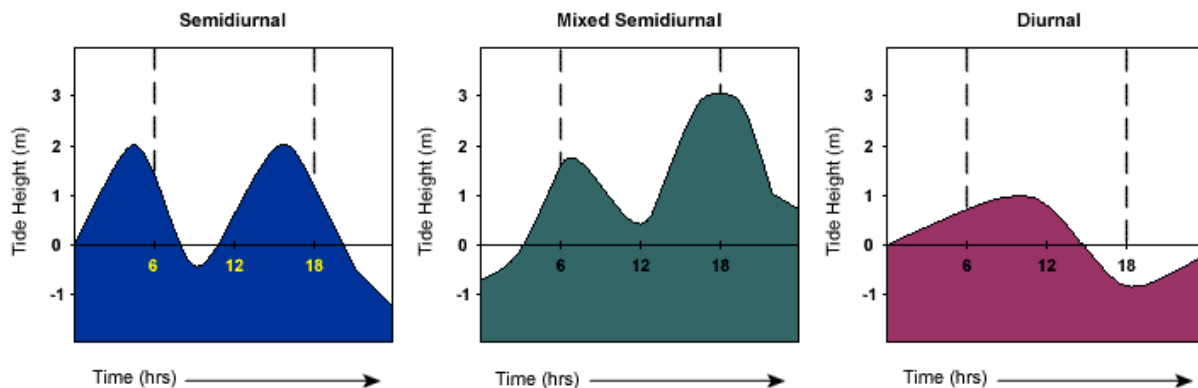


Fuente: desconocido

¹⁰ El rango de mareas se define como la diferencia de altura entre pleamar y bajamar.

Existen varios tipos de marea (Ilustración 49). La **marea diurna** se caracteriza por tener una sola pleamar al día y se da muy pocos lugares del mundo, como el sudoeste de Australia, en el mar de la China y en el Caribe. La **marea semidiurna**, en contraste, se caracteriza por dos pleamares y dos bajamares de similar amplitud al día, donde una pleamar y la bajamar siguiente ocurren en un intervalo de 6,24 horas. En la mayoría de los lugares del mundo predomina la **marea mixta**, donde las pleamares y bajamares sucesivas tienen diferentes amplitudes.

Ilustración 49: Regímenes de marea.



Fuente: desconocido

El régimen de marea está definido por el tamaño y forma de las diversas cuencas oceánicas y la latitud, entre muchas otras variables. Cada océano, golfo y mar interior tienen su propio régimen de marea, presentando amplitudes de entre una decena de centímetros y varios metros, dependiendo del lugar geográfico. Las amplitudes son altas únicamente donde las mareas entran en un cuerpo de agua semicerrado (golfo o mar interior) que tiene la forma y la profundidad para producir un período natural de oscilación del agua que esté en resonancia con algún período de la marea.

La amplitud de marea más grande en el mundo, de 16 kilómetros, tiene lugar en la bahía de Fundy, Canadá. Los mares interiores como el Mediterráneo, el Mar Negro y el Mar Báltico, en contraste, sufren oscilaciones menores. En las costas continentales del Atlántico, Pacífico e Índico se presentan mareas cuya amplitud no supera los 2 kilómetros. Los golfos y ensenadas tienen amplitudes típicas de entre 2 y 4 kilómetros producto de la amplificación de la señal. Esta condición se encuentra en el golfo de Tailandia, en la Europa occidental, en Indonesia, China, en la costa Pacífica de Panamá y en la desembocadura del Amazonas. Mareas de amplitud mayor a 4 kilómetros se limitan a zonas excepcionales, como el Canal de la Mancha, el sur de China, Australia noroccidental y el mar interior de Chiloé.

Además de subir y bajar el nivel del mar donde rompe el oleaje, las mareas pueden generar corrientes mareales periódicas. Las corrientes más fuertes se desarrollan en canales estrechos que comunican cuencas submarinas, donde son capaces de generar erosión, transportar una importante cantidad de sedimentos y formar profundos cauces submarinos. Bajo ciertas condiciones, las corrientes mareales transportan el sedimento a profundidades mayores que las asociadas al transporte generado por las olas.

Las mareas en Chile

La marea es uno de los fenómenos más relevantes en la oceanografía de Chile, siendo de particular importancia en la zona de los canales. La onda de marea se propaga de norte a sur en nuestras costas con una velocidad cercana a 500 [millas/hora], pero se reduce en la zona de los canales por el descenso en la profundidad. Eso hace, por ejemplo, que una pleamar se produzca unos minutos antes en Arica que en Iquique, y así sucesivamente hacia el sur. Al llegar a Chiloé, la onda de marea se divide en una rama que entra por el canal Chacao y una segunda que penetra por la boca del Guafo, encontrándose ambas en las cercanías de las islas Desertores y Chaúlinec. En la zona de los canales, cada localidad presenta características singulares debido a la influencia de factores meteorológicos y a la topobatimetría inmediata.

En general, la marea en nuestro litoral es del tipo mixta semidiurna con desigualdad diurna, es decir, que se manifiesta con dos pleamares y dos bajamares diarias de distinta amplitud. En las costas abiertas al Pacífico, las amplitudes fluctúan entre 1 y 2 kilómetros, mientras que en lugares como el seno Reloncaví y los golfos de Ancud y Corcovado, llegan incluso a los 7 kilómetros producto de la resonancia en el mar interior de Chiloé (Ilustración 51).

En las costas abiertas, las corrientes mareales son, salvo excepciones, inferiores a 1 [m/s]. En lugares como el Canal de Chacao, no obstante, éstas son muy intensas, variando desde los 2 nudos en su boca oriental hasta 9 nudos en roca Remolinos durante la sicigia equinoccial (Ilustración 50). El flujo tiene una regularidad de 6.21 horas, intercalando la corriente de flujo que se dirige al océano (vaciante) y la de reflujo que lo hace hacia el mar interior de Chiloé (llenante). La estoa¹¹ dura una decena de minutos y en la práctica es casi imperceptible. Durante las sicigias, las aguas toman la apariencia de un río, con escarceos y remolinos de gran violencia. Durante las cuadraturas, por el contrario, disminuye considerablemente la fuerza de estas corrientes.

La corriente de flujo que entra por la boca occidental del canal Chacao se divide en dos partes. Una primera rama fluye por el lado sur del banco Inglés hacia la bahía de Ancud, desde la cual se dirige al noreste y tira hacia la punta Pagueñún. La otra rama se dirige al Este por el lado norte del banco Inglés y se une después a la rama anterior. Debido a la complejidad de los canales que se ubican en la costa occidental del Golfo de Ancud, la dirección de las corrientes mareales es variada e irregular, pero tiende a tirar hacia el norte durante el flujo y hacia el sur durante el reflujo. La intensidad de estas corrientes varía comúnmente con el ancho y profundidad de los canales. En la parte central de los golfos de Ancud y Corcovado, la corriente mareal es en general baja, aumentando en la vecindad de las islas.

En el mar interior de Chiloé la señal se amplifica debido a la resonancia, alcanzando, en ocasiones, a 8 kilómetros en el Seno de Reloncaví, que alberga a la ciudad de Puerto Montt. Hacia el Sureste de la punta Piedras las corrientes mareales son, sin embargo, apenas perceptibles. Los fuertes vientos que soplan en esta región pueden, asimismo, alterar la hora y altura de la marea cuando soplan contra la corriente, como ocurre en el paso Queullín y el paso Nao. En el seno de Reloncaví, las corrientes y vientos pueden producir violentos escarceos y revesas, a las que en conjunto se les denomina "Rayas".

¹¹ La estoa corresponde al instante en que la corriente mareal se invierte. Se caracteriza por aguas calmas.

Ilustración 50: Canal Chacao en su zona más angosta y el Océano Pacífico en el horizonte. La estela central corresponde a turbulencias generadas por la Roca Remolinos. El borde costero a la derecha corresponde a territorio continental y a la izquierda la Isla Grande de Chiloé.



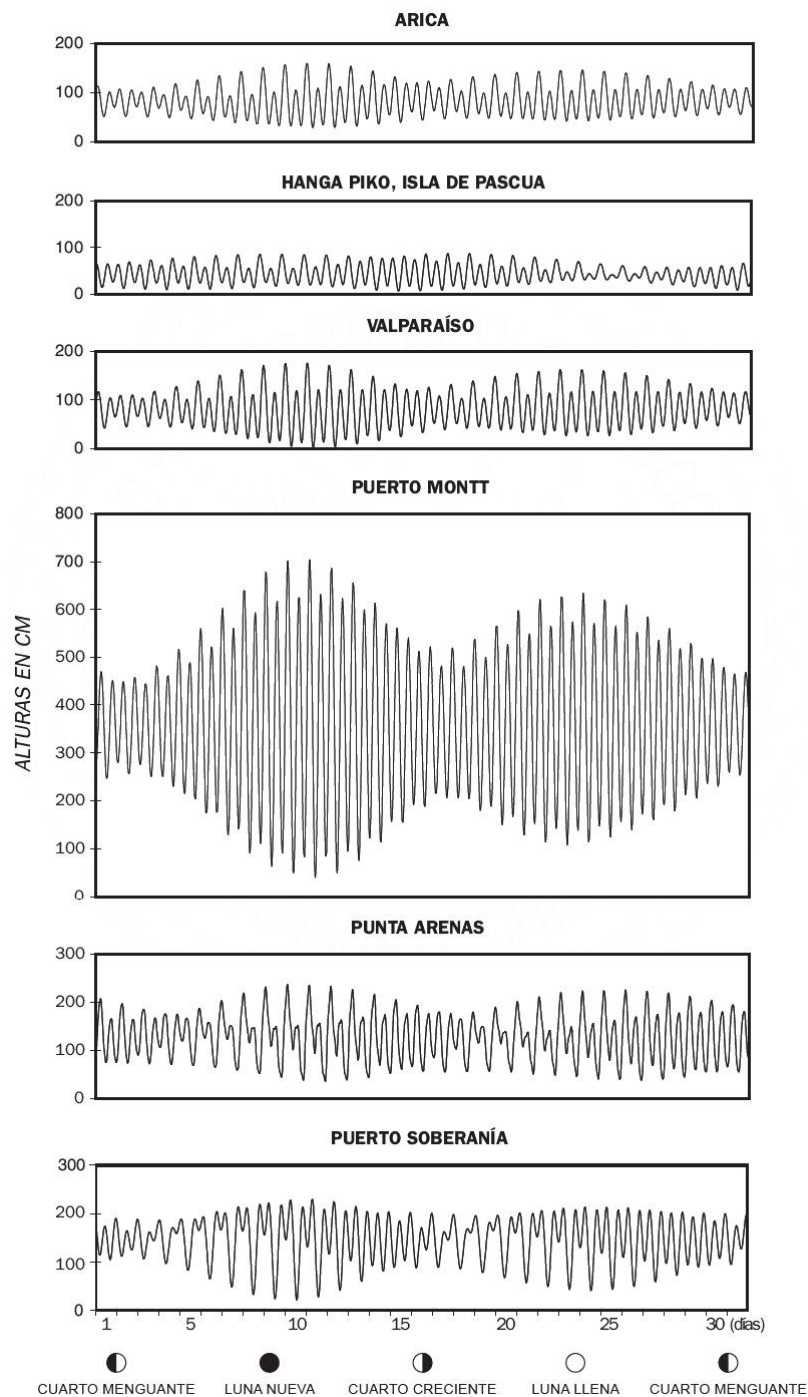
Autor: Horacio Parragué

Más al sur se presenta una zona de canales cuya dirección, profundidad y ancho son muy diferentes, lo cual genera una gran complejidad en la marea. A ello se agrega la influencia del viento, que según sea su dirección o intensidad, favorece o entorpece el movimiento de las aguas. En algunos sectores el viento puede producir notables anomalías tanto en las amplitudes y en las horas en que las pleamares y bajamares deben, en teoría, ocurrir. Otro importante factor es la presión barométrica dado que una baja de ella permite una mayor elevación de las aguas, fenómeno que se conoce como el "efecto del barómetro invertido". El efecto conjunto del viento y la presión atmosférica sobre el nivel del mar se denomina marea meteorológica (sección 3.4.3).

Más al sur, en el Estrecho de Magallanes, las corrientes son ocasionadas mayoritariamente por la marea, e influenciadas por los vientos dominantes del oeste. Ellas siguen la dirección del canal, excepto en la entrada de algunas bahías y canales transversales en los cuales son influenciadas por las corrientes de flujo. En la región occidental del Estrecho de Magallanes, las corrientes mareales son de media o baja intensidad, presentando rangos de entre 1,2 y 2,5 kilómetros. En la región oriental del Estrecho, las mareas presentan algunas particularidades. La primera es la variación del retardo que sufren la pleamar y la bajamar¹² a medida que la marea avanza desde punta Dungeness a Punta Arenas. La segunda es que las corrientes de flujo y reflujo continúan en el Estrecho de Magallanes hasta tres horas después de haberse producido la plea o la bajamar. En otras palabras, la corriente de flujo principia tres horas antes de la plea y persiste hasta tres horas después; fenómeno que también ocurre durante la vaciante.

¹² Definir: valor del establecimiento del puerto.

Ilustración 51: Curvas de marea representativas de la marea en el territorio chileno.



Fuente: Tablas de marea de la costa de Chile (SHOA, 2016).

Ilustración 52: Puerto pesquero de Carelmapu, en la ribera norte del Canal Chacao.



Fuente: Archivos personales.

Este régimen sufre algunas excepciones debido a la configuración de las bahías y bancos que desvían o dificultan el flujo. Ello puede observarse en las bahías Gregorio y Lomas, además de punta Catalina. Otro factor es el viento, el cual influye durante la cuadratura (cuando la marea de origen astronómico es mínimo) en la parte ancha del Estrecho de Magallanes. En la zona comprendida entre Dungeness y la Primera Angostura se presentan rangos cercanos a 11 kilómetros en sicigias medias. El rango decrece hacia el sur, alcanzando 6 kilómetros en la Segunda Angostura y 2 kilómetros en Punta Arenas. Esta gran diferencia genera un transporte periódico de grandes masas de agua del océano al Estrecho y viceversa, lo que da origen a las grandes corrientes que se observan en esta zona. Finalmente, la onda de marea que avanza desde el océano Pacífico, contornea el cabo de Hornos y se dirige hacia el Atlántico en el espacio comprendido entre las islas Falkland y el continente.



3.4.3 MAREA METEOROLÓGICA Y METEOTSUNAMIS

El fenómeno de la marea meteorológica (denominado *storm surge* en inglés) ocurre durante los temporales, que traen asociados campos de baja presión atmosférica y vientos fuertes. En la literatura, se suele separar el aumento del nivel del mar por presión atmosférica (*barometric set-up*), de la sobre-elevación por viento (*wind set-up*) generada por el esfuerzo de corte de éste sobre la interfaz agua-aire.

El cambio del nivel del mar se produce por la variación de la presión atmosférica con respecto a su valor medio y puede cuantificarse mediante la expresión del barómetro invertido, que dice que si existe un incremento de 1 [mbar] en la presión atmosférica, el nivel del mar desciende 1

[cm]. En contraste, un descenso de la presión atmosférica genera un aumento del nivel en la misma proporción. En las costas chilenas, este efecto puede alcanzar del orden de 30 [cm] en una escala de horas durante el paso de una depresión (Ilustración 53). La sobre-elevación por viento se puede estimar mediante formulaciones empíricas o modelos numéricos de uso común en ingeniería marítima. En general, su efecto en Chile es del orden de pocas decenas de centímetros debido a que nuestra plataforma continental es relativamente profunda.

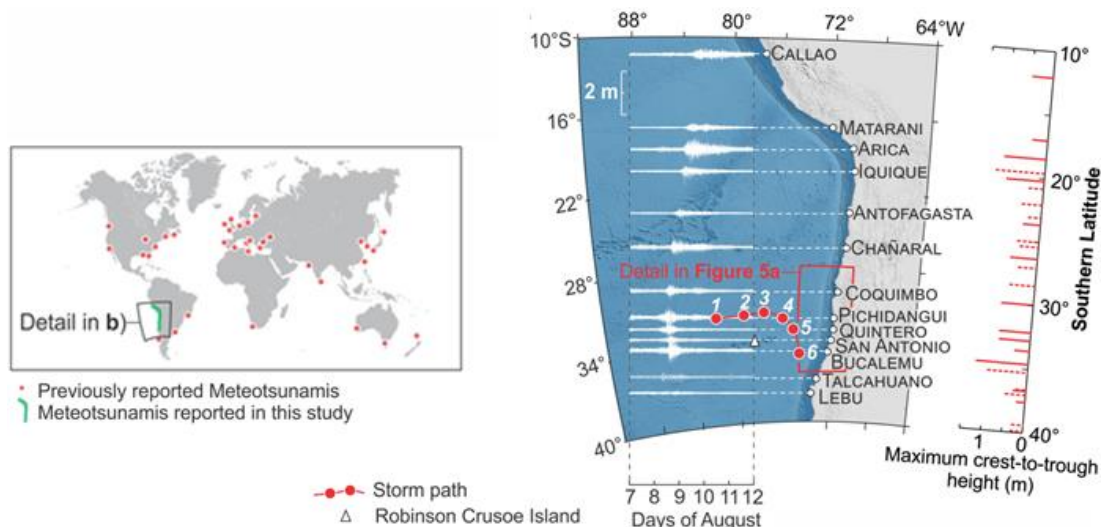
Ilustración 53: Marea meteorológica en la Estación de Montemar, de la Universidad de Valparaíso.



Fuente: Gentileza de Mauricio Molina, de Ingeniería Civil Oceánica UV.

La marea meteorológica puede ocurrir de manera conjunta con un meteotsunami, que corresponde a un aumento del nivel del mar producido por variaciones de presión y rachas de viento en una escala temporal de entre 5 minutos y 2 horas. Este fenómeno se produce con frecuencia y su ámbito de influencia es mundial, pero su conocimiento y estudio es insuficiente. Un ejemplo del primer meteotsunami reportado en las costas de Chile se presenta en la Ilustración 54 (Carvajal et al. 2017). El evento ocurrido el 8 de agosto de 2015 alcanzó en torno al metro de amplitud en la zona central de Chile y abarcó incluso a puertos peruanos.

Ilustración 54: Ejemplo del primer meteotsunami reportado en las costas de Chile.



Fuente: Carvajal et al. (2017).

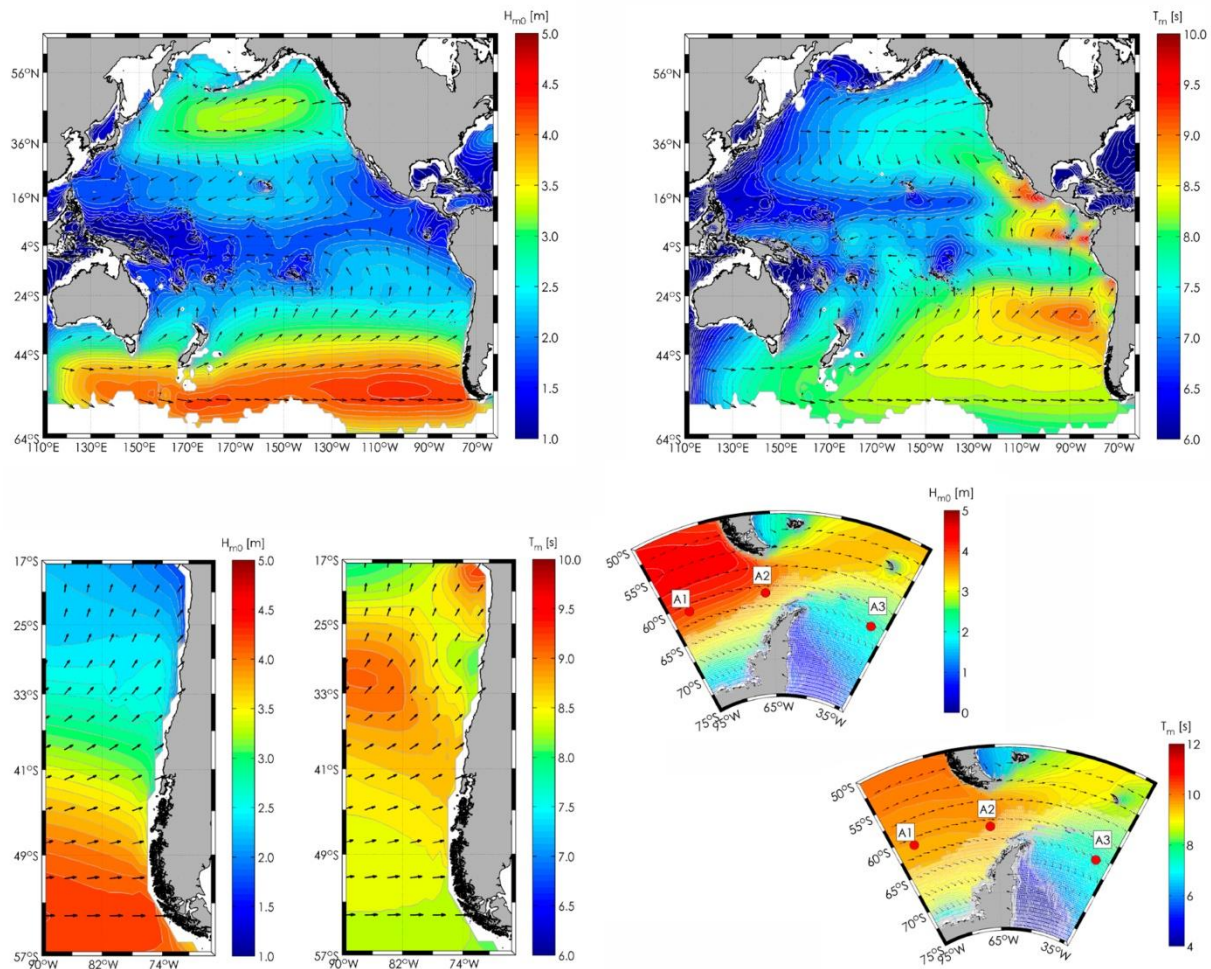
3.4.4 OLEAJE

El oleaje es el principal agente modelador de los procesos litorales en las costas abiertas entre Arica y la isla de Chiloé. En la zona de los fiordos, en contraste, estos procesos están dominados por las mareas, las corrientes, los vientos y las descargas de ríos de gran caudal. El comportamiento medio del oleaje permite conocer los aspectos de operatividad y seguridad en la navegación, estimar la erosión costera y evaluar los efectos de las ondas de largo período en instalaciones portuarias. Los eventos extremos, por su parte, definen el diseño estructural de obras marítimas. El oleaje se caracteriza mediante parámetros estadísticos como la altura, la dirección y el período, cuyo estudio se orienta a caracterizar las condiciones medias y extremas, denominados clima de oleaje operacional y extremo, respectivamente, en una localidad específica.

En general, el oleaje medio frente a las costas chilenas proviene principalmente desde el suroeste y noroeste y en menor medida desde el oeste. La altura significativa promedio varía entre 1.8 kilómetros para el extremo norte y alrededor de 4.0 kilómetros en el sur (Ilustración 55). Los períodos medios anuales se ubican entre 8 [s] en el sur y 10 [s] en el norte, lo que se explica por la distancia a las zonas de generación (dado que el período aumenta a medida que el oleaje envejece). En contraste, los eventos extremos, denominados también marejadas, bravezas de mar o temporales, se caracterizan por olas de gran altura formadas por fuertes vientos en el área oceánica, que se propagan a las costas de Chile. Por ejemplo, en Valparaíso, las máximas alturas significativas han excedido los 8 kilómetros, con longitudes de entre 100 a 300 kilómetros. Algunas marejadas generadas en el hemisferio norte durante verano se caracterizan por alturas bajas pero períodos inusualmente largos, que promueven el sobrepaso sobre las defensas costeras.

Los temporales se presentan con mayor frecuencia que otras amenazas costeras como los terremotos y tsunamis. Según el registro de desastres naturales de EMDAT (2017), en Chile ocurrieron 103 eventos entre 1900 y 2016, entre los que figuran 15 temporales que provocaron 273 víctimas fatales y afectaron a más de 500.000 personas. De esta forma, los temporales se posicionan como el tercer desastre natural más dañino, por sobre los incendios forestales, actividad volcánica, deslizamientos de tierra, sequías y sucesos de temperatura extrema. La tendencia muestra que las marejadas asociadas a dichos temporales aumentaron de un promedio de 5 eventos por año a mediados del siglo pasado a aproximadamente 20 eventos por año en el siglo XXI frente a Valparaíso (Martínez et al., 2017). Las marejadas tienen la capacidad de producir inundación de zonas costeras, erosión en playas, acantilados y efectos sobre el comportamiento operacional y estructural de las obras marítimas (Beyá y Winckler, 2013).

Ilustración 55: Campos de altura y período del oleaje en el Pacífico Sur, frente a Chile y en el territorio antártico.



Fuente: Adaptado del Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2017).

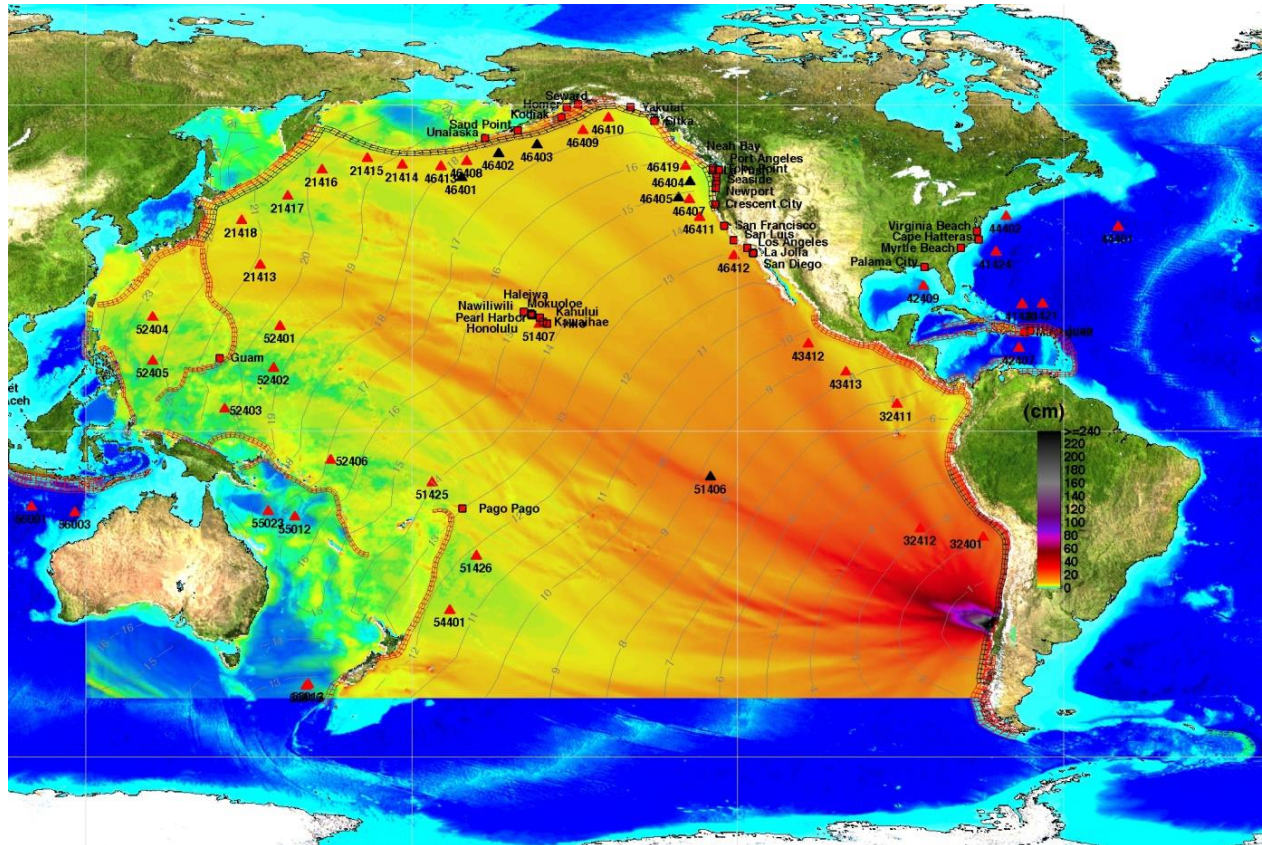
3.4.5 TSUNAMIS

Además de las olas formadas por el viento, existen otros tipos de oscilaciones tales como los tsunamis que es un término japonés que designa olas de largo periodo y que pueden ser provocadas por causas diversas. Su origen principal son los eventos sísmicos que al liberar una gran energía, provocan una fuerte perturbación en la superficie oceánica. Sin embargo cualquier fenómeno que introduzca gran cantidad de energía en el océano es capaz de generar un tsunami. Por ejemplo, los desprendimientos de tierras (*landslide tsunamis*), una erupción volcánica submarina, las perturbaciones atmosféricas (*meteotsunamis*) y la caída de un meteorito pueden ser otras fuentes de generación. Los tsunamis producidos por terremotos son capaces de viajar con baja altura y a velocidades cercanas a los 700 [km/h] en alta mar. Al llegar a la zona litoral, la reducción en la profundidad desacelera al tsunami y aumenta su altura hasta varios metros, producto del fenómeno conocido como asomeramiento.

Los tsunamis de origen tectónico son frecuentes en las costas del Océano Pacífico y Océano Índico debido a la alta sismicidad de sus márgenes activos de subducción. En cambio, las costas del Océano Atlántico apenas han sufrido las consecuencias de los tsunamis por predominar en sus

costas los márgenes pasivos. A pesar de ello, fue notable, el devastador efecto del tsunami de 1755, que junto a los estragos causados por el terremoto precedente, destruyó la ciudad de Lisboa en Portugal, acabando con la vida de más de 50.000 personas.

Ilustración 56: Modelación numérica del tsunami de 2010 en el Océano Pacífico.



Fuente: NOAA.

En Chile tenemos una larga historia de tsunamis de origen tectónico, entre los que destacan eventos recientes como los generados por los terremotos de El Maule en 2010, Illapel en 2014 e Iquique en 2015. Hay evidencia también de grandes eventos como los de 1868 y 1877 en la zona norte, 1922 en norte Chico, 1730 en el Chile central y 1835 y 1960 en el centro sur. Estos eventos pueden propagarse por todo el océano (Ilustración 56) y generar daños en nuestras costas (Ilustración 57). También experimentamos un landslide tsunami que causó la muerte de 10 personas en el Fiordo Aysén en abril de 2007.



Ilustración 57: Efectos del tsunami del 27 de Febrero de 2010 en la ribera sur del río Maule, en Constitución. La fotografía fue tomada a 2 kilómetros aproximadamente de la costa.



Fuente: Elaboración propia.

3.4.6 NIVEL MEDIO DEL MAR

En Chile el nivel medio del mar (NMM) corresponde al plano que adoptarían las aguas en reposo, depurada la acción de la marea (SHOA, 1992). El NMM responde a una determinada situación en el tiempo y en el espacio, y evoluciona a corto y largo plazo dentro de un momento geológico dado (Díez & Fernández, 2005). Se trata de un concepto relativo en el que se conjugan varios tipos de movimientos, tanto de los océanos como de la corteza terrestre, que se presentan a continuación:

- **Variaciones de largo plazo** que se explican por las variaciones en el volumen total del océano por la expansión térmica (Church et al., 2011) y por el derretimiento de hielos (Rignot et al. 2011). Por otra parte, efectos isostáticos y de subsidencia costera que provocan que los instrumentos que registran el nivel del mar asciendan o desciendan con respecto al NMM (Díez y Fernández, 2005).
- **Variaciones estacionales** asociadas a los cambios en la densidad del cuerpo de agua y en la distribución media de los campos de presión atmosférica, vientos y corrientes marinas superficiales (USEPA, 2009).
- **Variaciones cíclicas irregulares**, algunas de origen meteorológico y corto plazo como las mareas meteorológicas y las tormentas, que alteran el nivel del mar por la acción conjunta de la presión atmosférica y del viento (CEPAL, 2011). Hay variaciones irregulares de más largo plazo, como las perturbaciones generadas por ondas Kelvin asociadas al fenómeno ENOS (Díez y Fernández, 2005), que también alteran el nivel del mar.
- **Fenómenos transientes** o cambios abruptos de las referencias del NMM, que ocurren con el sollevamiento o subsidencia típicos de los terremotos de subducción que ocurren en nuestras costas. Destacan, por ejemplo, los cambios locales que sufre el NMM antes de un gran terremoto, que han sido ampliamente documentados en Chile para los terremotos de 1960 (Wyss, 1976) y 2010 (Farías, 2010; Vargas, 2011). A modo de ejemplo, para el terremoto de Chile en 2010, se registraron sollevamientos de hasta 3 kilómetros en el Golfo de Arauco.

Los asentamientos de terreno pueden ser causados también por la pérdida o compactación del material del suelo, el descenso del nivel freático y la descomposición

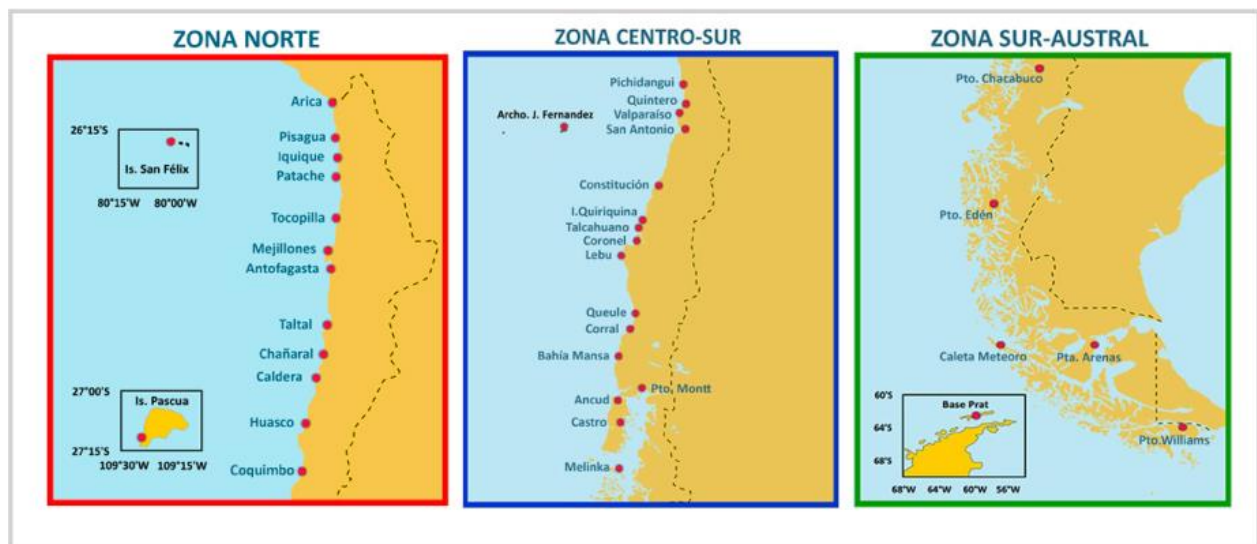
del suelos orgánicos como la turba. La relajación post-glacial puede también generar variaciones del nivel del suelo.

- **Ruido** correspondiente a procesos de naturaleza aleatoria y errores de registro instrumental.

Estas fluctuaciones implican que el NMM no es estacionario en una escala de tiempo corta, lo que dificulta la confiabilidad de los pronósticos y detección de posibles tendencias. Para comprender si existen cambios a largo plazo, se utiliza como estimador del NMM el promedio resultante de todas las pleamares y las bajamares en un mes (Gómez, 1994).

Desde 1968, el SHOA mantiene un centro de datos oceanográficos, hoy conocido como Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile (CENDHOC). Este servicio almacena los registros de las estaciones mareográficas instaladas en los principales puertos del país (Ilustración 58). Actualmente se cuenta con 40 estaciones de registro de nivel del mar con mayor densidad en el litoral centro-norte del país. Algunas estaciones funcionan desde el año 1944, pero varias presentan gaps que abarcan al 15% del volumen total de datos (Contreras et al., 2012).

Ilustración 58: Red mareográfica nacional.



Fuente: SHOA.

3.5 GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

La **Geología** es la ciencia que estudia el origen, formación y evolución de la Tierra, los materiales que la componen y su estructura. La **geomorfología**, por su parte, es la disciplina de síntesis que tiene por objeto la descripción y explicación del relieve terrestre continental y submarino.

3.5.1 FORMACIÓN DEL RELIEVE

La estructura geológica chilena es relativamente nueva y compleja, considerando los diferentes procesos que han intervenido en su formación. Las rocas más antiguas de Chile corresponden a formaciones prepaleozoicas y paleozoicas que datan de 600 a 300 millones de años, encontradas en la Cordillera de la Costa entre Taltal y Chañaral, una pequeña franja en Tongoy y entre Navidad y Concepción. Las formaciones prepaleozoicas están compuestas por pizarras arcillosas, filitas, micacitas y gneisses, en tanto que las formaciones paleozoicas se constituyen de calizas, pizarras y cuarcitas (Ilustración 59).

Ilustración 59: Clasificación de rocas.



Fuente: Desconocida.

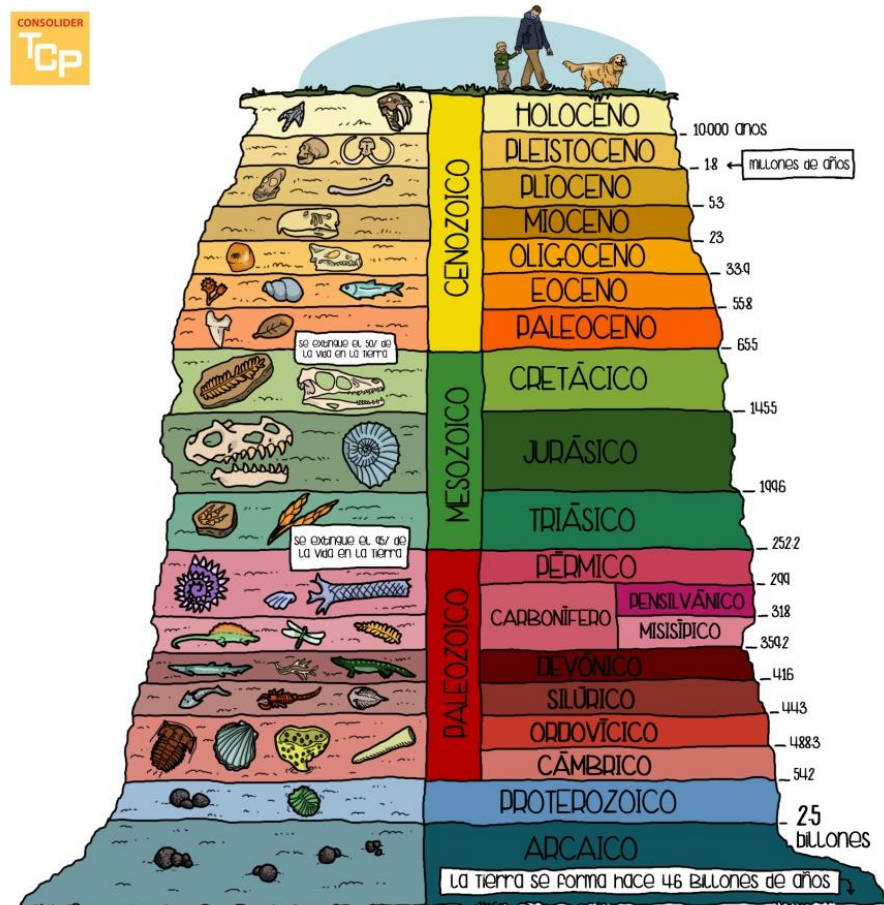
El territorio chileno a fines de la **Era Primaria** (230 millones de años) estaba ocupado en gran parte por el mar (Ilustración 60). Las cumbres más elevadas sobresalían dando una visión de islas. El territorio era una gran depresión submarina, denominada geosinclinal andino, donde se fueron acumulando los sedimentos que más tarde constituirían la Cordillera de los Andes. En el extremo austral existía otra depresión, denominada geosinclinal de Magallanes. En los bordes de estas depresiones se producían erupciones volcánicas frecuentes, que arrojaban material que una vez consolidado, era destruido y acarreado hasta el mar por los cursos de agua. Al término de la Era Mesozoica (65 millones de años) se inicia la orogénesis andina con el plegamiento de los sedimentos acumulados en el geosinclinal que unidos a los materiales volcánicos, dan origen a la Cordillera Andina.

Durante el período **Terciario** de la **Era Cenozoica** (65 a 2 millones de años) se formó una gran planicie producto del desgaste de los materiales plegados, la que posteriormente fue solevantada a más de 3000 kilómetros en el Norte y Centro del país; a 2000 kilómetros en las cercanías de Chiloé y a 500 kilómetros cerca de Punta Arenas. Junto con el plegamiento, se produjeron intrusiones de roca plutónica a gran escala, que conformaría el batolito andino. Estas rocas intrusivas se encuentran a lo largo del país, en forma de cerros, cumbres aisladas y cordones montañosos cordilleranos. En esta era se produjeron movimientos de ascenso y descenso de bloques en el sector costero del territorio chileno, originando transgresiones y regresiones marinas. En el norte del país se produjo una efusión de grandes cantidades de materiales volcánicos, conocida como formación riolítica y encontrada

especialmente en la puna de Atacama y los cordones más occidentales de la cordillera andina. Allí se formaron cuencas endorreicas que luego se rellenaron, constituyendo lo que hoy son los salares. También se produjeron fuertes fallamientos del sector continental, iniciando la delimitación definitiva de las cordilleras de los Andes y de la Costa, que por el solevantamiento costero y el hundimiento del bloque central dieron origen a la Depresión Intermedia.

En el período **Cuaternario** de la **Era Cenozoica** (últimos 2 millones de años), la actividad tectónica se agudizó, dando forma a la actual fisonomía del país. La Depresión Intermedia quedó claramente definida, en tanto la Cordillera de Los Andes siguió su proceso de solevantamiento y la Cordillera de la Costa adquirió su actual configuración, generándose terrazas marinas y planicies litorales. En este período, el volcanismo fue de menor intensidad que en el Terciario, y presente en casi todo el país, con excepción de los cordones transversales entre los ríos Copiapó y Aconcagua. En el Cuaternario, además de los procesos volcánicos y tectónicos, se produjo un importante modelado del territorio por efecto de las glaciaciones. Este proceso se genera por el avance del hielo desde la alta cordillera andina hacia las partes bajas, provocando un desgaste del relieve andino y la sedimentación en la Depresión Intermedia de los materiales erosionados. La acción de las glaciaciones se manifiestan más claramente en el sur del país, donde se represaron las aguas producto de los depósitos morrénicos acumulados en las partes más bajas, dando origen a los actuales lagos.

Ilustración 60: Edades geológicas



Fuente: <https://geocienciazone.wordpress.com/2017/01/17/eras-geologicas/>

3.5.2 UNIDADES GEOMORFOLÓGICAS PRINCIPALES

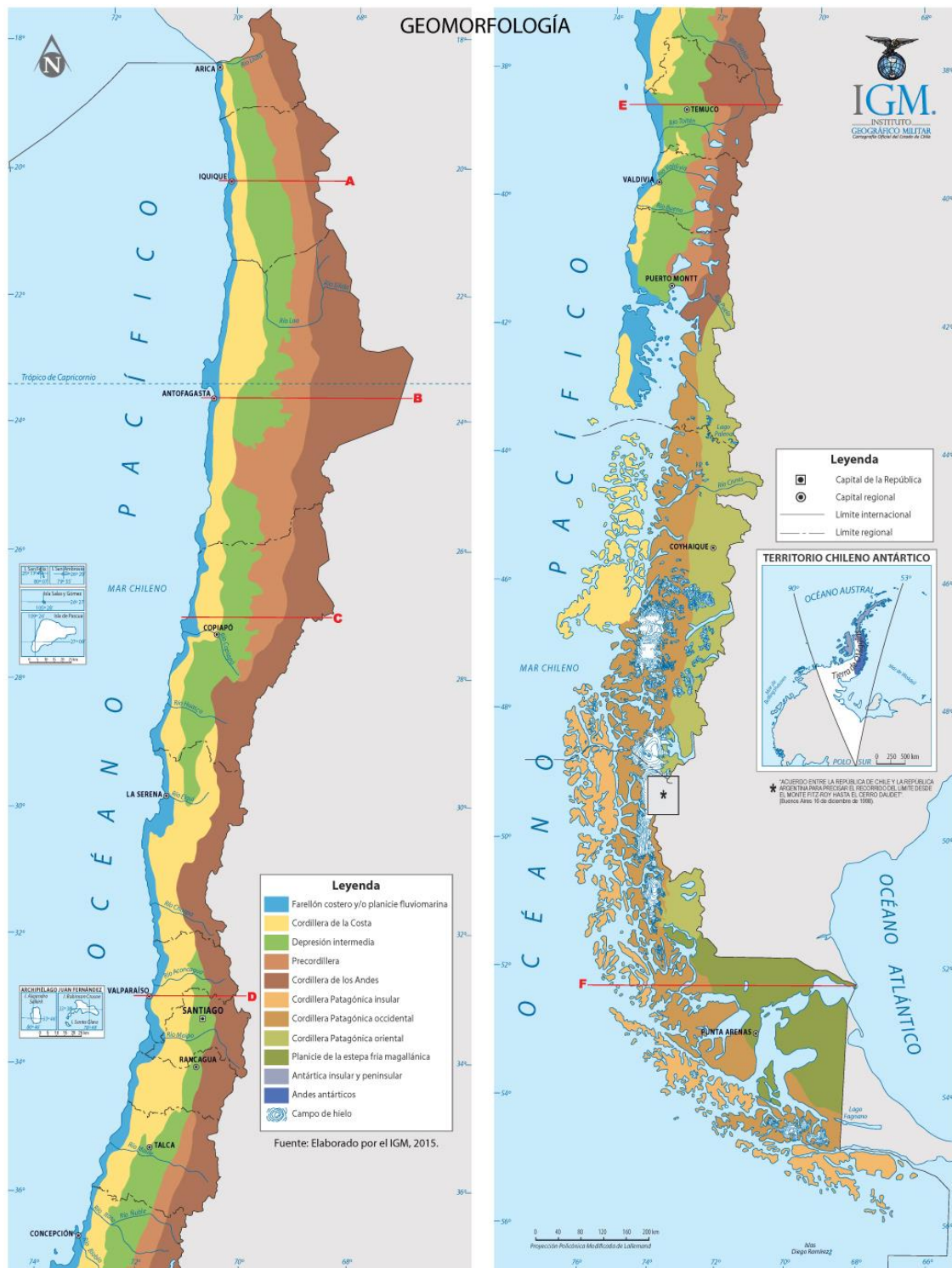
Los procesos volcánicos y tectónicos generados durante el Terciario, además del modelado posterior del relieve en el Cuaternario, dieron origen a unidades geomorfológicas que se denominan como la Planicie Litoral, la Cordillera de la Costa, la Depresión Intermedia y la Cordillera de los Andes, todas las cuales se encuentran orientadas de norte a sur (Ilustración 61). En este texto se pone énfasis en las unidades con mayor presencia en el litoral del país.

Las **Planicies Litorales** se extienden entre el mar y la Cordillera de la Costa, y desde el límite norte del país hasta el Canal de Chacao. En el sector norte, éstas planicies son interrumpidas por el farellón costero, hasta aproximadamente la latitud de Taltal, desde donde continúan en forma ininterrumpida al límite sur, presentándose en forma de terrazas, con escalones cuyo y ancho varían a lo largo de su extensión. Es así como en, el sector de Arica tiene una antigua plataforma de abrasión marina de unos 3 kilómetros de ancho, mientras en Mejillones se distinguen hasta nueve escalones con un ancho máximo de 5 kilómetros cada uno.

El desarrollo más amplio de las Planicies Litorales se da en la costa de Carrizalillo y en el sector de La Serena, donde llegan a alcanzar un ancho de 30 kilómetros, y alturas de hasta 110 kilómetros. Al sur del Río Aconcagua, las planicies de alturas cercanas a 200 kilómetros y anchos de hasta 20 kilómetros, han sido profundamente disectadas por las quebradas que desembocan en el mar. En la Bahía de Corral se encuentra una gran terraza de unos 200 kilómetros de altura, que se proyecta valle arriba hacia Valdivia, y se compone principalmente de arenas fluviales. Estas características se mantienen hasta la Provincia de Llanquihue, constituyendo el extremo sur de esta unidad. Es posible encontrar pequeñas planicies en el borde occidental de la Isla Grande de Chiloé.

