



Facultad de Ciencias del Mar y de Recursos Naturales

INGENIERIA CIVIL OCEÁNICA

EFFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COSTAS DE CHILE

DOC ICO 02-2009

Estudio realizado por el Grupo de Ingeniería Civil Oceánica en el marco de esta iniciativa denominada Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático. Solicitado por el Centro de Cambio Global (PUC) para CEPAL.



EFFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COSTAS DE CHILE

INFORME DE RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS PRELIMINAR DE ANTECEDENTES

PREPARADO PARA:

Centro de Cambio Climático
Pontificia Universidad Católica de Chile

FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS NATURALES
GRUPO DE INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA
UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO

Av. Borgoño 16344 Montemar, Reñaca
Teléfonos (32) 2507824 - (32) 2507860
Fax (32) 2507859 - 09-3244665
www.ingenieriaoceanica.cl

JULIO 2009

INFORMACION PROYECTO

DATOS GENERALES

Proyecto	EFFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COSTAS DE CHILE
Documento	INFORME DE RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS PRELIMINAR DE ANTECEDENTES
Cliente	Centro de Cambio Climático. Pontificia Universidad Católica de Chile
Código cliente	No aplica
Fecha entrega	
Autores	<p>Patricio Winckler Grez Ingeniero Civil MSc. In Environmental Technology Master en Ingeniería de puertos y costas</p> <p>Manuel Contreras López Matemático Ingeniero Informático Magister (c) Estadística</p> <p>Mauricio Molina Pereira Ingeniero civil oceánico (e)</p> <p>Ignacio Sepúlveda Oyarzún Ingeniero civil (e)</p> <p>Gustavo Barbet Martínez Ingeniero civil (e)</p>
Código interno	2009 PUC – Cambio climático
Archivo	2009 PUC - Cambio climático Informe Rev.B.doc.Doc
Archivo planos	No aplica

CONTROL INTERNO

Revisión	Elaboró			Revisó			Aprobó			Observaciones
	Nombre	Fecha	Firma	Nombre	Fecha	Firma	Nombre	Fecha	Firma	
A	MCL	06/07/09		PWG	06/07/09		PWG	06/07/09		Para revisión CCC - PUC
B							PWG	30/07/09		

RESUMEN

Desde septiembre del año 2008 los países de Sudamérica, junto a la CEPAL, el BID y los gobiernos del Reino Unido y Dinamarca, han iniciado el desafiante proyecto de estudiar la economía del cambio climático en la región. En el marco de esta iniciativa denominada Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático, la CEPAL y el Gobierno de Chile han comisionado al Centro de Cambio Global de la Pontificia Universidad Católica de Chile la coordinación de una serie de estudios sectoriales cuyo objetivo es evaluar los costos y beneficios de tomar medidas de adaptación al cambio climático, además apoyar acciones iniciales para definir políticas públicas tendientes a la mitigación de sus efectos. Estos estudios conformarán parte de la documentación que nuestro país y la región presentará en la próxima Conferencia de las partes del convenio marco del cambio climático, a realizarse en Diciembre de 2009 en Copenhagen, Dinamarca.

El presente estudio constituye una recopilación y análisis preliminar de antecedentes relativos a cambios del nivel del mar, sismicidad, tsunamis y variaciones del régimen de oleaje presente a lo largo de la costa, cuyo propósito es identificar tendencias y factores que deben tomarse en cuenta para analizar los efectos del cambio climático en las costas de Chile. Para este efecto se utilizaron registros horarios de larga duración nivel del mar en siete localidades del país, registros de oleaje de 20 años obtenidos mediante la calibración de un modelo numérico global con registros in situ, antecedentes sísmicos, de tsunamis y de otros factores que pueden ser relevantes en los efectos esperados. Estos estudios atienden a la disponibilidad de abundante información disponible por agencias locales, como el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada y el Servicio Sismológico de Chile, además de estudios generados por diversos centros de investigación radicados en el país. Se incluye un catastro de los principales puertos de Chile, infraestructura desarrollada por la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas y zonas protegidas en Chile cuyo objetivo es disponer de insumos básicos para estudios de vulnerabilidad que pudieren devenir en el marco de esta línea de investigación.

Los antecedentes recopilados permiten, mediante estadísticas significativas y análisis de series de tiempo, la identificación de tendencias y cambios de comportamiento generales en las variables en estudio. Se concluye que existen reducidas tendencias de cambio en el nivel del mar a lo largo de la costa chilena, con distintos comportamientos locales, existiendo zonas donde el nivel del mar estaría en ascenso y otras en descenso. Los antecedentes que dan evidencia de la necesidad de analizar con mayor detalle los efectos de sismos en el borde costero, pues las magnitudes de la deformación cortical evidenciadas históricamente son comparables, e incluso superiores, al aumento global del nivel del mar proyectado para fines de siglo por el Panel Internacional del Cambio Climático. En cuanto al oleaje, se detecta un cambio de comportamiento en sus características principales como la altura significativa, la potencia y la dirección, que podría tener efectos en las condiciones operacionales de las instalaciones portuarias y en el equilibrio dinámico de los sistemas costeros.

Cabe mencionar que, en razón de los exiguos plazos disponibles para su ejecución, este estudio corresponde a una recopilación bibliográfica y la aplicación incipiente de técnicas de análisis de datos oceanográficos que debieran servir de base para estudios ulteriores de mayor profundidad. Durante el desarrollo del estudio, se identificaron diversas interrogantes que pueden ser resueltas por estudios futuros, las cuales son consignadas en el capítulo de Conclusiones.

CONTENIDOS

1	INTRODUCCIÓN.....	10
2	REFERENCIAS.....	11
2.1	ESTUDIOS EN CHILE.....	11
2.2	ESTUDIOS RELACIONADOS CON EL NIVEL DEL MAR.....	11
2.3	ESTUDIOS RELACIONADOS CON EL OLEAJE.....	13
2.4	ESTUDIOS RELACIONADOS CON LA SISMICIDAD Y TSUNAMIS.....	13
3	RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES.....	15
3.1	GENERALIDADES.....	15
3.2	IMPACTOS EN EL MEDIO FÍSICO.....	15
3.3	ESTUDIO DEL NIVEL DEL MAR.....	21
3.3.1	METODOLOGÍAS DE ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR.....	21
3.3.2	METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS.....	29
4	ESTUDIO DE NIVEL DEL MAR EN LAS COSTAS DE CHILE.....	36
4.1	METODOLOGÍA.....	36
4.2	RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL NIVEL DEL MAR EN CHILE.....	42
4.2.1	ARICA.....	42
4.2.2	ANTOFAGASTA.....	43
4.2.3	CALDERA.....	44
4.2.4	ISLA DE PASCUA.....	44
4.2.5	VALPARAÍSO.....	45
4.2.6	TALCAHUANO.....	45
4.2.7	PUERTO WILLIAMS.....	46
4.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	54
5	ESTUDIO DE OLEAJE.....	58
5.1	GENERALIDADES.....	58
5.2	METODOLOGÍA.....	61
5.3	RESULTADOS.....	62
5.3.1	ALTURA DE OLA.....	62
5.3.2	PERIODO MEDIO.....	63
5.3.3	DIRECCIÓN MEDIA.....	66
5.3.4	POTENCIA DE OLEAJE.....	68
5.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	77
6	ESTUDIO DE SISMICIDAD Y TSUNAMIS.....	78
6.1	PROCESOS TECTÓNICOS.....	78
6.2	REGISTRO DE EVENTOS SÍSMICOS.....	80
6.2.1	DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS GEOFÍSICOS DE SISMOS FUERTES.....	80
6.2.2	RESUMEN DEL CATASTRO.....	81
6.3	DESCRIPCIÓN DE LOS EVENTOS SÍSMICOS MÁS IMPORTANTES.....	86
6.3.1	EVENTOS OCURRIDOS EN LA ZONA NORTE.....	86
6.3.2	EVENTOS OCURRIDOS EN LA ZONA CENTRAL.....	90
6.3.3	EVENTOS OCURRIDOS EN LA ZONA SUR.....	92
6.4	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	98
7	CONCLUSIONES.....	99