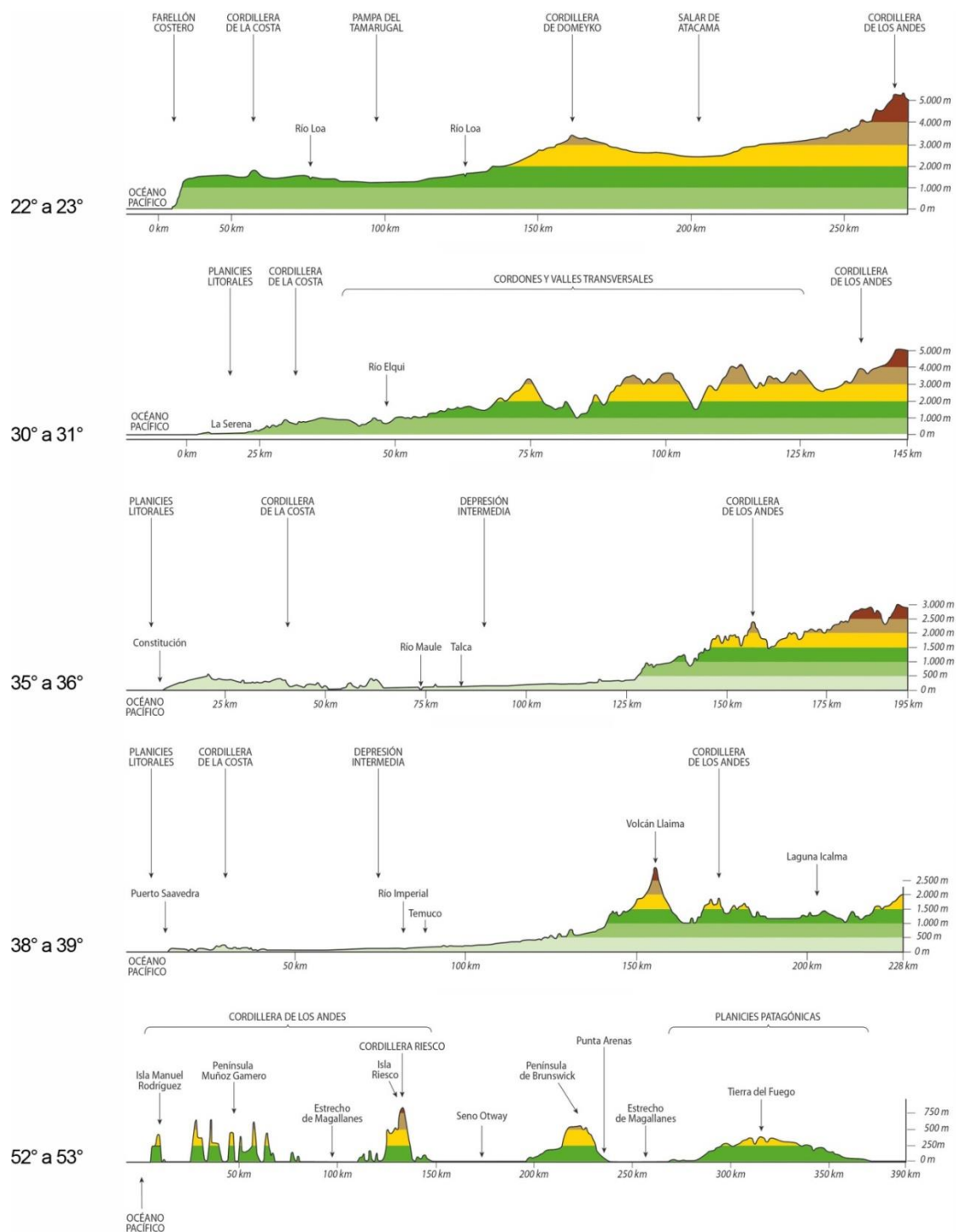
La **Cordillera de la costa** y la **Depresión Intermedia** se encuentran desde el límite norte del país hasta Puerto Montt. Por su parte, esta última se extiende al sur de Puerto Montt, sumergida en el Seno de Reloncaví, los golfos de Ancud y Corcovado, los canales Moraleda y Elefantes, la Laguna San Rafael y el Golfo de Penas. La Depresión Intermedia comprendida entre el Lago de Todos los Santos y el extremo más austral del continente, se caracteriza por la composición compleja de sus materiales constitutivos, que abarcan sedimentos metamórficos, rocas del batolito y porciones aisladas de las formaciones porfíricas del Secundario y riolíticas del Terciario. Presenta una gran acción glacial del pasado, a la que se suma la penetración del mar y los caudalosos ríos que nacen en el sector andino y/o trasandino que desembocan en el Océano Pacífico. Ello genera un paisaje muy accidentado que dificulta las comunicaciones y el asentamiento humano. La acción volcánica también ha contribuido al modelado del sector sur, aunque en menor escala.

Ilustración 61: Mapa geomorfológico de Chile



Fuente: Instituto Geográfico Militar, 2016.

Ilustración 62 Mapas del perfil topográfico de diferentes latitudes en Chile.



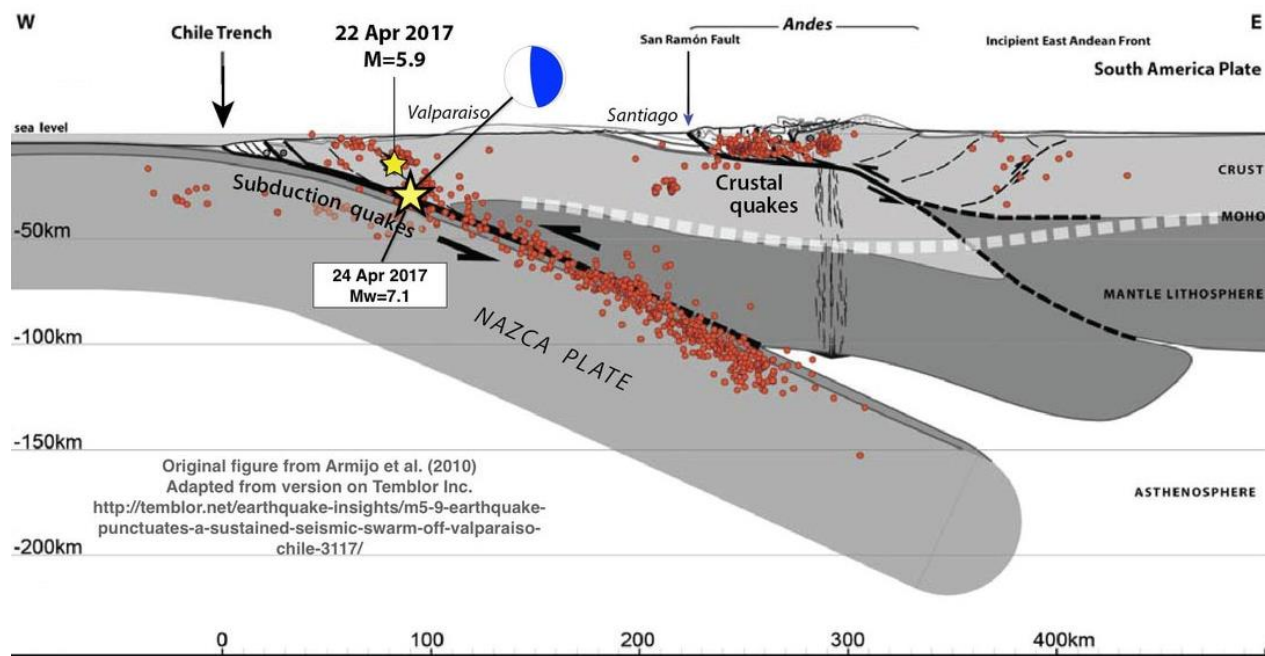
Fuente: Adaptado del IGM. www.curriculumenlineamineduc.cl/605/w3-propertyvalue-57357.html

3.5.3 ACTIVIDAD SÍSMICA Y VOLCÁNICA

La interesante geología y geomorfología de Chile se ha originado en una de las zonas de subducción más importantes del planeta, producto de la combinación de la actividad sísmica, el volcanismo y las anomalías en la gravedad. Una constatación de ello es la existencia de una zona volcánica asociada a una notable actividad sísmica. En efecto, este cinturón volcánico se extiende a lo largo de todo el país, pero en forma discontinua. Es así como entre los 19°S y 28°S, los volcanes han estado activos desde el cuaternario pero entre esa latitud y los 33°S, se presenta un segmento sin actividad volcánica. En el tramo comprendido entre los 33°S y los 46°S reaparece la cadena volcánica y entre los 46° y los 49°S el volcanismo es casi inexistente.

Aparentemente, el alineamiento submarino de Juan Fernández está asociado a la disminución de la sismicidad profunda y por consiguiente a los cambios abruptos de la actividad volcánica en el margen continental. De hecho, en su costado septentrional, la línea volcánica es discontinua, con cumbres separadas por cientos de kilómetros. Se especula que la discontinuidad en los alineamientos volcánicos estaría relacionada con su colisión y posterior consumo en la zona de subducción durante los últimos millones de años, donde provocaría una disminución de la actividad volcánica. Se cree también que la poca profundidad de la zona sísmica y la ausencia de actividad sísmica profunda podrían estar relacionadas con la boyantes de estas elevaciones.

Ilustración 63: Mapa de sismicidad en la zona central de Chile. Los círculos rojos representan el hipocentro de sismos menores. Las estrellas amarillas representan la ubicación de eventos ocurridos en 2017.

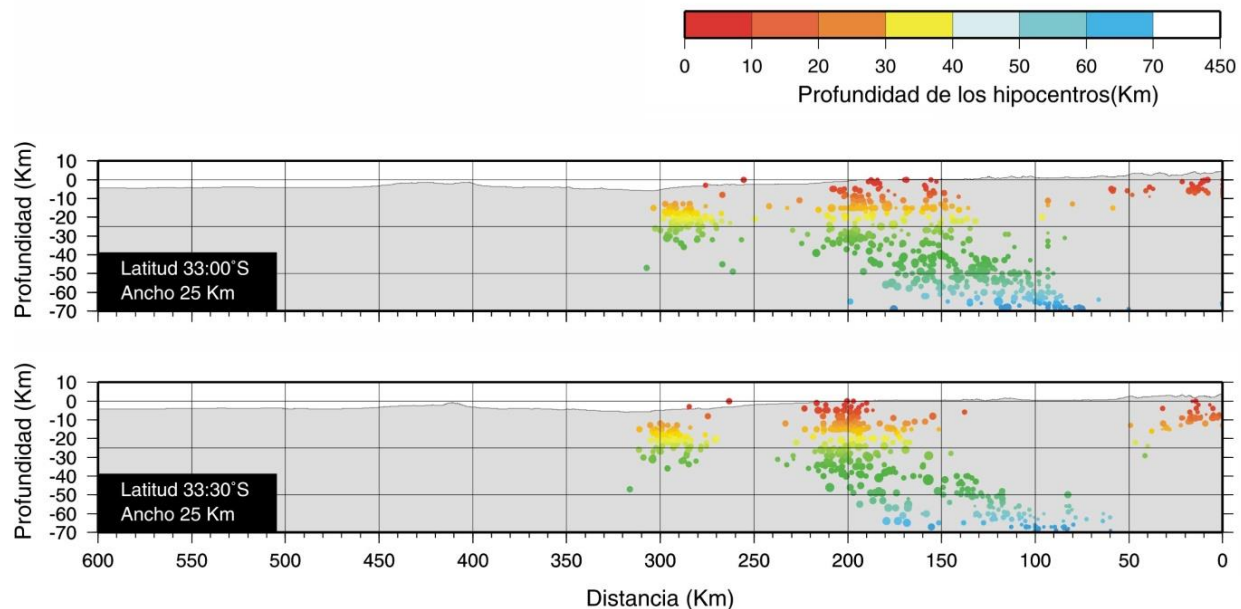


Fuente: Armijo et al. (2010).

La subducción en el margen continental de Chile genera una potente zona sísmica que se extiende por más de 2.600 kilómetros, entre el límite norte con el Perú y los 45°S. Una revisión de las investigaciones en sismología no hacen más que confirmar que los terremotos intermedios y profundos situados por debajo de Chile ocurren como resultado de tensiones acumuladas en la zona litosférica de penetración. La actividad sísmica, no obstante, es heterogénea, con zonas de silencio sísmico (lagunas o *gaps*) como la ubicada en el norte del país y zonas más activas. En la

actualidad existen mapas de sismicidad en los cuales se ilustra la posición del epicentro de terremotos históricos en función de la profundidad. Este tipo de información permite desarrollar modelos de la loa litosférica descendente y estimaciones de la amenaza sísmica en el país.

Ilustración 64: Sismicidad en los 30°S y 33,3°S entre 1973 y 2004.



Fuente: Elaboración propia.

La subducción presente en el margen continental de Chile genera una potente zona sísmica que se extiende por más de 2.600 kilómetros, entre el límite norte con el Perú y los 45°S. Una revisión histórica de las investigaciones en sismología no hacen más que confirmar que los terremotos intermedios y profundos situados por debajo de Chile ocurren como resultado de tensiones acumuladas en la zona litosférica de penetración. La actividad sísmica, no obstante, es heterogénea, con zonas de silencio sísmico (lagunas o *gaps*) como la ubicada en el norte del país y zonas más activas. En la actualidad existen mapas de sismicidad en los cuales se ilustra la posición del epicentro de terremotos históricos en función de la profundidad. Este tipo de información permite desarrollar modelos de la loa litosférica descendente y estimaciones de la amenaza sísmica en el país.

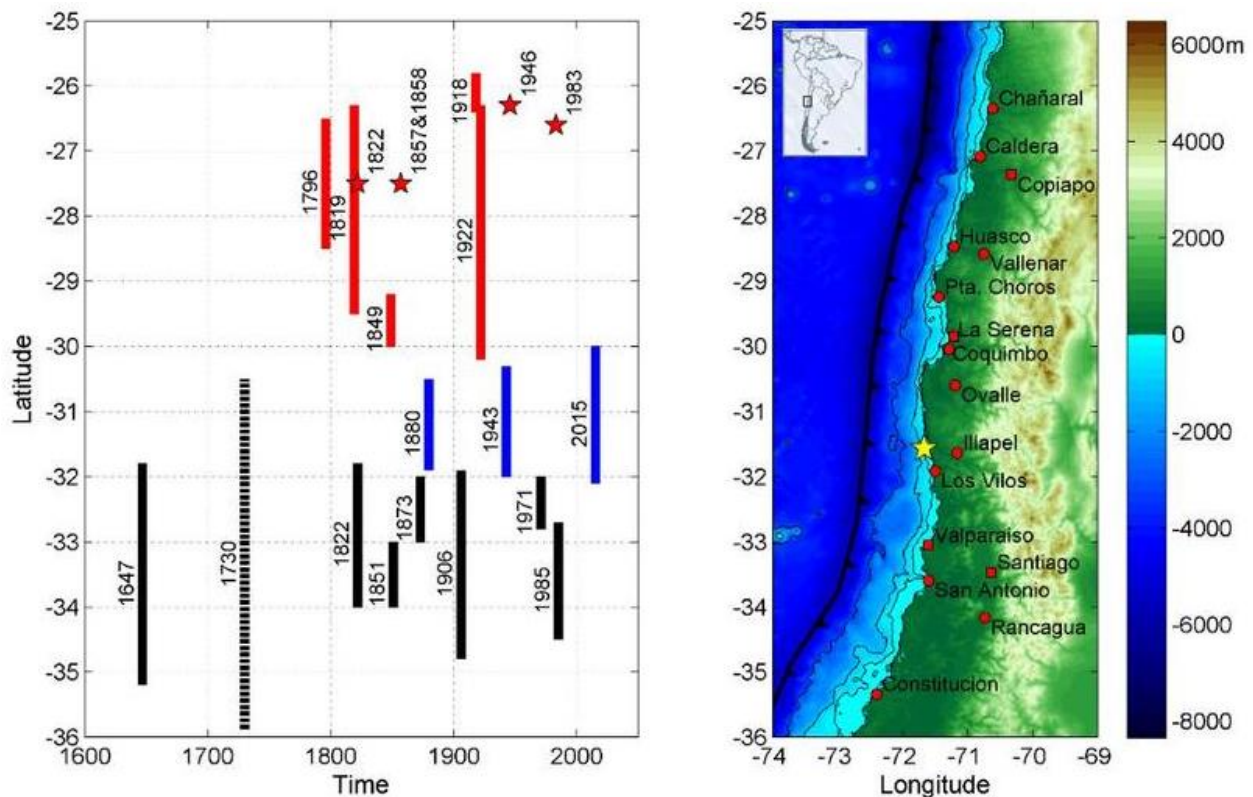
La sismicidad¹³ de Chile se puede subdividir desde la superficie hasta una profundidad superior a los 500 kilómetros. Entre el nivel superficial y los 50 kilómetros, la actividad sísmica se concentra a lo largo de la fosa y en la litosfera continental en forma de terremotos poco profundos con potencial de generar tsunamis. En ese nivel existen "lagunas" sísmicas en latitudes cercanas a los 19°S, 28,5°S, 35°S, 36,5°S y 38°S. Un segundo nivel situado entre 50 a 100 kilómetros sigue la línea de la costa, centrando su actividad entre los 19°S y 27°S. A esta profundidad, la sismicidad se agrupa en áreas más pequeñas, separadas por zonas de "silencio sísmico". Un tercer nivel, ubicado entre los 100 y 300 kilómetros presenta un agrupamiento por regiones, siendo la más activas entre los 15°S~25°S y los 27°S~37°S que se encuentran separadas por una zona de "silencio". El cuarto nivel corresponde a una zona de escasa actividad entre los 300 y 500 kilómetros de profundidad, donde los pocos terremotos

¹³ La sismicidad es el estudio de los sismos en términos de la frecuencia y posición espacial en algún período de tiempo para una localidad o región específica.

ocurren en su tramo superior. Finalmente, el quinto nivel muestra una actividad sísmica más profunda entre 20°S~29,5°S y hasta los 68°W; siendo bastante distinta de la actividad superficial.

Estos antecedentes permiten suponer que la sismicidad no es continua tanto en latitud como en profundidad. Esto puede ser claramente observado en cortes transversales, los cuales permiten visualizar que dicha distribución correspondería al hundimiento de la placa oceánica por debajo de la placa Sudamericana. Esta zona de interacción se denomina “Zona de Benioff”.

Ilustración 65: Sismicidad de la zona central de Chile. Izquierda: Diagrama espacio-tiempo de longitudes de ruptura en la regiones sísmicas de Copiapó-Coquimbo (rojo), Coquimbo-Illapel (azul) y Los Vilos-Constitución (negro). Las estrellas representan eventos menores.



Fuente: Aránguiz, R., Urra, L., Okuwaki, R., & Yagi, Y. Tsunami fragility curve using field data and numerical simulation of the 2015 tsunami in Coquimbo, Chile. Nat. Hazards Earth Syst. Sci. Discuss.



Geomorfología aplicada a la ingeniería y geología

3.5.4 GEOMORFOLOGÍA LITORAL

3.5.4.1 Las costas abiertas

Entre la frontera con Perú y una sinuosa línea inmediatamente al norte del río Elqui, predomina el **farellón costero**, que cubre una extensión lineal estimada en 1600 kilómetros. Este farellón (*cliff*) se levanta desde el nivel del mar hasta los 1000 kilómetros sobre la línea de costa, descendiendo

paulatinamente hacia el Sur. Taltal establece un límite entre una costa caracterizada por farellones altos y la otra, más deprimida. En toda su extensión, el acantilado costero está bien conservado y se interrumpe esporádicamente por quebradas secas que logran llegar hasta el mar (Borgel, 1982). Pequeños episodios regresivos han formado estrechas terrazas al pie del farellón costero que presentan diferentes alturas: 150 kilómetros sobre el nivel del mar en Patillos, 60 kilómetros al sur de Iquique, y 45 kilómetros en Pisagua. Esta desigualdad en los niveles de terraza costeras estaría asociada a movimientos tectónicos locales, y no a cambios en el nivel del océano por causas glacioeustáticas¹⁴.

Araya (1972) propone que la costa entre el límite con Perú y la desembocadura del río Elqui es de tipo abrasivo-tectónica. Así, por ejemplo, al norte de Iquique no existe la planicie litoral y el mar tiene contacto directo con el acantilado costero, el cual cae con una pendiente en torno a los 80°. Al Sur de Iquique hay un desarrollo creciente de playas y terrazas litorales, que obliga al acantilado a alejarse de la orilla del océano, a suavizar su pendiente a valores del orden de 35° a 40° (Borgel, 1982) y a dejar de sentir la influencia directa del mar (Ilustración 66). Más al sur, este acantilado inactivo va siendo reemplazado por extensas plataformas de abrasión marina.

Ilustración 66: Acantilados costeros al sur de Iquique.



Fuente: Norberto Seebach; disponible en www.curriculumenlineamineduc.cl/605/w3-propertyvalue-57357.html

El segundo accidente geomorfológico inscrito en el borde occidental de la Cordillera de la Costa Norte, es la denominada **Planicie Litoral**. Esta se presenta muy estrecha producto del

¹⁴ EL Glacioeustatismo considera las variaciones que experimenta el volumen total del agua en las cuencas oceánicas, debidas a cambios climáticos de largo periodo, asociados a la alternancia de las glaciaciones e interglaciares.

solevantamiento costero y es interrumpida por estribaciones desprendidas de la pampa alta y de la Cordillera de la Costa. Las estribaciones, en forma de cuchillas vertebradas, descienden hasta el borde de las playas, activando la erosión marina. Las playas que se intercalan entre estas estribaciones tienen forma de arco y, en general, presentan un estrán arenoso, recubriendo levemente un estrán rocoso que queda al descubierto en los períodos de baja marea.

Las **plataformas de abrasión** marina se limitan a 4 a 8 kilómetros de ancho. Solo en presencia de pocas desembocaduras en quebradas importantes, se amplían y ensanchan, dando lugar a extensiones de hasta 11 kilómetros, como ocurre en la desembocadura del río Loa (Borgel, 1982). Las planicies litorales están asociadas a procesos de abrasión o sedimentación marina. Sin embargo, en la mayor parte de este litoral nortino las acciones abrasivas del mar dominan sobre un estrán rocoso en continuo ascenso. Aislados golfos con restos de conchas marinas han sido afectados por este tipo de erosión, formando acantilados costeros al pie de los cuales se desarrollan estrechas playas.

Una tercera zona geomorfológica se conforma por los **llanos de sedimentación continental** presentes en las desembocaduras de ríos y quebradas. Estas unidades se forman sobre las llanuras de acumulación detrítica producidas por la coalescencia de material continental con depósitos marinos, como ocurre, por ejemplo, en las cercanías de Arica. Por su parte, en el curso del río Copiapó, entre Paipote por el este y Piedra Colgada en el oeste, se genera una zona de acumulación fluvial, que ha estado sometida a una tectónica litoral muy enérgica. Terrazas escalonadas y amplias planicies de abrasión marina amenizan esta gran acumulación.

La Quebrada del Salado, que desemboca en la ciudad de Chañaral, constituye el límite entre dos tipos de escurrimiento. Al norte de este límite, el sistema de drenaje se caracteriza por pendientes fuertes, no dando lugar a la organización de aterrazamientos cíclicos. Al sur de esta quebrada, las aguas fluviales acusan un escurrimiento más regular, aunque el estiaje prolongado y muy enérgico determina un ritmo muy menor de las aguas durante los años secos (Borgel, 1982).

Ilustración 67: Dársena de la antigua minera El Tofo, al norte de La Serena.



Fuente: Archivos personales

3.5.4.2 La zona centro-sur

Desde La Serena al sur, la **planicie costera** alcanza un importante desarrollo. Entre Tanguay y cerro Blanco, al Sur de Bahía Tongoy, ésta se extiende 30 kilómetros al interior del continente. El avance al oeste de un cordón transversal desprendido al occidente de Combarbalá, determina una disminución momentánea de la planicie, la que, interrumpida por espacio de 40 kilómetros, vuelve a presentarse al sur de Angostura, aunque con menor vigor que en la zona de Tanguay. En general, la planicie litoral alcanza mayor extensión en las desembocaduras de los ríos y quebradas importantes, lo que en parte acusa interacciones continentales y marinas.

De acuerdo a su origen, las terrazas comprendidas entre La Serena y el río Limarí corresponden a la serie fluviomarina, con abundantes ripios y material calcáreo. Condiciones parecidas, aunque menos potentes y de estrecho desarrollo, se presentan entre la Quebrada Matagorda y Playa Hacienda Agua Amarilla, al norte de Los Vilos. El resto de la costa se inscribe como una planicie litoral marina, con ligeras excepciones en Huentelauquén, Quilimaría y La Ligua, donde los aportes continentales son importantes, restableciéndose una moderada serie fluviomarina.

Entre los valles de Elqui y Aconcagua, los llanos de sedimentación fluvial ocupan los cursos medios de los ríos Elqui, Limarí, Choapa, Petorca, La Ligua y Aconcagua. Estos sistemas fluviales han sido capaces de generar playas de sedimentación fluvial, producto de la desagregación del granito costero y debido a que el ciclo anual de precipitaciones es de gran irregularidad.

Entre los ríos Aconcagua y Biobío, la planicie costera marina presenta variados aspectos en su desarrollo latitudinal. En algunos tramos se inscribe en el granito costero como terrazas de abrasión, construyendo sistemas escalonados de hasta 4 niveles. Tal sería el caso de la franja comprendida entre el río Aconcagua y el río Maipo por el Sur. Entre el Maipo y el estero Yali, la sedimentación moderna domina el sector costero. En punta Topocalma, a escasos kilómetros al Norte de Pichilemu, las terrazas del plioceno y mioceno logran penetrar hasta 25 kilómetros al interior. Desde Tanumé hasta las cercanías septentrionales del río Itata, las terrazas marinas se inscriben en las rocas metamórficas precambrianas.

Del estero Yali al sur, el sistema escalonado se reemplaza por una abrasión generalizada con bolsones de sedimentación en las desembocaduras de los grandes ríos. En general la línea costera es mixta, alternando extensas playas de acumulación arenosa y acantilados. Entre el río Aconcagua y el estero Casablanca domina la costa alta con algunas playas intercaladas. Entre el estero Casablanca y el río Rapel la costa es baja, con excepción del tramo comprendido entre Cartagena y San Antonio, que presenta acantilados menores y roqueríos bajos. Más al sur, desde Rapel a Vichuquén, existe una costa baja y arenosa.

Al sur del río Mataquito, la costa deja extensas playas al descubierto, con aterrazamientos altos que se empinan aproximadamente a 200 kilómetros en Chanquiuque. El área septentrional del río Maule, en Putú y Junquillar, corresponde a una costa baja del tipo construccional con un acantilado muerto 5 kilómetros al este de la línea de pleamar. Al sur del Maule se renueva la costa alta hasta la pequeña bahía de Las Cañas. Desde este punto a la desembocadura del río Tutuvén, la costa es baja y fuertemente invadida por arenas eólicas, repitiendo el aspecto dunario de Putú. Al sur de Tutuvén reaparece la costa alta con pequeñas playas arenosas que se intercalan en el relieve. Aquí logran distinguirse hasta tres terrazas marinas a 60, 140 y 220 kilómetros, respectivamente.

La costa acantilada continúa sin mayores cambios hacia Dichato, Tomé y Concepción, con playas y barras arenosas en las cercanías de algunas desembocaduras. Desde el río Biobío al Canal de Chacao, en un litoral de más de 600 kilómetros, las planicies cubren superficies variables de acuerdo a la presión que sobre ellas ejercen los relieves desprendidos de la Cordillera de la Costa. Es así como el aplanamiento marino que enfrenta el muro de barlovento de la cordillera de Nahuelbuta, se

estrecha a sólo 35 kilómetros de ancho máximo. En el curso inferior del río Tirúa, la cordillera costera termina por ahogar la planicie marina, la que desaparece momentáneamente para reaparecer 20 kilómetros al sur, en la orilla meridional del río Moncul.

En general, la sedimentación fluvial corresponde arenas negras, originadas en la actividad volcánica del sistema Antuco. Las acumulaciones eólicas que se encuentran entre el Maule y la planicie marina al sur del Biobío corresponden a arenas oscuras, empujadas al norte por la deriva litoral. Al sur del Biobío, la alteración del granito intrusivo y las cuarcitas de la formación metamórfica costera originan arenas blancas, las que también se encuentran en los cursos inferiores de los ríos Itata y Maule.

El litoral que se extiende desde el río Moncul hasta el río Queule presenta débiles afloramientos del batolito, ligeramente superiores a 300 kilómetros, que conforman una planicie marina de unos 25 kilómetros de ancho. En este sector tampoco están ausentes las acciones fluviomarinas, como ocurre en la desembocadura del río Imperial. En este tramo se encuentra el lago Budi (Ilustración 68), que se forma en las depresiones litorales vinculadas a la tectónica cuaternaria marina, siendo el nivel de base para aguas superficiales y subterráneas provenientes del frente occidental de la cordillera costera. Es interesante consignar, respecto a la tectónica cuaternaria, que 32 kilómetros al oeste de Punta Tirúa, se encuentra la isla Mocha.

Ilustración 68: Desembocadura del Lago Budi.



Fuente: Archivos personales

La Cordillera de Mahuidanchi, extendida en el eje noroeste-sur con altitud de 534 kilómetros en el cerro Puralaco, estrangula el desarrollo del aplanamiento litoral frente a la localidad costera de Queule. A partir de esta cordillera al sur, la orografía impide el desarrollo de planicies marinas, y sólo algunos niveles fluviomarinos se organizan en las desembocaduras de ríos importantes como el Valdivia, Bueno y Traanallaguín.

Solo al sur del río Llico se reorganiza el aplanamiento litoral, cuyo origen (marino, fluviomarino o glacial) es difícil de definir pues la altimetría costera trasciende hacia el Llano Central sin barreras. Entre Los Muermos y Puerto Montt se extiende la Planicie sedimentaria de Maullín. Desde el río Llico a Carelmapu, último punto del litoral no sumergido de Chile Continental, la costa se define por el principal accidente geográfico en la desembocadura del río Maullín.

Ilustración 69: Fuerte de Niebla, en la desembocadura del río Valdivia.



Fuente: Archivos personales

3.5.4.3 La zona de fiordos y canales

Entre el Golfo de Ancud y las Islas Diego Ramírez, se extiende un verdadero laberinto de montañas, ventisqueros, islas y canales en un eje Norte-Sur, cubriendo alrededor de 1600 kilómetros. El ancho este-oeste es variable, registrándose 300 kilómetros frente a Taitao, 100 kilómetros entre Palena y el Pacífico, y 480 kilómetros entre el extremo oriental del Estrecho de Magallanes y la Isla Diego de Almagro en el Pacífico. Esta área representa un tercio del territorio nacional y es una de las regiones más inhóspitas del planeta, por su intrincada morfología y clima. Sometida a una tectónica de hundimiento a escala geológica, el mar ha penetrado por el llano central y por los valles inferiores, originando una morfología litoral salpicada de golfos, canales, estuarios y fiordos.

La planicie litoral de Chiloé y sus islas adyacentes comienzan por el norte en Punta Corona, formación que cierra la Bahía Ancud por el noroeste. La península que aloja el poblado de El Banco tiene la forma de un gancho que alberga el arco meridional del golfo de Los Coronados. Al sur de El Banco, la playa de Bahía Cocotué representa una costa baja que se prolonga en ambas orillas de la desembocadura al mar del río Puntra. Al sur de Punta Ahuenco se interrumpe definitivamente el desarrollo de la planicie litoral, con una moderada excepción en el Lago Cucao.

La planicie litoral vuelve aflorar en la orilla norte del Estrecho de Magallanes, donde se extiende un aplanamiento marino salpicado de cerros aislados con una extensión de 260 kilómetros entre Agua Fresca, 28 kilómetros al sur de Punta Arenas, y Punta Dungeness, en la entrada oriental del estrecho. En este sector aparece una serie de lagunas que se desprenden desde Bahía Whitesand al oeste y que amenazan con cortar la Península de Brunswick entre Estancia Fenton y el Canal Fitz Roy.

Ilustración 70: Barcaza en la rampa de Pargüa, en la ribera norte del Canal Chacao.



Fuente: Archivos personales

En la orilla meridional oriental del Estrecho de Magallanes, entre Porvenir y Punta Catalina, se desarrolla una planicie litoral interrumpida por la Península Juan Mazía, con manifestaciones de hundimiento litoral señaladas por la presencia de lagunas entre Porvenir y Estancia Gente Grande.

Entre la Isla Grande de Chiloé y la Península Tres Montes, el relieve está conformado por islas, archipiélagos y penínsulas. Esta sección cordillerana, intensamente fragmentada por la tectónica de hundimiento, aparece enmarcada por el Golfo Corcovado al norte, los canales Moraleda, Costa y Estuario Elefantes al Este, el Océano Pacífico al Oeste y el Golfo de Penas. Esta zona geográfica se conoce como Archipiélago de Los Chonos. Las isla Guafo y Gaumblín representan elementos bastante excéntricos respecto del alineamiento norte-sur que conserva la Cordillera de la Costa en esta región. Sólo desde las islas Guaitecas al sur, el apretado ramillete de islas, penínsulas y canales dibuja una antigua unidad orográfica costera, ahora hundida.

El archipiélago de Los Chonos alberga formaciones mayores como las islas Benjamín, James, Melchor, Riveros y la Península de Taitao, unida al continente por el Istmo de Ofqui, que con su característica forma de gancho, da pie a numerosas penínsulas menores. En el centro de Taitao se aloja la depresión lacustre del Lago Presidente Ríos, digitada en cinco largos golfos.

Desde el seno de Reloncaví hasta el istmo de Ofqui, aparece el llano central ocupado por el mar, como resultado del energético hundimiento que ha experimentado esta zona del territorio. Los principales accidentes que se ubican de norte a sur en este espacio geográfico son el seno de Reloncaví, el Golfo de Ancud, el Golfo del Corcovado, los canal Moraleda y Costa, el estuario Elefantes, la laguna San Rafael, el istmo de Ofqui y el llano aluvial del río San Tadeo. Este sector, totalmente hundido en su margen oriental, se pone en contacto con las cordilleras patagónicas en un verdadero frente de falla que está bien conservado entre Puerto Montt y Puerto Palena. Hacia el sur, un fuerte desmembramiento genera un laberinto de islas, fiordos y canales que se prolonga hasta la salida occidental del fiordo Aysén.

Ilustración 71: Volcán Hornopirén, en Chiloé continental. En primer plano, la ciudad homónima, marcada por las variaciones de la marea.



Fuente: Archivos personales

Al sur del río Palena, la isla Refugio señala la aparición de un litoral fragmentado más intensamente, con canales, senos, ríos y fiordos que se adentran profundamente. Es así como el canal Jacaf penetra 55 kilómetros desde el Moraleda hacia el Este, poniéndose en contacto con el seno Ventisquero que, a su vez, es la prolongación septentrional del canal Puyuguapi. Este sistema de vías de aguas determina la insularidad del vasto territorio que comprende la isla Magdalena. Una característica notable, es la presencia de numerosos ventisqueros aislados unos y encadenados otros. La presencia de los fiordos Quitalco, Cupquellan o San Francisco impone la existencia de dos grandes penínsulas, en una de las cuales se encuentra el río de los Huemules. Los relieves allí presentes constituyen un sistema hidrográfico de pequeñas cuencas lacustres y numerosos glaciares que se derraman tanto al Pacífico como hacia las cuencas orientales.

En el ventisquero Jorge Montt y Tierra del Fuego, numerosos accidentes morfológicos caracterizan a un territorio bajo el dominio de un fuerte hundimiento, sin alcanzar aún la fragmentación insular. En esta región se presentan los ventisqueros patagónicos que se desarrollan entre la Península de Taitao y el Lago General Carrera.

Entre el Golfo de Penas por el norte y las islas L'Hermite por el sur aparece un variado conjunto de estrechos, canales e islotes caracterizados por el hundimiento tectónico. Los relieves se inician en la isla Javier, en el extremo nororiental del golfo de Penas, y continúan al sur en el archipiélago Guayaneco. La verdadera digitación oriental de este archipiélago se repite unos kilómetros al sur,

en las islas Van Der Meulen, Caldeleugh, Farquhar y Ofhidro, conjunto que se desplaza al este del canal Mesier. El archipiélago Guayaneco está limitado al este por el canal Mesier, al oeste por el océano Pacífico, al norte por el golfo de Penas y al sur por el golfo y canal Trinidad. Separadas del archipiélago por el canal Trinidad se ubican las islas Madre de Dios y Duque de York, conjunto insular que dibuja una especie de prolongación meridional del primero. El estrecho de la Concepción separa a estas dos islas de otras, situadas más al oriente y bajo los efectos de una fragmentación más intensa.

Ilustración 72: Caleta Tortel, en las cercanías de la desembocadura del Río Baker.



Fuente: Archivos personales

Las mayores porciones insulares que siguen a la isla Duque de York son las islas Chatham, Farrel, Hanover, Esperanza, Jorge Montt y Diego de Almagro. Al sur de la última, el estrecho de Nelson impone un límite importante que se prolonga al norte y este por los pasos Castro y Tarleton, respectivamente. En esta segunda unidad, las islas Vancouver, Evans y Owen se ubican tan al este que la orografía se ensancha a 105 kilómetros en eje este-oeste. Del mismo modo, la penetración al oriente de los senos Andrew y Calvo implica una asfixia al territorio continental chileno, el cual se estrecha a 20 kilómetros sobre un puente de hielo desprendido del cerro Cervantes. Al sur del estrecho Nelson, las islas Contreras, Vidal Gormáz, Rennell, Piazzzi y Manuel Rodríguez tienden a orientarse en el eje noroeste-sureste.

La isla Riesco, al sureste de la península Muñoz Gamero, representa un cambio en la topografía que se pone en contacto con la estepa fría magallánica, interrumpiendo en largo trecho el desarrollo de las cordilleras continentales. Entre la boca occidental del Estrecho de Magallanes y los canales Cockburn y Witeside, se ubican las islas Desolación, Jacques, Santa Inés, Clarence, Capitán Arcena y Dawson.

Ilustración 73: Ventisquero O'Higgins, en el lago Homónimo.



Fuente: Archivos personales

Finalmente se reconoce el conjunto de islas situadas al sur de los canales Ballenero y Beagle, incluyendo a Londonderry, Gordon, Hoste, Gilbert Wood, Navarino, Picton, Lennox, Nueva, Evout, Barnevelt, el conjunto de las Wollaston, L'Hermite y las más distantes al sur, la isla Hornos e islas Diego Ramírez. De este abigarrado sector insular, las mayores porciones corresponden a las islas Hoste y Navarino, siendo la primera predominantemente baja, con excepción del aislado pico Dientes de Navarino que se levanta a 1.195 kilómetros, y la segunda dotada de un relieve vigoroso, con numerosas digitaciones peninsulares.



3.5.5 GEOMORFOLOGIA SUBMARINA

El margen continental de Chile se caracteriza por ser uno de los más activos a nivel mundial, tanto desde el punto de vista sísmico como tectónico. Desde el punto de vista fisiográfico, la fosa Chile-Perú es única por su forma casi rectilínea a través de varios miles de kilómetros. Esta fosa es el elemento morfológico dominante, que persiste como unidad estructural desde la costa de Colombia hasta la Tierra del Fuego. La fosa fue reconocida como un elemento fisiográfico mayor hace más de 100 años, cuando en 1895 Sir John Murray publicó una primera carta batimétrica basada en sondeos realizados para la colocación de las líneas del telégrafo submarino. Su profundidad máxima es de 8.065 kilómetros cerca de los 23°20'S, siendo la mayor de este sector del Océano Pacífico.

El margen continental frente a Chile es típico de convergencia, originado en su tramo norte por la colisión de las placas Sudamericana y de Nazca, y en su tramo sur por la interacción entre las placas Antártica y Sudamericana. La Unión Triple de estas tres placas interrumpe la continuidad de la fosa frente a la Península de Taitao (46°S). Una interrupción menor está también dada por la cadena de montes submarinos que forman la dorsal de Juan Fernández, la cual subduce bajo el continente aproximadamente a los 33°S. En tramo entre los 18°S y los 45°S es un ejemplo clásico de zona de subducción, que resulta al penetrar la placa de Nazca por debajo de la placa Sudamericana con una convergencia de 10 [cm/año] (Minster et al, 1974). Entre los 40°S y la Unión Triple se encuentra una corteza oceánica originada hace 20 millones de años en la dorsal de Chile. Esta dorsal, que es el límite entre las placas de Nazca y Antártica, termina a su vez en una segunda unión triple hacia el noroeste, justo en la intersección de la dorsal Antártica Pacífico y la dorsal del Pacífico Oriental.

En relación con la batimetría¹⁵, es posible describir áreas con características distintivas. Entre los 19,5°S y los 28°S, el fondo oceánico se caracteriza por una plataforma continental de pocos kilómetros de ancho que en algunos lugares desaparece, y por terrazas angostas o planas o de lados muy inclinados en la parte inferior del talud. Entre los 28°S y 34°S, el margen se caracteriza por un "plateau" intermedio, con taludes superior y medio de 2,8° y la inexistencia de cañones submarinos. La región entre los 34°S a 45°S se caracteriza por suaves taludes superior y medio de morfología muy variada, una plataforma continental considerablemente más ancha y la ausencia del plateau intermedio. Entre los 47°S y 48°S el talud se torna más ancho, hasta alcanzar un ancho cercano al doble que el de la región situada al norte de la unión triple.

Ilustración 74: Relieve marino frente a Chile.



Fuente: Elaboración propia

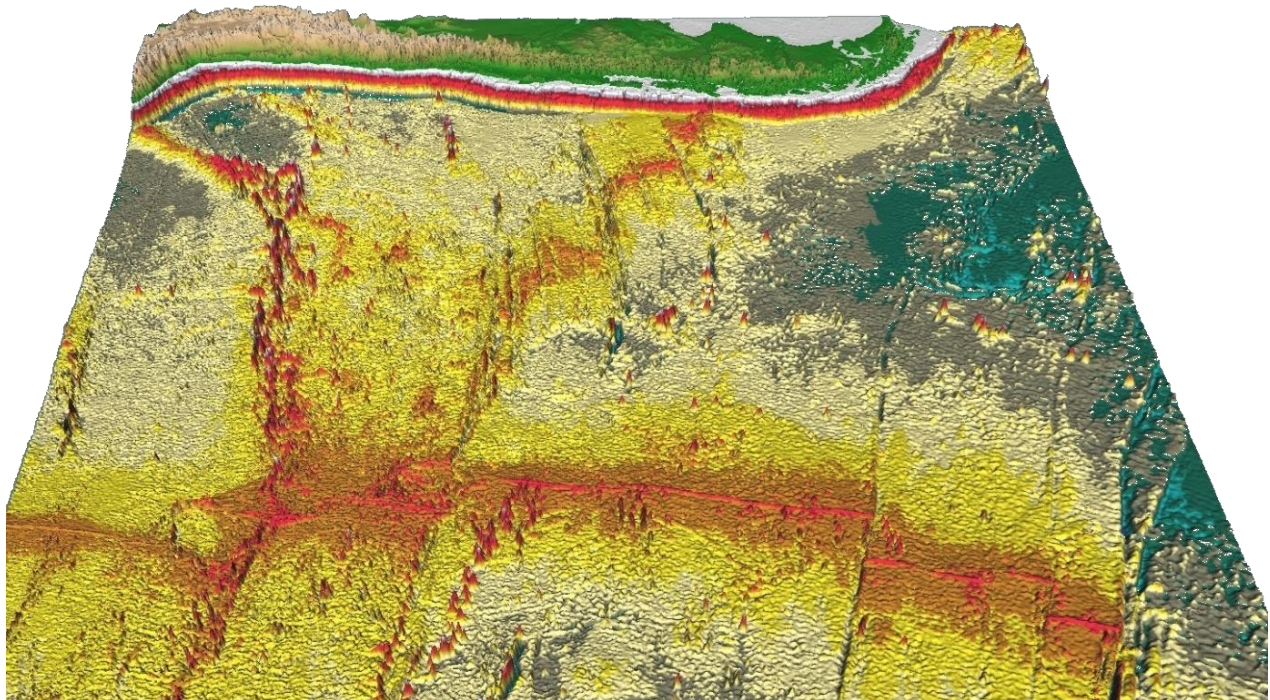
Aproximadamente a los 33°S, la fosa Chile-Perú presenta un cambio radical tanto en la forma como en profundidad, debido al importante aumento en los sedimentos hacia el sur. De hecho, la forma del eje cambia de una garganta angosta entre Arica y este límite, a una depresión ancha y plana en las proximidades de Valparaíso. Entre los 33°S y 40°S, el eje de la fosa desaparece bajo una capa horizontal de sedimentos de más de 1 kilómetro. La menor profundidad del basamento acústico al norte de los 33°S es, probablemente, la causa de la notable diferencia de la profundidad axial. Un levantamiento gradual del piso en lugar de las fallas verticales vistas en las provincias anteriores pareciera ser el responsable de la menor profundidad del basamento.

¹⁵ La batimetría es la disciplina se encarga del estudio de las profundidades marinas.

Los cañones submarinos aparecen en el talud continental al sur de los 33°S, siendo el más importante por sus dimensiones el de San Antonio, frente al puerto homónimo. La aparición simultánea de estos cañones y el mayor espesor de los sedimentos axiales se relacionan con el cambio del clima, que se hace más lluvioso en estas latitudes. Los sedimentos axiales aumentan al sur, en forma irregular, aparentemente debido a las barreras estructurales que inhiben la migración hacia el norte de los sedimentos a lo largo del eje de la fosa.

Al sur de los 40°S aparece el relieve representado por la Dorsal de Chile, que se extiende hacia el Pacífico en casi 1200 millas. La dorsal está constituida por un relieve bien definido de crestas y trincheras, con una zona axial profunda y amplia. Esta formación se prolonga desde los 46°S en una línea oblicua hasta la dorsal del Este del Pacífico, donde intercepta a otra unión triple ubicada en los 35°S y 110°W, que corresponde a la intersección de la dorsal Antártica Pacífico y la dorsal del Pacífico Oriental. La batimetría en este sector está representada por un sistema de valles de "riff" y zonas de fracturas que son los elementos prominentes de la unión triple. Este sistema intercepta la fosa Chile-Perú, donde se evidencia un desplazamiento lateral del eje de la dorsal del orden de 300 kilómetros hacia el costado del mar. Cerca de los 46°S existen dos zonas de fractura adicionales, las cuales provocan un nuevo desplazamiento de la dorsal en 60 y 70 kilómetros, respectivamente.

Ilustración 75: Relieve marino frente a Chile.



Fuente: Elaboración propia



3.6 SECTOR ANTARTICO CHILENO

El Continente Antártico comprende una superficie de 13.5 millones de kilómetros cuadrados. Tectónicamente se considera formado por dos grandes unidades, la Antártica Oriental y la Antártica Occidental, las cuales se encuentran separadas por las montañas transantárticas. La primera es un escudo continental compuesto por rocas antiguas ígneas y metamórficas, cubiertas por rocas sedimentarias más jóvenes y bien estratificadas. La Antártica Occidental, por su parte, está constituida por rocas sedimentarias y volcánicas jóvenes, fuertemente plegadas y afectadas por cierto grado de metamorfismo.

El Continente Antártico está cubierto casi en su totalidad por hielos, cuyo espesor sobrepasa los 2000 metros en algunas regiones. El hielo llega en casi todas partes al mar y sus emisarios más importantes penetran varias decenas de kilómetros, creándose amplias plataformas que terminan en acantilados de hielo, de los que se desprenden icebergs.

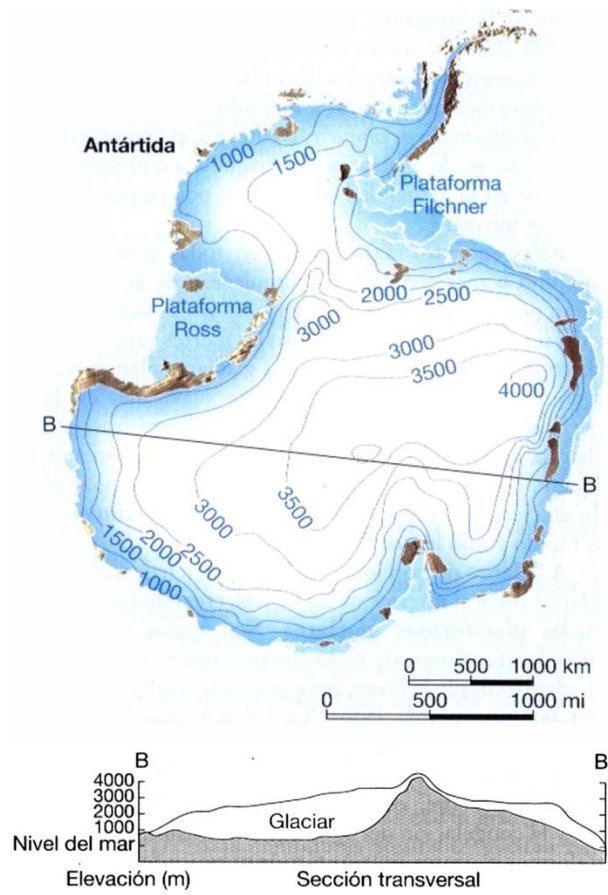
Los glaciares, las barreras continentales y otras formas de hielo transportan sobre el 90% de la cantidad total de detritos del continente. Por su parte, la erosión marina asociada al oleaje y la gelificación, afecta las rocas expuestas proporcionando un abundante material abrasivo. En consecuencia, la actividad glacial, la abrasión y la deflación han modelado una geomorfología litoral y submarina compleja.

La morfología submarina del Pacífico frente a la Antártica Occidental comprende la región ubicada entre los 60°W~130°W y los 45°S~70°S. La porción cercana al continente no es fácil de reconocer debido a la presencia casi permanente de hielos flotantes. Sin embargo, se sabe que la Plataforma Continental es única al ser comparada con las de otras latitudes, debido a la acción de los hielos que fluyen directamente al mar. Su profundidad es mayor que la mayoría de las existentes, alcanzando incluso 545 metros al sur de la Isla Alejandro I. El talud continental es extremadamente empinado, con pendientes del orden de 11° y un ancho que varía desde los 20 a 40 kilómetros. Las irregularidades de carácter menor presentes en los contornos del talud parecen ser el resultado de derrumbes submarinos que se habrían iniciado por la inestabilidad del voluminoso abastecimiento de materiales glaciares (Anderson, 1990).

La Elevación Continental presenta un extraordinario desarrollo a lo largo de casi la totalidad del margen antártico, excepto al norte de la zona de fractura Hero, donde se presenta un accidentado paisaje de montañas y colinas submarinas que terminan en el borde de la fosa de las Shetlans del Sur. A su vez, entre la zona de fractura Hero y Tula, esta elevación se encuentra interrumpida por la Elevación Palmer. Al sur de la zona de fractura Tula, la elevación se extiende hasta el contorno de las 2500 brazas y su gradiente disminuye suavemente hacia las zonas más profundas. En esta zona se destaca el Guyot de Gerlache, de considerables dimensiones al norte de la Isla Pedro I, encontrándose su cúspide a 391 metros de profundidad.

La Elevación Continental, a su vez, se puede dividir en tres regiones. La subdivisión más profunda es la más grande y regular, en la cual se destacan grandes "fans" con suaves declives, incisos en una cubierta abisal de sedimentos terrígenos depositados por corrientes de turbidez. La subdivisión central se caracteriza por un aumento del declive y por su irregularidad. Su ancho varía de 100 a 200 kilómetros, presentando numerosos canales submarinos. Finalmente, la subdivisión superior es un angosto cinturón caracterizado por una inclinación y un relieve más o menos suave, disectado y caótico de acuerdo a cada región que la constituye (Morales, 1992).

Ilustración 76: Topografía de la Antártida



4 LAS OBRAS MARÍTIMAS

4.1 CLASIFICACIÓN FUNCIONAL DE LAS OBRAS MARÍTIMAS

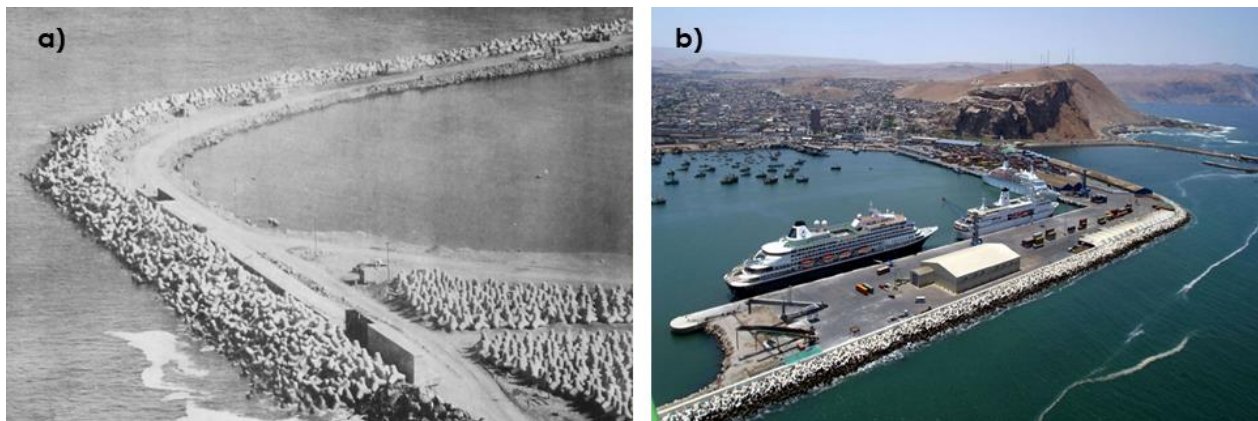
De acuerdo a las Recomendaciones de Obras Marítimas españolas, conocidas como ROM (PPEE, 2009), las obras marítimas pueden clasificarse, según su función, en:

- Obras de abrigo
- Obras de atraque
- Obras de amarre y fondeo
- Obras de gestión y protección del litoral
- Plataformas exteriores
- Conducciones submarinas
- Obras de dragado y relleno
- Obras de construcción y reparación de buques y flotadores.

En función de sus respuestas ante las acciones ambientales, las obras marítimas se pueden también clasificar en obras fijas de gravedad, fijas estructurales y flotantes. Las obras fijas de gravedad son aquellas cuya estabilidad se basa en la gravedad. Las obras fijas estructurales están construidas con elementos que se deforman para resistir y transmitir las cargas al terreno. Las obras marítimas flotantes son aquellas que cumplen su función estando a flote o fondeadas. La Tabla 3 presenta una definición de tipos de obras marítimas de acuerdo a su función y su sus respuestas ante las acciones ambientales.

Las obras de abrigo cumplen la función de reducir la acción del oleaje, y eventualmente el viento, protegiendo así las distintas partes que conforman una instalación portuaria, como las zonas de aproximación, acceso, maniobras y atraque de embarcaciones. En la Ilustración 77 se muestra el molo de abrigo del Puerto de Arica, construido a partir de 1960 por la empresa constructora Pei y Belfi Ltda. (Ossa, 1964).

Ilustración 77: Obras de abrigo del Puerto de Arica. a) Obras de construcción del molo de abrigo constituido por la coraza de tetrápodos. Ala derecha se observan los tetrápodos en espera de su colocación. b) Fotografía reciente del puerto, con tres cruceros ubicados en los sitios de atraque.



Fuente: a) Ossa (circa 1967). b) archivos personales.

De acuerdo a las ROM (PPEE, 2012), el objetivo fundamental de las obras de atraque, amarre y fondeo “es proporcionar a los buques unas condiciones adecuadas y seguras para su permanencia en puerto y/o para que puedan desarrollarse las operaciones portuarias necesarias para las actividades de carga, estiba, desestiba, descarga y transbordo así como embarque y desembarque de pasajeros, vehículos y mercancías que permitan su transferencia entre buques o entre éstos y tierra u otros medios de transporte”. En este tipo de obras “las oscilaciones del mar no suelen ser las acciones predominantes, ya que al estar generalmente situadas en zonas abrigadas, la carga predominante suele estar producida por las operaciones del buque, por las instalaciones de carga y descarga o por el terreno (PPEE, 2009). En la Ilustración 78 se muestra un muelle mecanizado en Puerto Coloso, al sur de Antofagasta, cuyo objetivo es exportar concentrado de cobre de la Minera La Escondida.

Ilustración 78: Muelle mecanizado de atraque para buques graneleros en el Terminal Coloso, al sur de Antofagasta. a) Vista de la correa transportadora y pasarela de acceso. b) Detalle del cabezo donde atracan naves de hasta 200 [m] de eslora y 12 [m] de calado.



Fuente: Elaboración propia.

Las obras de gestión y protección del litoral tienen el objetivo de proteger asentamientos establecidos en o cerca de la costa, o para proteger la costa misma, contra el embate de los agentes oceánicos (Salles y Silva, 2004). Estas obras pueden ser diseñadas en forma perpendicular a la costa, con el objetivo de detener intensas erosiones, en forma paralela a la misma con el objeto de proteger instalaciones, o de formas intermedias. La elección de la solución adecuada se hace sobre la base de una evaluación de los beneficios, costos y criterios de los encargados de adoptar las decisiones. La Ilustración 79 muestra la defensa costera del paseo Wheelwright, en Valparaíso, cuyo objetivo es dar soporte al paseo y a terrenos portuarios ganados al mar.

Ilustración 79: Defensa costera del paseo Wheelwright, en Valparaíso. La escollera está constituida por un talud de rocas y filtros interiores que en conjunto dan soporte a la explanada.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 80: Muelle flotante de Puerto Cisnes, para conectividad marítima de barcazas.



Fuente: Gentileza de la Dirección de Obras Portuarias

Tabla 3: Tipos de obras marítimas de acuerdo a su función y su sus respuestas ante las acciones ambientales.

Obras de abrigo	Tipo
Diques rompeolas de escollera o piezas prefabricadas	Fijas de gravedad
Diques verticales mediante cajones flotantes, bloques y hormigón en masa	Fijas de gravedad
Diques mixtos de escollera y cajones flotantes	Fijas de gravedad
Diques mixtos especiales	Fijas de gravedad
Pantallas delgadas, permeables o impermeables, verticales e inclinadas	Fijas estructurales
Pantallas múltiples	Fijas estructurales
Diques de recintos de tablestacas	Fijas estructurales
Grupos de neumáticos	Flotantes
Pontonas	Flotantes
Campos de boyas	Flotantes
Pantallas flotantes	Flotantes
Obras de atraque	
Muelles de cajones flotantes, bloques de hormigón o de hormigón en masa	Fijas de gravedad
Muelles de pantallas ancladas, muros en "L"	Fijas estructurales
Muelles o pantalanés sobre pilotes	Fijas estructurales
Muelles de tablestacas, recintos tablestacados u otros elementos prefabricados	Fijas estructurales
Pontonas-pantalanés flotantes	Flotantes
Obras de gestión y protección del litoral	
Muros, revestimientos y taludes de elementos granulares o prefabricados	Fijas de gravedad
Espigones perpendiculares a la costa y exentos de elementos granulares	Fijas de gravedad
Paseos marítimos	Fijas de gravedad
Protecciones de tubería submarina mediante elementos granulares	Fijas de gravedad
Muros en "L", pantallas ancladas	Fijas estructurales
Espigones de madera o metal	Fijas estructurales
Paseos marítimos como muro estructural	Fijas estructurales
Pontonas	Flotantes
Campos de boyas	Flotantes
Obras de amarre y fondeo	
Diques de Alba en cajón flotante	Fijas de gravedad
Diques de Alba con pilotes aislados o grupos de pilotes	Fijas estructurales
Monoboyas	Flotantes
Sistemas de cadenas	Flotantes
Plataformas exteriores	
Plataformas tipo "Ekofisk"	Fijas de gravedad
Plataformas izadas	Fijas estructurales
Plataformas pilotadas	Fijas estructurales
Plataformas lastradas	Flotantes
Plataformas atirantadas	Flotantes
Plataformas ancladas	Flotantes
Plataformas mixtas	Flotantes

Fuente: Adaptado de ROM 2.0-11 (PPEE, 2009).

Las conducciones submarinas contemplan sistemas de captación de agua de mar para usos industriales y descargas de diferentes tipos de vertidos. Entre las descargas se pueden contar los vertidos de aguas servidas mediante emisarios submarinos, agua caliente proveniente de sistemas de refrigeración de termoeléctricas, agua fría proveniente de sistemas de regasificación, salmuera proveniente de plantas desaladoras y residuos industriales líquidos (RILes). En la Ilustración 81 se muestra un Sifón de captación de agua de refrigeración para la central termoeléctrica de AES GENER, en la bahía de Quintero.

Ilustración 81: Sifón de captación de agua de refrigeración para la central termoeléctrica de AES GENER, en la bahía de Quintero.



Fuente: Elaboración propia.

4.2 DISEÑO DE OBRAS MARÍTIMAS

El ciclo de vida de una obra marítima contempla el diseño, la construcción, la operación, la conservación y la remoción final de esta, una vez que ha cumplido con su función. Como es común en la ingeniería civil, en la etapa de diseño, se recurre a diversas recomendaciones de obras marítimas a nivel mundial, las cuales han sido utilizadas indistintamente en el ámbito de la ingeniería chilena, dependiendo del contexto histórico en cuestión.

La Ilustración 82 presenta una lista de las variables propuesta por los autores, que se deben tener en cuenta cuando se desarrolla un proyecto de obras marítimas. Esta clasificación considera variables de explotación, atmosféricas, oceanográficas, morfológicas que junto a otras, como las hidrológicas, jurídicas, ambientales y sociales, condicionan cada proyecto en particular. Naturalmente, que la importancia relativa de cada una de estas variables depende del proyecto en particular. Por ejemplo, una obra ubicada en las costas abiertas del norte de Chile probablemente esté sometida a cargas predominantes de oleaje, tsunami y sismo, en tanto que una obra ubicada en la zona de los canales puede estar condicionada por el régimen de mareas, las corrientes y los vientos. Lo interesante es que las obras marítimas no son replicables pues dependen mucho de las condiciones locales (*site-specific*) y por tanto requerirán de estudios de campo cuyo objetivo será caracterizar las variables dominantes utilizadas en su diseño.

Ilustración 82: Variables fundamentales utilizadas en el diseño de obras marítimas.



Fuente: Elaboración propia.

Las recomendaciones cubren los aspectos hidráulicos, estructurales, geotécnicos, constructivos, de operación y ambientales. Los estándares y recomendaciones que se utilizan actualmente en Chile son:

- Guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras¹⁶ (Chile),
- Instrucciones hidrográficas y oceanográficas del SHOA¹⁷ (Chile),
- Recomendaciones de obras marítimas, ROM¹⁸ (España),
- Technical standards and commentaries for port and harbor facilities, OCDI¹⁹ (Japón),
- Coastal engineering manual, CEM²⁰ (EEUU),
- Estándares del American Petroleum Institute, API²¹ (EEUU),
- Estándares del British Standards Institution²² (Reino Unido),
- Estándares del PIANC²³ (Organización mundial),
- Estándares de Det Norske Veritas²⁴ (Noruega),
- The Rock Manual, CIRIA-CUR²⁵ (Francia, Países Bajos Y Reino Unido),

¹⁶ <http://www.dop.cl/seminarios/Paginas/Inicio2.aspx>

¹⁷ <http://www.shoa.cl/php/descargas.php?tipo=gratis>

¹⁸ <http://www.puertos.es/es-es/ROM>

¹⁹ <http://ocdi.or.jp/en/technical-st-en>

²⁰ <http://www.a-jacks.com/Coastal/GeneralInfo/CEM/CEM.aspx>

²¹ <https://www.api.org/Standards/>

²² <https://landingpage.bsigroup.com/LandingPage/Series?UPI=BS%206349>

²³ <http://www.kennisbank-waterbouw.nl/DesignCodes/rockmanual/>

²⁴ <https://rules.dnvgl.com/docs/pdf/dnv/codes/docs/2010-10/rp-c205.pdf>

²⁵ <http://www.kennisbank-waterbouw.nl/DesignCodes/rockmanual/>

Estas recomendaciones no tienen carácter normativo y por tanto su uso queda a criterio del equipo que diseñe el proyecto. Naturalmente, esta lista es sólo una muestra de la diversidad de filosofías de diseño y de la necesidad de conocimiento específico requerido para diseñar obras marítimas.

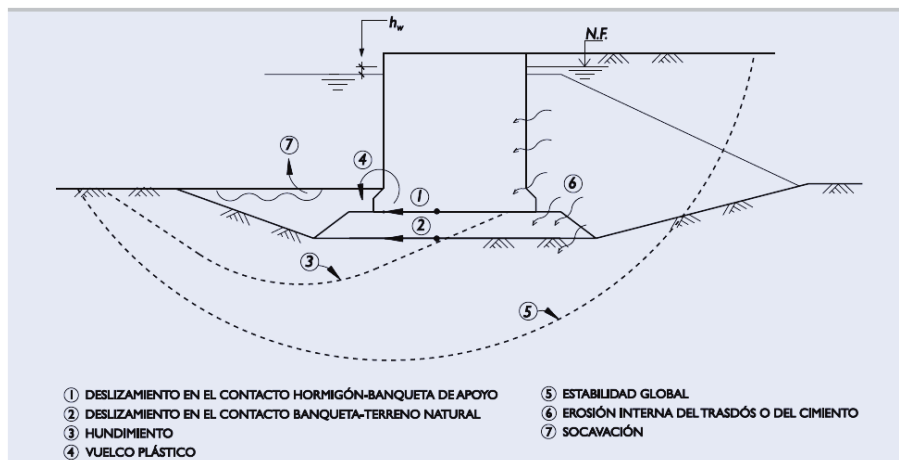
Existen además publicaciones científicas que pueden servir de apoyo al diseño, como:

- Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering (ASCE),
- Journal of Ocean Engineering and Science (Elsevier),
- Ocean Engineering (Elsevier),
- Coastal Engineering (Elsevier),
- Ocean & Coastal Management (Elsevier),
- Applied Ocean Research (Elsevier),
- Coastal Management (Taylor & Francis),
- Coastal Engineering Journal (World Scientific),
- Water and Maritime Engineering (ICE),
- Journal of Coastal Research (CERF),

además de documentos generados en universidades, como los Documentos de referencia del GIOC, de la universidad de Cantabria, o la serie Advanced Series on Ocean Engineering²⁶.

El diseño de las obras marítimas se basa en la evaluación de los modos de fallo de cada tipología, los que difieren de si son fijas de gravedad, fijas estructurales o flotantes. Las Recomendaciones Geotécnicas para Obras Marítimas y Portuarias, ROM 0.5-05 (PPEE, 2005) presentan una lista extensiva de los modos de fallo de origen geotécnico e hidráulico (o una combinación de ambos), a los que hay que adicionar aquellos de tipo estructural, generados por eventuales excedencias en las cargas de diseño, fatigas de material y pérdida de las características mecánicas de los materiales por obsolescencia. Los modos de fallo se ilustran para muelles gravitacionales (Ilustración 83), muelles de pilotes (Ilustración 84), muelles de tablestacas (Ilustración 85), muelles de recintos de tablestacas (Ilustración 86), rompeolas en talud (Ilustración 87) y rompeolas verticales (Ilustración 88).

Ilustración 83: Modos de fallo geotécnicos en muelles gravitacionales.

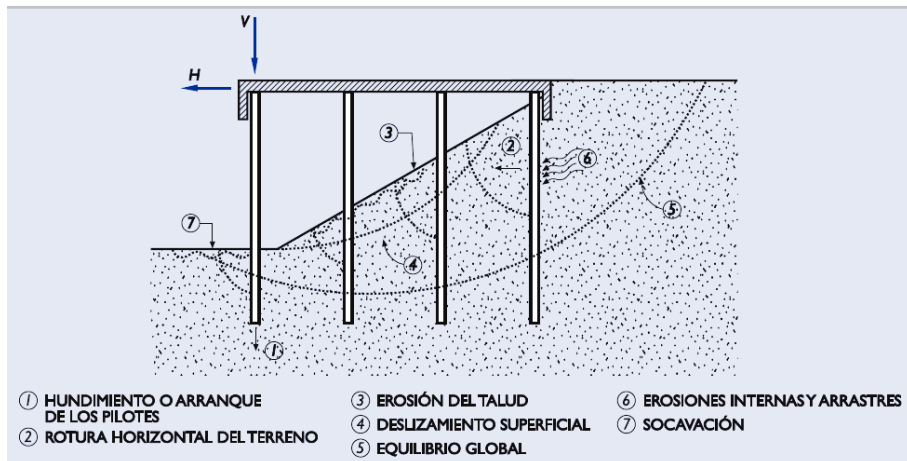


Nota: Sólo se incluyen modos de fallo de tipo geotécnico, esto es, controlados, principalmente, por las características del terreno.

Fuente: Adaptado de ROM 0.5-05 (PPEE, 2005).

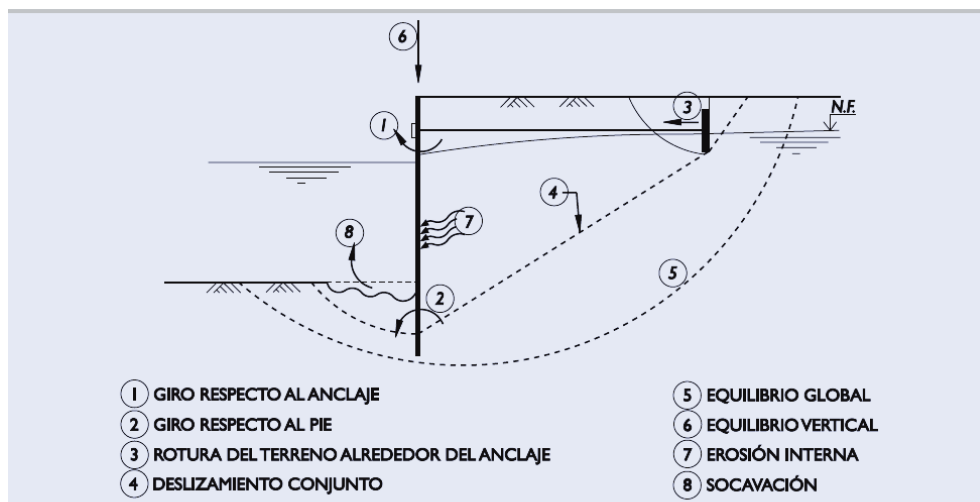
²⁶ <https://www.worldscientific.com/series/asoe>

Ilustración 84: Modos de fallo geotécnicos en muelles de pilotes.



Fuente: Adaptado de ROM 0.5-05 (PPEE, 2005).

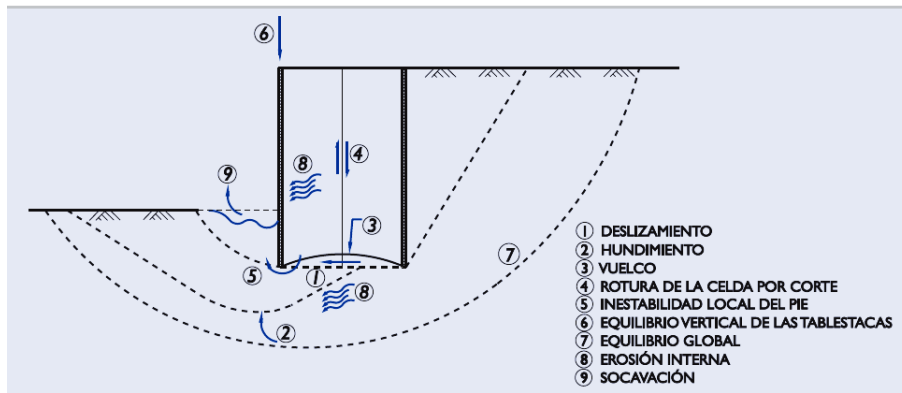
Ilustración 85: Modos de fallo geotécnicos en muelles de tablestacas.



Nota: Existen otros modos de rotura que implican el agotamiento estructural de la pantalla, de sus anclajes, de sus uniones, etc., que no se consideran aquí ya que son de tipo estructural.

Fuente: Adaptado de ROM 0.5-05 (PPEE, 2005).

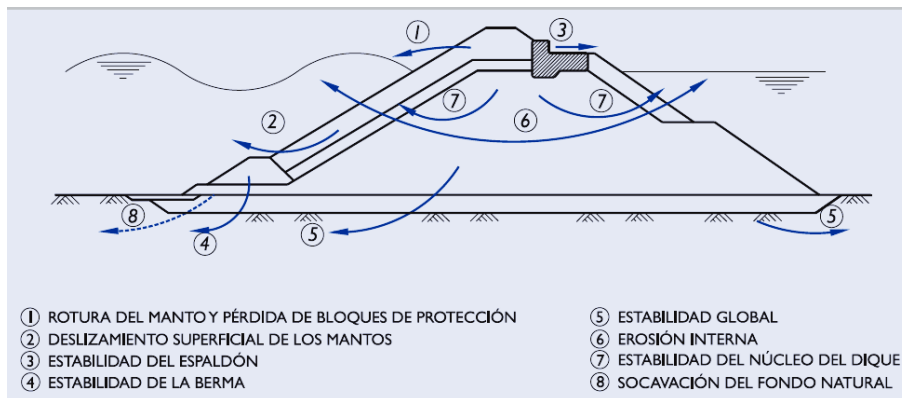
Ilustración 86: Modos de fallo geotécnicos en muelles de recintos de tablestacas.



Nota: Sólo se incluyen modos de rotura de tipo geotécnico, esto es, controlados principalmente por las características del terreno.

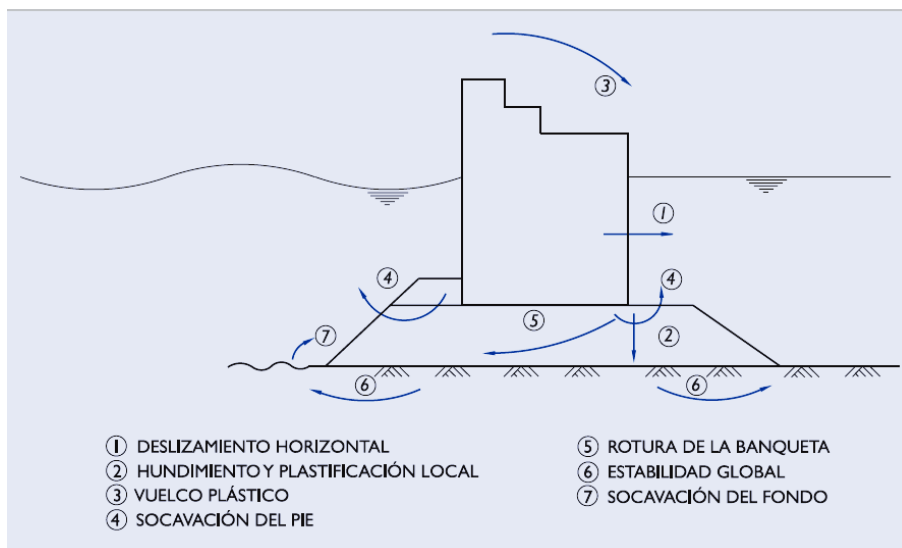
Fuente: Adaptado de ROM 0.5-05 (PPEE, 2005).

Ilustración 87: Modos de fallo geotécnicos e hidráulicos en rompeolas en talud.



Fuente: Adaptado de ROM 0.5-05 (PPEE, 2005).

Ilustración 88: Modos de fallo geotécnicos e hidráulicos en rompeolas verticales.



Fuente: Adaptado de ROM 0.5-05 (PPEE, 2005).

4.3 CONSTRUCCIÓN DE OBRAS MARÍTIMAS

Las obras marítimas son caras y de compleja construcción, pues se insertan en un ambiente físico y biogeoquímico agresivo que tiende a limitar su duración. En la mayoría de los casos, los trabajos se realizan sobre y bajo el agua, lo que requiere de maquinaria especializada, materiales resistentes a la salinidad y buzos especialmente entrenados para efectuar trabajos complejos como la soldadura submarina. Las variaciones cíclicas de la marea modifican las condiciones constructivas, limitando en ocasiones, los trabajos durante pleamares relativamente altas. Las marejadas pueden eventualmente generar complejidad en las condiciones de trabajo o suspensión de las faenas, lo que puede minimizarse con sistemas de pronóstico local como el desarrollado por Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso²⁷. El acceso desde tierra o mar puede ser dificultoso y usualmente existe escaso espacio para acopio de materiales e instalaciones de faenas. También es difícil controlar el acceso a sitios de trabajo. La construcción de obras marítimas es una disciplina que requiere de aprendizaje en terreno, experiencia y conocimiento específico de los métodos constructivos (Ilustración 89). Una excelente referencia introductoria es la Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas (PPEE, 2008).

Ilustración 89: Elementos de hormigón en fase de construcción para un rompeolas en el puerto de Misaki, Japón. a)



Fuente: Elaboración propia.

²⁷ <http://marejadas.uv.cl/> o <http://www.oleaje.uv.cl/>

4.4 OBRAS DE GESTIÓN Y PROTECCIÓN DEL LITORAL

Para la gestión y protección del litoral se han utilizado una variedad de métodos que se pueden clasificar en “no estructurales” –aquellos orientados a la estabilización de la costa- y “métodos estructurales” que requieren obras de ingeniería. Estos métodos se describen a continuación.

4.4.1 METODOS NO ESTRUCTURALES

4.4.1.1 Shoreline retreat management

La necesidad de protección costera puede reducirse mediante permitiendo aquellos usos que no requieran la ocupación de tierras costeras sujetas a erosión, inundación y daño por las tormentas. Este tipo de medidas se denominan “métodos pasivos”. Cuando el retroceso costero es evidente, toda nueva construcción debiera situarse a una distancia prudente de la línea costera que puede calcularse, como primera estimación, multiplicando la tasa anual de erosión a largo plazo por el número de años de seguridad contra la erosión que se considere apropiado o aceptable. Este método se denomina gestión del retroceso de costa, o *shoreline retreat management* y resulta ser eficaz en terrenos sin desarrollo urbano. También pueden utilizarse en instrumentos de ordenamiento territorial, exigiendo que los edificios se emplacen a prudente distancia de la línea costera. En las zonas densamente urbanizadas este método tienen poca aplicación, salvo en aquellos casos en que se tenga el propósito de modificar las modalidades de uso del suelo.

La otra modalidad son los “métodos activos”, que consideran el traslado de estructuras a distancia prudente de la línea costera. Este procedimiento se evalúa en función de las características y costos relacionados con cada estructura. Por su parte, el uso de vegetación es uno de los pocos métodos no estructurales capaces de controlar o retardar la erosión. Estos métodos comprenden la estabilización de las dunas y pendientes con plantaciones, o la creación de marismas salobres para absorber la energía del oleaje. En muchos casos se aplican conjuntamente con los métodos estructurales. Por ejemplo, cuando un muro de contención usado para estabilizar la base de un acantilado puede complementarse con plantaciones para controlar la erosión debida al escurrimiento de superficie y el efecto de las olas. La creación artificial de ciénagas a lo largo de costas con oleaje de poca energía, como las de las bahías y los estuarios, puede ser también una manera eficaz de controlar la erosión.

4.4.1.2 Alimentación artificial de playas

Una solución económica a los problemas de erosión costera consiste en la alimentación artificial de arena desde terrenos de empréstito ubicados, idealmente, en las cercanías del sitio. La transferencia de arena puede hacerse hidráulicamente mediante dragas móviles o fijas, dragas, barcazas o camiones que transporten la arena al lugar deseado. A diferencia de las soluciones estructurales, la alimentación artificial beneficia a las zonas costeras deriva abajo del emplazamiento. En algunos casos una sola operación de alimentación no basta para solucionar el problema de erosión, siendo preciso efectuar alimentaciones periódicas. La rentabilidad social del proyecto, en dicho caso, es función del costo de construcción inicial, del mantenimiento de una estructura fija y del costo de la alimentación periódica.

La alimentación artificial se puede combinar con espigones para generar playas artificiales, solución que se ha implementado en ciudades costeras como Arica, Tocopilla y Antofagasta, además de asentamientos lacustres como Villarrica. La Ilustración 90 muestra la fase final de construcción de la playa El Salitre, en Tocopilla, que concluyó en 2018.

Antes de utilizar arenas de algún sitio de empréstito para combatir la erosión de una playa o para la generación de una nueva, se deben estudiar las características de dicha arena. La arena de empréstito debe tener una granulometría similar a la playa erosionada para que permanezca estable. Si es de grano muy fino, la arena será arrastrada fuera de la playa durante las marejadas. Si es de grano demasiado grueso, puede aumentar el perfil de la playa y eventualmente modificar las condiciones de rotura. La arena de empréstito también debe responder a los requisitos funcionales como el tamaño, la forma el color y el olor. Las arenas extraídas de un lecho fluvial, por ejemplo, pueden tener una fracción de material orgánico y por tanto, tener un olor desagradable. Las playas de arena fina y redondeada, de color blanco o dorado suelen ser más apreciadas. Con todo, la definición del tipo de alimentación artificial obedece a un riguroso estudio de ingeniería que se puede conocer en el texto Regeneración de Playas, del GIOC (2002).

Ilustración 90: Construcción playa El Salitre, en Tocopilla. La playa contempla espigones de retención de arena y arena blanca para la alimentación artificial.



Fuente: Dirección de Obras Portuarias.

Las fuentes de arena pueden ser arenales costeros, bahías, lagunas, campos de dunas o zonas de acumulación en ensenadas. En caso de que un sitio de empréstito sea idóneo para la extracción, debe evitarse que la remoción no cause daños ecológicos, no altere las pautas de refracción del oleaje ni la dinámica del banco de arenas.

El volumen de arena necesario para un proyecto de alimentación depende del perfil de la playa que se desee, de la cantidad necesaria para compensar la erosión durante la "vida útil" del relleno, del porcentaje de la arena de relleno cuya granulometría sea de menor tamaño que la estable y de la frecuencia de la realimentación. Es común que la arena de empréstito se descargue directamente en la playa y se esparza con retroexcavadoras. Una vez dispuesta la

arena, las partículas forman una pendiente dinámicamente estable que se adapta a la combinación del oleaje y el régimen mareal.

Otra técnica de colocación de arena consiste en acumular el material en la zona de rompiente y en dejar que el transporte litoral lo distribuya. Esta técnica no ha sido utilizada en Chile, pero es comúnmente utilizada en otros países. Un ejemplo a gran escala en los Países Bajos es el *Sand Motor* (Ilustración 91), ejecutado en 2011 y cuya superficie es del orden de 1 km². Se espera que esta arena se mueva a lo largo de los años por la acción del oleaje, el viento y las corrientes para proteger la costa y generar otros beneficios durante los próximos 20 años. Se espera que este método sea más rentable que las alimentaciones efectuadas con mayor frecuencia y también ayude a la naturaleza al reducir la interrupción repetida causada por el reabastecimiento.

Ilustración 91: Alimentación artificial, denominada “Sand motor”), ejecutada en 2011 en las cercanías de La Haya, en los Países Bajos.



Fuente: Deltares. <https://www.deltares.nl/en/projects/sand-engine/>

Durante una alimentación artificial se debe evitar que el transporte genere la colmatación de ensenadas o puertos contiguos, lo que obligaría a faenas de dragado en los últimos para garantizar una profundidad. Como alternativa, se puede alimentar a una playa erosionada pasando mediante maquinaria terrestre, dragas bombeo hidráulico (bypass) la arena de las áreas de acumulación de una estructura costera a las playas erosionadas deriva abajo, lo que se denomina bypass de arena. Uno de los pocos ejemplos a nivel mundial es el bypass de arena del *Tweed River* (Ilustración 92), en *Gold Coast*, Australia, el que cumple la función de mantener el canal de acceso con calados suficientes para la navegación de embarcaciones menores y evitar la erosión aguas debajo de la desembocadura.

Ilustración 92: Sistema de bypass de arena en Tweed River, Gold Coast, Australia.



Fuente: <https://www.tweedsandbypass.nsw.gov.au/>

4.4.1.3 Restauración de dunas

Como protección costera, las dunas costeras alimentan a las playas en erosión y obstruyen a las olas de tempestad de la postplaya. En casos en que el transporte litoral es suficiente, el viento proveniente del mar transporta arenas, formando dunas del lado terrestre de la berma de invierno. De las diferentes variedades de dunas formadas, las antedunas revisten interés primordial para el control de la erosión. Estas son montículos continuos e irregulares de arena de pocos metros de altura situados paralelamente junto a la playa.

Las antedunas se crean por procesos desencadenados por el viento. Éste transporta partículas en una serie de saltos cortos, las que se levantan de la superficie en ángulo casi recto, se desplazan hacia delante en forma de arco y aterrizan a un ángulo rasante en un punto cuya distancia es de 6 a 10 veces la altura del arco, en dirección del viento. Al aterrizar pueden saltar otra vez o desprender otras partículas del lecho. La saltación (Ilustración 29) suele ser la forma predominante de transporte eólico de arenas, y comprende hasta el 80% del transporte total. La formación de una duna comienza cuando una obstrucción generada por hierbas provoca la acumulación de granos de arena. Movida por el viento, la arena alcanza elevaciones por encima del perfil natural de la playa, donde se deposita formando una duna, si el transporte es suficiente. Las mayores velocidades del viento impulsan partículas que se depositan del lado de tierra, de manera que la duna se agranda y emigra en la dirección del viento. Las bajas velocidades inducen el depósito del lado opuesto, ocasionando agrandamiento y migración en dirección contraria al viento. Las antedunas pueden ser destruidas por las marejadas, sequías o el exceso de pastoreo que reduce su cubierta vegetativa. Por esta razón, la creación de duna tiene un valor limitado en la lucha contra la erosión.

La restauración de los sistemas dunares constituye una alternativa de solución al problema de la erosión y se logra mediante técnicas de reconstrucción topográfica y repoblación con vegetación autóctona. Citando textual a (Ley y Vidal, 2007), la restauración puede basarse en técnicas de ingeniería convencional y técnicas ecológicas:

- “Técnicas de ingeniería convencional: Son actuaciones en las que la reconstrucción de la topografía dunar se realiza mediante el aporte de arena con maquinaria. La fuente de

arena puede estar o no en el sistema dunar objeto de la actuación. Suele emplearse este tipo de técnicas cuando el objetivo de la reconstrucción dunar es la protección de algún elemento de gran valor económico, social, cultural (como por ejemplo, los yacimientos arqueológicos), e incluso natural, situados en primera línea de costa. Generalmente, son actuaciones realizadas en plazos de tiempo breves (días-semanas), limitadas en el espacio y que requieren una elevada inversión económica. El impacto ambiental es elevado en aquellas zonas que actúan como fuente de arena y en los emplazamientos de las nuevas dunas.

- Técnicas ecológicas: Son actuaciones en las que, una vez eliminado o reducido a rangos compatibles el factor o factores que han conducido a la degradación dunar, se procede a la instalación de sistemas de "ayuda" que permitan su reconstrucción mediante procesos naturales. Es una acción relativamente lenta, cuyos resultados se obtienen a medio plazo. Son actuaciones muy poco costosas, en las que la inversión realizada es muy pequeña en relación con los resultados que se obtienen, que, en general, son buenos. No obstante, puesto que se trata de obras en las que es la propia naturaleza la que realiza la mayor parte del esfuerzo (el viento transporta la arena, la vegetación se establece y extiende su cobertura, etc.), los resultados no se aprecian al terminar la actuación sino al cabo de cierto tiempo, dependiendo de varios factores, entre ellos, la climatología, la dinámica sedimentaria, la efectividad de la protección, etc."

4.4.2 METODOS ESTRUCTURALES

Las estructuras de fortalecimiento de la línea costera tienen la finalidad de mitigar la erosión y proteger las instalaciones contra la acción perjudicial del mar. Estas obras tienen efectividad local y no extienden sus beneficios a las costas adyacentes. Por el contrario, pueden afectar las playas colindantes pues dan lugar a cierto grado de socavación local producto de la reflexión en la estructura. La diferencia entre erosión y socavación es que en la primera interactúan el agua y los sedimentos, en tanto que en la segunda se requiere también de la presencia de una estructura (Ilustración 93). La intensidad de la socavación depende de factores como el diseño estructural, las condiciones oceanográficas, las características del sedimento y la morfología de la costa. Si el suministro de sedimento que llega a la playa no es suficiente para compensar la pérdida debida a la socavación, la erosión de la playa se acelera y la playa puede desaparecer. Asimismo, el excesivo fortalecimiento de la línea costera que proporciona sedimento a costas adyacentes se puede traducir en la pérdida definitiva o temporal de sedimento en las zonas expuestas de la playa.

Ilustración 93: Socavación del paseo costero en Playa El Sol producto de la marejada del 8 de agosto de 2015 (Winckler et al., 2017).



Fuente: Elaboración propia.

Las estructuras bien diseñadas y construidas constituyen, sin embargo, una forma segura de proteger las tierras altas e instalaciones construidas inmediatamente tras ellas. Cuando la protección es imperativa y los riesgos deben minimizarse, como es el caso de instalaciones portuarias, plantas de generación eléctrica o canchas de acopio en instalaciones industriales, las estructuras de fortalecimiento suelen ser la única solución. La Tabla 3 ilustra una clasificación de obras de protección costera con arreglo a su objetivo y mecanismo de protección. Dada la gran variedad de obras costeras, se recomienda consultar el Coastal Engineering Manual (USACE, 2002) para conocer algo más de estas estructuras.

Una de los elementos de diseño más importantes de estas estructuras es la profundidad de penetración de su base en el fondo marino. Este parámetro debe considerar factores como la pérdida de sedimento debida a marejadas extremas, la erosión producida por espigones deriva arriba y las características del suelo detrás y bajo la estructura. Por su parte, la geometría y cota sobre el nivel del mar se determina en función de las condiciones del oleaje, las mareas astronómica y meteorológica, el lecho marino y la porosidad de la estructura. Las estructuras porosas absorben una mayor cantidad de la energía de las olas, reduciendo la socavación y el sobrepaso. Estas se construyen con rocas o elementos premoldeados de hormigón (Ilustración 100), lo que ocasionalmente son utilizados como soporte para el arte callejero (Ilustración 94). Finalmente, la geometría de la obra determina el costo pues define el tamaño, cantidad de materiales, equipos y la mano de obra especializada para la construcción.

Tabla 4: Definición de tipos de obras de protección costera.

Tipo	Traducción	Objetivo	Función principal
Dique	Sea dike	Prevenir o mitigar inundaciones de zonas bajas	Proteger la costa con una estructura impermeable
Muro vertical	Seawall	Proteger tierra y estructuras contra inundación y sobrepaso	Reforzar parte del perfil de la playa
Revestimiento	Revetment	Proteger contra la erosión de la línea de costa	Reforzar parte del perfil de la playa
Espigón	Groin	Prevenir erosión de playas	Reducir el transporte longitudinal de sedimentos
Dique exento	Detached breakwater	Prevenir erosión de playas	Reducir la altura del oleaje y transporte longitudinal

Dique arrecife	Reef brakwater	Prevenir erosión de playas	Reducir la altura del oleaje en la costa
Dren de playa	Beach drain	Prevenir erosión de playas	Acumular arenas en la zona drenada de la playa
Alimentación artificial	Nourishment	Prevenir erosión de playas y evitar inundación	Reemplazar transporte deficitario de sedimentos
Rompeolas	Breakwater	Proteger zonas de abrigo	Disipación o reflexión de energía del oleaje

Nota: En Chile los términos dique y rompeolas son sinónimos.

Fuente: USACE (2002).

Ilustración 94: Dolos de la defensa costera en isla Alacrán, Arica.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.1 Diques

Un dique es una barrera masiva que busca evitar la inundación de sectores costeros en países caracterizados por terrenos costeros muy bajos. Son estructuras que se sostienen por gravitación, esto es, que su propio peso constituye el mecanismo que les da resistencia, por lo que requieren

de más material que otras estructuras de altura equivalente. Los diques pueden ser permeables, impermeables, de superficie lisa o rugosa, y pueden construirse con una mayor variedad de materiales que otras estructuras. Se puede utilizar hormigón armado, rocas, encofrados de madera, gaviones rellenos de bolones, tablestacas de madera o de acero celular, dependiendo del nivel de esfuerzos al que esté sometido durante su vida útil.

Los holandeses han conseguido con la construcción de este tipo de estructuras recuperar tierras las cuales luego de dos a tres años crece la vegetación. Un ejemplo de ello es la ciudad de Westkapelle, en Zeeland donde el dique da soporte a un paseo costero y el transporte longitudinal se retiene mediante espigones hechos con tablestacas de madera (Ilustración 95). En este pueblo el nivel del mar se encuentra sobre el nivel de la ciudad.

Ilustración 95: Dique de protección de la ciudad de Westkapelle, en Zeeland, Países Bajos.



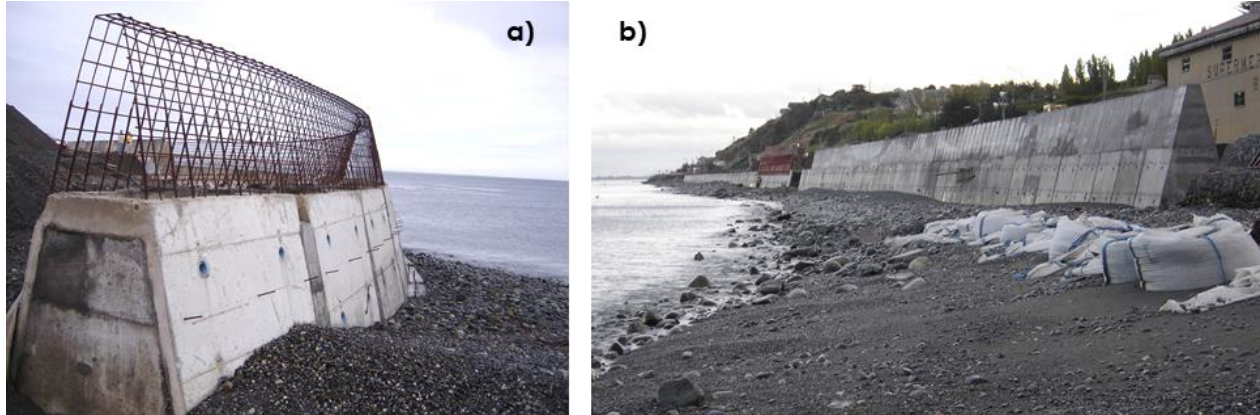
Fuente: Elaboración propia.

 **YouTube** [Ver Diques](#)

4.4.2.2 Muros de contención

Los muros de contención son estructuras gravitacionales, usualmente construidas mediante muros de hormigón armado, cuyo objetivo es proteger el terreno de la acción del oleaje y las corrientes. Suelen ser obras más ligeras que los diques y requieren de sistemas de protección contra la socavación para evitar su deslizamiento o vuelco (Ilustración 83). Dado que estas estructuras son menos voluminosas que los diques, requieren menos material y son usualmente menos costosas. La Ilustración 96 muestra un ejemplo de construcción de un muro de contención con elementos prefabricados de hormigón armado en las cercanías de Punta Arenas, en el Estrecho de Magallanes.

Ilustración 96: Construcción de un muro de contención mediante elementos prefabricados de hormigón armado en Punta Arenas.



Fuente: Elaboración propia.

 **YouTube** [Ver Muros de contención](#)

4.4.2.3 Malecones

Los malecones son estructuras destinadas a retener el terreno e impedir los deslizamientos de tierra sobre el agua. Se construyen en zonas relativamente abrigadas con elementos que tienen de espesor, como pantallas de tablestacas de acero, muros cantiléver o muros en L. Son estructuras usualmente verticales, lo cual los hace adecuados para albergar sitios de atraque para embarcaciones medianas, rampas de lanzamiento o chazas de atención para botes.

Ilustración 97: Malecón que alberga un paseo costero y una rampa para el lanzamiento de embarcaciones menores en Dalcahue, Chiloé.



Fuente: Elaboración propia.

4.4.2.4 Espigones

Los espigones son obras que penetran perpendicular u oblicuamente en el mar y se construyen para provocar la acumulación de los sedimentos. Estas estructuras pueden ser impermeables, lo que se logra mediante muros verticales o pantallas de tablestacas, o permeables, en cuyo caso son usualmente de roca de cantera. Los espigones son adecuados en lugares donde la erosión deriva abajo es aceptable y puede compensarse con alimentación artificial o estructuras adicionales de control de la erosión. Los efectos adversos deriva abajo pueden mitigarse reduciendo el largo y altura de los espigones a fin de reducir el tiempo requerido para que se colmate el lado deriva arriba de la estructura. Esta solución da por resultado una playa más reducida deriva arriba pero mantienen las pérdidas deriva abajo a un nivel aceptable.

Tras la construcción de un espigón, el suministro de arena deriva abajo del espigón queda reducido, resultando en el retroceso de la línea de costa (Ilustración 16d). Con una deriva litoral constante y unidireccional, este proceso continúa hasta que se alcanza la máxima acumulación de arena, después de lo cual la arena sobrepasa de nuevo el espigón. Los espigones pueden ser ventajosos para impedir la excesiva sedimentación en los canales navegables (Ilustración 92) o para estabilizar playas artificiales (Ilustración 98).