7.1	NIVEL DEL MAR.....	99
7.2	OLEAJE.....	100
7.3	SISMICIDAD Y TSUNAMIS.....	100
7.4	INFRAESTRUCTURA	101
7.5	FUTUROS ESTUDIOS.....	101

ANEXOS

ANEXO 1	PARÁMETROS DE PRINCIPALES SISMOS EN CHILE
ANEXO 2	INFRAESTRUTURA DE PUERTOS ESTATALES
ANEXO 3	INFRAESTRUCTURA DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS
ANEXO 4	ZONAS PROTEGIDAS EN CHILE

FIGURAS

Figura 3-1: Plano de erosión costera durante el siglo XX, EE.UU.	16
Figura 3-2: Plano de inundación por huracán, Baltimore.	17
Figura 3-3: Plano de inundación para aumentos estáticos de 1,2 y 3 [m], Arauco (Chile).	18
Figura 3-4: Playa Miramar a comienzos del siglo XX y en la actualidad. Viña del Mar.....	19
Figura 3-5: Playa Miramar en la actualidad. Viña del Mar.....	20
Figura 3-6: Balneario de Recreo a comienzos del siglo XX y en 2006. Viña del Mar.....	20
Figura 3-7: Variación latitudinal y temporal del nivel del mar en Chile.	23
Figura 3-8: Respuesta del nivel del mar a un aumento de temperatura.....	23
Figura 3-9: Relación entre temperatura superficial y tasa de aumento del nivel del mar.....	24
Figura 3-10: Mediciones de nivel del mar y estimación mediante método semi-empírico.	25
Figura 3-11: Registros de nivel del mar de larga data en Europa.....	25
Figura 3-12: Tendencia media del nivel del mar en Baltimore.....	27
Figura 3-13: Variación de tendencias del nivel del mar en 50 años, San Francisco.	27
Figura 3-14: Nivel del mar máximo mensual.	27
Figura 3-15: Valores máximos mensuales del Nivel del Mar en Antofagasta.....	28
Figura 3-16: Tendencia del nivel del mar 1993-1998 (mm/año). Misión TOPEX-Poseidon.	28
Figura 3-17: Cambios en los terrenos de marisma baja por efecto de MHW.....	30
Figura 3-18: Ejemplo de plano de inundación.	30
Figura 3-19: Representación esquemática de regla de Bruun.....	31
Figura 3-20: Extracto Atlas de Inundación en el litoral peninsular español.....	34
Figura 4-1: Estaciones del nivel del mar en Chile.	36
Figura 4-2: Duración de registro del nivel del mar en las estaciones costeras.....	37
Figura 4-3: Promedio mensual del nivel del mar en Arica.	38
Figura 4-4: Promedio mensual del nivel del mar en Antofagasta.	38
Figura 4-5: Promedio mensual del nivel del mar en Caldera.	38
Figura 4-6: Promedio mensual del nivel del mar en Isla de Pascua.	39
Figura 4-7: Promedio mensual del nivel del mar en Valparaíso.	39
Figura 4-8: Promedio mensual del nivel del mar en Talcahuano.....	39
Figura 4-9: Promedio mensual del nivel del mar en Puerto Williams.	40
Figura 4-10: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Arica.....	47
Figura 4-11: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en Arica.	47
Figura 4-12: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Antofagasta.....	48
Figura 4-13: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en Antofagasta.	48
Figura 4-14: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Caldera.....	49

Figura 4-15: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en Caldera.	49
Figura 4-16: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en I. de Pascua.	50
Figura 4-17: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en I. de Pascua.....	50
Figura 4-18: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Valparaíso.....	51
Figura 4-19: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en Valparaíso.	51
Figura 4-20: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Talcahuano.	52
Figura 4-21: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en Talcahuano.....	52
Figura 4-22: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en P. Williams.	53
Figura 4-23: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en P. Williams.....	53
Figura 4-24: Tasas de aumento del nivel del mar medias por latitud y longitud.	57
Figura 5-1 Posición de Nodos en el estudio de las estadísticas del oleaje.....	59
Figura 5-2: Histograma de frecuencias de altura (Hmo) y período (Tm) en latitud 33°S.....	61
Figura 5-3: Curvas de probabilidad de excedencia anual de altura significativa.....	62
Figura 5-4: Variación porcentual de la probabilidad de excedencia de altura significativa.....	63
Figura 5-5: Promedio mensual de la altura significativa y tendencia lineal.	63
Figura 5-6 Curvas de probabilidad de Excedencia anual del Periodo medio.	64
Figura 5-7: Variación porcentual de la probabilidad de excedencia del Periodo medio.....	65
Figura 5-8 Promedio mensual del Periodo medio y tendencia lineal.	65
Figura 5-9 Curvas de probabilidad de Excedencia anual de la Dirección media.....	66
Figura 5-10 Variación porcentual de la probabilidad de Excedencia de la Dirección media.....	67
Figura 5-11 Promedio mensual de la Dirección media y tendencia lineal.....	67
Figura 5-12: Potencia del oleaje en aguas profundas en todo Chile.....	69
Figura 5-13: Potencia media anual del oleaje en nodo 33 (1985 a 2006).....	70
Figura 5-14: Curvas de probabilidad de excedencia anual de potencia de oleaje.	72
Figura 5-15: Variación porcentual de la probabilidad de excedencia de potencia de oleaje.	73
Figura 5-16: Promedio mensual de la potencia de oleaje y tendencia lineal.....	73
Figura 5-17: Potencia media mensual del oleaje en nodo 33 (1985 a 2006).	74
Figura 5-18: Potencia media horaria del oleaje en nodo 33 (1985 a 2006).	75
Figura 5-19: Potencia media del oleaje en todos los nodos (1985 a 2006).	76
Figura 6-1: Diagrama espacio temporal de los sismos fuertes en Chile Continental.....	79
Figura 6-2: Efectos del terremoto de 1960 en Valdivia.	80
Figura 6-3: Localización de los sismos catastrados desde la I a la III Región.....	82
Figura 6-4: Localización de los sismos catastrados desde la III a la VIII Región.....	83
Figura 6-5: Localización de los sismos catastrados desde la VII a la X Región.	84
Figura 6-6: Localización de los sismos catastrados en la XI y XII Región.	85
Figura 6-7: Ubicación del Wateree después de tsunamis de 1868 y 1877, en Arica.	87
Figura 6-8: Efectos de tsunami del 9 de mayo de 1977 en la Iglesia de San Marcos, Arica.	88

Figura 6-9: Bodegas y oficina del ferrocarril de Coquimbo.....	89
Figura 6-10: Efectos del tsunami de 1922 en Coquimbo.	89
Figura 6-11: Registro de 1985 en estación del SHOA.....	91
Figura 6-12: Efectos del terremoto de 1985 en el Puerto de San Antonio.....	92
Figura 6-13: Ilustraciones del tsunami de 1835 en Juan Fernández.....	94
Figura 6-14: Tsunami del 22 de mayo de 1960 en Puerto Saavedra.....	96
Figura 6-15: Subsistencia experimentada en el Río Queule debida al terremoto de 1960.....	96
Figura 6-16: Inundación en el sector Collico en 1960 y foto actual.....	97
Figura 6-17: Inundación en el sector Mercado Municipal de Valdivia en 1960 y foto actual.....	97

TABLAS

Tabla 3-1: Resumen de metodologías para el estudio de impactos.	35
Tabla 4-1: Detalle de estadísticas utilizadas en el análisis del nivel del mar.....	37
Tabla 4-2: Número de gaps y outliers por mes y año en Talcahuano.....	41
Tabla 4-3: Porcentaje de gaps y outliers por localidad.	42
Tabla 4-4: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Arica.....	42
Tabla 4-5: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Antofagasta.....	43
Tabla 4-6: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Caldera.....	44
Tabla 4-7: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Isla de Pascua.....	44
Tabla 4-8: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Valparaíso.....	45
Tabla 4-9: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Talcahuano.	45
Tabla 4-10: Estadística de variaciones del Nivel del Mar por décadas en Puerto Williams.....	46
Tabla 4-11: Tasa de variación media anual de estaciones mareográficas en Chile.....	54
Tabla 4-12: Tasas de aumento del nivel del mar en estaciones mareográficas del mundo.	56
Tabla 5-1: Resumen estadística de oleaje en la zona de estudio (1985 a 2006).....	59
Tabla 5-2: Estadística bivariada de altura (Hmo), período (Tm) y dirección en latitud 33°S.....	60
Tabla 5-3: Potencia media anual de oleaje en la zona de estudio (1985 a 2006).....	71
Tabla 5-4: Potencia media mensual de oleaje en la zona de estudio (1985 a 2006).	74
Tabla 5-5: Potencia media horaria de oleaje en la zona de estudio (1985 a 2006).....	75