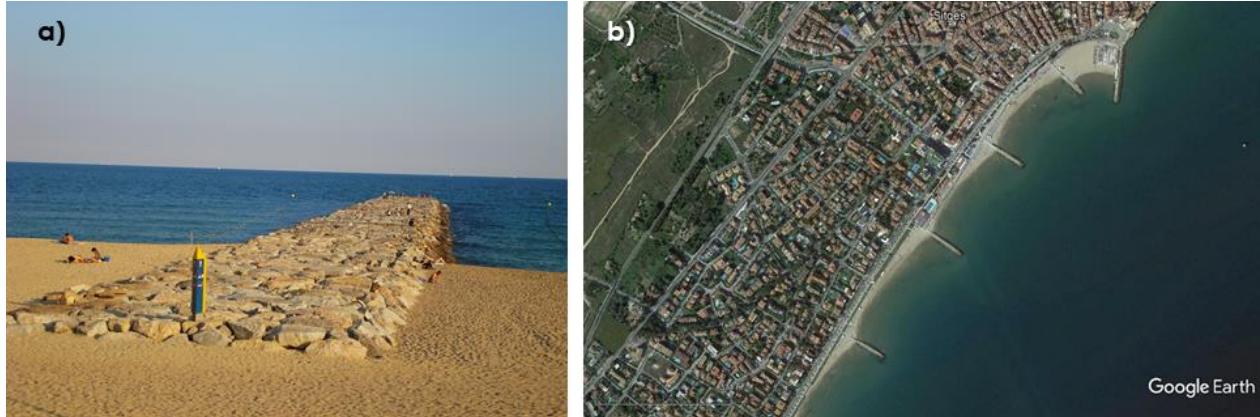
Ilustración 98: Espigones de retención de arena en Playa Paraíso, Antofagasta.



Fuente: Elaboración propia.

Los espigones suelen disponerse en grupos caracterizándose por su longitud, el espacio que los separa y la inclinación respecto a la línea de la costa (Ilustración 99). Los procesos básicos de acrecencia y retroceso característicos de un solo espigón caracterizan también a un sistema de espigones. El lado deriva abajo de cada espigón se beneficia con la acrecencia del lado deriva arriba del espigón contiguo, con lo cual la playa suele ensancharse. La separación y distancia entre espigones depende del ángulo de ataque del oleaje, de la pendiente y granulometría de la playa, además de factores económicos como el costo de la obra y el uso de la tierra.

Ilustración 99: Sistemas de espigones utilizados para proteger costas erosivas. a) Espigón construido en forma perpendicular a una playa en Barcelona, en el Mediterráneo. B)



Fuente: Elaboración propia (a) y Google Earth (b).

 **YouTube** [Ver Espigones](#)

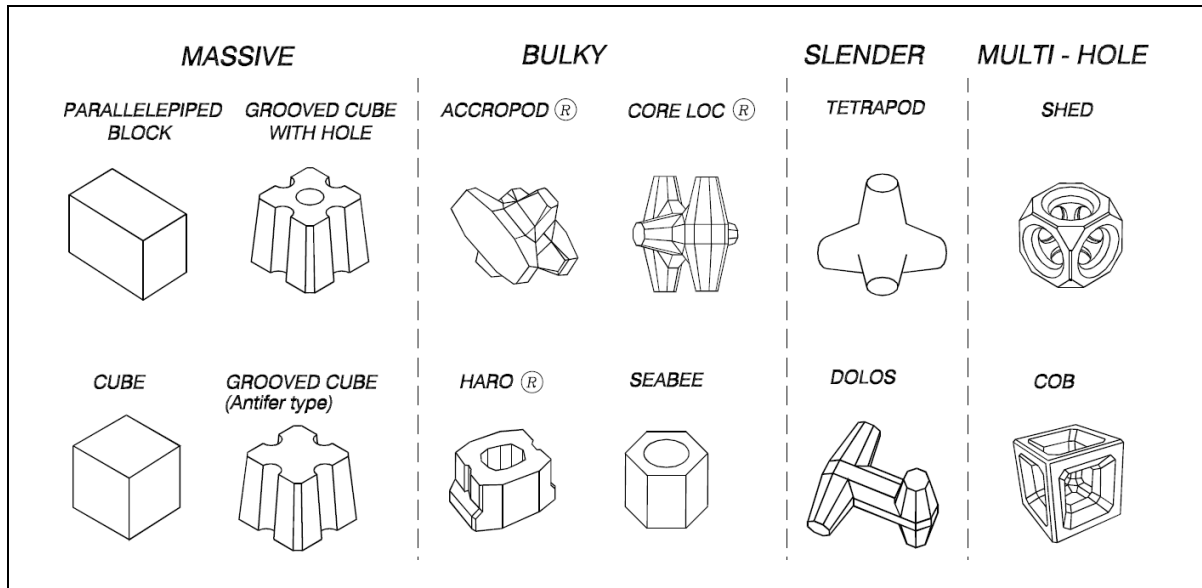
4.4.2.5 Rompeolas

Los rompeolas tienen por objeto producir la rotura de la ola, disipando su energía sobre su manto, o reducir el oleaje por difracción en una zona de abrigo. Son estructuras voluminosas que pueden construirse como elementos verticales (Ilustración 88) o en talud (Ilustración 87), en cuyo caso se conforman de varias capas de material pétreo. En España, estas estructuras se conocen como diques o y también son conocidos como escolleras, que proviene de la palabra “escollo”. En los rompeolas en talud se pueden utilizar elementos artificiales de hormigón en masa (Ilustración 100) o rocas graníticas, cuya dureza, densidad y forma angulosa favorece una mejor trabazón. Los elementos de hormigón pueden alcanzar pesos de entre 10 a 150 toneladas, dependiendo de la intensidad del oleaje extremo, y pueden llevar ranuras u orificios para aumentar la trabazón (Ilustración 89). En las grandes obras ejecutadas en Chile durante el siglo XX se utilizaron tetrápodos con pesos interiores a 20 toneladas, pero en la actualidad es común el uso de dolos, acrópodos y coreloc.

Los rompeolas utilizados como obras de abrigo generan una zona de oleaje de baja energía donde las embarcaciones operan. Al igual que los espigones, estas obras pueden constituir una barrera casi total contra la deriva litoral, privando de sedimento a playas ubicadas deriva abajo. No obstante las externalidades que derivan de un mal emplazamiento, en el diseño de un rompeolas hay suficiente margen para encontrar una solución que satisfaga los objetivos de controlar la erosión y de mitigar a la vez los efectos adversos de estas obras. Dado que los rompeolas se emplazan en aguas más profundas que las escolleras unidas a la costa, controlan una mayor proporción de la zona litoral y pueden inducir acumulación en un área más amplia, como ocurre en el puerto de Salaverri, Perú (Ilustración 101).

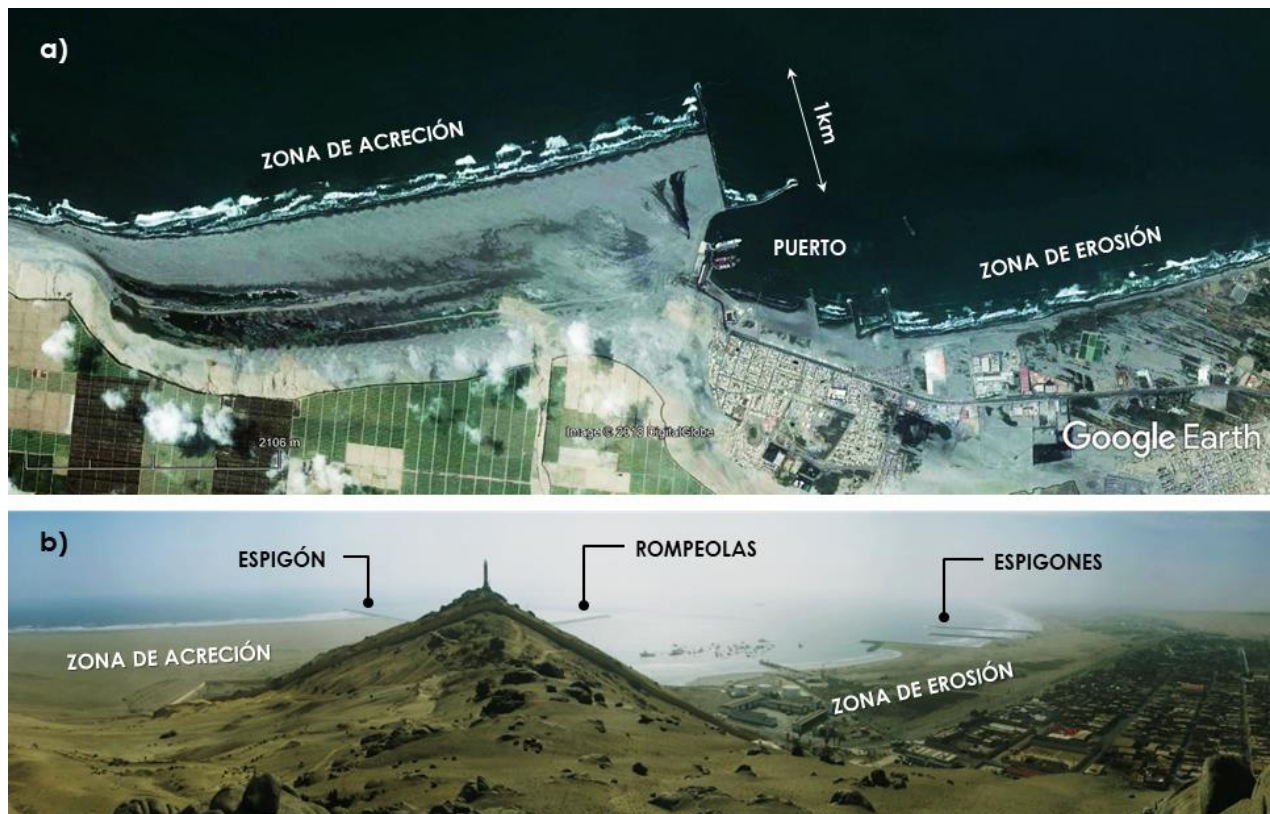
 **YouTube** [Ver Escolleras](#)

Ilustración 100: Ejemplos de elementos artificiales de hormigón en masa utilizados en obras de protección costera.



Fuente: USACE (2002).

Ilustración 101: Efectos en la dinámica litoral en el Puerto de Salaverri, en Trujillo, Perú. El transporte de sedimentos va de sur (izquierda) a norte (derecha).



Fuente: Google Earth (a) y Elaboración propia (b).

4.5 ASPECTOS ECONOMICOS

La búsqueda de la mejor protección del litoral requiere tanto de una evaluación técnica de los procesos costeros, como de una evaluación socio-económica de la región afectada. La evaluación técnica debe de considerar la caracterización del medio natural²⁸, la cuantificación histórica y estimación futura de la erosión (considerando tendencias a largo plazo, variaciones cíclicas y estacionales), la definición de las tipologías constructivas y la cuantificación de volúmenes de material erosionado o requerido para materializar la obra, entre otros estudios que dependerán de cada proyecto. Por su parte, la evaluación socio-económica incluye el estudio de las condiciones económicas del pasado y actuales en la zona de influencia del proyecto, además de la propuesta de planes socio-económicos para el futuro.

Como en cualquier proyecto de obras de infraestructura, el análisis de costo-beneficio social es un instrumento muy útil en la evaluación de un proyecto de control de la erosión y, en consecuencia, en la elección de la solución óptima. Habrá que cuantificar, entonces, los beneficios y costos sociales relacionados con las distintas soluciones optativas, con arreglo a las prioridades y los criterios de los encargados de adoptar las decisiones.

Un análisis detallado de costo-beneficio puede ser una operación costosa. Incluso hay factores implícitos en un análisis que pueden ser difícilmente cuantificables²⁹ y otros que cambian con el tiempo y cuya predicción difícil, sino imposible. Sea como fuere, un análisis de esta clase permite determinar sistemáticamente las cuestiones implícitas en la elección de una solución.

4.5.1 BENEFICIOS DE LA PROTECCIÓN DEL LITORAL

En la literatura especializada, los beneficios sociales de las medidas de control de la erosión se clasifican en financieros, sociales y ambientales. Los **beneficios financieros** se calculan como los ingresos de las actividades económicas generadas por el control de la erosión, menos las pérdidas que puede ocasionar. Esos ingresos se asocian a funciones específicas como la protección de diferentes zonas de la playa, la protección de infraestructura o el control de las inundaciones. Hay otros beneficios como el aumento de empleo durante la construcción, la generación de actividades económicas en la zona protegida, el aumento de la plusvalía del terreno, la transferencia de tecnología o el abastecimiento de bienes esenciales, que pueden también considerarse en esta categoría. Naturalmente, las medidas de control cumplen algunos objetivos con diferentes niveles de eficacia. Así, el uso de espigones protege a las actividades económicas de la post-playa, pero la protección de la playa, las tierras costeras altas y la línea costera adyacente son mínimas. En algunos casos ese potencial será escaso o nulo, y entonces la mejor solución puede consistir en no hacer nada.

Los **beneficios sociales** se derivan de la protección de las comunidades costeras, incluida la protección contra peligros para la vida y la salud, la participación comunitaria o la preservación de las zonas de interés cultural o estético. Las distintas medidas de control de la erosión varían muchísimo en los beneficios que proporcionan. Por ejemplo, métodos estructurales como la construcción de un espigón de retención de arenas, proporcionan una protección considerable a la comunidad costera próxima a un segmento de la costa, pero pueden afectar adversamente a otras comunidades ubicadas aguas abajo de la obra. Las estructuras de fortalecimiento costero

²⁸ Los estudios típicos contemplan la caracterización del viento, el oleaje, la corriente, la marea, el sedimento y el tipo de suelo, entre otros.

²⁹ Preguntas como ¿cuál es el beneficio que recibe un usuario de una playa en un día veraniego? son difíciles de responder en forma cuantitativa, aun cuando existen procedimientos para hacerlo.

protegen a las comunidades de las tierras altas, pero debido a sus efectos adversos sobre las playas pueden ocasionar inconveniente a las comunidades que dependen de ellas.



4.5.2 COSTOS DE LA PROTECCION DEL LITORAL

Los costos de las obras marítimas se pueden clasificar en la inversión inicial y en costos de operación o mantención durante la vida útil de la estructura. En caso de reportar beneficios, deben también incluirse en el valor actual neto, o VAN, parámetro comúnmente utilizado en evaluación de proyectos y que permite calcular el valor presente de un determinado número de flujos de caja futuros. Para obras que protegen extensiones de costa iguales a varias veces su propio largo, es común expresar los costos por unidad de longitud protegida para diferentes alternativas de estructuración y en función de este criterio, junto a otros como la factibilidad técnica, la disponibilidad de material, el impacto ambiental y la experiencia en el procedimiento constructivo, se decida la mejor opción.

La estrategia para planificar los flujos monetarios puede, en un extremo, considerar una alta inversión inicial y mantenimiento menor, o en el otro, una baja inversión inicial con costos significativos de mantención o inversiones menores durante la vida útil de la obra. Por ejemplo, un malecón de madera puede demandar una menor inversión inicial que un muro de contención de hormigón armado, pero el deterioro temprano de la madera puede requerir de mantenimiento periódico, reparaciones intensivas o de su reemplazo por otra solución. Por el contrario, una baja inversión inicial basada en materiales reciclados, como son el escombro de hormigón o material de dragado para el relleno de nuevas explanadas, puede eventualmente ser más conveniente en el largo plazo. Así las cosas, no es posible establecer cuál estrategia es la mejor sino hasta que se hacen los estudios de precios unitarios y se evalúa el VAN y otros instrumentos comúnmente utilizados para evaluar la rentabilidad social o privada del proyecto, según corresponda.

Es evidente que la inversión inicial de un proyecto depende de muchos factores. El precio y la disponibilidad de materiales pueden determinar la mejor estructura para una función definida, en tanto que condiciones del emplazamiento, como el acceso y las características del terreno, pueden hacer que ciertos tipos de estructuras resulten técnicamente imposibles o prohibitivas en función del costo. Los materiales constituyen un importante componente de la inversión inicial y su precio en obra es trascendente para la evaluación de los flujos financieros. En su estimación deben considerarse las maniobras de extracción, carga, traslado y descarga necesarias para transportarlos desde el sitio de empréstito al lugar de la obra. El manejo de materiales pesados y voluminosos, como las rocas de cantera, puede ser muy costoso. En algunos casos puede darse la posibilidad de transportar el material por vía acuática, medio que bajo ciertas condiciones puede costar menos que el transporte en camiones.

La disponibilidad de equipamiento durante la construcción es otro importante componente del costo y viabilidad. Por ejemplo, la carencia de grúas de alta capacidad puede limitar el uso de materiales o piezas pesadas. Análogamente, la carencia o el elevado costo de una planta de hormigón en gran escala puede ser el factor decisivo en la selección de bloques de hormigón prefabricado, bloques de hormigón contruidos in situ o roca de cantera.

En las obras marítimas se utilizan áridos para rellenos, material de cantera como las escolleras y el todo-uno, áridos, cementos y aguas para hormigones, aceros, geotextiles y, para obras menores,

maderas y gaviones. La vida útil de una obra depende, entre otros aspectos, de la resistencia de los materiales, de la periodicidad de los trabajos de conservación y de las fuerzas no previstas a que puede estar sujeta. Algunos materiales duran más que otros. Por ejemplo, la roca granítica, el hormigón de alta resistencia y el acero protegido contra la corrosión son usualmente duraderos. Por el contrario, la madera no tratada, la roca caliza, los gaviones y los sacos de arena (geobags) tienen una vida útil relativamente corta. Entre ambos extremos hay materiales que, debidamente elaborados y aplicados, pueden durar varias décadas. El hormigón en masa suele considerarse como uno de los materiales más duraderos para el ambiente marino, si se dosifica en forma adecuada y repara en caso de presentar fisuras. El hormigón armado, por su parte, puede durar bastante si se consideran revestimientos de más de 7 centímetros para que la armadura no se vea expuesta al agua salada (el revestimiento de la armadura en obras terrestres es bastante menor). La madera bien seleccionada y tratada, puede durar 40 ó 50 años. El acero, por su parte, tiene una vida útil de décadas si se reviste con pinturas epóxicas o si se protegen con ánodos de sacrificio o corrientes impresas. Con todo, es difícil prever cuánto va a durar una estructura pues, salvo pocas excepciones (Ilustración 102), no se cuenta con ensayos de duración de los materiales. La comparación con estructuras similares ya construidas en sitios de condiciones análogas puede dar una idea de la vida útil de una obra en sus fases iniciales. La Guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras (MOP, 2013) y la Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas (PPEE ,2008) contienen muy buena información constructiva de los diferentes tipos de materiales utilizados en obras marítimas.

Ilustración 102: Testigos de hormigón sometidos durante décadas a un ambiente salino en el Port and Airport Research Institute, PARI, en Japón.



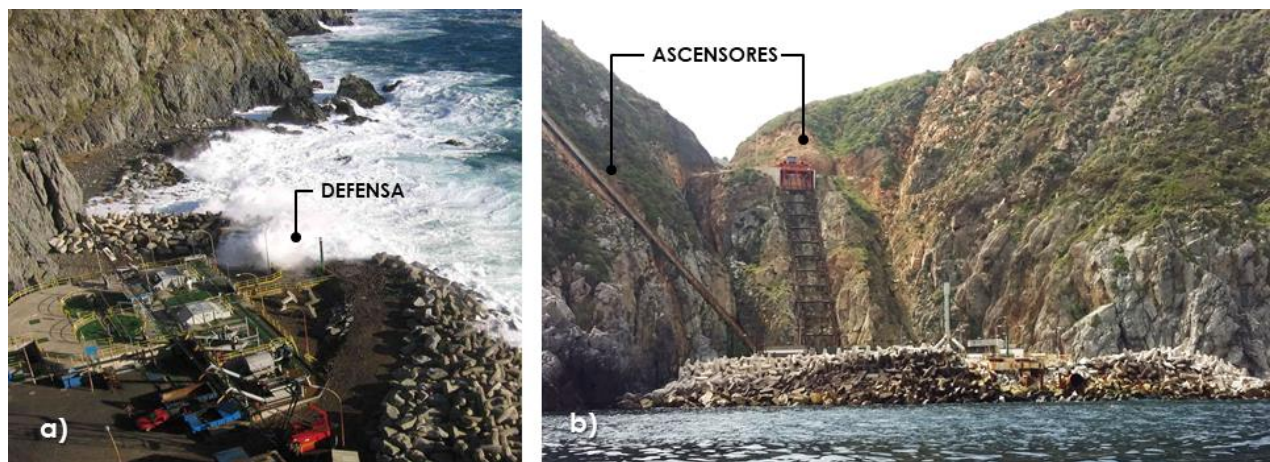
Fuente: Elaboración propia.

Las condiciones del terreno también determinan la clase de materiales, el tipo de estructura y los costos de construcción. Salvo excepciones, los suelos arenosos son adecuados para hincar pilotes o disponer escolleras, mientras que en los estratos rocosos se utilizan pilotes anclados que demandan mayor complejidad constructiva. Eventualmente, se deben excavar zanjas para el pie de las escolleras, las que sin dicho apoyo pueden ser desplazadas de su posición. Los terrenos fangosos que se encuentran en ambientes lacustres, meandros o desembocaduras bien

protegidas tienen baja capacidad de soporte y son, por tanto, poco idóneos para estructuras gravitacionales. En dicho caso habrá que incurrir en gastos adicionales para modificar el diseño de la estructura, mejorar las condiciones del suelo u optar por otra estructura más apropiada.

La amplitud de la marea, la distancia del agua, la altura del nivel freático y el régimen del oleaje afectan también la elección de la estructura y los costos de la construcción. La construcción en lugares con condiciones agresivas puede restringirse a épocas de calmas, lo que retrasa el avance de la obra. El procedimiento constructivo puede contemplar el avance en etapas, o por secciones pequeñas más o menos autónomas, de manera de evitar el riesgo de pérdida masiva de material.

Ilustración 103: Defensa costera del emisario de Loma Larga, en Valparaíso, el cual fue construido utilizando ascensores para bajar los materiales.



Fuente: Elaboración propia.

Por último, la facilidad de acceso del material y el equipo a un lugar puede determinar el tipo de estructura. Algunos materiales y equipos son más fáciles de manejar y transportar que otros. Si el lugar de una obra es la base de un acantilado sin acceso, ciertos materiales tendrán que ser transportados vía marítima o mediante obras especialmente acondicionadas para ello. Un ejemplo extremo fue la construcción de la defensa costera del emisario submarino de Loma Larga, en Valparaíso, que descarga las aguas servidas del Gran Valparaíso en el mar (Ilustración 103). Este tipo de soluciones aumenta apreciablemente el costo. El hormigón puede ser el material adecuado para construir un dique, pero si no se cuenta con acceso para los camiones mezcladores, denominados betoneras, se deberá optar por otro material.

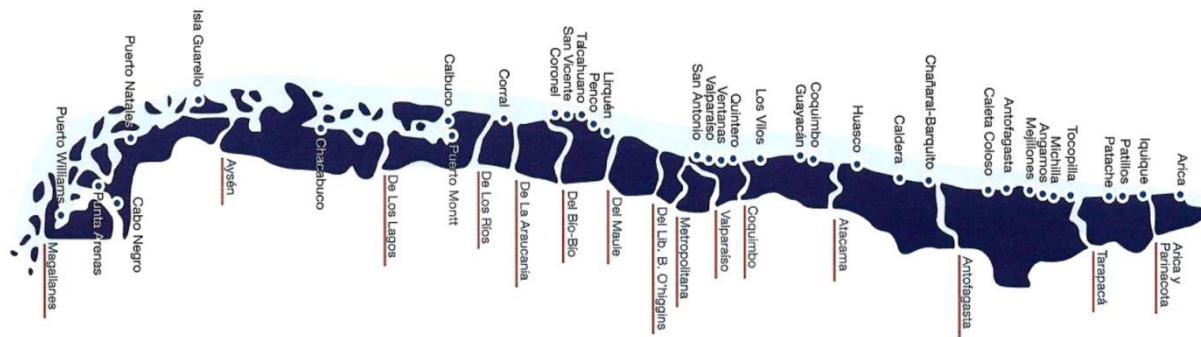


4.6 EL SISTEMA PORTUARIO CHILENO

El sistema portuario chileno cumple un rol estratégico para la integración comercial de Chile con el mundo pues transfiere aproximadamente el 90% del comercio internacional. Dicho sistema contempla nueve empresas portuarias autónomas cuyo rol consiste en crear condiciones favorables para el desarrollo del sector portuario al amparo de un sistema de concesiones establecido en la Ley 19.542 de Modernización del Sector Portuario Estatal, del 19 de diciembre de 1997. Las empresas portuarias se emplazan en Arica, Iquique, Antofagasta, Coquimbo,

Valparaíso, San Antonio, Talcahuano - San Vicente, Puerto Montt, Chacabuco y Punta Arenas. Existen además decenas de empresas concesionarias, puertos privados, instalaciones industriales y puertos pesqueros que conforman el sistema. “La importancia de los puertos estatales radica en que a través de ellos se transfiere la mayor cantidad de carga general y de contenedores, y en que su ubicación es relativamente mejor que la de los puertos privados” (SEP, 2006).

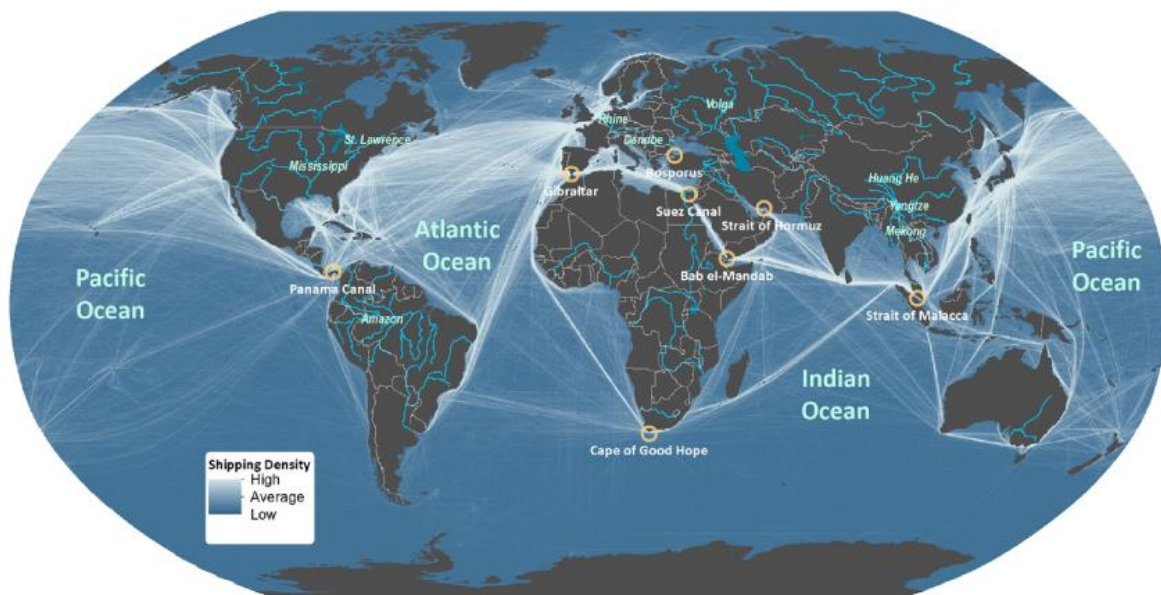
Ilustración 104: El sistema portuario de Chile en 2017.



Fuente: CAMPORT (2017).

Debido a su geomorfología marcada por la actividad tectónica, los puertos en Chile tienen características únicas y adversas pues en su mayoría –salvo aquellos ubicados en la zona de los fiordos y canales- se encuentran abiertos al Océano Pacífico. La distribución demográfica asimismo y la lejanía a las grandes rutas de navegación transoceánicas (**Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), hace que existan puertos relativamente menores a lo largo de toda la costa, comparados con los puertos del hemisferio norte.

Ilustración 105: Vías de navegación a nivel mundial.



Fuente: https://transportgeography.org/?page_id=8354

Muchos de los puertos Chilenos han requerido de la construcción de grandes obras de abrigo para permitir la operación de los buques, como son el caso de Arica, Iquique, Antofagasta

(Ilustración 106), Valparaíso (Ilustración 107) y San Antonio. Otros puertos se emplazan en las escasas bahías donde dicho abrigo se da en forma natural, como en Mejillones, Caldera, Huasco (Ilustración 108), Coquimbo, Guayacán, bahía de Concepción y el Golfo de Arauco. En general, los puertos estatales se ubican en emplazamientos geográficos ventajosos y cuentan con muelles marginales, mientras que los privados suelen tener sólo muelles de penetración (SEP, 2006).

Ilustración 106: Puerto de Antofagasta



Fuente: Gentileza de la Dirección de Obras Portuarias.

Ilustración 107: Puerto de Valparaíso.



Fuente: Archivos personales.

Ilustración 108: Puerto de la Central termoeléctrica Electroandina, en Huasco.



Fuente: Archivos personales.

5 EL CAMBIO CLIMATICO

El estudio del clima ha mostrado que la atmósfera cambia dramáticamente en cuestión de décadas, lo que parece haber ocurrido con la influencia del ser humano desde los inicios de la Revolución Industrial. El calentamiento del siglo XX no tiene precedentes en los últimos 1200 años y constituye una amenaza para las especies. En este capítulo revisamos las tendencias históricas y predicciones de variables oceanográficas que son alteradas por el cambio climático, esbozamos los posibles impactos en diversos sistemas costeros y algunas medidas de adaptación de cara al futuro.

Pero antes, un par de definiciones para partir con los conceptos claros. El **clima** es la descripción estadística del tiempo (*weather*) en términos de valores medios y variabilidad de las cantidades pertinentes como la temperatura, la precipitación, el viento y la presión atmosférica. Según la Organización Meteorológica Mundial, el período normal para la estimación del clima en una localidad es de 30 años, aun cuando se discute si en esa ventana es la adecuada. El **cambio climático**, por su parte, corresponde a cambio en el clima que se manifiesta como alteraciones en los valores medios o la variabilidad de sus propiedades, y que persiste por un tiempo de décadas o más. A diferencia de la climatología, la **meteorología** estudia el tiempo en escalas de tiempo de días. Ambas, no obstante, son ciencias que se nutren de las mismas variables atmosféricas. Para comenzar con el capítulo, en la próxima sección hacemos una descripción muy acotada de la composición de la atmósfera, que es donde el cambio climático se origina.

5.1 LA ATMOSFERA

La capa más externa del Planeta Tierra es la Atmósfera, que es la cubierta gaseosa que rodea al cuerpo sólido. Su grosor es de casi 1.000 kilómetros, aunque la mitad de su masa se concentra en los 10 kilómetros más cercanos a la superficie. Según sus características físico-químicas, la Atmósfera se divide en varias subcapas que describimos a continuación. La capa inferior, conocida como la **Tropósfera**³⁰, se extiende hasta unos 12 kilómetros de altitud y contiene el 80% de todos los gases de la atmósfera. Su tercio inferior es la parte más respirable de toda la atmósfera. Su porción más caliente está en la superficie terrestre, enfriándose aproximadamente a razón de 6.5°C por cada kilómetro en la vertical. Por sobre ella se ubica la **Estratósfera**, que presenta menos movimientos verticales y una temperatura relativamente constante. Más arriba se encuentra la **Mesósfera**, donde la temperatura decrece hasta unos -85°C, seguida de la **Termósfera**, con temperatura que se conservan, y finalmente la **Exósfera** la cual se extiende hasta unos 1.000-2.000 kilómetros de altitud. El límite superior de cada una de estas capas lleva un nombre que deriva de ellas, donde el sufijo “esfera”, está reemplazado por “pausa”³¹. Se tienen así la **Tropopausa**, cuya altura varía entre 6 y 17 kilómetros, la **Estratopausa**, que abarca entre 39 y 50 kilómetros y la **Mesopausa**, que varía entre 200 y 700 kilómetros. La Exosfera continúa por transiciones suaves al espacio.

Las grandes subdivisiones descritas en el párrafo anterior se agrupan a su vez en dos conjuntos: la **Homósfera**, por debajo de 90 kilómetros, y la **Heterósfera** por encima de ellos. La primera presenta, desde abajo hacia arriba, prácticamente la misma composición que el aire del suelo donde predomina el nitrógeno y el oxígeno. La presencia de este último es notable porque es apto para combinarse. Por encima de los 90 kilómetros la composición de la atmósfera se vuelve variable, de allí el nombre de Heterósfera.

³⁰ De la raíz griega “trop” (girar) y que significa la región donde el aire se mueve.

³¹ De una raíz griega que quiere decir: cesar.

La composición actual de la atmósfera es muy diferente de las nubes de gas y polvo primitivos a partir de las cuales se formó. La actual, refleja una larga y compleja historia que se inicia con las reacciones de elementos volátiles con el polvo existente en la primitiva nebulosa solar. Su evolución continúa con los gases que acompañan al magma que sale al exterior desde el manto terrestre, con las rocas presentes en la corteza terrestre y con la interacción con el océano y con la biosfera. La composición de la atmósfera y la distancia al Sol condiciona el balance de energía de la Tierra, que a su vez determina la temperatura de la superficie terrestre y la circulación atmosférica, cuya función es redistribuir la energía solar sobre la superficie terrestre.

En la actualidad, los componentes más importantes del aire seco son el nitrógeno (79%), el oxígeno (20%) y el argón (1%). Esta composición es notablemente constante en el globo terrestre. Los restantes componentes del aire están presentes en cantidades muy pequeñas. Destaca entre ellos el dióxido de carbono que representa unas 340 partes por millón (ppm), el neón con 18 ppm y el helio con 5 ppm. Con una cantidad promedio de 2 ppm está el ozono, cuya cantidad varía de 10 partes por mil millones en el suelo a un máximo de 12 ppm a 30 kilómetros. La concentración del ozono está determinada por el balance entre las reacciones que lo producen y las que lo destruyen. Éste es el único gas atmosférico que absorbe en el ultravioleta próximo a longitudes de onda de 0,2 a 0,3 micrómetro, característica que hace que cumpla un rol de extraordinaria importancia al proteger la superficie terrestre de los rayos ultravioletas del Sol, los cuales si llegaran al suelo, destruirían la vida. El transporte aéreo que se desplaza a gran altitud y ciertas actividades industriales arrojan compuestos que descomponen este ozono.



5.2 EL CAMBIO CLIMATICO

La atmósfera es un fluido donde ocurren los fenómenos tales como el viento, las tormentas, las nubes, la lluvia y la nieve. Estos fenómenos son resultado de complejas interacciones de diversa naturaleza, tanto en el tiempo como en el espacio, que van desde la inclinación del eje terrestre hasta el efecto de la topografía de una localidad. Estos fenómenos son generados por la continua radiación solar que alcanza el Planeta luego de recorrer 150 millones de kilómetros. La radiación (o energía) solar en el borde exterior de la atmósfera terrestre es de 1367 [w/m²] cuando la Tierra se encuentra a la distancia media del Sol en su órbita, aun cuando este valor varía durante en distintas escalas de tiempo³². Sin embargo, no toda la radiación que llega a la Tierra es absorbida. Un 30% es reflejada hacia el espacio por las nubes, el polvo atmosférico, la nieve y finos materiales piroclásticos. La radiación reflejada se denomina "albedo del planeta" y podría modificarse si se producen erupciones volcánicas que inyecten polvo en la atmósfera, se incrementan las deforestaciones o se derriten los casquetes polares. Un aumento o una disminución en el albedo pueden conducir a un enfriamiento o a un calentamiento neto de la Tierra.

La Tierra se desprende de la radiación solar que absorbe emitiendo radiación infrarroja o térmica. La mayor parte de esta radiación es absorbida por el vapor de agua, las nubes, el dióxido de carbono, el polvo y el ozono. Un porcentaje la absorbe la superficie, otra parte es reabsorbida por la atmósfera y el resto escapa al espacio. El incremento del dióxido de carbono (CO₂), que

³² Así por ejemplo, cuando en la superficie del Sol aparecen grandes manchas solares se produce un descenso de 0,1% en la radiación. Se ha determinado también que una aumento de 1% en la radiación respecto del valor medio durante 10 años, elevaría la temperatura media en la superficie terrestre en 2°C.

es transparente a la luz visible pero es extraordinariamente eficiente para absorber de la radiación infrarroja de onda larga emitida por la Tierra, explica el aumento de la temperatura media mundial. Este fenómeno se denomina **efecto de Invernadero**.

El clima actual (y desde siempre) es en definitiva la respuesta que genera el complejo sistema Tierra-Océano-Atmósfera al ser estimulado por la radiación solar incidente. En otras palabras, es el resultado del balance energético entre la radiación solar absorbida por el sistema y la manera mediante la cual dicha energía se reparte entre los continentes, los océanos y la atmósfera. Para definir el clima de un determinado lugar es necesario tener presente, además de los promedios de las variables durante un periodo relativamente largo, sus valores extremos, sus desviaciones típicas y otras consideraciones estadísticas.

Se sabe que la cantidad de CO₂ inyectada a la atmósfera y al océano ha aumentado desde la revolución industrial como resultado de la combustión de carbón, del uso del petróleo y de la deforestación, dado que estos conducen a la oxidación del carbono y al desprendimiento de CO₂. Investigaciones especializadas han estimado que la cantidad de CO₂ en el periodo preindustrial habría sido del orden de 250 y 300 ppm y que en la actualidad sería 400 ppm.

En la actualidad, la temperatura media global de la Tierra es del orden de 15°C, oscilando entre 50°C en las zonas tropicales y -60°C en los polos. La temperatura es función de la latitud, la altitud, el relieve, las masas de agua, la distancia al mar y la dirección de los vientos planetarios y estacionales, entre otros factores. La temperatura media actual es la necesaria para mantener la superficie terrestre y la atmósfera en equilibrio térmico. Sin embargo, eventuales desequilibrios locales entre la energía absorbida y liberada por la superficie terrestre, o las posibles variaciones regionales de la temperatura, precipitación y humedad del suelo, determinarán el eventual impacto del cambio climático sobre los ecosistemas, la agricultura y los recursos hídricos.

Ilustración 109; Ventisquero O'higgins. La fotografía fue tomada durante una expedición de los autores cuyo objetivo fue evaluar el riesgo de derretimiento ante una erupción del Volcán Lautaro. Este tipo de glaciares está experimentando un retroceso rápido producto del cambio climático.



Fuente: Archivos personales.

Existen numerosas evidencias que demuestran que el clima terrestre ha evolucionado, tanto a lo largo de milenios como por las denominadas variaciones naturales del clima. Una de las más emblemáticas fue generada durante los **periodos glaciares** del Cuaternario, donde gigantescos volúmenes de agua formaron casquetes polares, haciendo retroceder el nivel del mar. Estos periodos glaciares fueron intercalados por los **periodos interglaciares**, que hicieron aumentar dicho nivel. En conjunto, estos ciclos temporales de aproximadamente 100.000 años generaron oscilaciones verticales de más de 100 kilómetros en el nivel medio del mar. Existen también variaciones en escalas de tiempo bastante menores como las sequías o las inundaciones, que

son bastante frecuentes a escala mundial, y cuya incidencia varía considerablemente de un año a otro.

Otra variación puntual del clima se debe a las **erupciones volcánicas**. Es conocido el hecho que las nubes volcánicas de la estratósfera pueden afectar el clima mundial, provocando un descenso de la temperatura media global o hemisférica. En un principio se pensaba que el volumen de cenizas expulsadas en una erupción explosiva era una buena medida de la densidad de la nube producida, y por tanto, de su efecto sobre el clima. Sin embargo, en los últimos años ha quedado claro que la mayor parte del polvo se deposita en pocos meses, fuera de la estratosfera, y que las nubes volcánicas de larga vida están constituidas por un aerosol de ácido sulfúrico. Por consiguiente, la cantidad de gases ricos en azufre es un buen indicador de sus efectos atmosféricos de una erupción volcánica.

Finalmente, una de las variaciones climáticas más estudiada en estos últimos años es el fenómeno de **El Niño**, que consiste en un calentamiento anómalo del agua superficial en el Pacífico Ecuatorial. Este fenómeno se produce a intervalos irregulares, en conjunción con la Oscilación Meridional, fluctuación de gran amplitud de la presión atmosférica entre el Pacífico tropical sudoriental y el occidental. Debemos enfatizar que el fenómeno del Niño corresponde a variabilidad climática, cuya relación con el cambio climático no ha sido establecida en forma consciente a nivel científico. Indicios recientes, no obstante, indican que durante los años Niño, el nivel medio del mar mensual en Chile central puede elevarse en hasta 40 [cm] y la frecuencia e intensidad de los temporales pueden también incrementarse (Martínez et al., 2015). En la siguiente sección analizamos la tendencia histórica y predicciones a futuro de éstas y otras variables, en el contexto del cambio climático.

5.3 TENDENCIAS Y PROYECCIONES

El continuo intercambio entre los sistemas atmosféricos y oceánicos es determinante en el comportamiento del clima y su variabilidad. Algunas de las interacciones entre estos sistemas son simples y algunas más complejas y/o sinérgicas. En un escenario de aumento sostenido de la temperatura en la atmósfera a escala global, en los océanos debieran esperarse los siguientes efectos:

- Aumento en la temperatura de las aguas más superficiales
- Mayor estratificación de las masas de agua
- Disminución del O₂ disuelto en el agua (su solubilidad aumenta con la temperatura)
- Reducción del traspaso de O₂ de aguas superficiales a aguas profundas (y viceversa)
- Aumento del nivel medio del mar
- Cambio en la frecuencia e intensidad de los temporales y marejadas.

Así, el cambio climático tendrá consecuencias tanto para los océanos, la atmósfera, el clima y la vida en el planeta. Estos efectos a nivel medio mundial, sin embargo, no contemplan las condiciones locales tan particulares de nuestro territorio. Por ejemplo, en Chile no hay una clara tendencia al aumento del nivel medio del mar y la temperatura superficial del mar ha marcado un descenso debido al aumento de la surgencia costera durante las últimas décadas. Ello nos obliga a analizar con detalle los efectos del cambio climático en nuestro país.

Ilustración 110: Embarcación de apoyo a las operaciones acuícolas, en la zona de los fiordos. En la popa se observan redes que se utilizan en los módulos de engorda de salmones.



Fuente: Archivos personales.

5.3.1 TEMPERATURA SUPERFICIAL DEL MAR

Las masas de aguas oceánicas permiten el almacenamiento de enormes cantidades de energía en forma de calor, superando en más de 1000 veces a la capacidad de almacenamiento de la atmósfera para un nivel equivalente de temperatura. En los últimos 150 años, numerosos trabajos científicos han evidenciado un aumento drástico en la temperatura del mar en todas sus capas, producto en parte del calentamiento global de origen antrópico. De hecho el IPCC³³ (2014) indica, con un 66-100% de certeza, que ha habido un aumento de la temperatura de los 700 kilómetros superiores del océano entre 1870 y 1971, certeza que aumenta a 99-100% entre 1971 y 2010. El mayor calentamiento, del orden de 0.11°C por década, ocurrió en los primeros 75 kilómetros desde la superficie. Existe asimismo un 66-100% de certeza de que las aguas oceánicas aumentaron su temperatura bajo los 3000 kilómetros de profundidad entre 1992 y 2010. Existe finalmente un 66-100% de certeza de que la estratificación térmica de los primeros 200 kilómetros se incrementó en un 4% y que ha disminuido la concentración de oxígeno, debido a la disminución de aportes de O₂ desde aguas superficiales. Esta evidencia indica que a escala

³³ *International Panel of Climate Change (IPCC)*, conocido en el mundo hispano como Panel Internacional del Cambio Climático.

mundial, las aguas oceánicas se están calentando, la estratificación fortaleciéndose y los procesos de mezcla vertical haciéndose menos eficientes.

En Chile, el SHOA mantiene registros de la temperatura superficial del mar (TSM) en varios puertos del país, cinco de los cuales abarcan desde mediados del siglo XX. Hasta 1999 estos registros se anotaban manualmente 3 veces al día (mañana, medio día y tarde), promediando los resultados para obtener una estimación de la temperatura media diaria. En los últimos años se reemplazó la medición manual por sensores digitales que registran cada hora. Las mediciones de TSM para Chile norte y central (17°- 37°S) muestran un fuerte enfriamiento de aproximadamente 0,20°C por década costa afuera, que es consistente con la tendencia negativa de la Oscilación Decadal del Pacífico (PDO) y con modelos de reconstrucción de dicha variable.

Información científica reciente (Schmidko et al., 2017) concluye que en los últimos 50 años se ha registrado globalmente una reducción del 2% en la concentración de O₂, donde el Pacífico Norte y Tropical dan cuenta del 40% y el Pacífico Sur del 7.4%. La causa sería mayoritariamente el aumento de la temperatura del agua, que aumenta la solubilidad del O₂ y reduce la ventilación oceánica. El O₂ juega un rol esencial en la vida y la reducción de su concentración en aguas oceánicas puede tener impactos profundos tanto sobre el plancton, los recursos de fondo o las pesquerías. Del mismo modo se observan ampliaciones de las llamadas Zonas de Mínimo de Oxígeno que existen en el Pacífico Sur Oriental frente a Perú y Chile (Keeling et al., 2010; Mayol et al, 2012).

5.3.2 ACIDIFICACIÓN

Al igual que con el O₂, el CO₂ oceánico está relacionado con los procesos de oxigenación, respiración y productividad. El IPCC estima que entre 1750 y 2011, las emisiones de CO₂ de origen antropogénico a la atmósfera se incrementaron en aproximadamente un 40%, gran parte del cual se produjo en los pasados 50 años. Un 40% de estas emisiones permanece en la atmósfera, un 30% ha sido almacenado en los vegetales y suelos y un 30% ha sido absorbido por el océano. Se estima que la absorción en el océano fue de 1.0-3.2 [Pg C/año] entre 1994 y 2010. Ello ha llevado a una gradual acidificación de las aguas oceánicas abiertas (de pH básico en torno a 8), las que ya se han acidificado en aproximadamente 0.1.

La acidificación de aguas costeras en Chile ha sido poco estudiada. El trabajo de Vargas et al. (2017) para aguas costeras en los 10 kilómetros superiores muestra presiones parciales de CO₂ que son 3-4 veces mayores que las de aguas oceánicas abiertas³⁴, como consecuencia de factores locales como desembocaduras de ríos, las zonas de surgencias marinas y la alta productividad primaria. El trabajo concluye que la adaptación de las especies marinas a una mayor acidificación oceánica puede ya estar en curso. Finalmente, cabe enfatizar que se han alterado los balances geoquímicos en los océanos, con efectos en el pH, en el ciclo del carbonato y, por ende, en las especies marinas.

5.3.3 NIVEL MEDIO DEL MAR

La evidencia científica indica que, a escala global, existe un alza del nivel medio del mar (NMM) asociada al calentamiento de la atmósfera producto de la emisión indiscriminada de gases de

³⁴ Las aguas costeras superficiales presentan presiones parciales de 1600-1800 [micro-atmósferas] y las abiertas 400-450 [micro-atmósferas].

invernadero. Esta realidad llevó a que organizaciones intergubernamentales como la OMM³⁵ y el PNUMA³⁶ conformaran el IPCC en el año 1988, el cual es en la actualidad el referente para estas materias. El quinto informe del IPCC (2013) asegura que el NMM se ha elevado entre 10 y 25 [cm] durante los últimos 120 años, y que existe evidencia abundante para establecer una conexión entre dicho aumento y la influencia del hombre.

El NMM experimenta cambios debido a la fluctuación del volumen total de los océanos, que a su vez se explica por las variaciones en la temperatura del planeta. El factor más importante que explica su aumento es la expansión térmica del mar, responsable del 80% de la variación observada en los últimos 110 años. Otros aportes son el cambio en la masa de los glaciares continentales, cuya contribución asciende al 15%, y fenómenos indirectos como las variaciones en la distribución media de los campos de presión atmosférica, vientos y corrientes superficiales. Adicionalmente, el NMM experimenta fluctuaciones cíclicas irregulares, siendo el fenómeno El Niño el principal responsable. De acuerdo con el IPCC (2014), el NMM promedio mundial se elevó 0.19 ± 0.02 kilómetros entre 1901 y 2010, y se espera que aumente entre 0,26 y 0,82 kilómetros entre 2081 y 2100.

En base a mediciones y modelos, el IPCC predice un aumento global del NMM cercano a los 50 [cm] para el año 2100, con márgenes de incertidumbre de entre 30 y 85 [cm]. El panel señala que estos cambios no se producirán uniformemente alrededor del planeta y repercutirán más bien a escala regional. Esta situación es delicada ya que la elevación del NMM producirá un incremento en la erosión costera y en la inundación de grandes extensiones de territorio que albergan parte considerable de la población mundial. Dicha elevación también generará pérdida física del territorio, incidiendo negativamente en numerosas actividades económicas vitales de los estados ribereños.

A escala mundial, el aumento del NMM afectará a regiones bajas en Bangladesh, Florida, los Países Bajos, el Mar del Plata, el delta del Río Nilo y algunos Estados-islas como las Maldivas en el Índico, o los archipiélagos de Kiribati o Tuvalu en el Pacífico, donde incluso ha comenzado la migración hacia otros países. La estabilidad de dichos territorios dependerá, por una parte, de las características físicas de cada una de esas costas, y por otra, de la capacidad de los Estados para generar medidas de adaptación. El destino de países pobres, penosamente, será muy distinto al de los países desarrollados.

En América del Sur, los cambios del NMM afectarán en forma distinta a las costas acantiladas que caracterizan a la fachada occidental del continente, de las costas bajas y arenosas que predominan en su vertiente Atlántica (Ilustración 111). En estas últimas los procesos naturales podrían causar 1 kilómetro de erosión por cada centímetro de alza del NMM. En los grandes estuarios, por su parte, la cuña salina podría avanzar al interior del territorio 1 kilómetro por cada 10 [cm] de subida del NMM.

Como contrapartida, en el litoral del Pacífico Sur Oriental que incluye Colombia, Ecuador, Perú y Chile, los procesos tectónicos generan cambios mucho más importantes y rápidos sobre el NMM que los asociados al cambio climático. Los movimientos cosísmicos que ocurren durante un terremoto pueden traducirse en sollevamientos o subsidencia costera del orden de metros. Por ejemplo, para el terremoto de Marzo de 1985 se generaron sollevamientos de hasta 60 [cm] entre San Antonio y Valparaíso (Castilla, 1988) y para el del 27 de Febrero 2010 se generaron sollevamientos del orden de 2.5 metros en la Isla Santa María y subsidencias de hasta 1 metro al norte de Concepción (Vargas et al., 2011). Estos valores son bastante mayores que el

³⁵ Organización Meteorológica Mundial

³⁶ Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente

incremento medio de 0.19 ± 0.02 kilómetros que experimentó el NMM a nivel global entre 1901 y 2010.

Uno de los escenarios conservadores de cambio climático para el año 2100 predice aumentos del nivel medio del mar de entre 0.2 y 0.3 kilómetros para distintas latitudes a lo largo del país. En base a modelos numéricos, Albrecht y Shaffer (2016) proyectaron aumentos del nivel medio en la costa de Chile de entre 0.34 y 0.74 kilómetros para diferentes escenarios a fines del siglo XXI. Si bien estos valores son menores que los esperables para los grandes terremotos, contribuirán de todos modos a los cambios en la dinámica costera. El hecho de estar en un país sísmico nos obliga, no obstante, a mirar en forma simultánea las contribuciones de la tectónica y del cambio climático para la proyección del NMM.

Ilustración 111: Mosaico fotografico de América del sur, donde resaltan las grandes cuencas del Río Amazonas y Río de la Plata por el lado Atlántico. Se observa también la cordillera de los Andes, que cruza Chile, Perú, Ecuador y Colombia por el lado Pacífico.



Fuente: South_America_satellite_orthographic.jpg

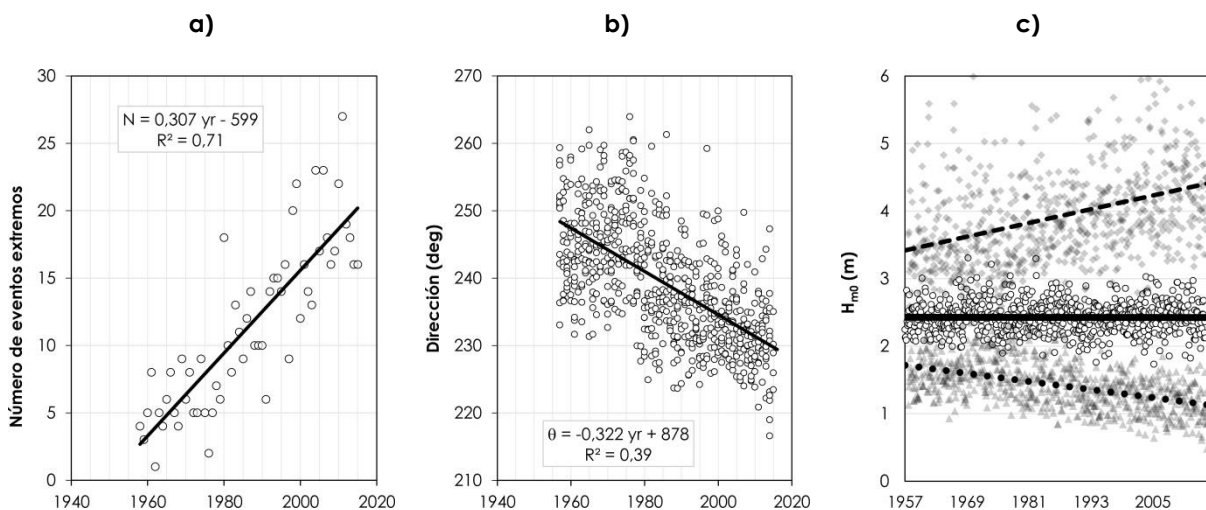
5.3.4 OLEAJE

En Chile no existe una red permanente de medida del oleaje en aguas profundas y solo se cuenta con registros cortos en pocas localidades. Para paliar esta tremenda deficiencia, recientemente se publicó el *Atlas de Oleaje para Chile* (Beyá et al., 2016), que ofrece acceso libre y gratuito a 35 años de estadísticas de oleaje frente a las costas, reconstruidas mediante modelos numéricos calibrados con altimetría satelital y boyas ocasionales. Esta estadística aún no ha sido analizada en detalle en el contexto de cambio climático.

A partir del análisis de 20 años de datos en Chile central, Molina et al. (2011) evidenciaron aumentos de 10 [cm] en la altura significativa y un giro de 12° en la dirección del oleaje hacia al sur y cambios menores en el período; variaciones que también se ven alteradas por el fenómeno El Niño. Estas estadísticas, no obstante, son cortas como para evaluar tendencias y variabilidad en el largo plazo. Martínez et al. (2017) detectaron un aumento desde 5 eventos anuales a mediados del siglo XX a más de 20 a comienzos del siglo XXI frente a Valparaíso (Ilustración 112), el que podría deberse a un incremento en la frecuencia y/o intensidad de los temporales en el tiempo (incremento de la amenaza), un aumento de la infraestructura costera existente (incremento de la vulnerabilidad) o una combinación de ambos.

Existen escasas proyecciones del clima de oleaje a futuro en Chile. En lo relativo al clima medio, CEPAL (2011) encuentra tendencias de aumento en la altura significativa media mensual al año 2070 de entre 0.3 kilómetros en la zona norte y 0.6 kilómetros para el extremo sur del país. Algunos investigadores como Church et al. (2013), prevén aumentos del orden del 5% en la altura significativa media para la mayoría del territorio excepto para las regiones IX y X, donde se prevé una disminución superior al 5%.

Ilustración 112: Evolución temporal de estadísticas de oleaje entre 1958 y 2015 en aguas profundas frente a Valparaíso (adaptado de Martínez et al., 2017). a) Número de eventos extremos anuales de oleaje. b) Dirección media mensual. c) Altura significativa promedio (círculos en contorno negro), máxima (diamantes grises) y mínima mensuales (triángulos), con sus respectivas rectas de ajuste.



Fuente: Elaboración propia

Cofré y Beyá (2016) cuantificaron el clima extremo de oleaje futuro en Chile, el cual permite definir la altura significativa de período de retorno de 50 años, comúnmente utilizada para diseño de obras marítimas (DOP, 2013). La comparación del período histórico (1980-2005) con ventanas futuras (2026-2045 y 2081-2100) indica que la tendencia general es al aumento de la altura extrema a mediados de siglo y a una estabilización a fines de siglo. Este resultado podría ser benévolo, pero requiere de estudios complementarios que cuantifiquen la incertidumbre.

5.4 IMPACTOS EN EL BORDE COSTERO DE CHILE

En la zona costera de Chile se esperan impactos asociados al cambio climático, entre los cuales se podrían indicar eventuales inundaciones de ciudades ribereñas, desaparición de humedales, erosión costera, efectos en la dinámica de las dunas, playas, acantilados y estuarios, intrusión salina en acuíferos y subida del nivel de la capa freática, efectos sobre el desempeño operacional y estructural de obras portuarias. El cambio climático afectará asimismo a los ecosistemas, el paisaje, la agricultura, los recursos hídricos y la acuicultura, entre otros.

Estos impactos se deben, en forma directa, a las variaciones del NMM, cambios en la frecuencia e intensidad de las tormentas, alteraciones en el régimen de precipitaciones y cambios en las corrientes oceánicas, entre otros. Como la cantidad de sectores que eventualmente pueden ser afectados son numerosos, se han seleccionado cuatro sistemas costeros por estimar su relevancia. Estos sistemas son las playas, los humedales, las ciudades y los puertos.

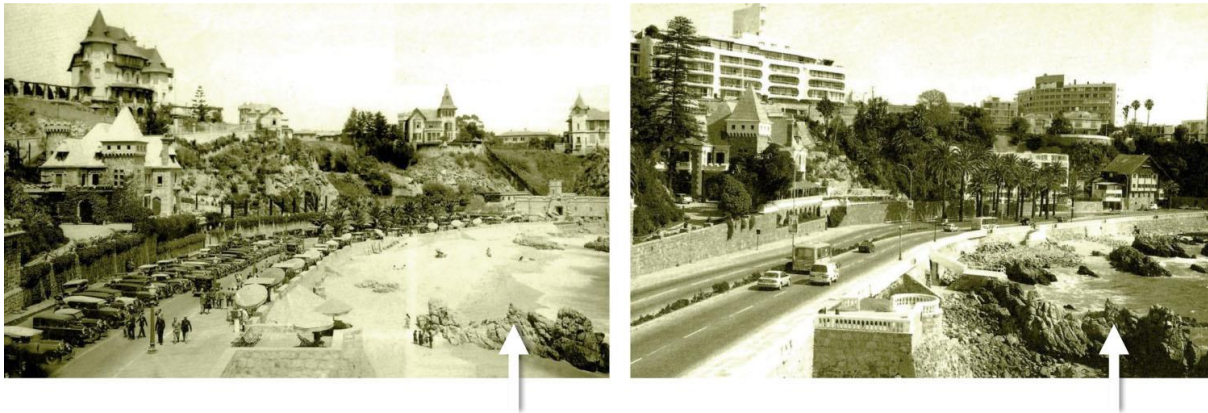
5.4.1 PLAYAS

Las playas juegan un rol clave en la defensa natural de las costas, dando soporte al turismo y esparcimiento de las comunidades. Por estar constituidas por arena, tienen la capacidad de adaptar su forma a las condiciones medias del verano, caracterizadas por un oleaje de baja energía, y a las marejadas. En palabras simples, las playas son el mecanismo más eficiente de protección costera ante los eventuales cambios en los patrones de oleaje y nivel del mar.

El cambio climático puede suponer una variación en la cota de inundación en una playa y un retroceso o avance de la línea de costa. A nivel mundial, Bird (2011) indica que cerca del 70% de las playas retrocedieron por efecto de la erosión entre 1976 y 1984. El retroceso se atribuye a factores climáticos como el cambio en los patrones de oleaje y NMM, y a factores antropogénicos como la reducción en el aporte sedimentario de las cuencas por efecto de la explotación de arenas y la urbanización, o los efectos de obras de infraestructura costera.

Como orden de magnitud y mediante la regla de Bruun, se puede estimar un retroceso de 1 kilómetros en la línea de costa por cada centímetro de ascenso del NMM para playas típicas de pendiente en torno a 0,01. Esta regla, no obstante, puede ser excesivamente simplificada para casos particulares, de acuerdo a Cooper & Pilkey (2004). Otro parámetro que puede contribuir a un retroceso adicional de las playas es la variación en la dirección del flujo medio de energía. Dicho retroceso es altamente dependiente del tipo de playa y de la propagación que el oleaje sufra desde aguas profundas.

Ilustración 113: Playa Miramar, Viña del Mar, a comienzos del siglo XX (izquierda) y en 2012 (derecha). En ambas fotos se muestra una roca para mostrar cómo la playa, que fue uno de los balnearios más populares del país, es hoy un roquerío sin sedimentos finos.



Fuente: La Segunda (N.D.). Suplemento "De la Caleta al Balneario". Serie "Chile, con 70 años de distancia".

En Chile, no obstante, sabemos poco sobre la erosión costera. En Valparaíso, por ejemplo, se sabe de la desaparición de las playas urbanas de Miramar (Ilustración 113) y Recreo (Ilustración 114) por efecto de la construcción de los caminos costeros, pero no existe evidencia alguna (ni esfuerzos por generarla) de que esta pérdida de playas se deba al cambio climático. Los escasos estudios sobre morfodinámica de playas aumentaron considerablemente luego del terremoto y tsunami del 2010, incorporando técnicas de modelación, monitoreo mediante sistemas de video y registros de campo (Martínez et al., 2011; Martínez et al., 2015; Villagrán et al., 2011; Cienfuegos et al., 2014). Por otra parte, las escasas campañas de monitoreo de playas se han hecho más sistemáticas luego del temporal del 8 de agosto de 2015 (Molina et al., 2015; Agredano et al., 2015), que causó pérdidas cuantiosas de arenas en las playas de Quintero y Valparaíso (Winckler et al., 2017). Si bien la erosión costera no es directamente atribuible al cambio climático, las medidas de adaptación deben considerar la planificación costera de infraestructura como complemento fundamental a la comprensión física del medio.

Ilustración 114: Balneario de Recreo, Viña del Mar, en la década de los 50's (izquierda) y en 2009.



Fuente: Vendedor de fotos en Avenida Valparaíso (arriba) y archivos propios (abajo).

En las últimas décadas se han evidenciado cambios sustantivos en los principios de diseño de infraestructura costera, lo que da una luz de esperanza en lo referido al manejo de la zona costera. En los años 60 se pensaba que la “rigidización” de playas mediante espigones o diques exentos era la solución a los problemas de erosión costera. Estas soluciones, no obstante, generaron impactos como la acreción y/o erosión de playas, además de la socavación y fallo de obras costeras³⁷. Hay casos donde estos efectos se han combatido mediante sistemas de bypass de arena, pero estas soluciones son caras y de difícil mantenimiento para la realidad nacional. En Chile, la rigidización se ha utilizado en caminos costeros, vías férreas, paseos y en alrededor de una decena de playas artificiales construidas en Arica, Tocopilla y Antofagasta. Desgraciadamente, el conocimiento local del impacto de este tipo de soluciones en la dinámica costeras es aún incipiente.

³⁷ El documental *Rivers of sand*⁽³⁷⁾ (1965) explica de forma muy clara estos procesos.

A fines del siglo pasado se introdujo la “alimentación artificial” de arenas como una opción ambientalmente amistosa a la rigidización de la cual prácticamente no tenemos experiencia local. La evidencia científica (Speybroeck et al., 2006), sin embargo, indica que el trasvase de grandes volúmenes de arena de un sitio de empréstito al de la obra puede generar impactos relevantes en la huella de carbono y en los sistemas ecosistémicos si no se efectúa respetando los ciclos naturales.

El paradigma actual se basa en el uso de “infraestructura verde” que responda a las demandas económicas, garantizando el bienestar humano y el funcionamiento del ecosistema (Andersson et al., 2014). Silva et al. (2017) presenta siete ejemplos de soluciones para reducir el riesgo de inundación y la erosión costera en la costa de América Latina, agrupada según su grado de intervención humana (van der Nat et al., 2016). Algunos ejemplos de este tipo de soluciones son la restauración de humedales, la rehabilitación y reconstrucción de dunas y playas, el uso de arrecifes artificiales de coral o el uso de cinturones verdes para la protección contra la inundación. Otros ejemplos de medidas de infraestructura que contemplan el principio de adaptación se presentan en SFFCC (2015).

En la actualidad existen estrategias encaminadas a adaptarse al eventual retroceso de la costa (*shoreline retreat management*), que se basan en determinar la posición histórica y futura de la línea de costa mediante levantamientos de terreno, fotografías aéreas, modelos numéricos u otras técnicas. El manejo del retroceso de la línea de costa para combatir la erosión de playas puede ser una alternativa de menor impacto a la rigidización o la alimentación artificial (McLachlan et al., 2013). En Chile, desafortunadamente, existe poca sensibilidad frente a este tipo de soluciones, lo que se evidencia en el excesivo desarrollo inmobiliario de zonas altamente vulnerables en ciudades como Arica, Iquique, Antofagasta, La Serena, Coquimbo, Concón y Talcahuano, cuyo denominador común es contar con terrenos bajos altamente vulnerables a las variaciones del nivel del mar, las marejadas y los tsunamis.

5.4.2 HUMEDALES COSTEROS

Los humedales son “extensiones de marismas, pantanos, turberas o superficies cubiertas de agua, sean estas de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, estancadas o corrientes, dulces, salobres o saladas, incluidas las extensiones de agua marina cuya profundidad de marea baja no exceda seis metros” (RAMSAR, 1971). Los humedales costeros, por su parte, representan ambientes sensibles a las características de las masas de agua que entran y salen de ellos (Niering, 1985). Estos cuerpos de agua ofrecen una serie de servicios ecosistémicos como los de “retención y remoción de nutrientes, estabilización de la línea de costa, secuestro de carbono, contención de sedimentos, provisión y mejoramiento de la calidad del agua y aminoramiento del efecto de las tormentas, inundaciones y otros desastres naturales; esto último por el rol que cumplen en atenuar la intensidad y altura del oleaje” (Marquet et al., 2012).

En el tramo de Chile centro-sur comprendido entre los 30°S y 41°4'S, hacia 2012 existían a la fecha 412 humedales costeros con un total de 38.167 há, que en conjunto conforman un complejo corredor ecológico fragmentado (Marquet et al., 2012). Estos humedales son ambientes extremadamente dinámicos y frágiles, y su existencia se encuentra condicionada por una gran variedad de factores naturales y antrópicos, entre los que se cuentan la variabilidad hidrológica y climática, el alto contenido energético litoral, la variabilidad en la disposición de sedimentos y los procesos tectónicos de la costa chilena. Esta combinación tan particular de factores solo tiene referentes similares en algunos sectores de Sudáfrica, Australia (Cienfuegos et al. 2012) y Nueva Zelanda (Nichol et al., 2007). Fariña y Camaño (2012) efectúan una buena recopilación de trabajos científicos orientados a dar una gestión sustentable a los humedales costeros de Chile.

Ilustración 115: Humedal de El Yali, al sur de San Antonio.



Fuente: Gentileza de Manuel Contreras-López.

Así por ejemplo en la laguna costera El Yali (Ilustración 115), al sur de Santo Domingo, se han experimentado drásticos cambios morfológicos durante los últimos, producto de los efectos del terremoto y tsunami del año 2010 en combinación con una prolongada sequía. En este sentido, Fariña et al. (2012) sugieren que el cambio en el régimen de precipitaciones puede alterar la dinámica del humedal, facilitando las conexiones con el mar cuando existe aporte de precipitaciones y disminuyendo su espejo de agua en períodos de sequía. Contreras et al. (2017b), por su parte, mostraron cómo 57 humedales costeros ubicados entre la región de Valparaíso y Coquimbo redujeron en un 40% sus espejos de agua durante la prolongada sequía desde el año 2007 a 2016.

En resumen, desde la perspectiva del manejo costero y en un contexto de cambio climático, los humedales juegan un rol fundamental que debe preservarse mediante estrategias sustentables y armónicas con los usos actuales y futuros del territorio costero. En esta línea, Losada (2008) propone medidas como

- Favorecer la migración hacia el interior de marismas y humedales,
- Evitar la construcción de infraestructura (paseos, caminos y edificaciones) en zonas altamente vulnerables,
- Relocalizar en espacios no inundables y/o abandonar instalaciones e infraestructura existente a una distancia apropiada de la zona costera. Este tipo de medidas se ha implementado en lugares como España al amparo de la Ley General de Costas.
- Introducir estudios de vulnerabilidad frente al efecto del cambio climático en la planificación territorial de zonas parcialmente recuperables.
- Promover la compra de terrenos con fines de conservación.
- Proteger los ecosistemas en peligro.

5.4.3 PUERTOS

En los próximos años el sector portuario deberá hacer inversiones para adaptarse a los profundos cambios en la tecnología de la industria naviera (e.g. el tamaño de los buques y la forma de transferencia de la carga), a los nuevos estándares en la relación con la comunidad y al cambio climático. De acuerdo al Marco estratégico para la adaptación de la infraestructura al cambio climático (CGG, 2013), los puertos presentan una serie de particularidades que los hacen especialmente sensibles pues:

- "Su vida útil es larga, superando en muchas ocasiones los 50 años, siendo entonces particularmente sensibles frente a los cambios futuros del clima.
- Por su localización en las costas, ríos o lagos, están expuestos a una gran variedad de acciones, tales como el ascenso del nivel del mar, las variaciones en marea meteorológica, tsunamis, oleaje y vientos extremos, inundaciones fluviales, embancamiento o socavación, incluso levantamientos o hundimientos (subsidiencias) de origen tectónico.
- Las operaciones portuarias pueden verse afectadas por las condiciones climáticas, produciendo retrasos en la actividad comercial del puerto.
- Los puertos son vulnerables a cambios económicos en el mercado global, derivados del cambio climático.
- Las mercancías y su demanda/oferta pueden ser sensibles a cambios en las condiciones climáticas (por ejemplo, combustible o productos de agricultura).
- El movimiento de mercancías hacia los centros de distribución en tierra depende de infraestructuras de transporte, generalmente gestionadas por entidades externas al puerto, y que, a su vez, pueden verse afectadas de diversas maneras por el cambio climático.
- Como otras instalaciones industriales, son vulnerables a afectaciones sobre servicios como el agua o la electricidad".

La Tabla 5 resume los impactos generados por los variables climáticas (denominadas drivers en la literatura especializada) que afectan a la navegación y a la actividad portuaria. Uno de los aspectos relevantes dice relación con el impacto de la climatología en las operaciones portuarias en Chile. Durante los episodios de mal tiempo, los puertos se cierran para garantizar la seguridad de las naves, carga y operadores. Estos cierres se traducen en pérdidas económicas del orden de millones de dólares para los concesionarios portuarios, y a fin de cuentas, para el erario público. A pesar de que las estadísticas de cierres de puerto son escasas en Chile –existen estadísticas a partir de 2005– en la última década se observa un incremento notorio en los principales puertos del centro y del norte. Por ejemplo, de acuerdo a estadísticas proporcionadas por la Empresa Portuaria de Antofagasta, dicho puerto permaneció cerrado el equivalente a dos meses en 2015 debido a acciones climáticas. Aun cuando dicha estadística es muy corta como para atribuir este comportamiento al cambio climático, el hecho de que haya un incremento en el número de eventos extremos de oleaje en los últimos 50 años (Martínez et al., 2018) obliga a idear medidas de adaptación para reducir los cierres de puerto. Entre estas medidas se pueden mencionar el uso de sistemas de predicción de oleaje para cada sitio de atraque o el uso de sistemas dinámicos de amarra de buques, entre otros.

Tabla 5: Impactos potenciales en los puertos y vías de navegación debido a drivers climáticos

Impacto potencial	Drivers	PUERTO			
		Infraestructura	Operaciones	Navegación	Entorno
Degradación, fallo y reparación de las estructuras (fiabilidad)	Aumento de los niveles medios y extremos (SS, SLR) Aumento de los extremos de oleaje	X	X		
Cambio en las necesidades de dragado	Aumento de los niveles Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje		X	X	
Inundación de áreas someras	Aumento de los niveles extremos Cambios en los extremos de oleaje	X	X		
Rebase sobre las estructuras	Aumento de los niveles extremos Cambio en los extremos de oleaje	X	X		
Pérdida/acreción de arena y sedimento (<i>offshore</i> y <i>onshore</i>)	Cambio en la frecuencia, duración e intensidad de los temporales Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje	X		X	X
Retranqueo de la línea de costa adyacente (afección a líneas de comunicación terrestre)	Niveles extremos de inundación Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje	X	X		X
Pérdida de terreno industrial	Niveles extremos de inundación Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje	X	X		
Reducción de la capacidad de recuperación natural del sistema costero adyacente	Niveles extremos de inundación Cambios en los patrones sedimentarios por ascenso del nivel del mar, cambios en la intensidad y dirección del oleaje				X
Problemas añadidos a la navegación	Cambios en los extremos de oleaje Aumento del nivel del mar		X	X	
Mayor exposición de los muelles y embarcaderos	Aumento del nivel del mar Aumento de los niveles extremos	X	X		
Disminución de la operatividad del puerto y retrasos adicionales	Aumento de altura de ola Cambios en la velocidad y dirección del viento Cambio en la intensidad y/o frecuencia de los temporales Cambios en la frecuencia de nieblas		X	X	X
Pérdida en la capacidad de almacenamiento y procesamiento de mercancía	Ascenso del nivel del mar Aumento de niveles extremos Cambio en el régimen de precipitaciones Aumento de la temperatura	X	X		
Acceso a rutas polares	Aumento de la temperatura Derretimiento de los casquetes polares (Polo Norte especialmente).		X	X	X

Fuente: CGG (2013).

5.4.4 CIUDADES COSTERAS

El cambio climático puede suponer importantes aumentos en el sobrepaso de obras marítimas, pérdidas de playas e inundación en los paseos marítimos de las ciudades costeras. En la Ilustración 116 se muestra un ejemplo del sobrepaso ocurrido durante el temporal del 8 de agosto de 2015 en Valparaíso, que provocó la pérdida de playas, destrucción de infraestructura y mobiliario público e incluso el corte del metro regional de Valparaíso durante una semana (Winckler et al., 2017). El sobrepaso puede significar un riesgo a la seguridad de las personas y vehículos, como es frecuente observar en las avenidas costeras de Viña del Mar, La Serena, Antofagasta, Iquique y Arica durante los temporales de invierno.

Ilustración 116: Erosión en playa Caleta Portales luego de la marejada del 8 de agosto de 2015



Fuente: Gentileza de Mauricio Molina Pereira.

Con el fin de minimizar los riesgos asociados al cambio climático, las ciudades debieran crecer al alero de una planificación urbana que incorpore variables asociadas al cambio climático. Desafortunadamente, la planificación urbana suele estar impulsada por intereses de corto plazo asociados a la demanda de viviendas residenciales y turísticas (Yepes & Medina, 2005). Ejemplos donde esta presión inmobiliaria ha terminado por dañar sistemas sensibles los hay en las dunas de Concón y en las playas de La Serena, Algarrobo y Arica.

Idealmente, en una planificación inteligente, los ríos, esteros, dunas y playas debieran permanecer inalterados de modo de permitir su adaptabilidad a los ciclos naturales. Las futuras obras debieran emplazarse fuera de la “zona morfodinámicamente activa” donde el suelo se mueve producto de las dinámicas oceánicas, con el objeto de minimizar la desestabilización de playas (Losada, 2008). La omisión de estudios que caractericen los procesos costeros en el marco de la planificación urbana puede ser causa de la erosión y daños en las playas, como son el caso de Playa Miramar (Ilustración 113) y Playa Recreo (Ilustración 114), en la bahía de Valparaíso. Cuando no se comprenden estos procesos y se permite la construcción de edificios e infraestructura sobre los campos dunares, se corre el riesgo de eliminar los depósitos de sedimentos naturales que podrían movilizarse durante los eventos extremos. El uso de estructuras reflejantes cerca de la costa contribuye también a reducir el ancho de las playas, promoviendo el proceso erosivo e incluso su desaparición. La planificación urbana debiera por tanto basarse en criterios de adaptación al cambio climático entre los que destacan:

- La modificación del uso del suelo considerando bajas densidades constructivas en zonas vulnerables. Un ejemplo interesante en Chile es el de Pelluhue (Igualt et al., 2017), donde mediante el Plan Regulador Comunal implementado luego del tsunami de 2010, se generaron zona de áreas verdes (ZAV) donde no se permiten edificaciones y zonas turísticas de borde costero (ZTBC) donde se restringió la densidad de uso del suelo a viviendas menores.
- La adaptación de normas de edificación considerando la amenaza del cambio climático, siguiendo lo hecho para tsunamis en Chile (MINVU, 2013; INN, 2015).
- La reconversión de usos en la zona costera a usos que sean compatibles con el cambio climático futuro. Un ejemplo poco aplicable en Chile pero bastante ilustrativo es el desarrollo de viviendas e instalaciones flotantes en los Países Bajos.

Dado que la planificación urbana se pondrá a prueba en escalas temporales muy largas, se hace necesario considerar escenarios basados en hipótesis de crecimiento social y económico en zonas costeras, cuya incertidumbre debe ser estimada.

Los esfuerzos de adaptación al cambio climático a nivel nacional, desafortunadamente, no se enfocan en proponer medidas concretas para los puertos y ciudades costeras. Recientemente, por ejemplo, se desarrolló una Estrategia Nacional de Investigación, Desarrollo e Innovación para un Chile resiliente frente a desastres de origen natural (CNID, 2016) que pone énfasis en las medidas de adaptación frente al cambio climático, y se redactó la Tercera Comunicación Nacional de Chile ante Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático (MMA, 2016), donde se identifican algunos aspectos sobre la vulnerabilidad del país y su adaptación. La comunidad científica, las autoridades, los operadores portuarios y la comunidad interesada en el uso y conservación de la zona costera debieran en lo sucesivo acometer estudios orientados a evaluar la amenaza, vulnerabilidad y riesgo de este territorio ante el cambio climático.

5.5 ADAPTACION

La adaptación al cambio climático corresponde a un ajuste en los sistemas naturales o humanos como respuesta a los efectos climáticos, cuyo objetivo es moderar el daño o explotar las oportunidades beneficiosas (UNISDR, 2009). A continuación detallamos tres tipos de medidas que podrían implementarse en nuestro país, y que han sido adaptadas de Winckler et al. (2018).

5.5.1 MEJORA EN LOS REGISTROS OCEANOGRÁFICOS

Para entender un fenómeno natural como el cambio climático, es necesario contar con estadística de calidad, con alta resolución espacial y extensión temporal. En Chile, sin embargo, prácticamente no hay redes de medida de variables biogeoquímicas en el océano y existe una asimetría muy marcada con la disponibilidad de datos en tierra³⁸. De hecho, en la actualidad existen solo 41 mareógrafos -que permiten medir la marea astronómica, la marea meteorológica y el nivel medio del mar- y ni una sola boya permanente de oleaje en los 4500 kilómetros lineales de costa. En esta línea es recomendable ampliar la cobertura de la precaria red de mediciones en la costa continental, insular y antártica y mejorar la disponibilidad de la información administrada por los organismos del Estado (SHOA para estudios oceanográficos y la DOP-MOP para proyectos de ingeniería). Es necesario también ampliar mediciones de topografía y batimetría utilizando nuevas tecnologías de percepción remota como LIDAR, SAR o similares (Robinson, 2010). Es necesario complementar esfuerzos actuales como el Atlas de Oleaje (Beyá et al., 2016) con otros que permitan estimar la amenaza de inundación costera bajo escenarios probables de cambio climático y pronosticar episodios extremos con horas de antelación, de modo de evitar trastornos en el uso de la zona costera.

5.5.2 EVALUACIÓN DE LA VULNERABILIDAD EN ZONAS COSTERAS

³⁸ Según Winckler et al. (2018), en el Explorador climático se analizan 1145 estaciones de registro de precipitación, 295 de temperatura y 788 de caudal en el territorio nacional. Según el Director del Servicio Sismológico Nacional, Prof. Sergio Barrientos (com. pers., 2016) en el ámbito de la sismología, por su parte, hay 467 instrumentos de registro de aceleración, movimiento fuerte y posicionamiento satelital. En lo relativo a contaminación atmosférica, el Sistema de Información Nacional de Calidad del Aire cuenta hoy con alrededor de 60 estaciones de monitoreo en línea a lo largo del país.

Se debieran evaluar en forma cualitativa y cuantitativa los efectos del cambio climático en las zonas costeras mediante la elaboración de mapas de amenaza³⁹, vulnerabilidad⁴⁰ y riesgo⁴¹ de inundación en plataformas SIG centralizadas e integradas para gestión de la costa (Losada, 2008). Afortunadamente, en Chile se ha desarrollado un conocimiento asociado a la amenaza de los terremotos y tsunamis que podría adaptarse al impacto derivado del cambio climático (e.g. erosión costera, inundación y daños de infraestructura costera, entre otros). De hecho, como consecuencia de los terremotos tsunamigénicos de 2010, 2014 y 2015, en Chile se han implementado diversas metodologías (SATREPS, 2016) y estudios específicos de amenaza de inundación por tsunami, entre los que destacan las Cartas de inundación desarrolladas del SHOA.

5.5.3 DISEÑOS DE INGENIERÍA CONSIDERANDO EL CAMBIO CLIMÁTICO

La estadística de las variables oceanográficas relevantes en el diseño de infraestructura (oleaje, nivel del mar y marea meteorológica) en Chile es escasa y rara vez incorpora los efectos del cambio climático, cuestión que es necesaria para obras cuya vida útil es del orden de décadas. En el diseño de infraestructura costera y la definición de las zonas potenciales de inundación deben considerar cómo han sido y cómo serán las variables oceanográficas en el futuro, e incorporarlas de manera íntegra en la definición de soluciones. En términos concretos, debemos fomentar la introducción del cambio climático e incorporar el concepto de incertidumbre como parte íntegra del diseño de nueva infraestructura (Losada, 2008). Estas acciones sólo serán posibles en la medida que:

- Haya mejoras en el acceso a estadística oceanográfica de calidad y con cobertura espacial y temporal adecuada.
- Se validen los escasos modelos de predicción de oleaje disponibles para lugares puntuales en nuestras costas.
- Se desarrollen modelos de predicción de marea meteorológica.
- Se conforme una masa crítica de profesionales, aun inexistente en Chile, con una formación especializada en el ámbito de la ingeniería marítima y sus disciplinas afines.

El contar con información de calidad y profesionales capacitados para utilizarla mejoraría el entendimiento de los fenómenos asociados al cambio climático, permitiendo diseños más robustos y seguros para un uso sustentable de la zona costera.

³⁹ Amenaza (peligro, *hazard*): Un evento, fenómeno o actividad humana con el potencial de causar daño, pérdida de vidas, lesiones, daño a la propiedad, trastornos sociales y/o económicos, y/o degradación ambiental. Cada peligro se caracteriza por su ubicación, intensidad, frecuencia y probabilidad. Las amenazas de origen natural que típicamente afectan Chile incluyen los terremotos, tsunamis, erupciones volcánicas, fenómenos climáticos extremos (marejadas, sequías o temporales de lluvia), remociones en masa e incendios forestales (CNID, 2016).

⁴⁰ Vulnerabilidad (vulnerability): Condiciones determinadas por factores o procesos físicos, sociales, económicos y ambientales, que definen la susceptibilidad y exposición de una comunidad al impacto negativo de peligros.

⁴¹ Riesgo (risk): Probabilidad de consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro ambiental) resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas y condiciones de vulnerabilidad.

6 RECURSOS MINERALES Y ENERGETICOS

La explotación de recursos minerales y energéticos presentes en los bordes costeros del mundo tiene larga data. Esta cubre desde el coral rojo utilizado en la confección de adornos y joyas cuyo tráfico se desarrolla en Egipto hasta la gigantesca industria petrolera y gas “costa afuera” en la actualidad.

6.1 EXPLOTACIÓN DE ÁRIDOS

Aun cuando las arenas y las gravas siempre se miraron como de poca importancia, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA, 2014), las caracterizó como “la materia prima más usada en la tierra después del agua”, agregando que “su uso excede ampliamente su tasa natural de renovación”. Hasta hace poco, las arenas se extraían de canteras y lechos de ríos, pero con el aumento de la demanda, los proveedores comenzaron a dragar arena de aguas costeras. Esta arena proviene de la erosión de las rocas de las montañas, material que inicia un largo viaje por ríos y arroyos hasta el océano, donde la marea y el oleaje lo esparce la zona litoral.

Con el aumento de la población, crece también la demanda por construir viviendas e infraestructura. Materiales como el hormigón y vidrio se componen principalmente de arena, razón por la cual la minería de este material se ha transformado en una industria multimillonaria en todo el mundo.

La explotación de arena en playas y mediante el dragado en las aguas costeras puede, ante la falta o deficiente aplicación de normas, acelerar el proceso erosivo. Las prohibiciones de extracción impuestas en algunos países para moderar este impacto han disminuido la disponibilidad de arena del lecho de los ríos, además de aumentar los precios de esta materia prima. El deterioro ambiental afecta en ocasiones a otros usuarios del borde costero, como el turismo y la pesquería artesanal.

En Chile, la normativa legal es algo laxa en lo relativo a las arenas de playa. El artículo 13 del Código de Minería señala, por ejemplo, que “no se consideran sustancias minerales y, por tanto, no se rigen por el presente Código, las arcillas superficiales y las arenas y demás materiales aplicables directamente a la construcción”. No existe en el país un cuerpo legal único que regule el proceso de extracción de áridos en su conjunto, por tanto la normativa aplicable se encuentra diseminada en diversos cuerpos legales. Tampoco existe en la ley Orgánica de Municipalidades una norma que regule el procedimiento de concesión de la extracción de áridos, por lo que su extracción queda supeditada a lo que establezca cada ordenanza municipal. Lo más concreto es que la Dirección de Obras Hidráulicas entrega asesoría técnica a los municipios que reciben solicitudes de extracción de áridos, pero dicha asesoría ni implica la entrega de permisos.

Recientemente se promulgó en Chile la Norma Secundaria de Calidad Ambiental que establece los valores de las concentraciones y períodos, máximos o mínimos permisibles de sustancias, elementos, energía o combinación de ellos, cuya presencia o carencia en el ambiente pueda constituir un riesgo para la protección o conservación del medio ambiente, o la preservación de la naturaleza (Ley 19.300 de Bases del Medio Ambiente). Sin embargo, la región de Aysén es la única que cuenta con un anteproyecto en elaboración de Norma de Calidad Secundaria para Sedimentos Marinos (Resolución Exenta N°115c), cuya aplicación aun no entra en vigor.

6.2 EXPLOTACIÓN DE MINERALES

Los recursos áridos no se utilizan solo como materiales para la construcción. En las arenas de playa están presentes también numerosos minerales pesados cuya alta concentración es promovida por oleaje y las corrientes costeras. La resaca del oleaje, especialmente durante las tormentas, lava los materiales más livianos de las playas, produciendo altas concentraciones de minerales pesados que se denominan "placeres". Las variaciones de la marea en combinación con los vientos oblicuos promueven el proceso pues exponen una faja mayor de playa a la acción del oleaje.

En lo placeres de una playa se encuentran minerales como la casiterita, diamante, oro, ilmenita, magnetita, monazita, rutilo, xenotima y circón. Estos recursos están presentes en casi todos los litorales del mundo, entre los que destacan los placeres de oro de Nome, en Alaska, los placeres en costa occidental de la isla de Chiloé, los placeres diamantíferos de Namibia, las arenas de ilmenita-monazita-rutilo de Travancore y Quilon, en India, las arenas de rutilo-circón-ilmenita de Australia y las arenas de magnetita de North Island, en Nueva Zelanda. Las altas concentraciones de estos minerales pueden provenir de rocas costeras o vetas aflorantes en la costa, del fondo marino, del aporte de los ríos u otros depósitos arenosos más antiguos retrabajados por el mar, como es el caso de Chiloé. Los placeres marinos recientes se presentan a diferentes niveles topográficos debido a cambios del nivel del mar durante el Pleistoceno.

Existen otros recursos en el borde costero que, debido a su progresiva explotación, fueron motivo del ordenamiento normativo. Un primer ejemplo señero lo constituye la Real Cedula del Consejo de Hacienda del Imperio Español del año 1760, que indica que "cuando se encuentren en la costa bastamientos menores con tabaco y sal /.../ se visiten y proceda contra los patrones, maestros y marineros, con arreglo a las Ordenanzas y leyes de estos reinos". Pero es solo a partir de la primera mitad del siglo XX que esta explotación se realiza a gran escala, generándose con ello una cantidad significativa de normativas nacionales e internacionales, particularmente en los países con litoral. Baste mencionar la creación de la Convención del Derecho del Mar de las Naciones Unidas (CONVEMAR), entre otras.

6.3 EXPLOTACIÓN DE COMBUSTIBLES FÓSILES

Aun cuando la primera extracción de petróleo procedente de las áreas marinas comenzó en 1896 en California, no fue sino hasta 20 años después, con el descubrimiento del yacimiento de Bolívar en Venezuela, cuando estas reservas cobraron importancia para la economía mundial. La primera plataforma "costa afuera" se instala durante los años cuarenta en el golfo de México, a una profundidad de apenas 7 metros. A partir de esa fecha, la exploración de los hidrocarburos presentes en depósitos submarinos litorales se ha transformado en la explotación más intensa de recursos minerales marinos, generando consecuentemente un enorme desarrollo tecnológico y económico.

En Chile, la explotación de recursos minerales y energéticos es de larga data remontándose, en el caso del carbón, a la época colonial. Pero es con la incorporación de la máquina a vapor y del ferrocarril, que la minería del carbón se masifica y juega un rol importante en el desarrollo minero del Norte Chico, antes de la guerra del Pacífico, y del Norte Grande luego de que éste es incorporado al territorio nacional. En la primera década del siglo XX, la producción nacional de carbón alcanza como promedio las 800.000 toneladas anuales. Hacia la década del cincuenta, la producción prácticamente se duplica, llegando a 2.100.000 toneladas en 1961, para luego experimentar un descenso gradual. El promedio para el decenio 1971-1980 es de 1.000.000 de toneladas, viviendo una pequeña reactivación entre 1983 y 1986, años en que la producción aumenta de 1.077.831 toneladas a 1.333.743 toneladas.

Los yacimientos de carbón de Chile se localizan prácticamente en la zona costera, como son los casos de Concepción y Magallanes. En el año 1869 y ante el agotamiento de los mantos carboníferos de Punta Puchoco en las cercanías de Coronel, se inicia en formas muy pionera la explotación de mantos del mineral, construyéndose piques submarinos en el subsuelo de la zona submarina adyacente a dicha costa. El yacimiento "Pique Carlos", conocido hoy como el "Chiflon del Diablo", se constituyó en la primera y única mina submarina del mundo. Esta mina se caracterizó por poseer ventilación natural y por el modelo de explotación denominado "por pilares", que consistía en la estructuración de pilares de carbón de 1 a 1.2 metros de altura donde el minero debía trabajar de rodillas, extrayendo el carbón hacia arriba o hacia abajo para conformar una caverna de extracción y un pilar sostenedor. Esta configuración conformaba una compleja trama de túneles y galerías interconectados que se pueden visitar hasta el día de hoy.

Hacia el sur del país existen importantes reservas de carbón. En la Isla Riesco, cerca del Estrecho de Magallanes, se encuentra la mina Elena, que comenzó a ser explotada a finales del siglo XIX. En la década de los treinta, la producción de carbón ascendía a dos mil toneladas mensuales y se sumaba a lo extraído desde los yacimientos Magdalena y Josefina, también en la isla. El yacimiento Estancia Invierno, que abarca 4.030 hectáreas, hay reservas por un total de 670 millones de toneladas de carbón, de las cuales cerca de 280 millones de toneladas corresponden a la categoría de reservas probadas y el resto a la categoría de probables. Su explotación, hoy en día, genera resistencia en las comunidades locales debido a sistemas de explotación basados en tronaduras.

La minería del carbón no solo fue pionera en lo referente a la minería submarina sino que también fue una de las consideraciones que llevaron al Presidente, don Gabriel González Videla, a proclamar la "Declaración Presidencial de Chile de 1947". Dicha revolucionaria iniciativa reivindicó, por primera vez en la historia del Derecho Internacional Marítimo, "todas las riquezas naturales que en el (océano) existen y bajo el, conocidas o por descubrirse" en las primeras 200 millas desde la costa chilena. Esta declaración lleva posteriormente a uno de los hitos más importantes en la creación del nuevo Derecho del Mar, al constituir el primer instrumento internacional, de carácter multilateral, que consagra la soberanía y jurisdicción exclusivas del Estado ribereño sobre una zona adyacente a la costa. Este instrumento formulado en "la Declaración de Santiago" de 1952, fue suscrita por Chile, Perú y Ecuador.

Junto a la explotación carbonífera se confirma, en 1945, la existencia de petróleo y gas en la zona austral de Chile, estableciéndose el primer yacimiento de petróleo en el sector de Sprighill, Tierra del Fuego. Desde la década de los cincuenta, la Empresa Nacional del Petróleo (ENAP) explota los únicos yacimientos de hidrocarburos y gas del país, presentes en la región de Magallanes. En la década de los ochenta, ENAP puso en producción los yacimientos "costa afuera", con la instalación de plataformas petroleras en el estrecho de Magallanes.

En la actualidad, parte importante de la energía requerida se obtiene a través del gas natural licuado (GNL), que es un recurso energético de combustión limpia, de precio competitivo, amplia disponibilidad y que en la década de los 90 se suministraba exclusivamente desde Argentina a través de un gaseoducto. Dicho suministro se interrumpió intempestivamente en los años 2004 y 2005, lo que obligó al Estado chileno a tomar urgentes medidas como construir un terminal de recepción, descarga, almacenamiento y regasificación de GNL en la bahía de Quintero. El traslado del gas natural licuado a -160°C reduce su volumen en más de 600 veces, haciendo viable su traslado por barco desde diversos países productores. La bahía de Quintero fue seleccionada tanto por abrigo natural y cercanía a los principales consumidores de gas natural. En enero de 2011 se dio inicio a la operación comercial, con todos los componentes del terminal operativos, incluidos dos estanques de 160.000 m³. En 2015 se aumentó la capacidad de suministro con la puesta en marcha de un tren de vaporización que permitió incrementar la capacidad de regasificación en un 50%, alcanzado un total de 15 millones de m³/día, y dos

nuevas islas de carguío en la estación de carga de camiones, que le permitieron duplicar la carga de GNL en camiones cisterna.

Del mismo modo, desde 2010 opera en la bahía de Mejillones, el Terminal de Regasificación GNL Mejillones, cuya capacidad de regasificación alcanza 5,5 millones de m³/día, con los que abastece principalmente a las generadoras eléctricas del norte.

6.4 LAS ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES

A pesar de los esfuerzos por diversificar la matriz energética, la realidad es que nuestro país es frágil energéticamente y carece de reservas de combustibles fósiles. Por ende, está fuertemente afecto a los precios internacionales y necesita de la exploración de otras fuentes energéticas. La autoridad política ha adoptado, en los últimos años, la decisión de efectuar un cambio progresivo de la matriz energética hacia la utilización de “energías renovables no convencionales” (ERNC). Este cambio de paradigma ha mostrado ser exitoso dado que hay 2.880 MW de nueva capacidad instalada en el año 2018, de los cuales 1.200 MW provendrían de energía fotovoltaica, 1.000 MW de energía eólica y 130 MW de Pequeños Medios de Generación Distribuida (PMGD), por lo que solo 500 MW se generarían con fuentes convencionales. El segmento de los PMGD está referido a los medios de generación cuyos excedentes de potencia son menores o iguales a 9 MW.

En la actualidad el porcentaje de las energías renovables en la matriz energética chilena se ha multiplicado por 5 desde 2012, y se espera que siga creciendo. En el año 2017, las ERNC fueron responsables del 20,2 % de la generación de los sistemas interconectados del Norte Grande (SING) y Central (SIC), sistemas otrora independientes que actualmente en proceso de unión. En total, a lo largo del año, las ERNC alcanzaron una capacidad instalada de 4.895 MW, y el porcentaje total que representaron en la generación eléctrica fue del 20,3 %. De ese modo, la meta impuesta por ley de que en 2025 al menos el 20 % de la generación del país proviniera de fuentes limpias se alcanzó con ocho años de antelación.

Teniendo presente la configuración geográfica del país, es posible proyectar el uso de otras energías renovables y limpias al considerar las potencialidades energéticas tanto de la costa norte, que recibe abundante radiación solar, como la costa de su extremo sur, que tiene abundante energía eólica. La energía solar se puede transformar en electricidad mediante paneles fotovoltaicos de silicio, o mediante la generación de flujos de alta velocidad que luego es transformada en electricidad mediante turbinas. Un caso innovador es la plana termosolar de 110 MW en María Elena, que cuenta con 10600 espejos. La energía solar es cuasi permanente, a excepción de las horas de la noche, y no contaminante, la que la hace muy atractiva.