1 INTRODUCCIÓN

Desde septiembre del año 2008 los países de Sudamérica, junto a la CEPAL, el BID y los gobiernos del Reino Unido y Dinamarca, han iniciado el desafiante proyecto de estudiar la economía del cambio climático en la región. En el marco de esta iniciativa denominada Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático, la CEPAL y el Gobierno de Chile han comisionado al Centro de Cambio Global de la Pontificia Universidad Católica de Chile la coordinación de una serie de estudios sectoriales cuyo objetivo es evaluar los costos y beneficios de tomar medidas de adaptación al cambio climático, además apoyar acciones iniciales para definir políticas públicas tendientes a la mitigación de sus efectos. Estos estudios conformarán parte de la documentación que nuestro país y la región presentará en la próxima Conferencia de las partes del convenio marco del cambio climático, a realizarse en Diciembre de 2009 en Copenhague, Dinamarca.

Entre los grupos sectoriales destaca el de Efectos del Cambio Climático en las costas de Chile, que será desarrollado por el Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cantabria (IHUC) y un equipo nacional constituido por académicos de la Facultad de Ciencias Biológicas de la PUC, del Departamento de Hidráulica Ambiental de la PUC y del Grupo de Ingeniería Civil Oceánica de la Universidad de Valparaíso (ICOUV).

El IHUC ha presentado los alcances de los estudios propuestos en el documento Términos de referencia para un estudio regional de los efectos del cambio climático en la costa de Sudamérica, cuyos objetivos abarcan la aplicación de modelos numéricos globales y datos en una escala mundial en las costas de toda América Latina, para obtener información valiosa a macroescala frente a las costas Chilenas.

Entre los estudios complementarios propuestos por el equipo nacional se contempla la evaluación de las variaciones a largo plazo del nivel del mar sobre la base de registros de larga data en los principales puertos patrones, de la frecuencia y severidad de los temporales a partir de estadísticas de oleaje de bases de datos de hindcasting disponibles en Chile y de los efectos geológicos y tectónicos en diferentes tramos de costa. Estos estudios atienden a la disponibilidad de abundante información disponible por agencias locales, como el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada y el Servicio Sismológico de Chile, además de estudios generados por diversos centros de investigación radicados en el país. Debido a los exiguos plazos del proyecto, no se contempla la identificación preliminar de sectores vulnerables, riesgos y pérdidas potenciales de la infraestructura ante los posibles cambios en el largo plazo de estas variables.

Cabe destacar que gran parte del presente trabajo no habría sido posible sin la valiosa colaboración del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, SHOA, quién a través de su Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile, CENDHOC, facilitó los datos del nivel del mar en puertos chilenos.

Ante cualquier comentario y/o interrogante producida por la forma y/o fondo del presente documento, quedamos a vuestra disposición para clarificarlas. Se recomienda contactar al Sr. Patricio Winckler Grez, cuyos datos presentamos a continuación:

Patricio Winckler Grez

Universidad de Valparaíso

Ingeniería Civil Oceánica

Edificio Rokamar. 13 Norte 766, 5 piso, Viña del Mar, Chile

Fono: (56) 32-2686848 2687306 2690265 (Anexo 500)

patricio.winckler@uv.cl

www.ingenieriaoceanica.cl

2 REFERENCIAS

Las referencias utilizadas en este estudio corresponden a documentos de carácter científico disponibles en la base de datos del Grupo de ingeniería Oceánica de la Universidad de Valparaíso. Para facilitar su contexto, se agrupan temáticamente en estudios específicos efectuados en Chile y en referencias estudios relacionados con el nivel del mar, sismicidad y tsunamis y oleaje.

2.1 ESTUDIOS EN CHILE

- Ref.1 Andrade, B. y Consuelo C. (1991). *"Impacts of and responses to sea-level rise"*. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica. Documento preparado para el International Sea-level rise Studies Project. Division of Coastal and Environmental Studies. Institute of Marine and Coastal Sciences. The State University of New Jersey.
- Ref.2 Andrade, B. y Consuelo C. (1992). *"Ensayo de evaluación de un eventual ascenso del nivel medio marino inducido por el efecto invernadero en la zona costera de la región de Valparaíso"*. Instituto de Geografía. Pontificia Universidad Católica.
- Ref.3 Andrade, B. y Peña, H. (1993). Ch. 7. *"Chilean Geomorphology and Hydrology"*. In Earth system responses to global change. Contrast between North and South America.
- Ref.4 Departamento de Geofísica Universidad de Chile (Diciembre 2006). *"Estudio de la variabilidad climática en Chile para el siglo XXI. Informe final"*. Preparado para la Comisión Nacional del Medio Ambiente (CONAMA).
- Ref.5 EULA (Abril 2001). *"Análisis de Vulnerabilidad y Adaptación en Zonas Costeras y Recursos Pesqueros"*. Centro de Ciencias Ambientales. Universidad de Concepción.

2.2 ESTUDIOS RELACIONADOS CON EL NIVEL DEL MAR

- Ref.6 Breaker, L. y Broenkow, W. (2005). *"Reconstructing an 83-Year Time Series of Daily Sea Surface Temperature at Pacific Grove, California"*. Moss Landing Marine Laboratories. Technical Report.
- Ref.7 Broenkow, W. y Breaker, L. (2005). *"A 30-Year History of Tide and Current Measurements in Elkhorn Slough, California"*. Moss Landing Marine Laboratories. Technical Report.
- Ref.8 Burkett, V. et al (2001). *"Coastal Zones and Marine Ecosystems en Climate Change 2001: Impacts Adaptation and Vulnerability"*. Disponible en: www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/wg2/index.htm. Ch. 6.
- Ref.9 Church, J. (2001). *"Climate Change 2001: The Scientific Basis"*. Disponible en: www.grida.no/publications/other/ipcc_tar/?src=/climate/ipcc_tar/. [Accedido 19 de junio de 2009].
- Ref.10 Committee on Engineering Implications of Changes in Relative Mean Sea Level, Marine Board, National Research Council (1987). *"Responding to Changes in Sea Level: Engineering Implications"*. ISBN: 0-309-59575-4, 160 pages, 6 x 9. This PDF is available from the National Academies Press at: www.nap.edu/catalog/1006.html.