La energía eólica, por su parte, es otra de las ERNC que se generan energía a través de aerogeneradores que han comenzado a levantarse en lugares donde el viento es fuerte y bastante permanente. El potencial chileno en esta materia se estima en 25.000 MW, considerando que la zona sur del país es una de las zonas con más viento en el mundo.

En la actualidad existen una serie de herramientas para evaluar el recurso eólico en Chile. El Explorador de Energía Eólica, desarrollado por la Universidad de Chile, es una herramienta de análisis del recurso viento, que entrega resultados a partir de una simulación numérica realizadas

por el modelo WRF (Weather Research and Forecasting)⁴². La información entregada por el Explorador Eólico permite realizar una evaluación preliminar del recurso eólico en cualquier lugar de Chile, a excepción de un pequeño tramo en la zona austral de Chile.



Existen asimismo, amplias zonas no exploradas de energía geotérmica, que corresponde a la energía calórica contenida en el interior de la Tierra. Esta energía se presenta en dos formas: i) la hidrotérmica, que involucra la presencia de agua a alta presión almacenada bajo la corteza de la tierra en rocas permeables cercanas a una fuente de calor, y ii) la denominada de sistemas de roca caliente que comprenden capas de rocas impermeables que recubren un foco de calor.



6.5 LAS ENERGÍAS MARINAS

Como consecuencia del cambio climático de origen antrópico, en estas últimas décadas se ha acentuado la necesidad de utilizar fuentes energéticas alternativas a los combustibles fósiles y que tengan las propiedades de ser renovables y no contaminantes. Las energías marinas que cumplen con estos requisitos y que además están en la zona costera son:

- La energía mareomotriz, asociada tanto a las diferencia de nivel como a la velocidad generada por las mareas.
- La energía undimotriz, que se genera a partir de la energía potencial y cinética del oleaje.
- La energía eólica asociada al viento, que en las zonas costeras es más potente que en litoral terrestre.
- La energía asociada al gradiente térmico entre aguas superficiales cálidas y aguas profundas frías.

De este tipo de energías, la eólica es la única que se ha desarrollado a gran escala en Chile, a través de varias plantas de generación ubicadas en las costas del Norte Chico. En lugares bajos como Copenhague, en Dinamarca, se han instalado turbinas eólicas en el mar (Ilustración 117). Los dispositivos de generación de energía undimotriz y mareomotriz se encuentran aún en estado de desarrollo a nivel mundial y se espera que logran una fase comercial en un par de décadas. El extenso litoral de Chile dispone más de 5.000 kilómetros de costa con un buen potencial de generación a partir del oleaje. Por otra parte, en lugares puntuales donde el flujo mareal se encajona y acelera, existen sitios idóneos para obtener energía mareomotriz. Por ende, los estudios de caracterización del potencial energético marino en Chile serán útiles para cuando estas tecnologías se encuentren en fase de explotación a gran escala.

⁴² <http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Eolico2/>

Ilustración 117: Turbinas eólicas del complejo de Middelgrunden, en Copenhague.



Fuente: Elaboración propia.

6.5.1 LA ENERGÍA MAREOMOTRIZ

Las mareas se han utilizado como una fuente de energía por varios cientos de años. Ya en el siglo XII, las turbinas hidráulicas impulsadas por corrientes mareales se utilizaron para hacer funcionar aserraderos y para los denominados "molinos de marea", destinados en su gran mayoría para moler el grano.

La energía mareomotriz se puede aprovechar construyendo una represa a través de la boca de una bahía o un estuario que tenga un gran intervalo mareal. Mediante el represamiento del agua, el flujo de entrada y salida se puede utilizar para impulsar turbinas y generadores eléctricos. Estas centrales requieren, no obstante, de rangos de marea superiores a 5 metros, que la bahía sea estrecha, cerrada y de gran extensión. Estas exigencias limitan los lugares aptos para la localización de centrales mareomotrices a solo unos veinte lugares en el mundo. Asimismo, los impactos ambientales asociados a este tipo de solución son enormes, pues el uso de una presa modifica completamente el patrón hidrodinámico de la bahía.

Una opción menos eficiente es extraer la energía mecánica de las corrientes mareales mediante turbinas, lo que no requiere de embalsar el agua. A diferencia de una presa donde la energía del flujo se concentra en un ducto donde se ubica el generador, en este caso la energía no está concentrada y por tanto los rendimientos son mucho menores. En este sentido, la energía obtenida mediante turbinas hidrocinéticas individuales se asemeja a la conversión de energía solar mediante paneles fotovoltaicos o a la eólica mediante turbinas, pues todas requieren de una gran cobertura espacial para generar una cantidad de energía comparable a la de sistemas donde la energía se concentra.

Uno de los sectores atractivos para el aprovechamiento de la energía mareomotriz en Chile es el Canal de Chacao (Ilustración 118). La Escuela de Ingeniería Oceánica de la Universidad de Valparaíso desarrolló la una evaluación del potencial de energía de corrientes de marea y oleaje entre las IV y X regiones de Chile (EICO, 2009), trabajo que, entre otras cosas, define la mejor ubicación de un prototipo en la zona del Canal Chacao mediante un modelo hidrodinámico. Las conclusiones más relevantes de este estudio en lo que dice relación con la energía generada por las mareas fueron:

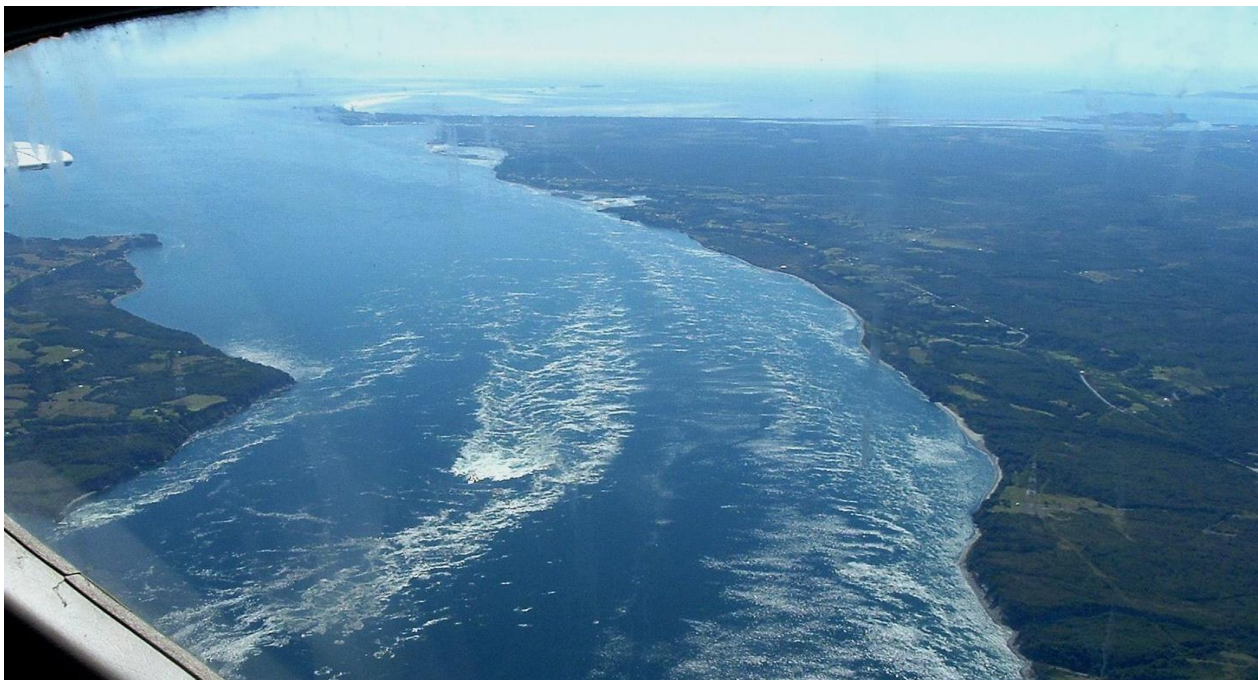
- La energía máxima disponible del canal se estima en 6.2 [TWh/año], lo que ubica al Canal Chacao como uno de los lugares con mayor potencial mareomotriz a nivel mundial.
- La potencia describe una notoria variabilidad horaria y a lo largo del ciclo lunar, siendo las mayores intensidades en el período de sicigia durante la vaciante y las menores en cuadratura durante la llenante. La variación mensual y anual es poco relevante, por lo que podría garantizarse una potencia firme mayor que otras alternativas de energías renovables no convencionales, tales como el oleaje, la energía solar o la eólica. En

consecuencia, la energía mareomotriz en Canal Chacao surge como una opción atractiva ya que es predecible, permanente e inagotable.

- Se identificaron seis zonas atractivas a lo largo del canal, cuyas velocidades máximas superan un umbral de 2,5 [m/s] y poseen profundidades inferiores a 60 [m]. Tres de ellas se encuentran en las inmediaciones de la Roca Remolinos, en el sector más angosto del Canal Chacao. Las restantes se encuentran cercanas a la boca occidental del mismo, en las cercanías de Carelmapu.

Existen otros estudios posteriores (Guerra et al., 2017) que constatan que este es uno de los canales más energéticos del mundo.

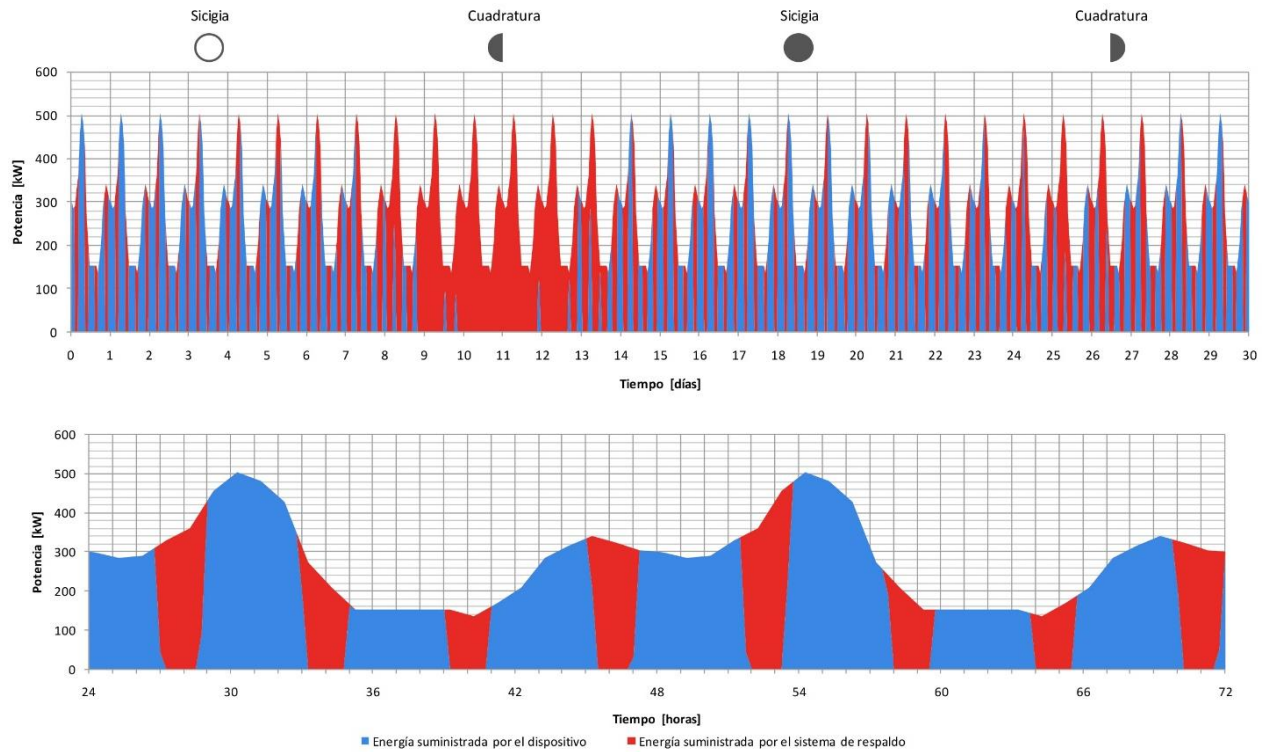
Ilustración 118: Fotografía aérea de la sección más angosta del Canal Chacao, durante una condición de marea vaciante. Al fondo se encuentra el Océano Pacífico. El tramo central, donde se observa espuma superficial, se encuentra la Roca Remolino; una formación de baja profundidad donde se emplazará una de las torres del futuro Puente Chacao.



Fuente: Elaboración propia a partir de fotografía aérea tomada por Horacio Parragué.

Finalmente, la periodicidad de las mareas constituye una ventaja de cara a la planificación del recurso. Por ejemplo, García (2008) efectuó una evaluación del potencial de la energía originada por corrientes de marea para generación en sistemas aislados para la localidad de Melinka, donde propuso un sistema híbrido donde la oferta energética se satisface con petróleo durante rango de marea bajos, y mediante energía mareomotriz cuando este es alto (Ilustración 119).

Ilustración 119: Grafico de potencia requerida por un sistema aislado en la localidad de Melinka. En rojo se muestran los momentos en que, debido a los menores rangos mareales, la energía es abastecida mediante un sistema de respaldo activado por petróleo. En azul, aquellos momentos donde la energía mareomotriz alcanza a satisfacer la demandas (García, 2009).



Fuente: García (2008).



6.5.2 LA ENERGÍA UNDIMOTRIZ

La energía undimotriz se obtiene a través de la captación de la energía mecánica del oleaje. Teóricamente, la cantidad de energía disponible es proporcional al periodo y al cuadrado de la amplitud de las olas. La conversión de esta energía, no obstante, es compleja pues los dispositivos se sumergen en un ambiente hostil, donde los eventos extremos generan grandes fuerzas y la salinidad del agua amenaza su integridad en el largo plazo. Asimismo, la mantención de artefactos flotantes es cara y el costo por unidad de energía generada es mucho mayor que otras energías más baratas generadas en tierra.

La historia de intentos fallidos por extraer energía undimotriz es larga. En 1884, el catalán José Barrufet patentó un ingenio para aprovechar las olas denominado "Marmotor", consistente en una serie de boyas cuyo movimiento se transmitía a un generador eléctrico que lo transformaba en electricidad, proporcionando un mínimo de energía de 0.36 KW. Sería la primera de 15 patentes de dispositivos de energía undimotriz que quedó en el olvido por razones desconocidas.

120 años después, en 2004, un dispositivo denominado "Pelamis" fue el primero en inyectar energía a la red eléctrica del Reino Unido. El dispositivo, de 150 metros de largo, consistió en 4

grandes tubos de acero articulados por 3 bisagras en las cuales se alojan bombas hidráulicas. Cuando una ola pasa por el dispositivo, el vaivén al que queda sometido provoca que las bisagras se doblen y que las bombas hidráulicas entren en acción, enviando un fluido a alta presión hasta el generador hidráulico que produce energía eléctrica. Cada "Pelamis" era capaz de generar 750 kw, los que eran transmitidos a tierra a través de unos cables submarinos. La compañía efectuó pruebas de concepto y llegó a operar en fase comercial, pero en 2014 se declaró en bancarrota. En la actualidad se siguen desarrollando distintos tipos de dispositivos en aguas profundas, intermedias y cerca de la costa, ninguno de los cuales ha alcanzado un grado de desarrollo suficiente para la explotación a gran escala.

Ilustración 120: Marejada actuando en Playa Cochoa, Viña del Mar. Al fondo se observa la Estación de Biología Marina de Montemar, edificio diseñado por el Enrique Gebhard cuya primera etapa fue inaugurada en 1945. En dicho edificio comenzó a impartirse en 2002 la carrera de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso.



Fuente: Gentileza del Profesor Mario Cáceres.

El oleaje es generado por mecanismos de origen local (seas) y remoto (swell). En el primer caso, los vientos generan olas en la zona inmediata cuyos períodos típicos son de 4 a 8 [s]. El swell proviene de diferentes regiones en la cuenca del océano Pacífico, con períodos del orden de 8 a 25 [s]. El oleaje en las costas abiertas de Chile se ve dominado por el swell remoto, lo que las convierte en uno de los sitios más aptos del mundo para la generación de electricidad con energía undimotriz. El swell arriba durante todo el año con poca variación entre las distintas estaciones, siendo marcadamente regular, con baja dispersión direccional y períodos altos, lo

que incide en la baja variabilidad estacional de la potencia y en los altos factores de capacidad que pueden desarrollar los dispositivos de explotación de esta energía.

En el estudio de la Universidad de Valparaíso (EICO, 2009) evaluó la disponibilidad energética de oleaje en las zonas costeras comprendidas entre la V y X regiones de Chile, con el objetivo de efectuar una preselección de potenciales sitios atractivos para el desarrollo de esta fuente energética. Considerando una serie de factores como la disponibilidad energética y la cercanía a la red eléctrica, el trabajo concluyó que los sectores más atractivos son Punta Curaumilla (V Región), Punta Nugure (VII Región) y Punta Tucapel (VIII Región), con máximas potencias de 33, 35 y 47 [kW/m], respectivamente. El estudio se enfocó en puntas debido a que ellas generan amplificación en la energía del oleaje debido a la acción combinada de la refracción, el asomeramiento y la reflexión.

Se observó también que en los sitios estudiados no existe un aumento significativo de la potencia entre aguas profundas y aguas someras, lo que implica que no necesariamente serán los mejores lugares para ubicar dispositivos. Esto se traduce en que prácticamente cualquier porción de costa expuesta al Pacífico será atractiva para la explotación, en la medida que la batimetría local permita utilizar sistemas de transmisión a costos razonables. Al respecto, cabe destacar que los costos de instalación y mantención aumentan a medida que crece la distancia entre el emplazamiento de la central y el continente, por lo que ésta debiera minimizarse al momento de proyectar una futura planta undimotriz.



6.5.3 LA ENERGÍA EÓLICA EN LA COSTA

El viento es una corriente de aire que tiende a compensar el desequilibrio producido en la atmosfera por la existencia de masas de aire a distintas temperaturas. El viento produce una energía renovable, gratis y no contaminante que se ha utilizado durante siglos. Los granjeros dependían de ella para bombear agua y generar electricidad. El desarrollo de las grandes centrales eléctricas a partir de la década de los treinta, no obstante, disminuyó fuertemente dicha dependencia. Aproximadamente el 0,25% de la energía solar que alcanza las capas inferiores de la atmósfera se transforma en viento. A pesar de ser un porcentaje poco significativo, la cantidad absoluta de energía es muy grande. De hecho con la tecnología actual, 10 molinos de viento pueden generar energía para abastecer la demanda de 19.000 hogares en un año, mientras que uno solo evita la emisión de 6.375 toneladas de CO₂.

En Chile, los indicadores que dan cuenta del potencial eólico muestran que la mayor ocurrencia se presenta a lo largo de la costa. El Ministerio de Energía estima un potencial cercano a los 40.500 MW en proyectos, cifra que refleja el extenso espacio disponible para nuevas iniciativas eólicas. Sin embargo, no todos los sitios con buen potencial son aptos, dado que en las zonas costeras donde están los mejores vientos puede existir resistencia de las comunidades locales o áreas protegidas.

Los tres primeros aerogeneradores en el país se instalaron en la localidad de Alto Baguales, cerca de Coyhaique, en Noviembre de 2001. Estos dispositivos tenían una capacidad instalada de 2MW y abastecen de electricidad a casi 2.000 familias. En el año 2007 entró en operaciones el primer parque eólico unido al Sistema Interconectado Central (SIC), ubicado en la localidad de Canela Región de Coquimbo (Ilustración 121). El parque partió con 11 aerogeneradores que producen 1,65 MW cada uno, con una generación anual de 46.000 MWh.

Ilustración 121: Parque eólico de Canela, en la Región de Coquimbo.



Fuente: <http://jorge-desdevalparaiso.blogspot.com/2012/02/parque-eolico-el-total.html>.

A partir de ese primer parque eólico se inicia el inicio de un verdadero “boom” en la instalación de parques eólicos en el país, principalmente en la zona costera del Norte Chico y del Bio Bio. A estos grandes parques hay que sumar un número creciente de aerogeneradores de pequeña escala que están situados en sistemas aislados, que no forman parte del SIC y también de aerobombas que llevan décadas funcionando en el país. El Ministerio de Energía indica que la energía generada a través de parques eólicos aumentará considerablemente en función de nuevos proyectos. La meta es que al menos un 70% de la matriz eléctrica al 2050 provenga de fuentes renovables, con énfasis en energía solar y eólica y con la incorporación progresiva de la geotermia, la biomasa y las energías oceánicas.

6.6 LOS HIDRATOS DE METANO

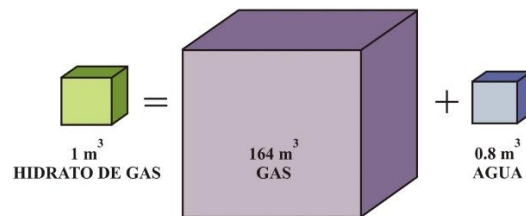
En el año 2001, cuando se aceleraban las gestiones para el reemplazo del suministro del gas proveniente de la República Argentina, un conjunto de instituciones nacionales y extranjeras lideradas por la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, desarrollaron con el apoyo del Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico (FONDEF) y empresas privadas, el proyecto titulado “Hidratos Submarinos. Una nueva fuente de energía para el siglo XXI”⁴³. Su propósito fue demostrar la existencia de una novedosa fuente de energía en los fondos marinos cercanos al litoral de Chile: los hidratos de gas submarinos. Este tipo de formación natural contiene grandes cantidades de gas natural, principalmente metano, y agua en forma de hielo.

Los hidratos de gas son acumulaciones cristalinas similares al hielo, formadas de gas natural y agua. El bloque constructor de este sólido cristalino es una estructura denominada “clatrato”, en

⁴³ El proyecto fue dirigido por el Dr. Esteban Morales, uno de los autores de este texto.

la cual las moléculas de agua forman una celda cuyo interior está ocupado por moléculas de gas. En la naturaleza existen varios gases que tienen tamaños moleculares adecuados para formar hidratos de gas, sin embargo, el más común es el hidrato de metano. Estos hidratos son concentradores naturales de gas y pueden almacenar grandes porcentajes de gas por unidad de volumen, en condiciones de presión y temperatura estándar. En concreto, 1 m³ de hidrato de metano produce 164 m³ de metano gaseoso y 0.8 m³ de agua (Ilustración 122).

Ilustración 122: Cambio de volumen del hidrato de gas.



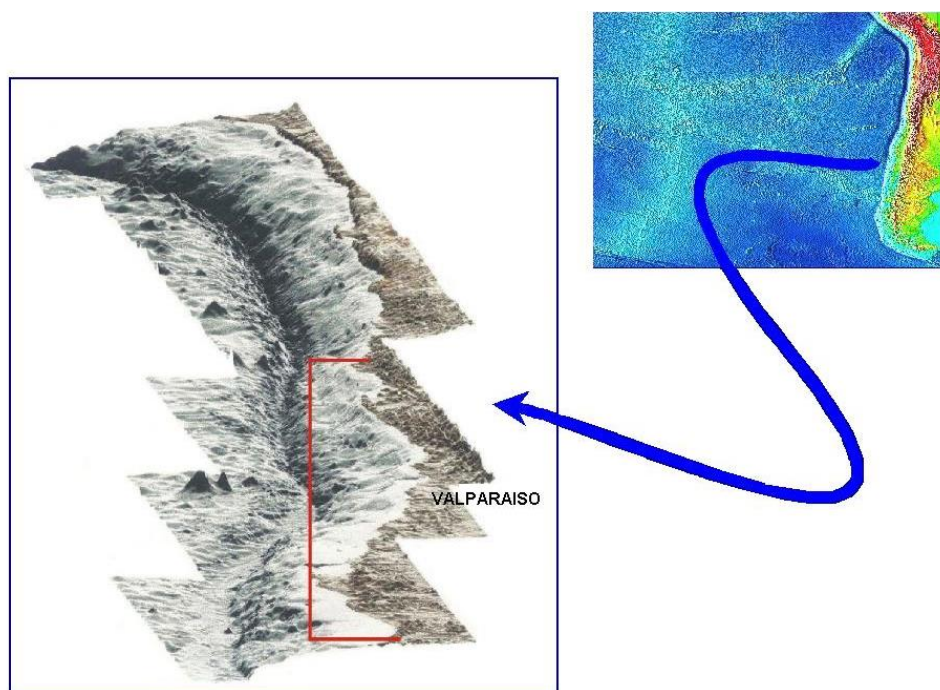
Fuente: Elaboración propia.

A nivel mundial hay dos ambientes donde se encuentran hidratos en grandes cantidades. El primero es bajo capas de suelo congeladas permanentemente, denominadas "permafrost", que se sitúan en las regiones frías del planeta y a profundidades de algunos cientos de metros. El segundo ambiente es el fondo oceánico y a poca profundidad, en un sistema finamente balanceado entre sus componentes, tales como los sedimentos, la presión, la temperatura y el agua que cubre la capa de sedimentos.

A escala global, la cantidad de gas almacenado en los hidratos de metano se estima entre 10¹⁵ y 10¹⁶ m³, lo que equivale a varias veces las reservas mundiales de gas y petróleo. En el margen continental de Chile, por su parte, se estima que volumen de gas podría ser del orden de 3,2 x 10¹³ m³, lo que es tres órdenes de magnitud superior al consumo anual de Chile. Si sólo una pequeña fracción de este gas pudiera efectivamente ser explotado, podría constituir la reserva de combustibles fósiles más grande de la tierra y colaborar de manera importante en la economía nacional.

El proyecto "Hidratos de gas submarinos: una nueva fuente de energía para el siglo XXI", consistió en compilar la información geológica y geofísica del margen continental de Chile, definir áreas prioritarias para prospecciones futuras, estimar los volúmenes de metano disponibles y proponer un marco legal para el manejo del recurso. El área considerada para el proyecto comprendió entre los 31° a 39°S y entre la línea de la costa y los 77° W (Ilustración 123). Debido a la falta de equipos y profesionales calificados en Chile, se buscó apoyo científico y tecnológico de investigadores de Alemania, Dinamarca, Noruega, Canadá, Estados Unidos y Japón. La Armada de Chile puso a disposición el buque oceanográfico "Vidal Gormaz" para realizar tres cruceros de prospección en la zona de estudio.

Ilustración 123: Área estudiada en el Proyecto de Hidratos de Gas Submarinos.



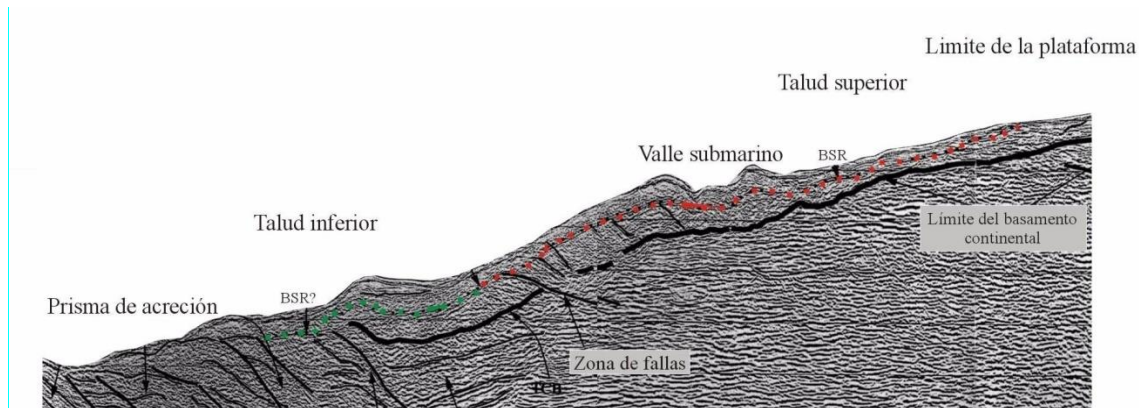
Fuente: Elaboración propia.

Las mediciones en terreno y los antecedentes de campañas oceanográficas extranjeras permitieron mejorar el conocimiento de un sector importante del margen continental chileno, generando, entre otros productos, una cartografía submarina de gran resolución, elaborada a partir de las mediciones de un poderoso ecosonda multihaz facilitado por GEOMAR (Alemania).

Estas observaciones se complementaron con mediciones de las anomalías de la gravedad obtenidas con un gravímetro facilitado por la Universidad de Bergen (Noruega) y con mediciones del magnetismo que en conjunto permitieron discriminar los contrastes en densidad y magnetización de la secuencia sedimentaria que aloja los hidratos de gas. Con ello se caracterizaron las unidades litológicas del subsuelo y del sistema estructural que lo caracteriza. Una medición novedosa consistió en la determinación del transiente electromagnético, gracias a un equipo facilitado por la Universidad de Toronto (Canadá), que permitió conocer la resistividad de los hidratos de gas y del gas atrapado bajo ellos. Otra medición relevante fue la de flujo de calor, dado que las condiciones de presión y temperatura son críticas para la estabilidad de los hidratos. Estas observaciones constituyeron, además, las primeras observaciones masivas de flujo de calor realizadas en el margen chileno gracias al apoyo de equipos y científicos aportados por la Universidad de Bremen (Alemania).

Estas mediciones se completaron con las de reflexión sísmica convencional mediante un instrumento operado por científicos de la Universidad de Aarhus (Dinamarca), que permitió la identificación una anomalía conocida como "Bottom Simulating Reflector" BSR (Ilustración 124), comúnmente utilizada para la identificación de hidratos de gas. Estas mediciones se complementaron con observaciones de reflexión sísmica profunda, obtenidas mediante un equipo de última generación aportado por la Oficina de Investigaciones Navales de la Armada de los EEUU, denominado "Deep Towed Acoustic Geophysical System" (DTAGS).

Ilustración 124: Perfil sísmico en el margen continental de Chile mostrando el registro de BSR (en rojo y verde).



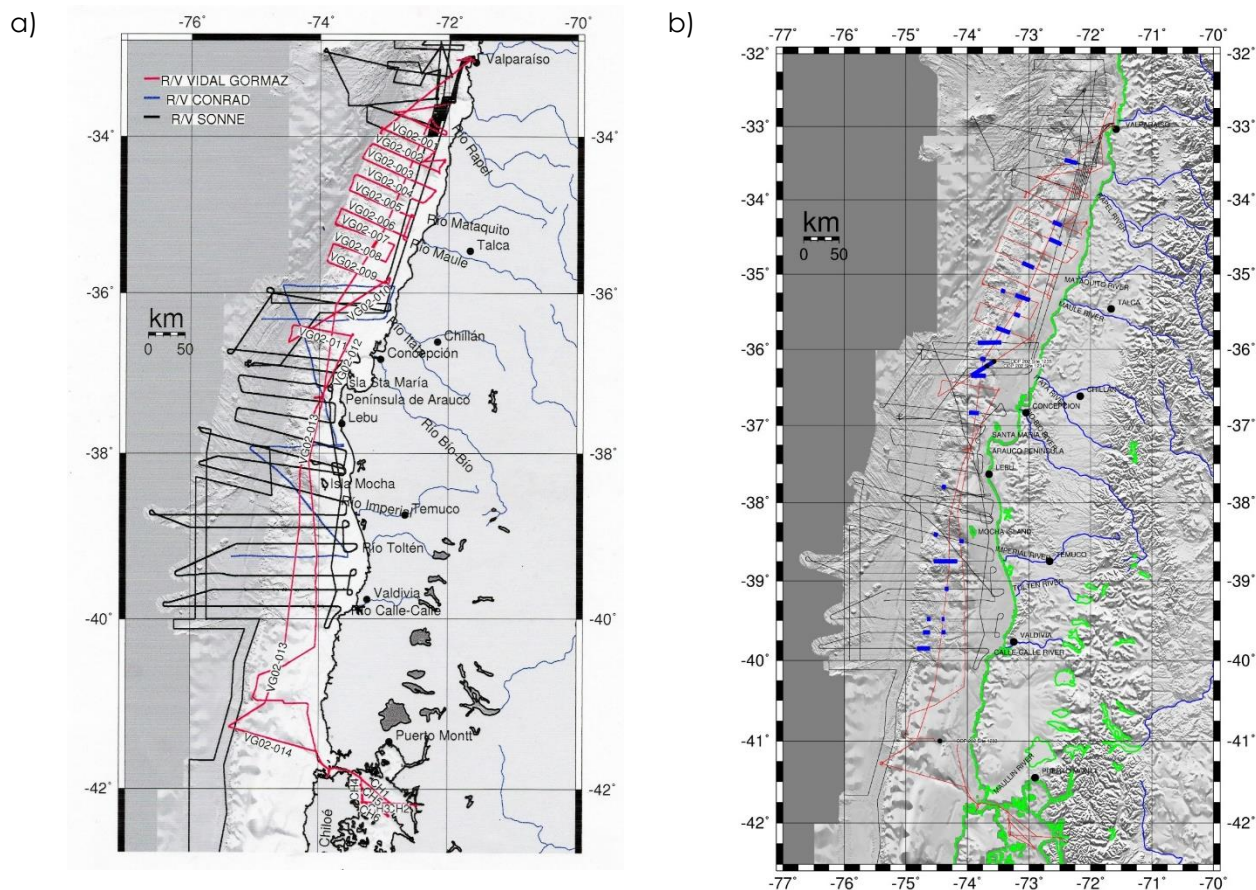
Fuente: Elaboración propia.

En total se cartografiaron 26 líneas sísmicas de longitud entre los 1,3 km la más corta y de 37,7 km la más extensa, cubriendo un total de 386,6 km (Ilustración 125a). A partir de varios supuestos fundados científicamente, se estimó un volumen de hidratos de gas entre los 32° y los 40°S de unos 100 km³, los que multiplicados por el factor de amplificación de 164 (a temperatura y presión estándar) ascienden a es decir, 16.400 km³, lo que constituye una reserva energética capaz de servir los requerimientos del país a largo plazo. Se estimó asimismo que en dicha franja latitudinal, la capa de hidrato de gas tiene un espesor de 130 metros y que área susceptible de contener hidratos de gas es de 9.660 km². El proyecto contó con el apoyo de la institucionalidad científica y política (Ilustración 126).

En el año 2018 se inició el proyecto denominado "A first estimation of gas hydrates offshore Patagonia. Chile", cuyo cometido es estudiar tres nuevas zonas de interés frente al borde costero de Chile. Dichas zonas cubren entre el Río Itata y Arauco, entre Valdivia y Chiloé y finalmente entre Coyhaique y la Patagonia Chilena. Los investigadores estiman que en la primera de estas zonas la presencia de este recurso alcanzaría un volumen total de roca de 15%, en la segunda estos valores serían del orden del 20% y en la última entre 8% y 20% del volumen total de roca.

 **YouTube** Los hidratos de metano en Chile

Ilustración 125: a) Campañas oceanográficas relacionadas al Proyecto FONDEF D001104. b) Distribución de BSR (en azul) Proyecto FONDEF D001104.



Fuente: Elaboración propia.

Ilustración 126: Presidente Lagos sosteniendo un testigo del proyecto “Hidratos de gas submarinos: una nueva fuente de energía para el siglo XXI”, liderado por el Dr. Esteban Morales.



Fuente: Elaboración propia.

7 EL ORDENAMIENTO JURÍDICO Y GESTIÓN DE LA ZONA COSTERA

7.1 PRINCIPIOS GENERALES

A lo largo de nuestra existencia como Nación, distintas han sido las iniciativas que se han considerado para regular la protección del medio marino y su borde costero, incluyendo su ecosistema, el cual es comprendido como el

*"complejo dinámico de comunidades vegetales, animales y de microorganismos y su medio no viviente que interactúan como una unidad funcional"*⁴⁴.

Como ha sido expresado por el Informe País sobre el Estado del Medio Ambiente en Chile 2016⁴⁵,

"el borde costero marino es un sistema natural, altamente complejo, caracterizado por múltiples recursos geográficos, muy relevantes para el ser humano, siendo el punto de congruencia de tres componentes fundamentales de la Biosfera; el mar, la tierra y la atmósfera".

Además, las zonas costeras han sido por mucho tiempo gran fuente de riquezas y atractivos para los países que la poseen. Son espacios geográficos generalmente muy poblados, en los cuales se han efectuado actividades tradicionales desde los inicios de la civilización humana. En la actualidad, con el desarrollo de nuevas actividades industriales y turísticas, los espacios costeros son objeto de una creciente ocupación humana, por lo cual están directamente amenazados si no se toman los resguardos necesarios.

Del mismo modo, el ordenamiento jurídico y la gestión de la zona costera ha sido compleja, debido que en el manejo de un espacio tan singular, han concurrido un elevado número de administraciones sectoriales, de la pesca, de la defensa, del medio ambiente, de las obras públicas, de la minería, del urbanismo, de la industria, de la agricultura, entre otras. También, han actuado en ella, todas las escalas administrativas competentes, sean estas locales, metropolitana, provincial, regional, nacional y supranacional.

Dada las características particulares de este entorno geográfico, se requiere de algunos principios básicos para su manejo apropiado. El primer principio es que la zona costera es un sistema único de recursos donde los usos de la tierra y el mar se deben manejar y planificar teniendo como meta la conservación de la propiedad común de ellos.

Un segundo principio, es que los programas de manejo de la zona costera deben considerar la prevención de riesgos naturales y la conservación de los recursos naturales, utilizando formas especiales de la evaluación económica, de los beneficios sociales y de participación ciudadana. Por último, se ha requerido una ordenación integrada del sistema costero, el cual ha debido considerar la fragilidad de los ecosistemas presentes, bajo una "visión ecológica".

7.2 NORMATIVA INTERNACIONAL EN RESGUARDO DEL MEDIO MARINO Y COSTERO

⁴⁴ Artículo 2º del Convenio sobre la Diversidad Biológica, del cual Chile es Estado parte, conforme al Decreto Supremo N°1.963, publicado en el Diario Oficial de fecha 6 de mayo de 1995.

⁴⁵ Véase <http://www.uchile.cl/publicaciones/129633/informe-pais-estado-del-medio-ambiente-en-chile>

El resguardo de las zonas costeras ha estado íntimamente ligado a los procesos regulatorios asociados al control de la contaminación marina al alero del Derecho Ambiental Marítimo. La preocupación por la protección y preservación de los ecosistemas marinos es en la actualidad un problema de orden mundial, dado que se reconoce que más de las dos terceras partes del planeta están cubiertas por océanos y que éstos constituyen el principal factor que modela el comportamiento de procesos como el cambio climático y la regulación de la temperatura de la Tierra. Además, la preservación del medio ambiente, especialmente en el medio marino, desemboca en cuestiones de valores y, por ende, de elección. Entraña así, en último término, un problema cultural, cuya solución debe buscarse en el campo de la educación ambiental (Valenzuela, 1974).

Sin embargo, la historia ha evidenciado que los problemas relacionados con la preservación del medio marino no han logrado ser solucionados en el sólo campo de la educación. Al margen de las múltiples cuestiones de orden científico y técnico que encierra el gran número de procesos involucrados en este medio, existe un nivel de solución que debe ser asumido en el campo del Derecho, ya que sólo la fuerza coactiva de éste puede ser capaz de imponer un orden de conductas que logre coincidir los intereses particulares de personas naturales y jurídicas, con su conservación de este patrimonio ambiental (Valenzuela, 1976).

La historia ha demostrado que la preservación del medio y de sus recursos marinos y costeros, ha representado una norma imperativa del Derecho Internacional (lo que, también, es conocida, en su terminología técnica como *jus cogens*). Esto explica que en la actualidad se haya incluido como norma obligatoria en los convenios, acuerdos y declaraciones internacionales, así como en las disposiciones constitucionales y en las leyes especiales sobre preservación del medio ambiente marino.

Muchos han sido los autores que señalan que, si bien es cierto que los orígenes de la problemática ambiental se remontan a la Roma antigua, suelen aceptar que ésta sólo se reconoce en la década de los 70's (Amaya, 2001). Sin embargo, la preocupación internacional sobre los aspectos en materia de protección del medio marino ya se venía discutiendo antes de la aparición del llamado "Derecho del Medio Ambiente", o simplemente, "Derecho Ambiental", en los 70's. El elemento precursor, en este sentido, fue la contaminación originada por hidrocarburos, lo cual era admitido antes de la Primera Guerra Mundial como resultado de la expansión del transporte marítimo desde comienzos del siglo XX.

7.2.1 LAS PRIMERA NORMAS DESTINADAS A LA PROTECCIÓN DEL MEDIO MARINO

Los primeros que intentaron obtener un acuerdo internacional para combatir la contaminación por hidrocarburos fueron los Estados Unidos de Norteamérica (EE.UU.) y, posteriormente, la Liga de Naciones. Así, en 1926, la Conferencia Marítima Internacional desarrollada en Washington D.C. decidió adoptar el 1er **Convenio Internacional Relativo a la Contaminación por Petróleo**. Sin embargo, las soluciones que dicho instrumento aportaba no prosperaron en un acuerdo definitivo, por lo que este tratado fracasó al no ser ratificado por ninguna nación.

Durante los años veinte y treinta, varias naciones introdujeron sus propias medidas e impusieron multas para evitar las descargas de hidrocarburos a sus aguas territoriales, pero en ningún caso éstas se internacionalizaron. En tal sentido, fue el Reino Unido, quien lideró el desarrollo de varios acuerdos que prosperaron a nivel internacional y que dijeron relación con la seguridad marítima y la prevención de la contaminación. Ejemplos de ello son el **Convenio Internacional sobre Seguridad de la Vida Humana en el Mar**, de 1920 y 1948, el **Convenio Internacional sobre Líneas de Carga**, de 1920, y el **Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación de las Aguas del**

Mar por Hidrocarburo, de 1954 (el cual fue posteriormente enmendado en 1962 y en 1969 (**OILPOL 54/69**)).

Durante la Segunda Guerra Mundial, el problema de la contaminación generada por los derrames de hidrocarburo fue muy recurrente, en particular en las costas del Océano Atlántico, debido a los buques que eran hundidos o dañados por la acción de la guerra. Una vez concluida la guerra, las Naciones Unidas reconocieron la necesidad de crear una agencia dedicada exclusivamente a temas marítimos. Así, en 1948 se convocó a la Conferencia Marítima de la Naciones Unidas en Ginebra, donde se aprobó la **Convención sobre la Organización Marítima Internacional (OMI)**. A través de este acuerdo, que entró en vigor en 1958, se creó oficialmente la OMI, estableciendo como sus objetivos principales,

- el servir de mecanismo de cooperación entre los gobiernos en el campo de los aspectos técnicos de las actividades derivadas del transporte marítimo internacional,
- promover la adopción de convenios internacionales que establezcan los más altos estándares prácticos en materias de seguridad marítima, eficiencia de la navegación y prevención y control de la contaminación marina por buques.

El acuerdo también trata los aspectos legales derivados de dichas temáticas.

La contaminación originada por las consecuencias de las dos Guerras Mundiales se sumó a las observadas por las operaciones ordinarias que llevaban a cabo los buques tanques, lo cual condujo a que a mediados del siglo XX se desencadenara una creciente inquietud justificada a lo largo de la mayor parte de los países costeros de Europa. En aquella época era común que los buques tanques, que navegaban sin carga, vertieran directamente al mar sus residuos líquidos originados por el lavado de los estanques y el lastre de agua de mar, el cual se empleaba con el fin de otorgarle una mayor estiba a la nave. Estos residuos, al entrar en contacto con los estanques de combustible los contaminaban, lo que provocaba daños sobre ecosistemas vulnerables.

El primer paso importante en materia del control internacional de esta contaminación se dio en 1954, cuando una conferencia internacional realizada en Londres, Inglaterra, decidió adoptar el **Convenio Internacional para Prevenir la Contaminación de las Aguas del Mar por Hidrocarburos**, conocido como **OILPOL/54**. La principal ventaja del Convenio fue generar un área de protección especial para aquellas aguas marinas cercanas a las zonas costeras frente a las acciones de contaminación derivadas del vertimiento de hidrocarburos. Dicho objetivo se logró a través del establecimiento de "zonas prohibidas", las cuales se extendían desde una distancia mínima de 50 millas náuticas de la costa más cercana, o a 100 millas náuticas para los casos del Mar Mediterráneo, Mar Rojo, Australia, entre otros, en cuya área estaba prohibida la descarga de hidrocarburos o mezclas oleosas (sustancias con un contenido de hidrocarburos igual o superior a 100 partes por millón).

Mientras tanto, en Sudamérica se llevaban a cabo diversas conferencias en materia de Derecho Ambiental Marítimo, entre las cuales se destacó la realizada en Santiago de Chile, el 18 de agosto de 1952, donde se logró suscribir el primer acuerdo regional que permitió a los Estados contratantes a declarar su Zona Económica Exclusiva de 200 millas náuticas ("**Declaración de Santiago**").

Además, en la misma ocasión, se creó la **Comisión Permanente del Pacífico Sur (CPPS)**, organismo intergubernamental con personalidad jurídica de derecho internacional, destinado a coordinar, fortalecer y cooperar en investigaciones, adoptar acciones y participar en la creación de políticas regionales para desarrollo del derecho del mar, la protección del medio marino y sus recursos. La CPPS fue ratificada por Ecuador, Perú y Chile, el 18 de agosto de 1952. Posteriormente, Colombia se adhirió a dicho sistema, en virtud al convenio de incorporación suscrito en Quito el

9 de agosto de 1979. Los primeros esfuerzos de la CPPS, se remontan a las reuniones ordinarias sostenidas en Paracas, durante los años 1966 y 1968, donde se adoptaron los Acuerdos XII y IV, respectivamente.

En Febrero de 1957, la Asamblea General de las Naciones Unidas, a través de su Resolución 1105 (XI), convocó a una conferencia internacional de plenipotenciarios sobre el derecho del mar, la cual se efectuó en Ginebra, Suiza. Fruto de esta reunión, se suscribieron cuatro convenciones, entre las cuales se destacan la **Convención sobre Alta Mar** y la **Convención sobre Plataforma Continental** (Ferrero, 1987).

La **Convención sobre Alta Mar** permitió ampliar el concepto de fuente generadora de contaminación marina, manejado en aquella época. De esta forma, ya no sólo se hablaría de las fuentes procedentes de los hidrocarburos, sino que ahora se incluía, también, aquellas provenientes de desperdicios radioactivos y de la explotación y exploración del subsuelo marino. Se dispuso que era obligación de los Estados contratantes prevenir la contaminación de las aguas jurisdiccionales de otros países, producto a derrames de hidrocarburos o de sustancias radiactivas que se hubieran originado en su propio mar territorial; así como también, aquellas procedentes de las operaciones de sus buques y/o tuberías en alta mar, por la operación de instalaciones y estructuras localizadas en la plataforma continental.

A su vez, la **Convención sobre Plataforma Continental** permitió ampliar las garantías reconocidas para los Estados costeros, al señalar que “un Estado ribereño podrá ejercer derechos de soberanía sobre la plataforma continental a los efectos de su exploración y de la explotación de sus recursos naturales”; aclarando que, dichos derechos, son exclusivos de los Estados costeros e independientes a su ocupación real o ficticia. Asimismo, la convención potenció el interés de los Estados ribereños para proteger sus recursos vivos, fuera de su mar territorial, para lo cual incluyó la capacidad de declarar zonas de seguridad que sólo el Estado ribereño podría establecer alrededor de las áreas de exploración o explotación, protegiéndose de este modo a los recursos vivos de mar contra posibles “agentes nocivos”.

La primera Convención sobre Derechos del Mar (Ginebra 1958) y aquella que se efectuó en 1960, tuvieron una mayor trascendencia de la que se esperaba originalmente. En tal sentido, propósito de evitar la contaminación marina originada por actividades de radioactividad (artículo 25° de la Convención de Alta Mar), sirvió de base para que se incluyera en el artículo V del **Tratado Antártico**, firmado en Washington D.C., EE.UU., el 1° de diciembre de 1959, en el que se prohíbe efectuar explosiones nucleares y eliminar este tipo de desechos en la Antártica; y, posteriormente, en la **Convención de Moscú sobre Prohibición de Ensayos Nucleares de 1963**, la cual estableció la prohibición de realizar explosiones que contaminen más allá de sus fronteras (Uribe, 1989).

Mientras tanto, en 1957 y bajo el auspicio del Gobierno de Bélgica, se firmaba el primer convenio intergubernamental en materia de indemnizaciones y responsabilidades legales por derrames de hidrocarburos provenientes de buques en alta mar (**Convenio Internacional relacionado con la Limitación de la Responsabilidad Legal de los Armadores de Buques en Alta Mar, de 1957**), el cual sentó las bases de la responsabilidad civil por la contaminación del mar por hidrocarburos y los sistemas que garantizarían la indemnización en el campo internacional.

Ilustración 127: Puerto de Iquique.



Fuente: Gentileza de la Dirección de Obras Portuarias.

Después de la creación de la OMI y mediante una serie de preparativos que comenzaron con la Conferencia de Copenhague de 1959, se celebró la **Conferencia Internacional de Londres de 1962**, la cual permitió enmendar el contenido del **Convenio OILPOL/54**, permitiendo incluir importantes aspectos en materias de definiciones, intercambio de información y procedimientos legales por contravenciones. Luego, con la firma del **Convenio Europeo sobre Prevención de la Contaminación por Hidrocarburos de 1967**, entre Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suiza, se consolidó en esta región la preocupación de que "la preservación del medio ambiente exige el control de las fuentes de contaminación más allá del territorio nacional y del mar territorial".

En 1969, la OMI decidió enmendar el Convenio OILPOL54 (**OILPOL 54/69**), perfeccionando las medidas que había establecido a las operaciones de los buques tanques, a través de la introducción del sistema llamado "carga sobre residuos" e incluyendo la prohibición absoluta para que las naves efectuaran descargas de hidrocarburos.

Un aporte importante de la enmienda de 1969 al Convenio OILPOL 54, constituyó la exigencia para que toda nave lleve a bordo un Libro Registro de Hidrocarburos. En este texto, se deben anotar operaciones tales como la carga de lastre (lastrado), descarga de lastre (deslastrado), limpieza de estanques de combustibles, descarga de sentina (mezclas oleosas), carga de combustible (rancho de combustible) y carga de lubricantes, entre otras. A esta exigencia, se

sumó la obligación que los Estados firmantes estipularan procedimientos de control y cumplimiento de las exigencias señaladas en este Convenio. El **Convenio OILPOL 54/69**, entró en vigor el 20 de diciembre de 1978, y unos 70 Estados fueron partes de él.

7.2.2 LA DETERMINACIÓN DE LA RESPONSABILIDAD POR LA CONTAMINACIÓN MARINA

El accidente del Buque Tanque “Torrey Canyon”, ocurrido el 18 de marzo de 1967 en el sudoeste de Inglaterra, hizo evidente para la comunidad mundial la existencia de vacíos legales en los esquemas internacionales, en particular, en materias de responsabilidad civil e indemnización por daños producidos por la contaminación marina. Este hecho provocó una serie de reacciones en el seno del Comité Jurídico de la OMI que culminaron con que, en 1969, se convocara en Bruselas, a la más importante conferencia internacional sobre esta materia, de la cual nacieron los siguientes acuerdos:

- **El convenio internacional relativo a la intervención en Alta Mar en casos de accidente que causen una contaminación por hidrocarburos” (INTERVENTION CONVENTION 69)**, el cual permite que los Estados partes puedan adoptar acciones tendientes a prevenir, mitigar o eliminar todo peligro grave o inminente contra su litoral o intereses conexos, debido a la amenaza de contaminación de sus aguas marinas por la acción de hidrocarburos. Sin embargo, esta intervención sólo puede ser ejercida cuando la acción contaminante haya sido originada por un accidente marítimo u otro acto que esté relacionado con éste y de cuyos hechos puedan desprenderse consecuencias de gran magnitud.
- **El convenio internacional sobre responsabilidad civil por daños causados por la contaminación de las aguas del mar por hidrocarburos (Convenio CLC/69)**, que representó un cambio significativo para el tradicional sistema de responsabilidad vigente a la fecha y que se basaba en la necesidad de probar culpa o negligencia de un supuesto hecho de contaminación marina debido que, a través de él, se estableció un nuevo sistema de responsabilidad estricta y definida del propietario del buque.

Con la consagración de una responsabilidad objetiva o del riesgo creado, el Convenio CLC/69 permitió que quien sufriera el daño derivado de contaminación por hidrocarburos persistentes desde cualquier tipo de buque, no tuviera la obligación de probar la culpa, negligencia o dolo del agente (propietario del buque), ya que sólo basta establecer que exista un derrame o descarga accidental este tipo de sustancias, en el territorio marítimo de algún Estado parte, para que se configure la responsabilidad civil. De esta manera, esta culpa fue reemplazada por la reparación efectiva y por ello se comenzó a hablar de una responsabilidad sin culpa o responsabilidad por riesgo creado (en vez de la responsabilidad subjetiva o basada en la prueba de dicha culpa).

Sin embargo, este carácter objetivo, limitó el accionar del convenio al circunscribir la responsabilidad civil sólo a la acción de descarga de hidrocarburos persistentes (crudos, full oil, aceite diesel y aceite lubricantes, entre otros), dejando fuera aquellos considerados como no persistentes (kerosene, gasolina y aceite diesel liviano, entre otros). Asimismo, estipuló su aplicabilidad sólo a determinados tipos de buques, dejando fuera a las naves de guerra, de pasajeros o que transporten carga seca o que efectúen un viaje con lastre.

Asociado a la naturaleza de un sistema de responsabilidad objetiva, el Convenio CLC/69 incluyó una serie de causales de exoneración de responsabilidad, basado en circunstancias que fueron consideradas fuera del alcance operacional del propietario de la nave que produjo la contaminación, entre las cuales se pueden mencionar:

- Consecuencias de un acto de guerra, hostilidad, guerra civil, insurrección o de un fenómeno natural de carácter excepcional, inevitable e irresistible.
 - Causado por una acción u omisión intencional de un tercero.
 - Debido a una negligencia y/o otro acto lesivo de cualquier Gobierno o Autoridad responsable del mantenimiento de luces u otras ayudas a la navegación en el ejercicio de estas funciones (faros y balizas)
- El **acuerdo voluntario de los armadores de buques tanque sobre responsabilidad por contaminación por hidrocarburos (Acuerdo TOVALOP 69)**, el cual fue concebido como una medida provisoria, hasta que fuera suscrito y entrado en vigor un Tratado Internacional sobre Responsabilidad Civil. Desde el punto de vista operativo, el Acuerdo TOVALOP/69 contempló un campo de aplicación más amplio que el CLC/69, e incluso cubre indemnizaciones que para aquellos casos que exonera el CLC/69, como aquellos derrames de hidrocarburos procedentes de naves sin cargas. Además, posee la capacidad de ser modificado libremente a voluntad de cualquiera de sus miembros. Sin embargo, el hecho que represente sólo un acuerdo internacional entre particulares, impide que los Estados puedan imponer instrumentos legales destinados a obligar el cumplimiento de los compromisos legales establecidos en él.

Regionalmente, durante el año 1969, se firmó, en la ciudad de Bond, Francia, el **acuerdo de cooperación para combatir la contaminación del Mar del Norte por hidrocarburos (Acuerdo de Bond/69)**, el cual entró en vigor el mismo año e incluyó los conceptos que se habían establecido en los Convenios CLC/69 e INTERVENTION/69.

Con el transcurrir de los años, los dueños de las empresas navieras y aquellas compañías que transportaban petróleo en buques tanques volvieron a discutir los alcances del Acuerdo TOVALOP/69, lo cual propició para que en 1971 se firmara otro acuerdo o contrato voluntario de carácter interino entre ellos, denominado **Contract Regarding an Interim Supplement to Tanker Liability for Oil Pollution o CRISTAL/71**. Dicho acuerdo, representó un fondo adicional al propuesto por el acuerdo TOVALOP/69.

Tal como se ha comentado, hasta los comienzos de la década de los 70's, la contaminación marina por otras sustancias distintas a los hidrocarburos, no había atraído la atención internacional, a pesar que sus consecuencias sobre los ecosistemas marinos y litorales eran bastante conocidas e investigadas. Sin embargo, la lucha por la preservación del medio marino internacional, ya estaba inserta en las decisiones intergubernamentales desde hacía bastante tiempo y, con ello, la comunidad internacional había formado una conciencia de los efectos que provocaba el vertimiento al mar de las sustancias diferentes a los hidrocarburos.

Fue así que, en diciembre de 1970, la Asamblea General de las Naciones Unidas aprobó la **Declaración de Principios que Regulan los Fondos Marinos y Oceánicos y su Subsuelo fuera de los Límites de la Jurisdicción Nacional**, en la que se nombró como "Patrimonio Común de la Humanidad" a los fondos marinos y oceánicos y sus subsuelos, ubicados fuera de las jurisdicciones nacionales, incluyendo en ella todos los recursos existentes. Y, obligó a los Estados miembros a proteger y conservar los recursos naturales, prevenir daños que se pudieran ocasionar sobre la flora y fauna marina, impedir la contaminación, impurificación, perturbación del equilibrio ecológico y otros riesgos que pudieran afectar estos ecosistemas marinos.

Dichos principios representaron una guía que aún es aplicada en el actual régimen internacional de dicha zona. Además, consagró el derecho de los Estados costeros a imponer medidas tendientes a prevenir, mitigar o eliminar cualquier tipo de peligro grave e inminentes que pudiera

afectar a sus costas e intereses conexos, derivados de la contaminación originada en zona fuera de los límites jurisdiccionales o, también, de otros efectos peligrosos que pudieran generarse producto de actividades realizadas en ella.

De aquellos vacíos dejados por el Convenio sobre Responsabilidad Civil de 1969 (CLC/69), nació en 1971 **el Convenio Internacional sobre la Constitución de un Fondo Internacional de Indemnizaciones de Daños Causados por la Contaminación de Hidrocarburos**, el cual creó a un organismo intergubernamental que recibió el mismo nombre (*Fondo Internacional de Indemnizaciones de Daños Causados por la Contaminación de Hidrocarburos*). Este organismo, creado en 1978, permitió garantizar una adecuada indemnización a las víctimas de perjuicios por contaminación del mar y los ambientes costeros que, en virtud del Convenio sobre Responsabilidad Civil de 1969 (CLC/69), no hubieran podido obtener el resarcimiento total o parcial de sus daños. Además, estableció la posibilidad de exonerar parcialmente de los gravámenes financieros adicionales impuestos por citado CLC/69, a aquellos armadores cuyas naves den cumplimiento con las normas de seguridad y prevención de la contaminación especificada en ciertos convenios internacionales.

Posteriormente, en 1976, se suscribió el *Protocolo* correspondiente al **convenio internacional sobre la constitución de un fondo de indemnizaciones de daños causados por contaminación de hidrocarburos, de 1971**, el cual permitió modificar las cuantías de los daños señalados por el Convenio de 1971.

Ese mismo año, en Bruselas, Bélgica, se firmó el **convenio internacional relativo a la responsabilidad civil en la esfera del transporte marítimo de materiales nucleares** y, con ello, se permitió reconocer que el transporte de este tipo de material era susceptible de poner en peligro la salud del mar y las zonas costeras, demostrando, a la vez, la resistencia que existía en la industria de seguros marítimos para aceptar las disposiciones de responsabilidad en ésta área. Además, a través de este instrumento, se intentó resolver las dificultades de la aplicación simultánea, tanto a los operadores de las instalaciones nucleares de origen como a aquellos donde se transportaban estos productos, de los diversos convenios relativos a la responsabilidad nacida de accidentes nucleares.

Asimismo, en 1975, en la ciudad de Ramsar, Irán, se desarrolló la **Convención relativa a los Humedales de importancia Internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas**, referida como "*Convención sobre los Humedales*" o la "**Convención Ramsar**", la que es, quizás, el primer tratado moderno de carácter intergubernamental sobre conservación y uso racional de los recursos naturales. Una de las motivaciones originales para el establecimiento de este Convención fue la preocupación que tomó auge a principios de la década de los 60's acerca de la seria disminución de la poblaciones de aves acuáticas y sus hábitat. Sin perjuicio de ello, con el transcurrir de los años, dicha Convención ha ampliado su preocupación original a todos los aspectos referidos al uso racional y conservación de los humedales, considerados en su definición a los humedales marinos (costas rocosas y arrecifes de coral), humedales estuarinos (deltas, marismas de marea y pantanos de manglar), humedales lacustres, asociados a ríos y arroyos, y los palustres (en el que se incluyen las ciénagas y los pantanos). La Convención Ramsar entró en vigor en 1975 y en noviembre de 1996 contaba con 96 Partes Contratantes repartidas en el mundo (Davis et al., 1996).

7.2.3 EL RECONOCIMIENTO DE LA PROTECCIÓN DE LA BIODIVERSIDAD MARINA

En Junio de 1972, el impacto de la deterioración del medio ambiente condujo a que las Naciones Unidas convocaran a su **Conferencia sobre el Medio Humano**, que se celebró en Estocolmo,

Suecia, entre el 5 y el 16 de junio del mismo año. En ella, por primera vez, todos los aspectos ambientales fueron analizados en extenso en una reunión internacional, lográndose adoptar una Declaración del Medio Humano y su Plan de Acción Mundial (**Declaración de Estocolmo 1972**). En su principio, se consagra expresamente el derecho a un ambiente sano, al proclamar que

"El hombre tiene el derecho fundamental a la libertad, a la igualdad y a las condiciones de vidas adecuadas, en un ambiente cuya calidad le permita una vida en dignidad y bienestar, y tiene la solemne responsabilidad de protegerlo y mejorarlo para las presentes y futuras generaciones"

Seis meses más tarde, la Asamblea General de la Naciones Unidas aprobaba las Resoluciones Nº 2.994 y Nº 2.997, las cuales resaltaron la importancia de la Convención de Estocolmo y remitió el Plan de Acción de la Administración de ésta al recién creado Consejo de Administración y la Secretaría del Medio Ambiente, el cual es la base del actual **Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA)**.

Durante el mismo año, se firmó el **convenio sobre prevención de la contaminación marina por vertimientos desde buques y aeronaves (Oslo Dumping Convention, 1972)**, el cual impuso estrictas normas a las prácticas de vertimientos en el Atlántico Noreste, el Océano Ártico y el Mar del Norte, y constituyó en estricto el primer instrumento internacional sobre vertimientos de diferentes sustancias, que influyó sobre todos los acuerdos a la postre.

A fines de 1972, la Conferencia de Estocolmo había conducido directamente al desarrollo de otra conferencia internacional, en el cual se logró adoptar uno de los convenios más importantes que actualmente se emplean para prevenir la contaminación marina por vertimiento de desechos, el que denominó **convenio sobre prevención de la contaminación del mar por vertimiento de desechos y otras materias (London Convention 1972"** o **"LC/72"**). Este tratado entró en vigor en 1975 y permitió extender lo establecido inicialmente por la Convención de Oslo a escala internacional; es decir, limitó toda evacuación deliberada en el mar de diversos tipos de desechos generados en tierra, separando en tres categorías dichos desechos.

Un año después de adoptada la London Convention y bajo el auspicio de la Organización Marítima Internacional (OMI), se firmaron dos acuerdos de importancia mundial para el control de la contaminación marina: el **protocolo relativo a la intervención en Alta Mar en casos de contaminación del mar por sustancias distintas de los hidrocarburos** y el **convenio internacional para prevenir la contaminación del mar por buques (Convenio MARPOL/73)**. Este último, representó la última y definitiva enmienda que sufrió el Convenio **OILPOL/54** y el primer acuerdo que permitió reglamentar la operación de vertimiento asociado con la normal operación de los buques. Además, de reforzar las reglamentaciones anteriores, el **Convenio MARPOL 73** introdujo cinco anexos con medidas concretas para evitar la contaminación debido a hidrocarburos, por sustancias nocivas líquidas transportadas a granel, a raíz de sustancias perjudiciales transportadas por bultos, por vertimiento de aguas sucias y por basuras generadas a bordo, respectivamente. El **Convenio MARPOL 73**, fue modificado posteriormente en 1978 (**MARPOL 73/78**) para mejorar las medidas tendientes a evitar la contaminación por hidrocarburos y, además, permitió que los Estados contratantes pudieran diferir la implementación del Anexo II, el cual contiene requerimientos para el control de más de 250 sustancias diferentes transportadas a granel, hasta un plazo de tres años posteriores a la entrada en vigor del protocolo.

Para fines de 1973, se llevó a cabo una nueva Conferencia sobre el Derecho del Mar denominada **UNCLOS III**, la cual fue concebida con el propósito de concebir un nuevo régimen legal para los recursos del lecho marino. Sin embargo, durante su desarrollo, la organización de la Conferencia decidió cambiar la proyección de su objetivo, lo que concluyó finalmente en la necesidad de efectuar una completa revisión del Derecho del Mar. Sin perjuicio de ello, el **UNCLOS III** representó

mucho más que un debate sobre el derecho del mar; fue la instancia que permitió un cambio radical para establecer una equidad para todos los usos que se estaba dando al océano. Como resultado de ello, la actividad naviera que hasta entonces era considerada como el principal factor de explotación de este sistema, perdió su hegemonía y pasó a ser uno de los muchos usos del océano.

En 1974, el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) dio inicio al Programa de Mares Regionales, que actualmente suscriben más de 120 Estados ribereños bajo instrumentos internacionales propios para cada región. Posteriormente, entre los años 1974 y 1978, este Programa logró la adopción de un importante número de medidas tendientes a prevenir la contaminación del Mar del Norte, entre los que se destaca el **convenio sobre la protección del medio ambiente entre Dinamarca, Finlandia, Noruega y Suecia (Convenio de Estocolmo, 1974)**, el cual fue ampliado posteriormente al área del Mar Báltico a través del **Convenio de Helsinki 1974**.

En 1975, la CPPS realizó la “Encuesta Internacional sobre Contaminación Marina en el Pacífico Sudeste”, la cual sentó la base de la **reunión internacional de trabajo sobre la contaminación marina en el Pacífico Sudeste**, la cual se sostuvo posteriormente en 1978 en Santiago de Chile y en el que señaló las bases técnicas y legales del actual Plan de Acción del Pacífico Sudeste.

Ya en el año 1976 y con la participación de casi todos los Estados ribereños del Mar Mediterráneo, se adoptó **el convenio para la protección del Mar Mediterráneo contra la contaminación**, el cual incluyó protocolos sobre vertimientos y medidas de emergencia en casos de contaminación por hidrocarburos y otras sustancias. Estos convenios regionales, administrados por el PNUMA, obligan en cierta manera a que todos los Estados ribereños incluyan en su legislación nacional acciones decisivas en materia de penalización para aquellos que contaminen el mar y una serie de disposiciones de prevención.

Tal como se venía ocurriendo en otras regiones del mundo, en 1979, el PNUMA aprobó un proyecto sobre el “**Desarrollo de un Plan de Acción del Pacífico Sudeste**”, el cual fue incluido posteriormente en el Programa de Mares Regionales del Plan Global del PNUMA. Este proyecto permitió que en noviembre de 1981, se celebrara en Lima, Perú, una Conferencia Plenipotenciaria de los Estados miembros de la CPPS, en el que se incluyó a Panamá, adoptándose el anhelado Plan de Acción y sus tres anexos:

- **Convenio para la Protección del Medio Marino y la Zona Costera del Pacífico Sudeste**, el cual destaca la necesidad de proteger y conservar los ecosistemas marinos y costeros de esta región contra todo tipo de contaminación proveniente de diversas fuentes, incluyendo la erosión de zonas costeras, la descarga de sustancias tóxicas, perjudiciales y nocivas, y la contaminación derivada de la operación de buques.
- **Acuerdo sobre la Cooperación Regional para el Combate contra la Contaminación del Pacífico Sudeste por Hidrocarburos y Otras Sustancias Nocivas en casos de Emergencias**, modificado posteriormente en 1983, que desarrolla los mecanismos para la cooperación regional en casos de derrames, la descripción del plan nacional de contingencias y programas de entrenamiento para mantener la más alta eficiencia de los principios generales señalados en la convención que le dio origen a este acuerdo.
- Dispositivos Institucionales y Financieros para la Ejecución del **Plan de Acción en la región del Pacífico Sudeste**.

Mientras tanto, en el seno de las Naciones Unidas, se llevaba a cabo una negociación con el propósito de adoptar la **Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar**, la cual, al

cabo de nueve años (1982), fue aprobada con votación favorable de la gran mayoría de los Estados miembros. La Convención Sobre el Derecho del Mar, significa un desarrollo progresivo del derecho internacional al delimitar el mar en cinco espacios claramente definidos, reconociendo como zonas de jurisdicción nacional el Mar Territorial de 12 millas náuticas, la Plataforma Continental y la Zona Económica Exclusiva de 200 millas náuticas. A éstas se agregan el alta Mar y la Zona Internacional de los Fondos Marinos (Carrillo, 1992).

Comparada con las Convención efectuada en Ginebra, en 1958, la Convención sobre el Derecho del Mar de 1982, innova en el Derecho Internacional del Mar al proveer un marco jurídico comprehensivo para el fomento y explotación racional de los océanos y sus recursos (Beyerlin, 1995). Así, esta convención destina 13 artículos a la conservación y manejo de los recursos marinos, incluyendo la conservación de especies, protección de hábitats y manejo de recursos vivos. Además, impone la obligación a los Estados para que protejan y preserven el medio marino, al establecer el deber de no transferir los daños o peligros de un área a otra o transformar un tipo de contaminación en otra y prohibir que se apliquen tecnologías que permita la introducción de especies extrañas al medio marino, las cuales se traduzcan en cambios significativos a la diversidad biológica de éstos. Además, se incluyen obligaciones respecto a la contaminación por fuentes terrestres, actividades en el lecho del mar bajo áreas sujetas a las jurisdicciones nacionales, por desarrollo de recursos en las profundidades del lecho marino, por vertimiento de embarcaciones, por contaminación de embarcaciones y por contaminación proveniente de la atmósfera o a través de ella.

Una de las consecuencias inmediatas de la Convención sobre los Derechos del Mar de 1982, fue la aprobación del **Protocolo para la Protección del Pacífico Sudeste contra la Contaminación proveniente de Fuentes Terrestres**, firmado en Quito, Ecuador, el 22 de julio de 1983. Entre los temas tratados por este convenio se encuentran las fuentes de contaminación, las obligaciones generales, prácticas y procedimientos, cooperaciones entre las partes, los programas de vigilancia ambiental, el intercambio de información, la cooperación científica y técnica y las medidas de sanción que serán impuestas a los transgresores.

En 1989, los estados miembros de la CPPS suscribieron el **Protocolo para la Protección del Pacífico Sudeste contra la Contaminación Radiactiva**, en Paipa, Colombia, el cual entró en vigencia en 1994. Este instrumento fue concebido a raíz de la creciente preocupación regional para prohibir los vertimientos y/o enterramiento de desechos radiactivos u otras sustancias en el mar y/o en el lecho marino. En él se establece la prohibición para verter este tipo de desechos y obliga a los Estados a adoptar medidas para que las actividades relacionadas con la radiactividad que se desarrollen bajo su jurisdicción, se realicen de manera tal que no causen perjuicios.

Además, en 1989, fue adoptado por la comunidad internacional el **Convenio Internacional para el Control de los Movimientos Transfronterizos de Desechos Peligrosos y su Eliminación (Convenio de Basilea 1989)**. Este tratado, a juicio del PNUMA, representa el primer paso en la definición de medidas de alcance global para reducir y controlar de una forma estricta el movimiento de desechos peligrosos y para asegurar que su disposición se realice de una forma ambiental, incluyendo el medio marino⁴⁶

Después de veinte años de haberse celebrado la Conferencia Estocolmo (1972), las Naciones Unidas vuelve a realizar otra conferencia, ahora en Río de Janeiro y esta vez con un objetivo diferente al de Estocolmo, esto es el mejoramiento del ambiente humano. Así, en Junio de 1992, se celebró **la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y Desarrollo (UNCED)** o

⁴⁶ Véase Informe de la Reunión de Expertos legales para analizar el Borrador del Protocolo sobre el Control en el pacífico Sudeste de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos peligrosos y su Eliminación. Quito, Ecuador, 26-28 octubre de 1992.

Cumbre de la Tierra, en el que participaron representantes de 178 Estados. Esta Conferencia, se destacó por la trascendencia de las materias ambientales y de desarrollo, lo cual permitió la suscripción de cinco documentos principales (Quarrie, 1992):

- La Declaración de Principios de Río
- La Convención sobre Cambio Climático
- La Convención sobre Biodiversidad
- La Agenda 21
- Un grupo de principios sobre bosques (Gabaldón, 1992)

En materia de prevención de la contaminación marina, la UNCED alcanzó una amplia convergencia de criterios respecto a la identificación de los problemas que aquejan los océanos y áreas costeras, así como de los principios que guiarán en el futuro una acción conjunta de los Estados e instituciones para enfrentar dichos desafíos. Son muchos los estudiosos que señalan que la UNCED dio un impulso político adicional a la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, acelerando el proceso que determinó su entrada en vigor el 16 de noviembre de 1994 (Artigas, 1994).

Por otro lado, la UNCED enfatiza la interdependencia existente entre las variables terrestres y marinas, destacando la necesidad de lidiar con las fuentes terrestres de contaminación marina dentro de un contexto de manejo integrado de las costas. En este contexto, esta Convención dio paso al desarrollo de distintos foros de discusión sobre asuntos costeros y oceánicos, tales como las problemáticas del manejo integrado de costas, islas y sus fuentes terrestres de contaminación, y el fortalecimiento de arreglos regionales para enfatizar la adecuada administración de las zonas costeras y oceánicas.

Tanto la Declaración de Principios de Río como los demás acuerdos surgidos de la UNCED, no constituyen en sí documentos vinculantes. Sin embargo, los Estados manifiestan la intención de formar parte del consenso internacional que se mueve en la dirección de una sociedad más sostenible (Cicin-Sain et al., 1993).

Burke (1993) es enfático al señalar que en la Agenda 21 se destacan dos lineamientos que son muy importantes para tener en cuenta en relación con el Plan de Acción para el Pacífico Sudeste (CPPS) y sus diversos convenios:

- La búsqueda de aproximaciones integrales a los aspectos del medio marino y su prevención contra la contaminación.
- La promoción de acciones precautorias para el manejo marítimo y costero.

Al comparar los acuerdos del CPPS con los principios enumerados en la Declaración de Río, se puede observar que las principales acciones de los Estados, organizaciones y otras entidades señaladas en dichos convenios, tratan sobre relaciones de cooperación e integración. Así, en la Declaración de Río, se hace hincapié en la integración y la cooperación que debe existir a todo nivel entre los Estados para conservar, proteger y restaurar la integridad del medio ambiente (Keating, 1993). Además, en la Agenda 21 se enfatiza la importancia de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar, de 1982, que provee la base normativa sostenible del medio marino y pesquero y sus recursos vivos.

Respecto a las recomendaciones de la UNCED para los Estados insulares en desarrollo, en Abril de 1974, la Asamblea General de las ONU acordó efectuar una conferencia global sobre desarrollo sostenible de los Estados-Islas, que sucedieron a dos conferencias regionales

efectuadas durante 1973, en Vanuatu, para los océanos Índico y Pacífico, y en Trinidad y Tobago, para los océanos Atlántico, Caribe y Mediterráneo.

Otras de las consecuencias directas de la UNCED, fue la **Convención para la Protección del Medio Marino en el Atlántico Noreste, de París (1992)**, el cual amplió el espectro de aplicaciones que habían sido establecidas en la Convención para la Prevención de la Contaminación Marina por Fuentes Terrestres o Convenio de París de 1974, adoptando el principio precautorio, el principio de "quien contamina paga" y los conceptos de las mejores técnicas a disposiciones y mejores prácticas ambientales, incluyendo la tecnología limpia (Hilf, 1995).

En la misma época, en Helsinki se desarrollaba la **Convención para la Protección del Medio Marino en el Mar Báltico**, la cual incorpora los principios de precaución, el mejor de mejor práctica ambiental y mejor tecnología disponible, y el principio de "quien contamina paga". Además, incluye una serie de obligaciones, de las cuales se destaca el deber de los Estados contratantes para efectuar los mejores esfuerzos para asegurar que la Implementación de la Convención no produzca contaminación transfronteriza en áreas fuera del Mar Báltico.

Dos años más tarde, en 1994, los dignatarios del continente se dieron cita en la **Cumbre de las Américas**, realizada en Miami, Florida, con el objeto de reconocer la necesidad de alcanzar un progreso real en el fortalecimiento de la democracia, fomentar el desarrollo, lograr la integración económica y el libre comercio, mejorar la vida de los pueblos y proteger el medio ambiente para las generaciones futuras a través del Plan de acción de la Cumbre de las Américas (Centro Peruano de Estudios Internacionales, 1994).

7.3 DEFINICIONES RELEVANTES PARA LA GESTIÓN DE LA COSTA

La **Zona Costera** es aquella franja de ancho variable, que resulta del contacto interactivo entre la naturaleza y las actividades humanas que se desarrollan en ámbitos que comparten la existencia o la influencia del mar. Su conocimiento, gestión y normativa son imprescindibles para establecer su mejor uso, logrando así mejorar la calidad de vida de las respectivas poblaciones.

El extraordinario auge que ha tenido el uso de la zona costera ha captado el interés por la formulación de modelos orientados a su ordenación y gestión. De hecho gran parte del sistema de las Naciones Unidas (FAO⁴⁷, UNESCO⁴⁸ y UNEP⁴⁹), el Banco Mundial y otras instituciones de la importancia de la OECD⁵⁰ y la Unión Europea, dedican notables esfuerzos a su investigación y divulgación. Del mismo modo, organizaciones no gubernamentales (ONG's) contribuyen de forma permanente con esta temática. Sólo por citar algunas, la IUCN⁵¹, la EUCC⁵², la CEN⁵³, se destacan por sus programas e iniciativas vinculadas a las áreas costeras. En consecuencia, se cuenta con el aval de instituciones gubernamentales y ONG's, que proporcionan un marco conceptual, métodos, técnicas, instrumentos y estrategias para la protección de la zona costera. Algunas particularidades de la zona costera se enumeran a continuación:

⁴⁷ Food and Agricultural Organization

⁴⁸ United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization

⁴⁹ United Nations Environment Programme

⁵⁰ Organization for Economic Cooperation and Development

⁵¹ International Union for Conservation of Nature and Natural Resources

⁵² European Union for Coastal Conservation

⁵³ Coastwatch-European Network

- Desde el punto de vista **físico-natural**, la zona costera es un área que alberga medios de distinta naturaleza (litosfera, hidrosfera salada y atmósfera) que interactúan en forma muy dinámica y compleja generando cambios biológicos, geomorfológicos y químicos en diferentes escalas temporales y espaciales. Ello es particularmente cierto en áreas marinas de alta productividad y gran diversidad biológica, las cuales son muy vulnerables.
- Desde el punto de vista de su **gestión y ordenamiento**, la zona costera es un espacio escaso y por lo mismo muy deseado debido, entre otros, a la existencia de recursos naturales, clima benigno, fertilidad en los suelos, convergencia de usos y actividades, concentración de los asentamientos humanos e infraestructuras y valor paisajístico.
- Desde el punto de vista de los **aspectos jurídicos y administrativos**, es preciso destacar el carácter público de la mayoría de las zonas costeras del mundo, como así mismo la convergencia de numerosos organismos públicos que actúan en ella tanto en lo referido a las escalas nacionales, regionales como sectoriales. De allí la diversidad en las fórmulas para su administración y gestión.

A partir de estas consideraciones, se han definido tres subsistemas bien diferenciados que coexisten en la zona costera: el físico-natural, el de su gestión y ordenamiento y el jurídico-administrativo. Aun cuando cada uno presenta posibilidades analíticas en diferentes niveles, es importante mantener una visión de conjunto. De esta forma, cada segmento o unidad litoral presenta un estado muy definido y diferenciado que deviene de la conjugación de las opciones que los tres subsistemas permiten. Así, el físico-natural puede oscilar entre diversos grados de conservación/degradación, el de gestión y ordenamiento entre unos niveles concretos del desarrollo, y el jurídico-administrativo entre su adecuación/inadecuación a las necesidades del sistema litoral en su conjunto.

Una primera complejidad que aparece al momento de estudiar la zona costera es precisamente, su definición y el establecimiento de sus límites. La bibliografía especializada presenta numerosas definiciones y área geográfica que cubre la zona costera. La mayoría de los autores coinciden, a pesar de esta complejidad, en el hecho de que el litoral es una zona de contacto y de transición entre la hidrosfera salada, la litosfera y la atmósfera en lo que a los fenómenos físico-naturales y actividades humanas se refiere. Aparece entonces de forma nítida el reconocimiento de un principio básico: la interacción entre medios diferenciados que albergan fenómenos naturales y humanos de distinto alcance. Algunas de las definiciones de **zona costera** más reconocidas son:

- *"Aquella parte de la tierra afectada por su proximidad al mar y aquella parte del océano afectada por su proximidad a la tierra"* (U. S. Commission on Science Engineering and Resources, 1969).
- *"Franja de mar adyacente a la línea de costa y una zona terrestre -no exactamente definida- hasta la cual las acciones e interacciones de ambos medios, el terrestre y el marino, son notables"* (Álvarez y Álvarez, 1984).
- *"Interface entre la tierra y el mar que se extiende hacia la parte continental y marítima dependiendo de los objetivos y necesidades"* (Clark, 1992).
- *"Área geográficamente delimitada. Su carácter distintivo proviene a partir de la suma de las interacciones de los ambientes costeros correspondientes a los sistemas estructurales natural y antrópico"* (Awosika et al., 1993).
- *"Banda relativamente estrecha de agua y tierra a lo largo del borde marino, que queda definida por unidades naturales y actividades humanas"* (Pappas, Post y Lundin. The World Bank, 1994).

- “Área de intensa actividad de intercambio dentro y entre procesos físicos, biológicos, sociales, culturales y económicos” (UNEP, 1995).
- “Zona de interface dinámica que implica el encuentro de la atmósfera, la tierra y el mar” (Viles y Spencer, 1995).

Algo similar ocurre en lo que a la terminología técnica se refiere. Así por ejemplo, la expresión **costa**, predomina sobre la expresión **litoral** evidenciando la influencia que ha ejercido y ejerce, el aparato científico de Estados Unidos y Canadá, así como los textos editados en inglés por organismos internacionales. En español, el carácter sinónimo entre costa y litoral, explica que ambos términos se utilicen indistintamente. Cabe, sin embargo, resaltar un matiz interesante que se observa en ciertos estudios. Mientras costa se vincula con preferencia a una franja relativamente estrecha situada a un lado y otro del contacto tierra mar, el término litoral se asocia a superficies más amplias, sobre todo en la dirección continental. En cualquier caso, se puede afirmar, de forma genérica, que zona costera, litoral y área litoral pretenden significar lo mismo en el contexto de la planificación y gestión de ella. Otras definiciones también importantes para la búsqueda de consensos entre especialistas y el público en general son:

- Aguas oceánicas (*ocean waters*): Es la parte marina más amplia y suele estar relacionada con las 200 millas náuticas de la Zona Económica Exclusiva. También son utilizadas referencias batimétricas como la isóbata 200 [m]. Se asocia, cuando es posible, a la parte oceánica de la plataforma continental. Es considerada un área de vital importancia para ciertos recursos naturales.
- Aguas litorales (*coastal waters*): Es una zona de enorme trascendencia para determinados ecosistemas marinos y fases vegetativas de algunas especies de valor comercial o crucial en la cadena trófica. También para el control de la calidad de las aguas. Aunque países como la República Popular de China definen su anchura en 3 millas náuticas desde la línea de las más bajas mareas, es usual identificarla con las 12 millas náuticas del Mar Territorial y las Aguas Interiores.
- Espacio intermareal (*littoral area*): Es el área de acción de las mareas y comprende las zonas de manglares, marismas y estuarios, donde existen ecosistemas o biotopos de vital importancia. Su amplitud depende de la marea, del viento y de la topografía de la zona, entre otros, y varía entre unos pocos metros y algunos kilómetros. Una característica singular que le suele acompañar es su naturaleza pública.
- Borde litoral (*coastline*): Es el contacto entre la tierra y el mar. Tiene sobre todo un valor georreferencial pues a partir de su definición se determinan diferentes zonas. La línea de pleamar viva equinoccial se utiliza con frecuencia para su delimitación.
- Frente litoral (*ocean front* o *shorelands area*): Es la parte terrestre entre el borde litoral y las tierras litorales que varía usualmente, entre 20 y 200 [m]. Siendo una franja relativamente estrecha, aparece delimitada por la distancia desde la cual se puede ver el mar, la existencia de una vía de comunicación o de determinados ecosistemas o una distancia arbitraria que frecuentemente aparece en las legislaciones nacionales o textos constitucionales. Juega un papel muy destacado para el acceso y propiedad públicos, para la seguridad respecto de amenazas naturales y para la protección de hábitats sensibles. Incluso, cuando no tiene carácter público, las limitaciones de la propiedad privada y sus servidumbres también confieren a dicha zona condiciones muy especiales.
- Tierras litorales (*coastal uplands*): Constituyen, desde un punto de vista cualitativo, la parte terrestre litoral por excelencia. Coincide con la que podría denominarse llanura costera, cuyos límites pueden definirse a partir de sistemas e estructuras falladas, rupturas de pendiente, topografía accidentada, llanuras de piedemonte o de sierras litorales. En varios

países la cifra de los 5 [km] es muy utilizada. Buena parte de las necesidades humanas se satisfacen en dicha zona.

- Tierras continentales (*inland*): Se trata de una superficie relativamente amplia en la que se desarrollan actividades que pueden incidir en el litoral. Así, es posible observar como en algunos planes y programas de gestión litoral son incorporadas, de entre ellas, las cuencas hidrográficas y las tierras de agricultura intensiva. La razón estriba en la transferencia de costes ambientales entre dicha área y la propiamente litoral. Los vertidos urbanos o industriales sin depurar, la contaminación difusa provocada por la utilización de fertilizantes, plaguicidas o fungicidas, son claros ejemplos.

Ilustración 128: Lancha de pesca industrial entrando en la bahía de San Vicente, Región del Biobío. Estas lanchas pescan entre el Mar Territorial y la Zona Económica Exclusiva.



Fuente: Elaboración propia.

7.4 LA GESTION DE LA COSTA

El objetivo de la gestión y el ordenamiento de la zona costera consisten en administrar el conjunto de sus recursos terrestres y acuáticos de un territorio. Sus límites deben extenderse tan lejos hacia alta mar y al interior de las tierras como lo exija la realización de los objetivos de dicha gestión.

El manejo o administración de las zonas costeras constituye una disciplina relativamente nueva. Por consiguiente, no ha habido acuerdo general acerca de uso apropiado o significado de términos y frases comunes. Algunos términos se usan indistintamente en la literatura para describir la actividad de manera una región, área, uso o recurso costero. Esto incluye conceptos tales

como manejo costero, manejo de recursos costeros, manejo de área costera, manejo y planeamiento de área costera, manejo de zonas costeras, manejo integrado de zona costera, manejo integrado de recursos costeros y manejo de recursos de zonas costeras. Para Sorensen *et al.* (1992), en general, estos términos no están cuidadosamente definidos o diferenciados el uno del otro, ni están bien definidos los “recursos” o “ambientes que se maneja o administran.

7.4.1 PARTICULARIDADES DEL TERRITORIO COSTERO

Para llevar a cabo una gestión exitosa, se debe de tener en consideración un conjunto de aspectos que normalmente se presentan al momento de emprenderla.

- Con muy pocas excepciones, las estructuras políticas-administrativas y los órganos establecidos para asegurar el funcionamiento de la sociedad, no están coordinados como sería deseable. En algunos casos son incluso incompatibles en materia de gestión costera. Conviene pues, como primera tarea, integrar a los diversos órganos administrativos de gestión de manera que se administren en conjunto todos los recursos.
- Un segundo aspecto tiene que ver con materias de orden jurídico. Sucede a menudo que las competencias de las autoridades locales se detienen en el espacio de playa descubierta con la marea baja. Para intervenir más allá de este límite, resulta necesario integrar, dentro del proceso de gestión, a la autoridad regional o nacional competente, dotándola además de herramientas legales y de una infraestructura técnica. Lo mismo ocurre con otras actividades que se desarrollan en aguas nacionales o territoriales, ya se trate del tráfico marítimo, perforaciones en el mar, explotación minera o explotación energética.
- Existen ámbitos que se rigen por acuerdos internacionales cuya aplicación y control requieren de la intervención de las autoridades nacionales. La prevención de la contaminación marina, la inmersión de desechos radioactivos en el mar y las convenciones relativas a los diferentes mares, constituyen ejemplos de ello. Aunque estas actividades estén situadas lejos de la costa, pueden producir efectos incluso en las aguas costeras y en el litoral. Por este motivo, resulta importante tenerlas en cuenta en las iniciativas de gestión de la zona costera.
- Por último, están aquellos aspectos relacionados con la influencia de las actividades terrestres en los recursos del mar. Existe sin duda alguna un nexo entre la gestión costera y los recursos biológicos en toda la franja marítima expuesta a la contaminación. Por consiguiente, la gestión de los recursos biológicos en las aguas costeras debe formar parte integrante de la gestión de zonas costeras.

De lo anterior, se hacen resaltar dos conclusiones: la primera, es que si se quiere asegurar una gestión eficaz que cubra la mayor parte de las relaciones economía-medio ambiente, importa definir los límites de la zona costera de manera muy amplia, y la segunda, es que resulta indispensable asegurar un buen nivel de integración entre las diferentes unidades administrativas locales y regionales o nacionales que deban intervenir en la gestión. En consecuencia, la intervención de los diferentes niveles sectoriales de la Administración Pública hace necesario un reparto de las responsabilidades y, por tanto, de la concurrencia administrativa en relación con ciertas competencias. Algunos apuntes de los conceptos administración y gestión de espacios litorales (Gubbay, 1992) hacen énfasis en tales cuestiones:

- “...el interés de la Gestión del Espacio Litoral suele girar en torno a la resolución de los conflictos generados entre los diferentes usos y la asignación de los más apropiados a los recursos costeros” (Sorensen y otros, 1984).

- “...el primer objetivo de la gestión del espacio litoral es proporcionar una serie de directrices a los responsables de las tomas de decisiones en el sentido de que la demanda de las numerosas actividades encuentren acomodo sin perturbarse unas a otras, al tiempo que se respetan el equilibrio del sistema natural y el uso y disfrute de los miembros de la comunidad” (Report of House Representatives Standing Committee on the Management of the Coastal Zone in Australia).
- “... La gestión del espacio litoral coordina las acciones de varios sectores económicos para asegurar que el avance de uno de ellos no repercuta negativamente en otros” (Al Gain y otros, 1987).
- “...proceso dinámico en el cual es desplegada y desarrollada la coordinación estratégica para la distribución de los recursos medioambientales, socioculturales e institucionales que permitan alcanzar la conservación y el uso múltiple sostenido de la zona costera” (Coastal Area Management & Planning Network, 1989).

La noción de Gestión del Espacio Litoral, se complementa con lo expresado por Hoozemans (1992), cuando afirma que ésta tiene como tareas “su planificación, diseño y construcción de infraestructuras, regulación, control, funcionamiento y mantenimiento”. Esta amplia visión se entiende mejor al considerar que la primera meta de la Gestión es conseguir los bienes y servicios necesarios de acuerdo con los objetivos marcados.

Objetivos tan genéricos, conducen a una considerable gama de posibilidades en la administración y gestión de la zona costera. Estas pueden traducirse en una normativa que proporcione el marco legal, un aparato político que asigne los recursos y especifique los objetivos y un cuerpo técnico de la Administración Pública cuya función sea ejecutar las políticas diseñadas. En resumen, puede afirmarse que la naturaleza compleja de la zona costera, desde los puntos de vista físico y humano, explica su complejidad administrativa y, en consecuencia, sus dificultades para su gestión.

Los inconvenientes surgidos para la gestión y manejo de un espacio tan singular provienen, en parte, por el elevado número de administraciones sectoriales (pesca, defensa, medio ambiente, obras públicas, minería, urbanismo, industria, agricultura) y de todas las escalas administrativas competentes, sean estas locales, metropolitana, provincial, regional, nacional, y supranacional. Los distintos enfoques, perspectivas, intereses y posibilidades de cada administración hacen realmente arduo i) coordinar la aplicación de normativas, ii) definir objetivos, criterios, estrategias y medidas de intervención y iii) asignar medios técnicos y recursos financieros. Tales razones explican el hecho de que el espacio litoral, a pesar de haber sido tratado intensamente en foros internacionales, sigue degradándose y permanezca a la fecha en muchos países, sin un sistema que permita su correcta gestión.

Conforme fue considerado en el Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile (Universidad de Chile, 2012), el marco legal que regula el uso del borde costero en Chile está constituido por una serie de Ministerios que participan, en mayor o menor medida, en la construcción de la estructura jurídica y política de esta área medio ambiental, entre los cuales se pueden considerar, entre otros, al Ministerio de Bienes Nacionales, al Ministerio de Obras Públicas, al Ministerio de Defensa Nacional, al Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, al Ministerio de Agricultura y al Ministerio Secretaría General de la Presidencia.

7.4.2 ESTRATEGIAS DE MANEJO Y GESTIÓN DE LA ZONA COSTERA

Para Sorensen *et.al* (1992)⁵⁴, casi todas las naciones en desarrollo han utilizado dos o más de las siguientes estrategias de manejo costero:

- Planeamiento económico nacional;
- Planeamiento sectorial amplio de usos o recursos costeros;
- Mares regionales;
- Planeamiento y regulación del uso del suelo a nivel nacional o provincial (estatal);
- Planes de área especial o planes regionales,
- Exclusión o restricción litoral;
- Protección de área crítica;
- Evaluación de impactos ambientales de propuesta de desarrollo costero;
- Lineamientos, guías y regulaciones obligatorias;
- Programas de adquisición;
- Atlas costero y bancos de datos.

Para los antes citados autores, las referidas estrategias no son mutuamente excluyentes, sino que se apoyan unas con otras, tal como lo ha utilizado Francia, el cual utiliza el planeamiento nacional o estatal de uso de suelo junto con campañas de adquisición de áreas naturales como estrategias principales.

Para Sorensen *et.al* (1992), las antes indicadas estrategias deben ser complementadas por el planeamiento económico nacional, la participación en el Programa de Mares Regionales (Chile se encuentra inserto en el Programa de Mares Regionales que es llevado a cabo por la Comisión del Pacífico Sur, CPPS), el planeamiento de áreas especiales, la exclusión litoral y la protección de áreas críticas. Los Estados Unidos de Norteamérica, por ejemplo, utiliza casi todas las estrategias en varios grados, con la excepción del planeamiento económico nacional y el programa de mares regionales.

De esta forma, el planeamiento económico nacional implica metas prescriptivas para cada sector de la economía, afectando la asignación de trabajo, la inversión de capital y el uso de suelo. Su objetivo principal es establecer un plan de largo plazo (por lo general a 5 años), con el propósito de establecer metas de producción en los sectores más importantes de la economía. De esta forma, la producción, como rasgo central de un plan económico, es usada para especificar el tamaño de la fuerza laboral, el tipo y la calidad de tierra necesaria para una eventual industria particular, y la cantidad de capital de inversión necesario para implementar el plan.

De acuerdo a Sorensen *et.al* (1992), estos planes económicos nacionales crean certidumbre sobre el frente costero y los terrenos adyacentes, necesarias para el desarrollo dentro de un período definido de tiempo, lo que evita propuestas y demandas aleatorias sobre los recursos costeros, fomentando además una mayor tiempo para alcanzar la integración con otros sectores y evitar impactos negativos.

⁵⁴ Véase página 53 del Libro "Arreglos Institucionales para Manejar Ambientes y Recursos Costeros", de Jens C. Sorensen, Scott T. McCreary y Aldo Brandani. Centro de Recursos Costeros de la Universidad de Rhode Island. 1992

Ilustración 129: Planificación y desarrollo del Borde Costero



Fuente: Gentileza de la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas (véase <http://www.ssffaa.cl/asuntos-maritimos/cnubc/planificacion-y-desarrollo-del-borde-costero>)

7.4.3 ACTORES RELEVANTES EN LA GESTIÓN DE LA ZONA COSTERA

Tal como fue expuesto en los capítulos anteriores, muchos son los actores sectoriales que participan en el manejo y gestión de la zona costera. Algunos otros actores que juegan un rol fundamental en la gestión de la zona costera en Chile, se presentan a continuación.