- Ref.11 Contreras M. (2001). *“Introducción al Análisis de Series de Tiempo para Oceanografía y Geociencias”*. Estudios y Documentos de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. (N°15/01). R.P.I. N°123194.
- Ref.12 Federal Emergency Management Agency (1991). *“Projected Impact of Relative Sea Level Rise on the National Flood Insurance Program”*. Disponible en: www.epa.gov/climatechange/effects/downloads/flood_insurance.pdf. [Accedido 19 de junio de 2009].
- Ref.13 Foreman M. y Neufeld E. (1991). *“Harmonic Tidal Analysis of Long Time Series”*. International Hydrographic Review, Monaco, LXVIII(1): 85 – 108.
- Ref.14 Gill, S. y Stolz, A. (2005). *“Relative long-term sea level trends: how are they determined and what do they tell us?”*. Disponible en: www.csc.noaa.gov/cz/2005/CZ05_Proceedings_CD/pdf%20files/StolzSeaLevel.pdf.
- Ref.15 Gornitz, V. et al (2000). *“Climate Change and Global City: an Assessment Metropolitan East Coast Region”*. Disponible en: http://metroeast_climate.ciesin.columbia.edu/reports/assessmentsynth.pdf. [Accedido 19 de junio de 2009].
- Ref.16 Gómez J. (1994). *“Cambios seculares del nivel medio del mar y predicción de mareas por el período Caldeo en el puerto de La Coruña”*. Bol. Inst. Esp. Oceanogr. 10(2): 125 – 146.
- Ref.17 González M. (1996). *“Global Environmental Trends and Probable Impacts on the Coasts of South American Mid-Latitudes”*. Journal of Coastal Research 12(4): 1034 – 1037.
- Ref.18 Gregory, J. (2006). *“Changes in sea level”*. Talk, CGAM and Hadley Centre, UK.
- Ref.19 Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas (N.D.). *“Atlas de inundación del litoral español”*. Universidad de Cantabria.
- Ref.20 Hamon B. y Middleton J. (1989). *“Return Periods of Extreme Sea Levels: the Exceedance Probability Method”*. International Hydrographic Review, Monaco, LXVI(2): 165 – 177.
- Ref.21 Intergovernmental Oceanographic Commission (N.D.). *“Manual on sea level measurement and interpretation”*. Volumen I – Basic procederes. Manuals and Guides 14.
- Ref.22 IPCC (2001). *“Climate Change 2001: The Scientific Basis”*, Third Assessment Report.
- Ref.23 Lorente, I. (2004). *“Los efectos biológicos del cambio climático”*. Disponible en: <http://www.revistaecosistemas.net/pdfs/172.pdf> [Ingreso el 19 de junio de 2009].
- Ref.24 NOAA (N.D.). *“Floodplain Glossary of Terms”*. Disponible en: <http://lancaster.ne.gov/city/pworks/watrshed/mfptf/meetings/2002/031902/pdf/fpgloss.pdf>. [Accedido 19 de junio de 2009]
- Ref.25 Peltier, W. (1998). *“Global Glacial Isostatic Adjustment and Modern Instrumental Records of Relative Sea Level History en Sea Level Rise. History and Consequences”* [e-book] [Accedido el 09 de abril de 2009].
- Ref.26 Rahmstorf, S. (2007). *“A Semi-Empirical Approach to Projecting Future Sea-Level Rise”* [online]. Disponible en: <http://www.sciencemag.org/cgi/content/abstract/1135456>. [Accedido 19 de junio de 2009].

- Ref.27 Ros, J. (1993). *“El cambio climático y la subida del nivel del mar”*. Centro de Estudios de Técnicas aplicadas. Madrid: Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas, Gabinete de Formación y Documentación. 74 p. (Monografías: ISSN 0211-8203 M23)
- Ref.28 Slovinsky, P y Dickson, S. (2006). *“Impacts of Future Sea Level Rise on the Coastal Floodplain”*. Disponible en: www.maine.gov/doc/nrimc/mgs/explore/marine/sea-level/contents.htm. [Accedido 19 de junio de 2009].
- Ref.29 Soley, F. (1993). *“Un programa para obtener la transformada discreta de Fourier de secuencias cronológicas muy largas”*. Ciencia y Tecnológica 17 N°1: 1 – 16.
- Ref.30 U.S.E.P.A. (2009). *“Coastal Sensitivity to Sea Level Rise: A Focus in the Mid Atlantic Region”* [e-book]. Disponible en: www.climate-science.gov/Library/sap/sap4-1/final-report/sap4-1-final-report-all.pdf [Ingreso el 19 de junio de 2009].

2.3 ESTUDIOS RELACIONADOS CON EL OLEAJE

- Ref.31 Acuña y Monardez (2007). Evaluación del potencial de la energía del oleaje en Chile. Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica. XVIII Congreso Chileno de Hidráulica.
- Ref.32 González M. (1996). *“Global Environmental Trends and Probable Impacts on the Coasts of South American Mid-Latitudes”*. Journal of Coastal Research 12(4): 1034 – 1037.
- Ref.33 Liu & Frigaard. (2001). *“Generation and analysis of random waves”*. Aalborg Universitet.
- Ref.34 Silva, R. (2005). *“Análisis y descripción estadística de oleaje”*. UNAM, México.
- Ref.35 USACE (2003). Coastal Engineering Manual. *“Water Wave Mechanics. Wave train (wave-by-wave) analysis”*.

2.4 ESTUDIOS RELACIONADOS CON LA SISMICIDAD Y TSUNAMIS

- Ref.36 Astroza, M. (2009). *“Efecto de los Terremotos Chilenos en las Obras Civiles”* [PDF] Chile: Universidad de Chile.
- Ref.37 Comte, D. (2009a). *“Valdivia 1960”*. Curso Terremotos: Usos y Abusos [Powerpoint] Chile: Universidad de Chile.
- Ref.38 Comte, D. (2009b). *“Antofagasta 1985”*. Curso Terremotos: Usos y Abusos [Powerpoint] Chile: Universidad de Chile.
- Ref.39 Hernández, L. (1961). *“Catástrofe en el paraíso”*. Editorial del Pacífico.
- Ref.40 Kausel, E. (1986). *“Proceso Sísmico, Parámetros Focales y Réplicas del Sismo del 3 de Marzo de 1985”*. Capítulo N°2 de: El Sismo del 3 de Marzo de 1985-Chile; Monje J. Coordinador. Acero Comercial S.A., Santiago 1986.
- Ref.41 Lomnitz, C. (1970). *“Major earthquakes and tsunamis in Chile during the period 1535 to 1955”*. Geologische Rundschau.

- Ref.42 Oidores de la Real Audiencia. (N.D.). "*Carta de la real audiencia de Chile sobre el terremoto del 13 de mayo de 1647 por los oidores*".
- Ref.43 Reigber et al. (N.D.). "*The Antofagasta 1995 Earthquake : Crustal deformation pattern as observed by GPS and D-INSAR*" [Online]. Disponible en: <http://earth.esa.int/workshops/ers97/papers/reigber1/> [Ingreso el 27 de Mayo de 2009].
- Ref.44 SHOA (N.D.). "*Tsunamis Registrados en la Costa de Chile [Online]*". Disponible en: http://www.shoa.cl/servicios/tsunami/data/tsunamis_historico.pdf [Ingreso el 27 de Mayo de 2009].
- Ref.45 SHOA (2000). "*El Maremoto del 22 de Mayo de 1960 en las Costas de Chile*". 2da Edición.
- Ref.46 Siglos curiosos (2009). "*El terremoto de 1822*" [Online]. Disponible en: <http://sigloscuriosos.blogspot.com/2007/09/el-terremoto-de-1822.html> [Ingreso el 27 de Mayo de 2009].
- Ref.47 Terremotos y otros desastres naturales. (2009). "*Terremoto del 8 de febrero de 1570*" (Historia General de Chile - Diego Barros Arana) [Online]. Disponible en: <http://www.angelfire.com/nt/terremotoMayo1647/1570.html> [Ingreso el 27 de Mayo de 2009].
- Ref.48 Terremotos y otros desastres naturales. (2009). "*Terremoto de Concepción 1835*" (Historia Ilustrada de Chile, de Francisco Encina y Leopoldo Castedo. Edit. Zig-Zag. 1985) [Online]. Disponible en: <http://www.angelfire.com/nt/terremotoConce1835/> [Ingreso el 27 de Mayo de 2009].
- Ref.49 Terremotos y desastres naturales. (2009). "*Terremoto de Valdivia de 1960*" [Online]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org> [Ingreso el 27 de Mayo de 2009].
- Ref.50 Wikipedia (2009a). "*Terremoto de Santiago de 1647*" [Online]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org> [Ingreso el 27 de Mayo de 2009].
- Ref.51 Wikipedia (2009b). "*María Callcott*" [Online]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org> [Ingreso el 27 de Mayo de 2009].
- Ref.52 Wikipedia (2009c). "*Terremoto de Concepción de 1570*" [Online]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org> [Ingreso el 27 de Mayo de 2009].
- Ref.53 Wikipedia (2009d). "*Terremoto de Chillán de 1939*" [Online]. Disponible en: <http://es.wikipedia.org> [Ingreso el 27 de Mayo de 2009].

3 RECOPIACIÓN DE ANTECEDENTES

3.1 GENERALIDADES

En general, el nivel medio del mar cambia por variaciones del volumen total de los océanos, causadas principalmente por alteraciones en la temperatura a escala global. La causa más importante que explica el aumento reciente del nivel del mar a escala global es la expansión o dilatación térmica del agua, el cual es responsable del 80% de la variación observada en el último siglo. Otros importantes aportes, son el cambio en el balance de masa de los glaciares continentales (alrededor del 15%) y otros fenómenos indirectos como son las variaciones en la distribución media de los campos de presión atmosférica, vientos y corrientes marinas superficiales (EULA, 2001). Además de las variaciones del nivel del mar por efecto del cambio climático, deben señalarse los efectos de solevantamiento costero o subsidencia provocados por los procesos tectónicos, los cuales a pesar de actuar a nivel local, pueden generar efectos comparables a los causados por el nivel del mar.

En este capítulo se introducen se introducen los impactos físicos asociados a eventuales variaciones del clima marítimo, las metodologías para abordar los estudios de nivel del mar y aquellas orientadas a evaluar su efecto en las costas.

3.2 IMPACTOS EN EL MEDIO FÍSICO

Se efectúa una revisión bibliográfica de los antecedentes que dan cuenta de los impactos asociados a la variación del clima marítimo¹ y en particular, aquellos que responden exclusivamente al nivel del mar. Estos impactos poseen alcances que gradualmente comienzan a mensurarse pues las complejas dinámicas que caracterizan los procesos costeros, algunas de ellas escasamente estudiadas, pueden acarrear cambios inciertos en los hábitats y comunidades que forman parte de estos sistemas litorales. Estos efectos físicos asociados a la modificación del clima marítimo, se pueden enumerar en los siguientes:

- Inundación de las zonas costeras
- Aumento de las planicies de inundación
- Pérdida de territorios deltaicos
- Desaparición de humedales
- Erosión costera en playas y acantilados
- Efectos en la cota de inundación en playas
- Efectos en la forma en planta y perfil de las playas por basculamiento
- Modificación del balance sedimentario costero
- Efectos en la dinámica de las dunas
- Efectos en la hidrodinámica y morfodinámica de estuarios
- Efectos sobre el comportamiento operacional y estructural de las obras marítimas
- Aumento del daño durante inundaciones y tormentas
- Intrusión salina en acuíferos
- Subida del nivel de la capa freática

La inundación de las zonas costeras, además de los efectos más patentes como el aumento de las planicies de inundación, la pérdida de territorios deltaicos y la desaparición de humedales (Lorente,

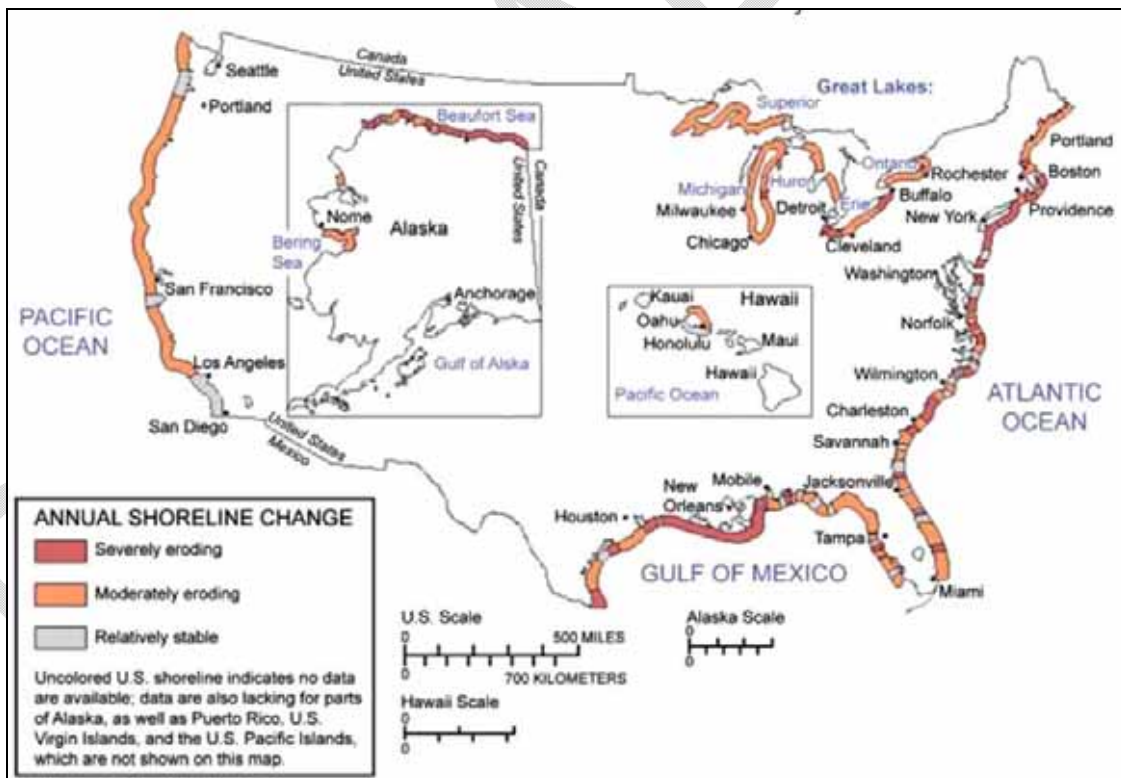
¹ Para efectos de este informe, por clima marítimo se entenderán todas aquellas dinámicas que condicionan el comportamiento físico del océano y que tienen directa incidencia en las costas.

2004), genera una serie de alteraciones geomorfológicas indirectas tales como la modificación del balance sedimentario costero, modificación del perfil de playa, cambios en el perfil de equilibrio de los valles costeros, creación de pantanos litorales y generación de nuevos estuarios o rejuvenecimiento de los antiguos (EULA, 2001).

Entre los impactos sobre el medio físico identificados como los de mayor atención por parte de la investigación actual se encuentran la erosión y la inundación costera. La erosión corresponde al fenómeno mediante el cual se produce una remoción física de los materiales de las playas y costas. En los últimos 100 años, cerca del 70% de las playas del mundo han retrocedido por efecto de la erosión, entre un 20 y un 30% se han estabilizado y menos de un 10% han avanzado (Bird, 1993). En la Figura 3-1 se indican todas las zonas costeras en Estados Unidos en que la situación durante el siglo recién pasado era de erosión severa, erosión moderada o zonas relativamente estables (EPA, 2009).

Se estima que el calentamiento global y al aumento del nivel del mar ocasionará que las playas actualmente erosionadas lo sean aún más y las que están estabilizadas comiencen con procesos erosivos. Este proceso a menudo es cuantificado aplicando la regla de Bruun. Esta regla, ampliamente utilizada por su simplicidad, "prevé que una subida del nivel del mar produce una erosión de la playa y una sedimentación de los materiales erosionados en la parte más profunda de la zona activa" (Ros, 1991) de tal manera que la playa se desplaza como un todo configurándose geoméricamente de la misma forma respecto al nivel del mar (sección 3.3.2.2).

Figura 3-1: Plano de erosión costera durante el siglo XX, EE.UU.



Fuente: U.S.E.P.A., 2009.