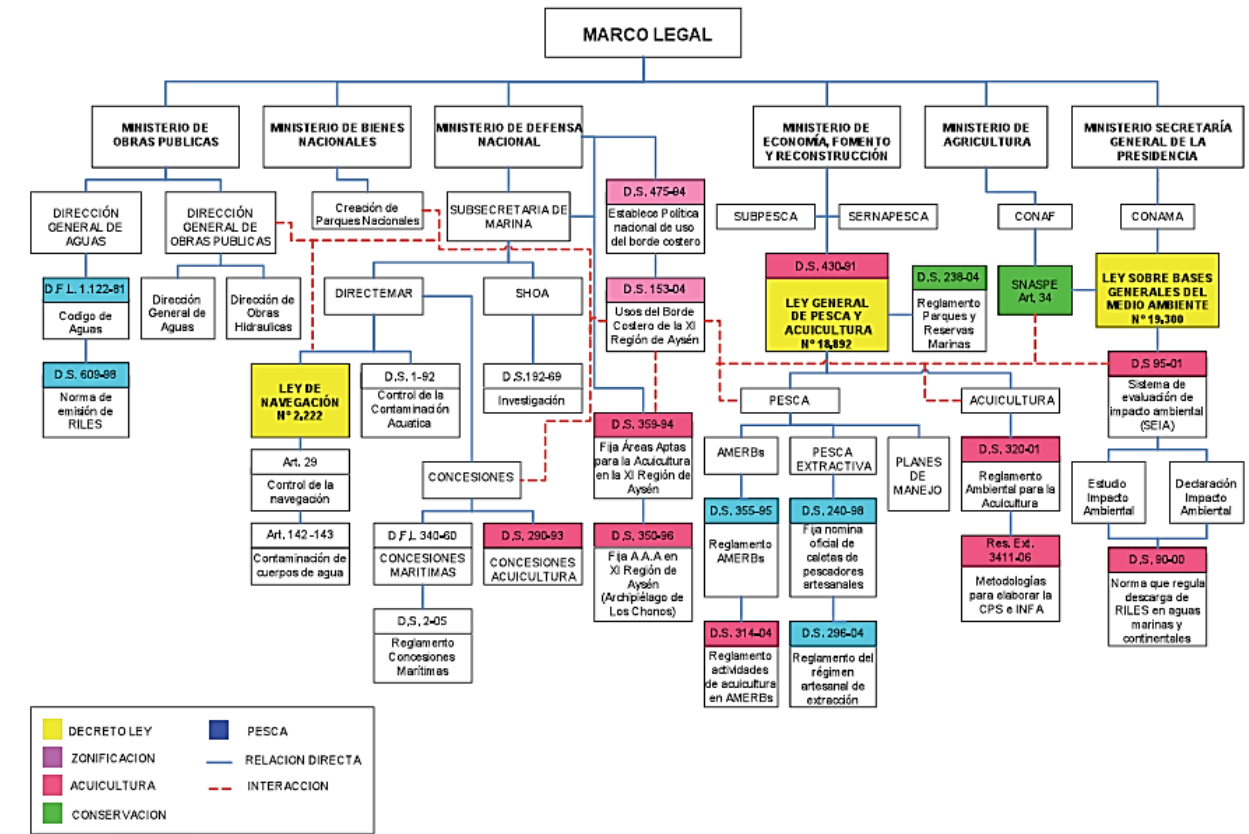
7.4.3.1 Ministerio de Medio Ambiente

El Ministerio de Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) y la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA) fueron creados a partir de la Ley N°20.417, publicada en el D.O. de fecha 20 de enero de 2010, la cual modificó la Ley N°19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente.

Además, normativa permitió incorporar en el inciso segundo del artículo 4° de la **Ley sobre Bases Generales del Medio Ambiente** (Ley N°19.300), el deber de la institucionalidad de propender la conservación de los ecosistemas naturales, incluyendo el marino, al establecer que

"los órganos del Estado, en el ejercicio de sus competencias ambientales y en la aplicación de los instrumentos de gestión ambiental, deberán propender por la adecuada conservación, desarrollo y fortalecimiento de la identidad, idiomas, instituciones y tradiciones sociales y culturales de los pueblos, comunidades y personas indígenas, de conformidad a lo señalado en la ley y en los convenios internacionales ratificados por Chile y que se encuentren vigentes".

Ilustración 130: Estructura del marco legal que regula el uso del borde costero en Chile, de acuerdo al Informe País 2012.



Fuente: Molinet et. al (2008) (véase: <http://www.fao.org/tempref/docrep/fao/011/i0444s/i0444s20.pdf>)

7.4.3.2 Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA)

En cuanto a la evaluación de los proyectos o actividades en el borde costero que son sometidos al SEIA, la Ley N°19.300 (modificada por la ley N°20.417) solicita la opinión del Gobierno Regional, el Municipio respectivo y la Autoridad Marítima competente, sobre la compatibilidad territorial del proyecto.

Las competencias del Ministerio del Medio Ambiente se pueden dividir en tres ámbitos:

- Políticas y regulaciones ambientales generales, incluyendo aquellas vinculadas a cuentas ambientales, biodiversidad y áreas protegidas.
- Políticas y regulaciones para la sustentabilidad.
- Políticas y regulaciones en materia de riesgo y medio ambiente.

El Ministerio aborda materias centrales para la gestión ambiental como la regulación ambiental, la información y economía ambiental, la educación, participación y gestión local, los recursos naturales y biodiversidad el cambio climático, el cumplimiento de convenios internacionales y, finalmente, la planificación y gestión.

7.4.3.3 Superintendencia de Medio Ambiente (SMA)

A la SMA le corresponde de forma exclusiva ejecutar, organizar y coordinar el seguimiento y fiscalización de las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCAs) de los proyectos que se han aprobado ambientalmente, incluyendo aquellos que operan en el medio marino o en su borde costero. Además, le compete ejecutar, organizar y coordinar las medidas de los Planes de Prevención y/o de Descontaminación Ambiental, del contenido de las Normas de Calidad Ambiental y Normas de Emisión, y de los Planes de Manejo, cuando corresponda, y de todos aquellos otros instrumentos de carácter ambiental que establezca la Ley. Para desarrollar estas labores, la SMA puede utilizar tres modalidades de fiscalización:

- A través de una modalidad directa, es decir, mediante sus propios funcionarios.
- A través de las facultades que poseen los distintos órganos de la administración del Estado con competencia ambiental.
- Mediante la acción de terceros, que están debidamente acreditados y autorizados por la SMA, tales como, entidades técnicas de fiscalización y entidades técnicas de certificación.

Asimismo, la SMA posee la rectoría técnica de la actividad de fiscalización ambiental, por cuanto debe establecer los criterios de fiscalización que deberán adoptar todos los organismos sectoriales que cumplan funciones de fiscalización ambiental para efectos de llevar a cabo sus labores.

7.4.3.4 Dirección General de Territorio Marítimo y de Marina Mercante (DIRECTEMAR)

Otro organismo que posee competencias en la gestión de los ecosistemas marinos, incluyendo el borde costero, es la DIRECTEMAR. Este organismo, perteneciente a la Armada de Chile, encuentra sus fundamentos jurídicos para proteger los ecosistemas marinos y el borde costero a partir de lo dispuesto en el artículo 5° de la Ley de Navegación, el cual expresa que

“la autoridad marítima corresponderá a la Dirección y, como tal, aplicará y fiscalizará el cumplimiento de esta ley, de los convenios internacionales y de las normas legales o reglamentarias relacionadas con sus funciones, con las preservación de la ecología en el mar y con la navegación en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional. La Dirección tendrá la representación oficial del Estado en asuntos o reuniones internacionales relativos a las materias profesionales y técnicas de que trata esta ley”.

Esta misma Ley establece un principio general en materia de contaminación acuática, cuya disposición ya era norma exigida desde el año 1941, conforme se consagró en el artículo 185° del Reglamento de Orden, Seguridad y Disciplina de las Naves y Litoral de la República, y cuyo texto señalaba:

“Artículo 185.- Se prohíbe arrojar lastre, escombros, basuras, derramar petróleo y sus derivados o residuos de los mismos, aguas de relaves de minerales u otras materias orgánicas nocivas o peligrosas de cualquier especie, en los puertos o en las aguas jurisdiccionales de la República, sin el consentimiento previo de la Autoridad Marítima respectiva, quien designará e todo caso, el lugar o forma como se procederá a efectuar alguna de dichas operaciones (...)”.

A dicha disposición, la Ley de Navegación, en cambio, quiso replantear de una manera más profunda el enfoque tradicional, agregándole el carácter absoluto a la citada prohibición.

Además, permitió especificar las actividades que serían sometidas a ella y los cuerpos de agua sujetos a su tutela, señalando en su artículo 142°:

“Artículo 142.- Se prohíbe absolutamente arrojar lastre, escombros, basuras, derramar petróleo o sus derivados o residuos, aguas de relaves de minerales u otras materias nocivas o peligrosas, de cualquier especie, que ocasionen daños o perjuicios en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional, en puertos, ríos y lagos (...)”

Cabe hacer presente, que este mismo principio general es reproducido fidedignamente en el Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática. Además, como cuerpo normativo de la Ley de Navegación, el Reglamento incorpora otras prohibiciones que se inspiraron en aquel dispuesto en el artículo 142, como i) la prohibición de transporte marítimo de sustancias nocivas o peligrosas que puedan ocasionar daños o perjuicios a las aguas sometidas a la jurisdicción nacional, ii) la prohibición de efectuar descargas de aguas sucias a toda nave o artefacto naval, y iii) la prohibición de introducir o descargar directa o indirectamente a las aguas sometidas a la jurisdicción nacional de cualquier materia, energía o sustancias nocivas o peligrosas desde fuentes terrestres. Este último representa uno permisos ambientales sectoriales que otorga la Autoridad Marítima a las actividades o proyectos sometidos al SEIA.

7.4.3.5 Autoridad Marítima

Orgánicamente, la Autoridad Marítima ejerce sus competencias ambientales a través de sus órganos operativos, los cuales son las Gobernaciones Marítimas y las Capitanías de Puerto, las cuales se encuentran distribuidas desde Arica hasta el territorio antártico.

Desde el punto de vista operativo, la Autoridad Marítima Nacional supervisa las actividades que se encuentran bajo su jurisdicción, mediante su Dirección de Intereses Marítimos (DIRINMAR), en donde se administran y se evalúan aquellos proyectos u operaciones que pueden afectar la calidad del medio acuático, incluyendo sus ecosistemas marinos y dulceacuícolas continentales, así como también, las concesiones marítimas otorgadas por el Ministerio de Defensa Nacional y las autorizaciones transitorias de ocupación del borde costero. DIRECTEMAR posee jurisdicción sobre aquellos ríos y lagos que son navegables por embarcaciones que posean sobre 100 toneladas de registro grueso.

7.4.3.6 Subsecretaría de Pesca y Acuicultura (SUBPESCA)

La SUBPESCA posee amplias atribuciones jurídicas destinadas a regular y administrar la actividad pesquera y de acuicultura nacional, a través de políticas, normas y medidas de administración, de acuerdo a un enfoque precautorio y ecosistémico que promueva la conservación y sustentabilidad de los recursos hidrobiológicos para el desarrollo productivo nacional. La SUBPESCA, que se encuentra bajo la supervisión del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, posee una amplia función reguladora de las actividades que inciden en los recursos hidrobiológicos, incluyendo, entre otras, las actividades pesqueras extractivas y de transformación, la acuicultura y cualquier proyecto que pueda afectar el ecosistema en donde se encuentren las especies y recursos hidrobiológicos.

7.4.3.7 Servicio Nacional de Pesca (SERNAPESCA)

SERNAPESCA es la institución dependiente del Ministerio de Economía, Fomento y Turismo, cuya misión es fiscalizar el cumplimiento de las normas pesqueras y de acuicultura, proveer servicios para facilitar su correcta ejecución y realizar una gestión sanitaria eficaz, a fin de contribuir a la sustentabilidad del sector y a la protección de los recursos hidrobiológicos y su medio ambiente. De esta forma, SERNAPESCA es el órgano fiscalizador de las normas pesqueras y de protección

de los recursos hidrobiológicos. SERNAPESCA y SUBPESCA fueron creadas por D.L. N° 2.442, del 29 de Diciembre de 1978, la cual modificó radicalmente la institucionalidad pública pesquera que existía hasta antes de esa fecha.

Posteriormente, como respuesta a las modificaciones de la Ley General de Pesca y Acuicultura, SERNAPESCA debió reestructurar su organización, con el objeto de hacer frente a los nuevos desafíos ambientales y las exigencias de un comercio internacional dinámico y globalizado. Actualmente, contribuye a la sustentabilidad del sector y a la protección de los recursos hidrobiológicos y su medio ambiente, a través de una fiscalización integral y gestión sanitaria que influye en el comportamiento sectorial promoviendo el cumplimiento de las normas. De esta forma, SERNAPESCA fiscaliza la pesca extractiva (artesanal e industrial), la pesca recreativa, la acuicultura, el comercio exterior de recursos hidrobiológicos, efectúa difusión de las normas pesqueras y de acuicultura, efectúa la vigilancia epidemiológica de manera oficial, efectúa vigilancia ambiental cuando se vean afectados los recursos hidrobiológicos y apoya a la SUBPESCA en la gestión normativa.

7.4.3.8 Superintendencia de Servicios Sanitarios (SISS)

La SISS es otro organismo de la administración del Estado que tiene competencias en la gestión ambiental del borde costero y de los ecosistemas marinos. Esta institución, la cual es funcionalmente descentralizada, con personalidad jurídica y patrimonio propio, está sujeta a la supervigilancia del Presidente de la República, a través del Ministerio de Obras Públicas. Sus funciones sustantivas, se enfocan al control de las empresas concesionarias sanitarias y, por consiguiente, en la gestión de los **Residuos Industriales Líquidos** (RILes).

La SISS posee competencias para proponer normas técnicas relativas al diseño, construcción y explotación de las descargas de los residuos industriales líquidos y velar por el cumplimiento por parte de los entes fiscalizadores. Asimismo, vela por el cumplimiento de disposiciones legales y reglamentarias, normas técnicas, instrucciones, órdenes y resoluciones que dicte relativas a la prestación de servicios sanitarios y descargas de los referidos residuos líquidos, entre otros, a los cuerpos de agua marinos.

Entre los cuerpos normativos, por cuyo cumplimiento la SISS se le encomienda velar, destaca especialmente la *Ley N° 3.133 de 1916*, sobre neutralización de los residuos provenientes de establecimientos industriales y sus Reglamentos. Al respecto, es jurídicamente correcto afirmar que la citada *Ley N° 3.133*, constituye el cuerpo normativo más antiguo en Chile (Herrera, 2002), que regula este tipo materia y que se mantuvo en ejercicio durante casi un siglo (hasta 1982), en cuyo artículo 1° dispone que

"Los establecimientos industriales, sean mineros, metalúrgicos, fabriles o de cualquier otras especie, no podrán vaciar en los acueductos, cauces artificiales o naturales, que conduzcan aguas o en vertientes, lagos, lagunas o depósitos, los residuos líquidos de su funcionamiento, que contengan sustancias nocivas a la bebida o al riego, sin previa neutralización o depuración de tales residuos por medio de un sistema adecuado".

7.5 ASPECTOS DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL

El ordenamiento de la zona costera debe considerar criterios coincidentes con las necesidades y objetivos de cualquier espacio, como por ejemplo el hacer compatibles los distintos intereses sociales y económicos de la población costera en relación con disponibilidades de los recursos y la conservación del espacio natural. Los criterios a tener en cuenta en todo proceso de planificación, se centran fundamentalmente en el concepto de **compatibilidad**. En efecto, los conflictos surgidos nacen

- de la falta de espacio terrestre y marítimo para determinar dos o más usos o actividades,
- de los intereses entre los propios habitantes del litoral o entre los de estos y los de otras regiones,
- entre los intereses de pocos individuos y de un colectivo mayor y
- la atención puesta para hacer compatible naturaleza y posibilidades de desarrollo económico.

Estos criterios constituyen los puntos de partida de una batería de objetivos entre los que se consideran como fundamentales, la conservación de ciertos espacios naturales, el fomento del desarrollo económico sostenido de la población, la localización adecuada de los distintos usos y actividades, la delimitación y protección del espacio público litoral y la coordinación funcional y de administración de los diferentes usos y actividades.

Estos objetivos no tienen por qué producirse de forma aislada, lo cual aparece recogido por diversos autores que tratan sobre los objetivos que deben primar en la ordenación de la zona costera o en el diseño del aparato normativo correspondiente. De hecho, la **Carta Europea del Litoral** del año 1981, establece una serie de objetivos en función de una estrategia global que pretende armonizar las exigencias del desarrollo y los imperativos de la protección a través de la ordenación. Sus recomendaciones plantean entre otros aspectos:

- Desarrollar una economía litoral competitiva y selectiva.
- Proteger y desarrollar las peculiaridades de cada zona litoral.
- Organizar el espacio litoral.
- Administrar el espacio litoral.
- Prevenir riesgos naturales.
- Controlar el turismo.
- Informar ampliamente a los usuarios.
- Desarrollar la investigación científica.
- Armonizar el derecho.
- Desarrollar la cooperación internacional.

Ilustración 131: Puerto de Guayacán, donde la Compañía de Aceros del Pacífico CAP exporta hierro. En el primer plano la caleta de Guayacán, donde subsisten pescadores y buzos mariscadores. Esta imagen es un ejemplo de usos antagonistas en la costa.



Fuente: Elaboración propia.

Desde el punto de vista normativa nacional y conforme fue señalado en el Informe País del año 2012 (Universidad de Chile, 2013), varias son las normas que regulan el uso del borde costero, algunas de larga data como el D.F.L. N° 340, Ley sobre Concesiones Marinas, promulgado en abril de 1960. Sin embargo, este tema junto con el desarrollo acelerado del país en las últimas décadas se ha transformado en algo complejo, tanto en sus aspectos políticos como legales. Por eso en los últimos años ha sido necesario hacer varios esfuerzos para producir un ordenamiento de los procedimientos facilitando la participación ciudadana. Como resultado de este esfuerzo se ha generado una **Política Nacional de Uso del Borde Costero del Litoral de la República** (PNUBC), promulgada por D.S. (M) N° 475, del 14 de diciembre de 1994. Esta política, mantiene una serie de principios que hacen considerar la actividad en torno al borde costero como Política de Estado, Nacional, Multidisciplinaria y Sistémica.

Asimismo, el mismo Informe País 2012 afirma que las principales normas legales que regulan el uso del borde costero son los siguientes:

- El D.S. N°609, de 24 de enero de 1979, del Ministerio de Tierras y Colonización, el cual fija las normas para establecer los deslindes de los bienes nacionales de uso público que constituyen los cauces de ríos, lagos y esteros.

- El D.S. N°660 del 14 de junio de 1988, del Ministerio de Defensa Nacional, el cual sustituye Reglamento sobre Concesiones Marítimas, fijado por el D.S. (M) N° 223 de 1968.
- La Ley N°18.362, publicada en el D.O. de fecha 27 de diciembre de 1984, el cual creó el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado.
- La Ley N°18.892, Ley General de Pesca y Acuicultura,
- El D.S.(M) N°475 DE 1994, el cual establece la Política Nacional de Uso del borde costero del litoral de la República y crea la Comisión Nacional respectiva.
- La Orden Ministerial N°2, del Ministerio de Defensa Nacional, del 15 de enero de 1998, el cual instruye sobre prohibición de ingreso y tránsito de vehículos en toda la costa del litoral de la República, sus playas, terrenos de playa, en ríos y lagos y demás bienes nacionales de competencia del indicado Ministerio.
- Los D.S. N°11 y N°12, ambos del Ministerio de Defensa Nacional, del 15 de diciembre de 1998, las cuales fijan las nóminas oficiales de ríos y lagos navegables por buques de más de cien toneladas de registro grueso.
- La Ley N° 9.931, publicada en el D.O. de fecha 18 de marzo de 2004, la cual establece beneficios a concesionarios y ocupantes del Borde Costero de la Isla Robinson Crusoe de la comuna de Juan Fernández.
- El D.S. N°240, del Ministerio de Defensa Nacional, publicado en el D.O. de fecha 24 de octubre de 1998, el cual fija la Nómina Oficial de Caletas de Pescadores Artesanales, cuyo texto fue modificado por el D.S. N° 337 de 2005, del mismo ministerio.
- La Ley N° 20.062, publicado en el D.O. de fecha 29 de octubre de 2005, el cual regulariza la situación de los ocupantes irregulares del borde costero de los sectores que indica, e introduce modificaciones al D.L. N° 1.939 de 1977.
- La Ley N° 20.249, publicado en el D.O. de fecha 18 de febrero de 2008, el cual crea el Espacio Costero Marino de los Pueblos Originarios.

Ilustración 132: Caleta Estaquilla, Región de los Ríos.



Fuente: Elaboración propia.

No obstante lo expuesto precedentemente, el listado antes señalado no prevé en los siguientes alcances:

- Que, el D.S. N°660 del 14 de junio de 1988, del Ministerio de Defensa Nacional, fue sustituido por el actual reglamento, promulgado por el D.S.N°9, del 17 de marzo del 2018.
- Que, la Ley N°18.362, el cual creó el Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado, fue modificada por la Ley N°20.417, que modificó a su vez la Ley N°19.300, sobre Base Generales del Medio Ambiente, estableciendo que “La administración y supervisión del Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado corresponderá al Servicio de Biodiversidad y Áreas Protegidas”.
- Que, la misma Ley N°20.417, también modificó la Ley General de Pesca y Acuicultura (LGPA), en términos que le transfirió al Ministerio del Medio Ambiente la facultad de declarar los Parques y Reservas Marinos, el cual originalmente estaba bajo competencia del Ministerio de Economía, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura.

Existen además otros instrumentos jurídicos que participan en la gestión ambiental del borde costero, tales como:

- La **Constitución Política de la República**, que asegura a todas las personas el derecho a vivir en un medio ambiente libre de contaminación; disponiendo para ello, como deber del Estado velar para que este derecho no sea afectado y tutelar la preservación de la

naturaleza. Asimismo, faculta a la ley para establecer restricciones específicas al ejercicio de determinados derechos o libertades para proteger el medio ambiente.

- La **Ley N° 19.300, sobre Base Generales del Medio Ambiente**, modificada por la Ley N°20.417, la que estableció las regulaciones básicas en dos de los principales elementos de la gestión ambiental: los instrumentos de la política ambiental nacional y el modelo de nuestra actual institucionalidad ambiental. De esta forma, determinó que los instrumentos de política regulados por esta Ley son, fundamentalmente,
 - El Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental
 - Las normas de calidad ambiental
 - Las normas de emisión
 - Materias que dicen relación con planes de prevención y de descontaminación.

En lo concerniente al modelo de institucionalidad, la ley define al funcionamiento del Ministerio de Medio Ambiente, el Servicio de Evaluación Ambiental y la Superintendencia de Medio Ambiente

La ley, además, modificó una serie de otras normas legales como la Ley General de Pesca y Acuicultura, la Ley N°17.288 sobre Monumentos Nacionales, el D.L. ley N°1.939 sobre Adquisición, Administración y Disposición de Bienes del Estado, la Ley N°18.695 Orgánica Constitucional de Municipalidades, el D.F.L. N°294 que establecía la funciones y estructura del Ministerio de Agricultura, en la siguiente oración *"la conservación, protección y acrecentamiento de los recursos naturales renovables"* por *"la protección de los recursos naturales renovables del ámbito silvo-agropecuario, sin perjuicio de las atribuciones del Ministerio del Medio Ambiente"*, entre otros.

- En asociación a esta Ley se encuentra el **Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental**, publicado en el D.O. de fecha 12 de agosto de 2013, el cual obliga a los proyectos o actividades susceptibles de causar impacto ambiental, listados en su artículo 3°, a ingresar al referido SEIA, con el objeto de analizar su eventual impacto al medio ambiente.
- la **Ley de Navegación**, promulgada por el D.L. N°2.222, en cuyo artículo 5° consagró las facultades ambientales y de protección de la ecología del mar de la DIRECTEMAR, al expresa que *"Art. 5° La autoridad marítima corresponderá a la Dirección y, como tal, aplicará y fiscalizará el cumplimiento de esta ley, de los convenios internacionales y de las normas legales o reglamentarias relacionadas con sus funciones, con la preservación de la ecología en el mar y con la navegación en las aguas sometidas a la jurisdicción nacional"*.
- El **Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática**, promulgado con fecha 6 de enero de 1992, el cual establece las condiciones por medio del cual las fuentes se instalen en el borde costero, deben actuar sin ocasionar contaminación de las aguas.

Asociados al Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática, se encuentran las siguientes Directivas y Circulares de la DIRECTEMAR, que regulan las materias de gestión ambiental en el medio ambiente marino:

- La Circular DGTM A-53/004 del 3 de diciembre 2012, que modificó los procedimientos y requerimientos necesarios para determinar el ancho de la **Zona de Protección Litoral (ZPL)** para aquellos proyectos que consideran descargar residuos industriales líquidos a cuerpos de agua marinos mediante emisarios submarinos.

- La Circular DGTM A-52/002 del 09 de marzo de 2007, el cual establece procedimientos para dar cumplimiento a normas para prevenir la contaminación por hidrocarburos y otras sustancias nocivas desde buques que operen en la zona antártica, conforme al Convenio MARPOL 73/78.
- La Circular DGTM A-51/004, del 13 de diciembre de 2007, que dispuso las exigencias técnicas ambientales de las prescripciones operativas para la aprobación de sistemas de tratamiento de aguas sucias en buques y artefactos navales, que lo requieran de conformidad con lo dispuesto en Título II, Capítulo 5°, del Reglamento para el Control de la Contaminación Acuática.
- La Circular DGTM A-53/002, del 27 de enero de 2007, que establece el procedimiento para la confección y presentación de Planes de Emergencia para combatir la contaminación ante derrames de hidrocarburos y material mínimo de respuesta, para naves que enarbolan el pabellón chileno.
- La Circular DGTM A-53/003, del 27 de enero de 2007, que establece el procedimiento para la confección y presentación de Planes de Contingencia de respuesta, contra la contaminación de las aguas por hidrocarburos u otras sustancias nocivas líquidas contaminantes o, que sean susceptibles de contaminar, material mínimo de respuesta y lineamientos para empresas dedicadas a las tareas de contención, recuperación, limpieza y disposición final de los residuos recuperados.
- La Circular DGTM A-51/004, del 24 de septiembre de 2003, que dispone de los procedimientos a seguir por las Gobernaciones Marítimas y Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático, para el cumplimiento de las disposiciones establecidas en la Ley, respecto de la tramitación de los informes de Estudios de Impacto Ambiental (EIA) o Declaraciones de Impacto Ambiental (DIA) al interior de la Autoridad Marítima, sin y con SEIA electrónico.
- Las Directrices para la evaluación ambiental de proyectos industriales de desalación en jurisdicción de la Autoridad Marítima, publicadas por la DIRECTEMAR, mediante la DIRINMAR, en el mes de noviembre de 2015.

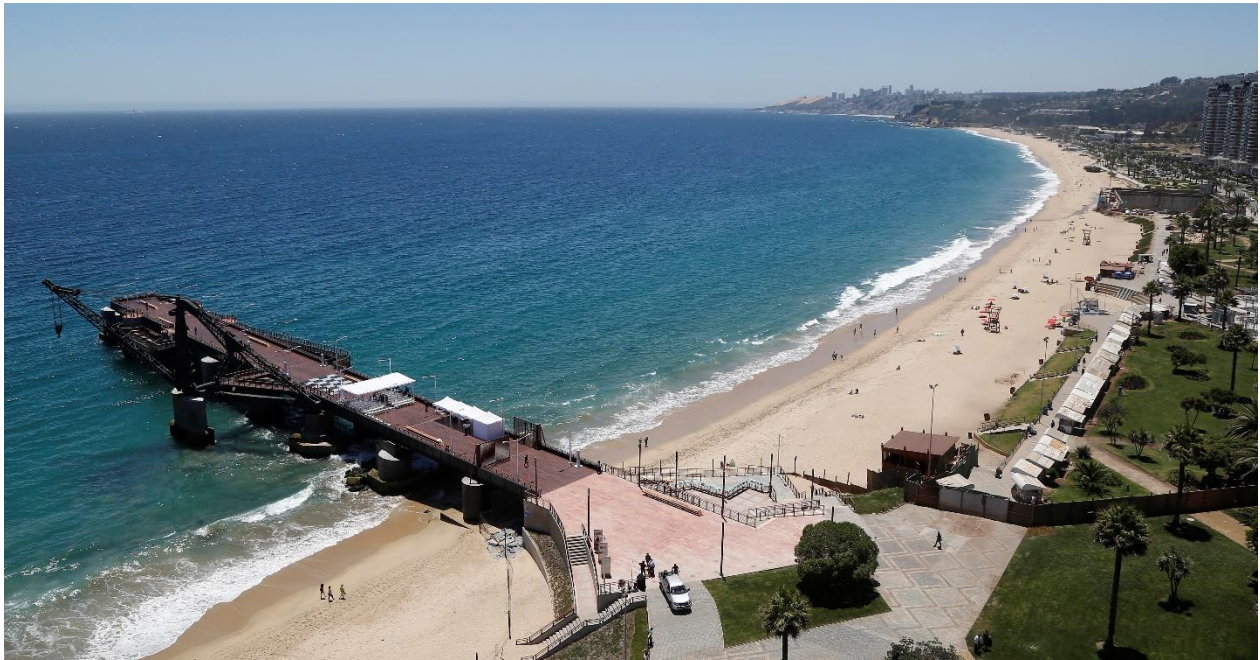
Cabe mencionar que el Reglamento sobre Concesiones Marítima, cuya modificación entró en vigencia el 1° de septiembre de 2015, establece nuevas definiciones a aquellos términos de usos cotidianos en el ámbito costero⁵⁵. El cuerpo normativo ha permitido además vincular el proceso administrativo sectorial de otorgamiento o modificación del uso territorial del área costera con el proceso de Evaluación de Impacto Ambiental, establecido en el ya individualizado Reglamento de Evaluación de Impacto Ambiental (RSEIA). El otorgamiento del uso territorial se efectúa mediante permisos o autorizaciones de carácter transitorios, otorgados por la DIRECTEMAR, o mediante concesiones marítimas, mayores o menores, otorgadas por el Ministerio de Defensa Nacional, a través de la Subsecretaría para las Fuerzas Armadas.

En definitiva, para algunos investigadores (Belisario, Arenas y Guijón, 2008), el borde costero, tal como está concebido en la legislación chilena, tiene una extensión muy reducida sujeta a regulación específica, lo que no permite abarcar de una manera adecuada la planificación de lo que se debería considerar una zona costera. Para estos estudiosos, su adecuada delimitación debiera incorporarse criterios ambientales y funcionales y no solo administrativos, lo cual permitiría determinar para cada tramo del litoral, la extensión más adecuada para un manejo más satisfactorio.

⁵⁵ Tales como atracadero, chaza, dársena, muelle mecanizado, muelle semi mecanizado, puerto, terminal o recinto portuario, rampa, rampa de conectividad, rejera, rompeolas, entre otras.

De esta forma, la institucionalidad para el uso del borde costero, no obedece a una política que permita su regulación permanente e integral, ya que por ahora parece obedecer más a la finalidad, no despreciable pero restringida, de realizar una gestión eficiente y sustentable de un ámbito territorialmente reducido, conforme a criterios recomendados, pero no obligatorios para los agentes involucrados. Este enfoque restringido de planificación costera, se adapta a la regulación sectorial del uso de recursos del litoral, pero no es suficiente a la escala necesaria para el ordenamiento territorial de la zona costera, puesto que la regulación existente debe considerar en su planificación del borde costero, adaptaciones a los requerimientos ambientales y de conservación de los ecosistemas marinos.

Ilustración 133: Muelle Vergara, en Viña del Mar.



Fuente: Elaboración propia.

8 BIBLIOGRAFIA

Albrecht, F. & Shaffer, G. (2016). Regional Sea-Level Change along the Chilean Coast in the 21st century. *Journal of Coastal Research*, 32(6): 1322 – 1332. Doi:10.2112/JCOASTRES-D-15-00192.1.

Amaya, O. D. (2001). *Lecturas sobre Derecho del Medio Ambiente*. Tomo I.

Andrade, B., Arenas, F., y Guijón, R. (2008). Revisión crítica del marco institucional y legal chileno de ordenamiento territorial: el caso de la zona costera. *Revista de Geografía Norte Grande*, 41: 23-48 (2008).

Armijo, R., Rauld, R., Thiele, R., Vargas, G., Campos, J., Lacassin, R., y Kausel, E. (2010). The West Andean thrust, the San Ramon fault, and the seismic hazard for Santiago, Chile. *Tectonics*, 29(2).

Artigas, C. (1994). El Desarrollo Sustentable de las Zonas Costeras y Marinas: de la Parte XII de la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar al Capítulo 17 del Programa 21, en Segunda Reunión Internacional de Expertos Legales sobre América Latina y la Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar. Comisión Permanente del Pacífico Sur: Lima.

Barragan, J. M., Castro, C. y Alvarado, C. (2004). La zona costera chilena caracterización geográfica y estado de la gestión. *Rev. Geografía PUCV Valparaíso* N°35.

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contreras, C., Winckler, P. y Molina, M. (2016). *Atlas de Oleaje de Chile*. Primera edición. ISBN: 978-956-368-194-9. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso.

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H. and Winckler, P. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling* 116 (2017) 16–32.

Beyá, J. y Winckler, P. (2013). Inundaciones Costeras, Más Allá de los Tsunamis. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*. Volumen 125, Número 2, pp. 63-81. (Incluido en *Revista Chilena de Ingeniería* N°469).

Beyerlin, U. (1995). New developments in the protection of the marine environment: Potential effects of the Rio process. *Heidelberg Journal of International Law*, editado por Verlag W. Kohlhammer.

Bird, F. (1985). *Coast*. Cambridge. Massachusetts Institute of Technology 1985, 246 pag.

Bravo, R., Díaz, H., Herrera, M. y López E. (2017). Ecosistemas Marinos y del Borde Costero. En el Informe País, Estado del Medio Ambiente en Chile, Comparación 1999-2015. Instituto de Asuntos Públicos, Universidad de Chile. 283-390.

Bruun, P. (1968). Beach erosion and coastal protection. In Fairbridge, R.W. ed. *The Encyclopedia of Geomorphology*. New York, Reinhold Boob Corp., p. 68-70.

Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). 2001. Cruise Report SO 161-5, Spoc, Valparaíso.

Burke, W.T. (1993). UNCED and the Oceans, en *Marine Policy*. Vol. 17 N°6.

CAMPORT (2017). *Memoria Anual* N°73. Cámara Marítima y Portuaria de Chile.

Campos-Caba, R. (2016). *Análisis de Marejadas Históricas y Recientes en la Costa de Chile*. Valparaíso. Universidad de Valparaíso. Escuela de Ingeniería Escuela de Ingeniería Oceánica.

Carey, A. E., Oliver, F. W. (1981). Tidal lands; a study of shore problems. Glasgow, Blackie and Sons, 284 p.

Carrillo, J. (1992). Curso de Derecho Internacional Público. Introducción a su Estructura, Dinámica y Funciones. Ed. Tecnos: Madrid.

Carvajal, M., Contreras-López, M., Winckler, P. and Sepúlveda, I. (2017). Meteotsunamis Occurring Along the Southwest Coast of South America During an Intense Storm. Pure and Applied Geophysics. doi:10.1007/s00024-017-1584-0.

Castilla, J.C. (1988). Earthquake-caused coastal uplift and its effects on rocky intertidal kelp communities. Science 242:440-443

Castro, C. Morales, E. (2006). La zona Costera Medio Natural y Ordenación Integrada. Serie Geolibros PUC. 210 pág.

Centro Peruano de Estudios Internacionales (1994). El Sistema Internacional en sus Textos. Tomo III.. Lima. Plan de Acción de la Cumbre de las Américas. En Análisis Internacional 8: 126-143

CGG (2013), Marco estratégico para la adaptación de la infraestructura al cambio climático. 156 pág.

Charney, J. (1994). The Marine Environment and the 1982 United Nations Convention on the Law of the Sea, in the International Lawyer, Vol. 24, N°4.

Church, J.A., P.U. Clark, A. Cazenave, J.M. Gregory, S. Jevrejeva, A. Levermann, M.A. Merrifield, G.A. Milne, R.S. Nerem, P.D. Nunn, A.J. Payne, W.T. Pfeffer, D. Stammer and A.S. Unnikrishnan, (2013): Sea Level Change. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

Cicin-Sain, B., and Knecht, R.W. (1993). Implications of the Earth Summit and Coastal Governance, en "Ocean Development and International Law, Vol. 24, N°4.

CPPS. (1992). Informe de la Reunión de Expertos legales para analizar el Borrador del Protocolo sobre el Control en el pacífico Sudeste de los Movimientos Transfronterizos de los Desechos peligrosos y su Eliminación. Quito, Ecuador, 26-28 octubre de 1992.

Davis, T.J., Blasco, D. and Carbonell, M. (1996). Manual de la Convención de Ramsar. Edit. Por la Oficina de la Convención de Ramsar. Ministerios de Medio Ambiente, España.

EMDAT (2017). The International Disaster Database, Centre for Research on the Epidemiology of Disasters, School of Public Health, Université Catholique de Louvain. Available at: www.emdat.be (Accessed 14 March 2017)

Fariña, J. M. y Camaño, A. (Eds.). (2012). Humedales costeros de Chile: Aportes científicos a su gestión sustentable. Ediciones Universidad Católica de Chile.

Ferrero, E. (1987). Evolución del Derecho del Mar. Panorama sobre el Derecho del Mar, editado por la Marina de Guerra del Perú. Lima.

Gabaldón, A. (1992). Perspectivas de la Conferencia de las Naciones Unidas sobre Medio Ambiente y el Desarrollo", en El Perú, el Medio Ambiente y el Desarrollo. Editado por Eduardo Ferrero Costa. Centro Peruano de Estudios Internacionales: Lima.

García, R. (2009). Evaluación del potencial de la energía originada por corrientes de marea para generación en sistemas aislados. Memoria de titulación Ingeniero Civil Universidad Técnica Federico Santa María.

GIOC (2002). Documentos Temáticos. Regeneración de playas. Universidad de Cantabria.

Guerra, M., Cienfuegos, R., Thomson, J., and Suarez, L. (2017). Tidal energy resource characterization in Chacao Channel, Chile. *International journal of marine energy*, 20, 1-16.

Herrera, M. (2002). El Desarrollo Internacional del Derecho Ambiental Marítimo: sus Orígenes hasta la Cumbre de la Tierra. En: *Lecturas sobre Derecho del Medio Ambiente*. Ed. Universidad Externado de Colombia, pp. 399.

Herrera, M. (2002). El Problema de los Residuos Líquidos Urbanos en Chile: Aspectos Jurídicos y Científico-Técnicos que Influyen en su Solución y Control. En *Libro de Resumen de las VI Jornadas de Derecho del Medio Ambiente*. Universidad Externado de Colombia, Bogotá, Colombia.

Hilf, J. (1995). The Convention for the Protection of Marine Environment of the North East Atlantic - New Approaches to an Old Problem?, en *Heidelberg Journal of International Law*, editado por Verlag. W. Kohlhammer.

Hoozemans, F. M. (1992). "Introduction to the coastal system". *Delf Netherlands*, 12: 76-189.

Inman, D, and Sheldon, J. (1965). *The Beach: A river of sand*. AGI-EBF Earth Sciences Series. Encyclopaedia Britannica Films. www.youtube.com/watch?v=FqT1g2riQ30.

Keating, M. (1993). *The Earth Summit's Agenda for Change a Plain Language Version of agenda 21 and the other Rio Agreements*. Center for Our Common Future: New York.

Ley, C. y Vidal, C. (2007). *Manual de restauración de dunas costeras*. Ministerio del Medio Ambiente, España.

Marquet, P. A., Abades, S. y Barría, I. (2012). Distribución y conservación de humedales costeros: una perspectiva geográfica. *Humedales costeros de Chile. Aportes científicos a su gestión sustentable*. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago de Chile, 2-19.

Martínez, C., Contreras-López, M., Winckler, P., Hidalgo, H., Godoy, E. y Agredano, R. (2018). Coastal erosion in central Chile: A new hazard?, *Ocean & Coastal Management*, 156: 141-155.

McGranahan, G., Balk, D., and Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and urbanization*, 19(1), 17-37.

MOP (2013). *Guía de diseño, construcción, operación y conservación de obras marítimas y costeras Volumen 3: Construcción*.

Niering, R. (1985). *Wetlands. The audubon society nature guides*. Alfred A. Knopf Inc. 638 pág.

Ossa, M. (1964). El nuevo Puerto de Arica y el empleo de tetrápodos como recubrimiento en sus obras de protección. *Revista del IDIEM*. Vol. 3, No. 2.

Puertos de Estado (2012). ROM 2.0-11. Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre (Tomo I).

Puertos de Estado (2009). ROM 2.0-11. Recomendaciones del diseño y ejecución de las obras de abrigo.

Puertos de Estado (2005). ROM 0.5-05. Recomendaciones geotécnicas para obras marítimas y portuarias.

Puertos de Estado (2008). Guía de buenas prácticas para la ejecución de obras marítimas.

Quarrie, J. (Ed). (1992). Earth Summit 1992. The United Nations Conference on Environment and Development, Río de Janeiro 1992. The Regency Press Corporation: London.

RAMSAR, C. D. (1971). Convención relativa a los humedales de importancia internacional especialmente como hábitat de aves acuáticas. Ramsar, 2, 1971.

Reynolds, O. (1883). An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water shall be direct or sinuous, and of the law of resistance in parallel channels. 35(224-226):84-99.

Salles, P. y Silva, R. (2004). Cap. 13. Infraestructura de protección costera en Manejo costero en México. Rivera, E.; Villalobos, G., Azuz, I y Rosado, F. (eds). Universidad Autónoma de Campeche, SEMARNAT, CETYS-Universidad, Universidad de Quintana Roo. 654 p.

SEP (2006). Modernización portuaria en Chile. Bitácora 1998-2005.

Universidad de Chile (2013). Informe País. Estado del Medio Ambiente en Chile 2012. Centro de Análisis de Políticas Públicas, Instituto de Asuntos Públicos, Universidad de Chile. 296 págs.

Uribe, C. (1989). Regulación jurídica de la Protección del Medio Ambiente Marino contra la Contaminación. Lima.

USACE (2002). Types and functions of coastal structures. Part VI, Ch.2. Coastal Engineering Manual. Coastal Engineering Research Center.

Valenzuela, A. (1974). Ecología y Educación (reflexiones sobre la necesidad de inspirar las labores educacionales en la perspectiva ecológica del Informe fauré de la UNESCO).

Valenzuela, R. (1976). Contaminación Marina y Derecho Nacional. Ediciones Universitarias de Valparaíso.

Van Dyke, J. (1993). International Governance and Stewardship of the marine Environment from Land-based Activities. Intergovernmental Conference to Adopt a Global Programme of Action for the Protection of the Marine Environment from Land-based Activities: New York.

Vargas, G., Farías, M., Carretier, S., Tassara, A., Baize, S., & Melnick, D. (2011). Coastal uplift and tsunami effects associated to the 2010 Mw8. 8 Maule earthquake in Central Chile. *Andean Geology*, 38(1).

Vergara, M. (2011). Zonas y procesos costeros, Instituto Politécnico Nacional, México, 362 p.

Winckler, P., Contreras-López, M., Campos-Caba, R., Beya, J. y Molina, M. (2017). El temporal del 8 de agosto de 2015 en las regiones de Valparaíso y Coquimbo, Chile Central. *Latin American Journal of Aquatic Research*. 45(4): 622-648.

Winckler, P., Contreras-López, M., Castilla, J. C.. (en elaboración). El cambio climático en el océano y en la zona costera y el océano de Chile. En "El cambio climático en Chile" (título tentativo). Eds. Vicuña et al. Ediciones UC.

Witek, P. P. and Czechowski, L. (2015). Dynamical modelling of river deltas on Titan and Earth. *Planetary and Space Science*, 105, 65-79.

Lecturas complementarias

Das, M, N. (1972) Suspended sediment and longshore sediment transport data review. In American Society of Civil Engineers. 13th Conference on Coastal Engineering. New York, ASCE. p 1027-1048.

Davies, J. LA (1964). Morphogenic approach to world shorelines. Zeischrift für Geomorphologie. (Stuttgart) 8: 27-42.

Edwards, N. 1997. On the resource evaluation of marine gas hydrate deposits using the sea-floor transient electric dipole-dipole method, Geophysics, 62. Pág. 63-74.

EICO (2009). Evaluación del potencial de energía de corrientes de marea y oleaje entre las IV y X regiones de Chile. Escuela de Ingeniería Oceánica, Universidad de Valparaíso.

Fairbridge, R.W. Beach. The Encyclopedia of Geomorphology. New York, Reinhold Book Corp., 1968, p 62-68.

Ferrero, E. (1987). Evolución del Derecho del Mar. Panorama sobre el Derecho del Mar, editado por la Marina de Guerra del Perú. Lima.

Gutman, A.I. "Low cost shore-line protection in Massachusetts" (MIT Sea Grant report, MITSG, 79-19J). In American Society of Civil Engineers. Coastal structure 79. New York, ASCE, 1979. v 1, p. 373-387.

Herrera, M. (1997). Consideraciones para una Eficiente Estrategia de Conservación. Boletín Ambiental, Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático. DIRECTEMAR. pp. 11.

Herrera, M. (2002). El Problema de los Residuos Líquidos Urbanos en Chile: Aspectos Jurídicos y Científico-Técnicos que Influyen en su Solución y Control. En Libro de Resumen de las VI Jornadas de Derecho del Medio Ambiente. Universidad Externado de Colombia, Bogotá, Colombia.

Herrera, M. (2003). El Régimen de Responsabilidad Civil por Daño Ambiental en Chile, y su Aplicación en la Contaminación por Hidrocarburos y otras Sustancias. En: Tomo IV Lecturas sobre Derecho del Medio Ambiente. Ed. Universidad Externado de Colombia, Bogotá, Colombia, pp. 261-287.

Herrera, M.; & Berasaluce, J. (2004). El Desarrollo de la Regulación Internacional aplicada a las Aguas de Lastre de los Buques y su Experiencia Normativa en Chile. En: Derecho de Aguas, Tomo II. Ed. Universidad Externado de Colombia, Bogotá, Colombia. Pp. 219-247.

Hicks, S. D. (1972). On the classification and trends of long period sea level rise. Shore and beach (Berkeley, Calif.) 40:20-23.

Inman, D. L. & Rusnak, G. S. (1956). Changes in sand level on the beach and sheet at La Jolla, California. Washington, United States Department of the Army, Corps of Engineers, Beach Erosion Board. (Technical memorandum, 2).

Komar, P. D. (1976) Beach Processes and Sedimentation. Englewood Cliffs, N. J., Prentice Hall, 427 p.

Kvenvolden, K. (1993). Gas hydrates, Geological perspective and global change, Reviews of Geophysics, 31 pág. 173-187.

Lisitzin, E. (1974). Sea-level changes. New York, Elsevier, 286 p.

Methane Hydrate Advisory Committee (2002). Report on Methane Hydrate Issues and Opportunities. Pág. 1-11.

Millman, J. D. and Emery, K. O, (1968). Sea levels during the past 35,000 years. Science (Washington) 162:1121-1123.

Morales, E. y Cañon. E. (1984). Geografía del Mar Chileno. IGM. Santiago de Chile, 244 pag.

Morales, E. (2003). Methane hydrates in the Chilean continental margin. J. Biotec Vol.6 (2). Pág. 80-84.

Morales, E. y Rodrigo. C. (2005). Methane hydrates: Hazards and risk assessment at the Chilean continental margin between the 32° and 54° S. Revista Geografica de Valparaiso. Vol 36. Pág. 221-231.

Morales, E., E. Vera, J. Díaz, G. Yañez, D. Comnte y R. Nuñez. (2002). Proyecto FONDEF DOOI1104. Hidratos de gas submarino; una nueva fuente de energía para el siglo XXI.

Okuda, Y. (1988). Introduction to exploration research on gas hydrates in Japan. Bulletin of Geological Survey of Japan Vol. 49 (19). Pág. 494-500.

Ottmann, F. (1965). Introduction a la geologie marine et Littorale. Ed. Masson, 252 pag.

Shepard, F. P. (1963). Submarine Geology. New York, Harper and Row. 2nd ed. 557 p.

Silvester, R. (1974). Coastal Engineering. Amsterdam, Elsevier.

Sorenson, R. N. (1978). Basic Coastal Engineering. New York, Wiley and Sons. 227 p.

Stafford, D. A. (1971). An aerial photographic technique for beach erosion surveys in North Carolina. Washington, United States Department of the Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center, 1971.

Strahler, A. N. (1963). Physical Geography. New York, John Wiley and Sons, Inc., 2nd ed. 534 p.

Uribe, C. (1989). Regulación jurídica de la Protección del Medio Ambiente Marino contra la Contaminación. Lima

Wiegel, R. L. (1964). Oceanographical Engineering. Englewood Cliffs, N.J., Prentice Hall.

Woodroffe, D (2002). Coast, form, process and evolution. Cambridge University Press. 632.pag