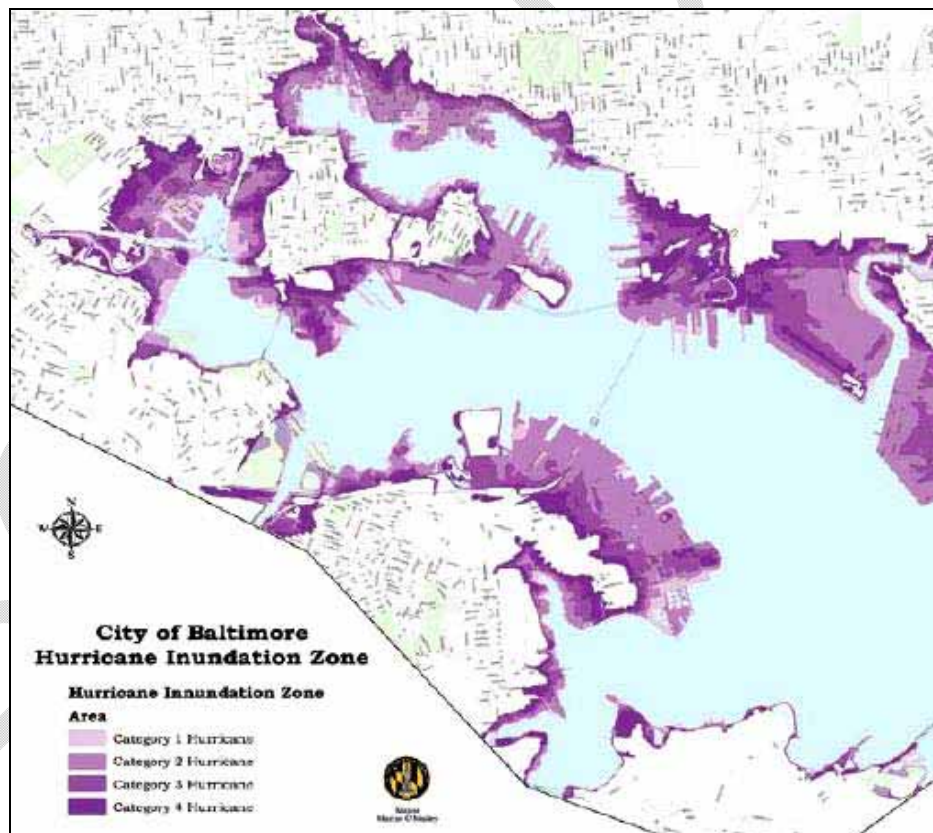
Por otra parte, la estimación del cambio en el régimen de cota de inundación es difícil de mensurar debido a la complejidad de los procesos involucrados y de las escasas herramientas que existen actualmente para establecer relaciones claras entre estos. Más aún, el establecimiento de

relaciones probabilísticas usualmente utilizadas en el diseño de nuevas obras y ayuden a la toma pronta de decisiones orientadas a la mitigación de los eventuales daños, ha sido escasamente estudiada.

“Son pocos los estudios en los que se han examinado los posibles cambios en las alturas y direcciones prevaletientes de las olas marinas y las olas de tormenta y tempestad como consecuencia del cambio climático. Cabe esperar que esos cambios tengan impactos graves sobre las costas naturales o modificadas por la actividad humana, ya que se producirán a niveles del mar superiores a los actuales” (Burkett, 2001). La incertidumbre respecto a los riesgos de inundación ligados a futuros escenarios es la que ha generado iniciativas orientadas a cuantificar escenarios de inundación a escala local (Figura 3-2 y Figura 3-3).

Con todo, cabe mencionar que la estimación de los efectos asociados a cambios en el clima marítimo requiere del estudio detallado de variables como el nivel del mar, parámetros de oleaje reinante y dominante, las mareas astronómica y meteorológica, los fenómenos ENOS (El niño oscilación Sur), entre otros. La profundidad de las herramientas a utilizar dependerá de la cobertura y calidad de la información disponible, además de disponibilidad de herramientas apropiadas para su procesamiento y análisis. En la sección 3.3.2 se realiza una revisión más extensa de las metodologías comúnmente utilizadas para cuantificar estos efectos.

Figura 3-2: Plano de inundación por huracán, Baltimore.



Fuente: U.S.E.P.A., 2009.

Figura 3-3: Plano de inundación para aumentos estáticos de 1,2 y 3 [m], Arauco (Chile).

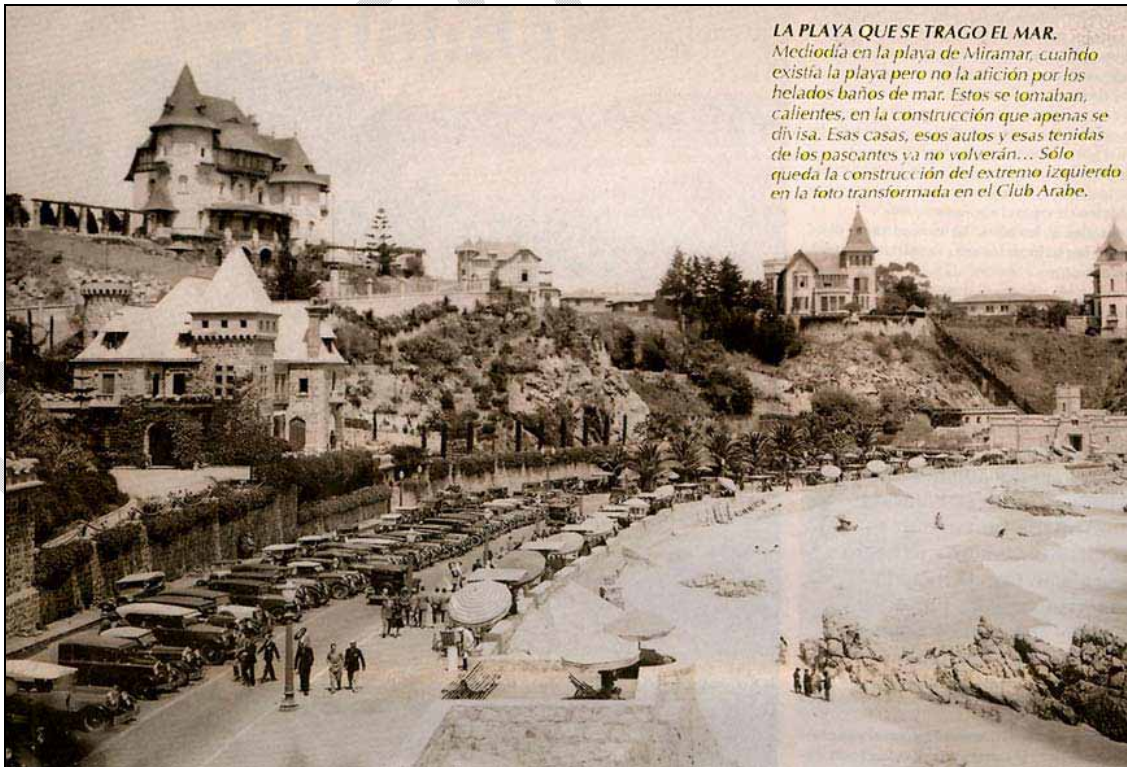
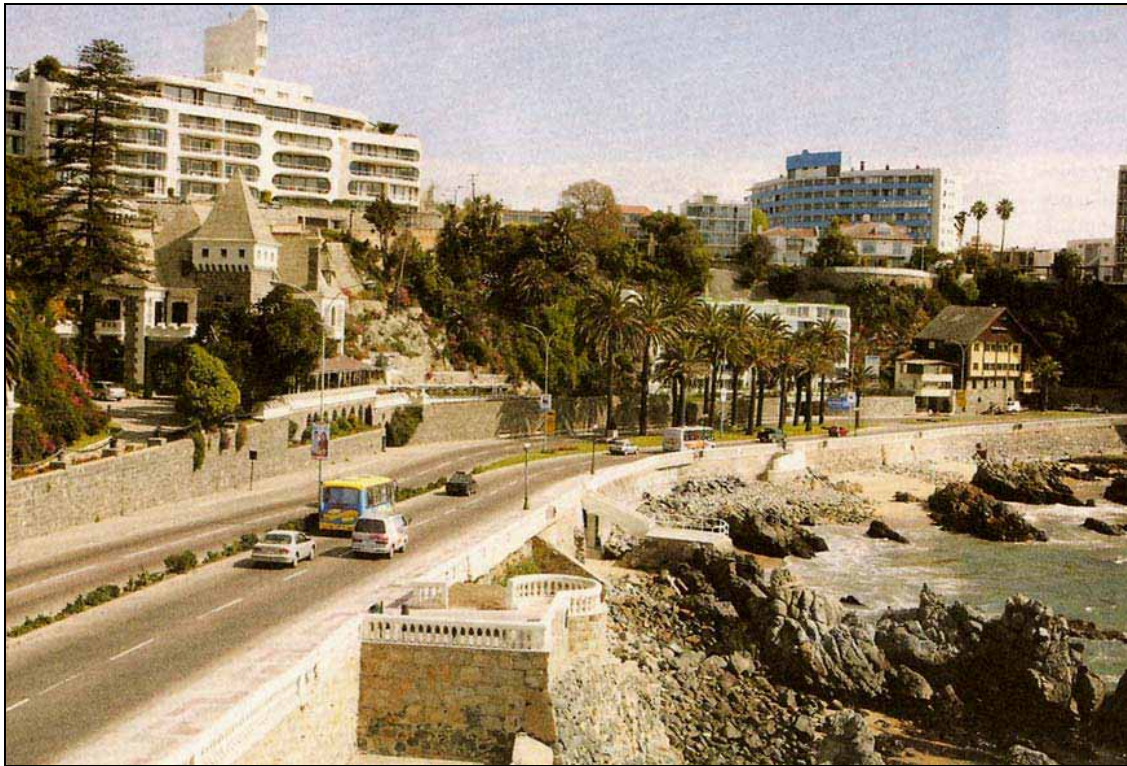
Fuente: EULA, 2001.

Cabe mencionar que el cambio climático puede constituir un factor más en la vulnerabilidad de las costas, que puede interactuar en forma sinérgica con otras acciones de carácter antrópico como el emplazamiento de infraestructura en zonas bajas de alto riesgo, la extracción indiscriminada de sedimentos de los lechos fluviales y la fijación de suelo erosionable y campos dunares debida a la urbanización masiva, entre otros. En general, se puede observar que la evolución litoral está dominada fundamentalmente por:

- Interacción entre las mareas, el oleaje y las corrientes residuales.
- Procesos de transporte de sedimento.
- Actuaciones humanas.
- Aportes fluviales significativos.
- Efectos del cambio climático en las variables oceanográficas.

En las costas de Chile es posible identificar diversos lugares que han evidenciado el efecto conjunto de estos factores, debido principalmente a presiones inmobiliarias, falta de políticas efectivas de planificación urbana y desconocimiento de los procesos físicos y biogeoquímicos que juegan parte importante en la dinámica litoral. En la Figura 3-4 se presenta el caso de la Playa Miramar, ubicada en un sector urbano de gran valor escénico de Viña del Mar, cuya desaparición se hizo efectiva durante el siglo XX. En la actualidad el sector evidencia una pérdida completa de la playa y como consecuencia de ello, un serio problema de estabilidad de los muros de contención de la principal arteria vial que comunica las ciudades de Viña del Mar y Valparaíso (Figura 3-5). Otro ejemplo es el otrora existente Balneario Municipal del sector de Recreo, en Viña del Mar, que a comienzos del siglo XX constituía un sector de gran afluencia de público y en la actualidad presenta un escaso valor escénico y funcional (Figura 3-6).

Figura 3-4: Playa Miramar a comienzos del siglo XX y en la actualidad. Viña del Mar.



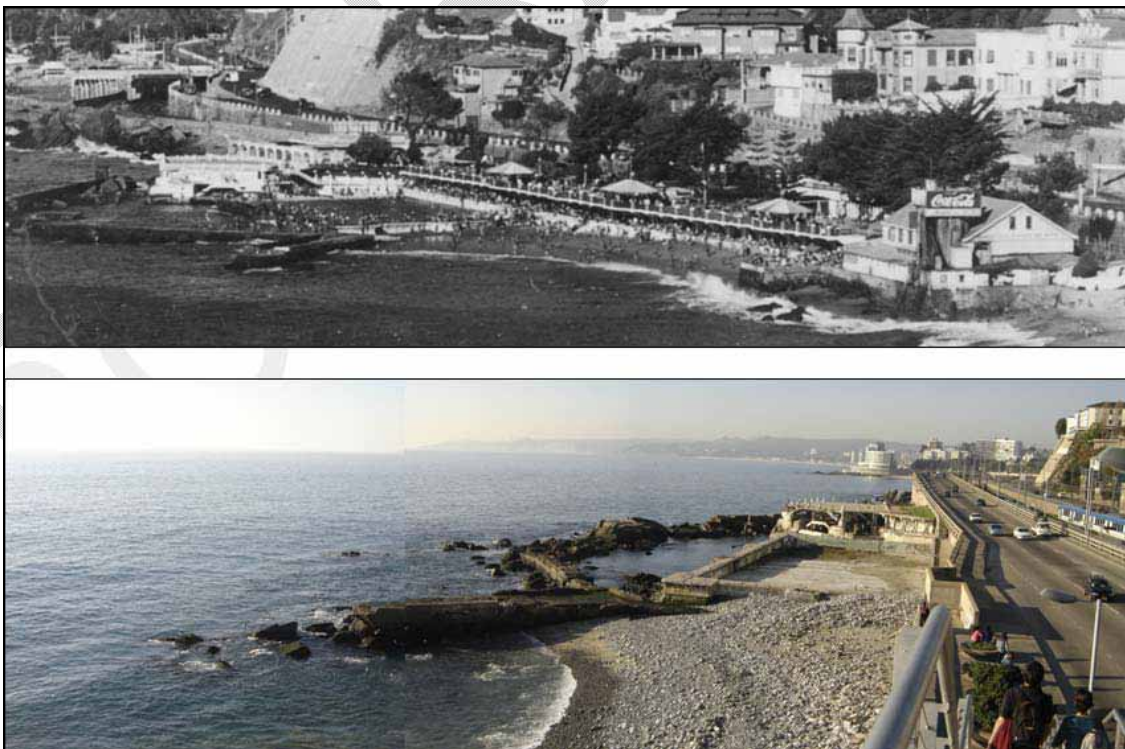
Fuente: La Segunda (N.D.) Suplemento "De la Caleta al Balneario". Serie "Chile, con 70 años de distancia.

Figura 3-5: Playa Miramar en la actualidad. Viña del Mar.



Fuente: Archivo ICO UV.

Figura 3-6: Balneario de Recreo a comienzos del siglo XX y en 2006. Viña del Mar.



Fuente: Archivo ICO UV.

3.3 ESTUDIO DEL NIVEL DEL MAR

Debido a que es el fenómeno más importante en los impactos relacionados al cambio climático, se describirán a continuación metodologías para la determinación de las variaciones del nivel del mar² y e impactos en el medio físico.

3.3.1 METODOLOGÍAS DE ESTUDIO DE LA VARIACIÓN DEL NIVEL DEL MAR

En esta sección se presenta una revisión de algunos métodos de estudio actualmente utilizados en cuantificación de la variación del nivel del mar. Estas metodologías han sido desarrolladas por diversidad de autores, por lo que la disparidad que pueda aparecer entre ellas es esperable. Sin embargo, a menudo ellas son utilizadas en conjunto en estudios orientados a la cuantificación y proyección de las actuales y futuras tasas de aumento del nivel del mar. Para efectos de este informe se han presentado 3 metodologías que intentan sintetizar el nivel de desarrollo actual en este campo de estudio. Las técnicas introducidas responden a una selección basada en la revisión de estudios y publicaciones de diferentes fuentes.

La variabilidad del nivel del mar a nivel global, en el marco de los efectos del cambio climático, ha sido estudiada mediante diferentes técnicas, entre las que se cuentan la altimetría satelital, la reconstrucción de series históricas de larga data y aplicación de modelos numéricos globales, entre otros. Algunas de estas técnicas se introducen a continuación:

- La medición del nivel del mar tiene una larga historia que se remonta hasta la época de los griegos y romanos. En la actualidad, la mayoría de los países disponen de una red de medida distribuida a lo largo de sus costas, diseñada para medir y pronosticar los cambios y variaciones del nivel medio del mar asociados a los cambios de volumen de los océanos, las corrientes marinas y los cambios climáticos (Gómez, 1994). Estos registros son también utilizados para caracterizar la señal de marea y efectuar pronósticos orientados principalmente a la navegación.

Cuantificar la tendencia del nivel medio del mar no es inmediato y tiene un cierto grado de complejidad derivado de variaciones cíclicas regulares e irregulares de origen astronómico, estacionales, de interacción entre océano y atmósfera, efectos de ondas planetarias (ondas Kelvin, ENSO), efectos locales, etc. Estas fluctuaciones al ser analizadas en una escala de tiempo corta, implican que la señal de nivel medio del mar no sea necesariamente estacionaria, lo que dificulta la confiabilidad de los pronósticos y detección de posibles tendencias.

- La técnica de altimetría por satélite tiene la ventaja de cubrir grandes extensiones del océano, a diferencia de los registros costeros que son de carácter esencialmente puntual. Sin embargo, para efectos del análisis del nivel medio del mar, la elevación de la superficie obtenida por los satélites contiene una señal de marea que debe eliminarse.

² De acuerdo al Servicio Hidrográfico y oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), el nivel medio del mar corresponde al promedio de los movimientos del nivel del mar y su expresión física sería la del plano que adoptarían las aguas en reposo, depurada la acción de la marea y otras oscilaciones del mar. No es fácil obtener un valor preciso del nivel medio del mar puesto que el nivel real del agua está variando constantemente. Existen variaciones de corto período causadas por condiciones atmosféricas y de mar; de período medio (variaciones estacionales de la presión y del viento atmosférico) y de largo período, que pueden tomar décadas y aun siglos. La excelencia del NMM depende de la longitud de observación. El período ideal es de 18,6 años (ciclo del nodo lunar), en el cual se cumplen todas las posiciones relativas de la Luna y del Sol respecto de la Tierra.

Esto se realiza mediante el conocimiento previo de las constituyentes armónicas de la marea de cada zona y del residuo meteorológico, datos que deben obtenerse de mareógrafos y estaciones meteorológicas situadas próximas a la traza del satélite, o bien mediante modelos numéricos de marea astronómica (Grobas, 2002).

- A escala geológica, los cambios que ha experimentado el nivel del mar se pueden reconstruir, estudiando las fluctuaciones de las relaciones entre los isótopos 16 y 18 del oxígeno contenidos en los caparazones de organismos bentónicos. Estas relaciones entre los isótopos del oxígeno dependen de la temperatura del mar (Isla, 1989).

3.3.1.1 METODOLOGÍAS BASADAS EN MODELOS GLOBALES

Este tipo de metodología se caracteriza por incorporar en una o varias expresiones, las componentes que influyen en el fenómeno de estudio, determinando por separado cada una de ellas. Una metodología de este tipo es la utilizada por IPCC en Church (2001), en la que se estima el aporte de cada uno de los factores que afectan en el aumento del nivel del mar en la siguiente expresión:

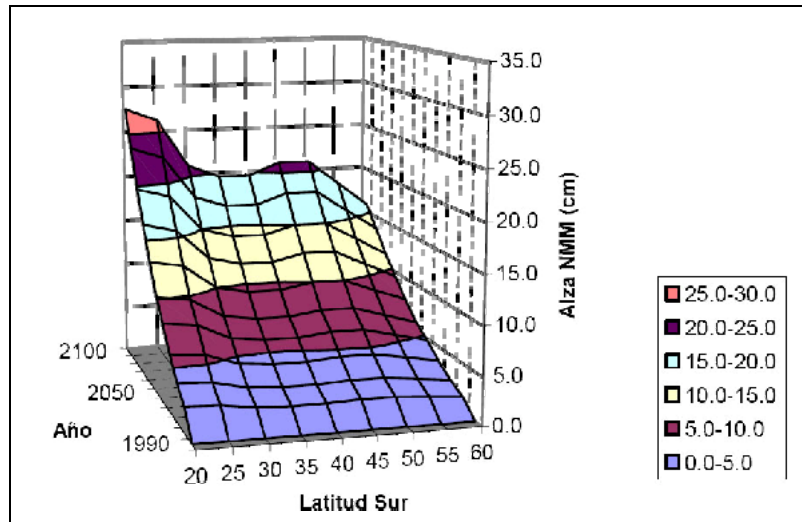
$$h = X + g + G + A + I + p + s$$

Donde

- h : Altura del nivel del mar
- X : Expansión térmica de océanos
- g : Pérdida de masa de glaciares y cuerpos de hielo
- G : Pérdida de masa hielo de Groenlandia debido al reciente cambio climático
- A : Pérdida de masa hielo de la Antártica debido al reciente cambio climático
- I : Pérdida de masa hielo en Antártica y Groenlandia debido a cambios climáticos pasados
- p : Esguccionamiento por descongelamiento del *permafrost*
- s : Depósitos de sedimentos sobre el fondo oceánico

La contribución “X”, “g”, “G” y “A” es determinada mediante modelos *upwelling-diffusion energy-balance* (UD/EB), calibrados según los resultados de modelos de circulación general océano – atmósfera (AOGCM). La contribución de los restantes es determinada a través de datos medidos y resultados de observaciones, asumiendo tasas de variación constante.

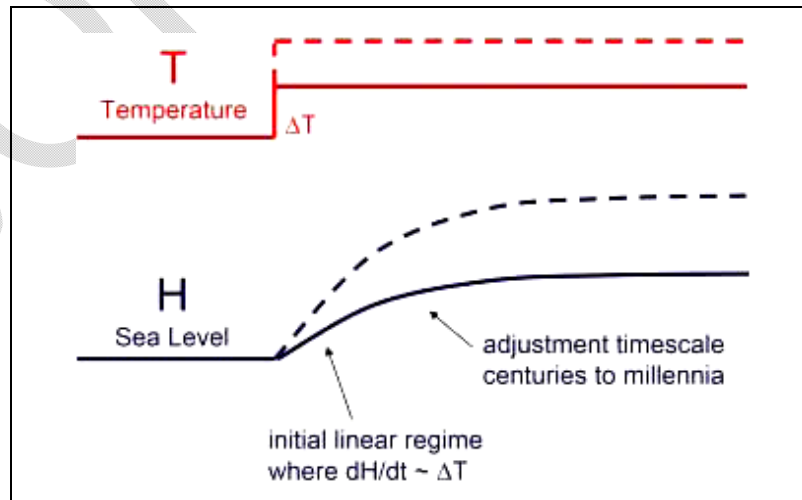
Una metodología similar corresponde a la utilizada en el “Estudio de la Variabilidad Climática en Chile para el Siglo XXI”, preparado por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (2006) para la Comisión Nacional del Medio Ambiente. En el estudio se reportan las estimaciones del nivel del mar para dos de los escenarios propuestos por la IPCC (Church, 2001) en distintas partes del territorio chileno continental. Las estimaciones son obtenidas mediante la combinación de resultados basados en el modelo acoplado atmósfera-océano HadCM3 (Hadley Center Climate Model, version 3) y en resultados presentados por el IPCC en su Tercer Informe (Church, *op. cit.*). Los resultados para la variación en el nivel del mar en Chile se presentan en forma de tablas y gráficos como el que se muestra en la Figura 3-7, en la que se presenta la variación latitudinal y temporal del nivel del mar hasta el año 2100.

Figura 3-7: Variación latitudinal y temporal del nivel del mar en Chile.

Fuente: Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (2006)

3.3.1.2 APROXIMACIONES SEMIEMPÍRICAS

Este tipo de métodos surgen a raíz del sinnúmero de limitantes que impone lo complejo de los procesos involucrados en el aumento del nivel del mar, pues muchas de las dinámicas que influyen en este fenómeno aún no son comprendidas totalmente e incluso algunas de ellas no son siquiera incluidas en los modelos actuales. Rahmstorf (2007) propone un método semi-empírico que correlaciona el aumento de la temperatura superficial del mar (SAT) con el aumento del nivel del mar. Este método utiliza como forzante al calentamiento global (representado en términos de la SAT), sugiriendo que la tasa de aumento del nivel del mar puede relacionarse proporcionalmente con el aumento de temperatura (Figura 3-8).

Figura 3-8: Respuesta del nivel del mar a un aumento de temperatura.

Fuente: Rahmstorf, 2007.

Esto se plantea en términos de la siguiente ecuación:

$$\frac{dH}{dt} = a(T - T_0)$$

Donde

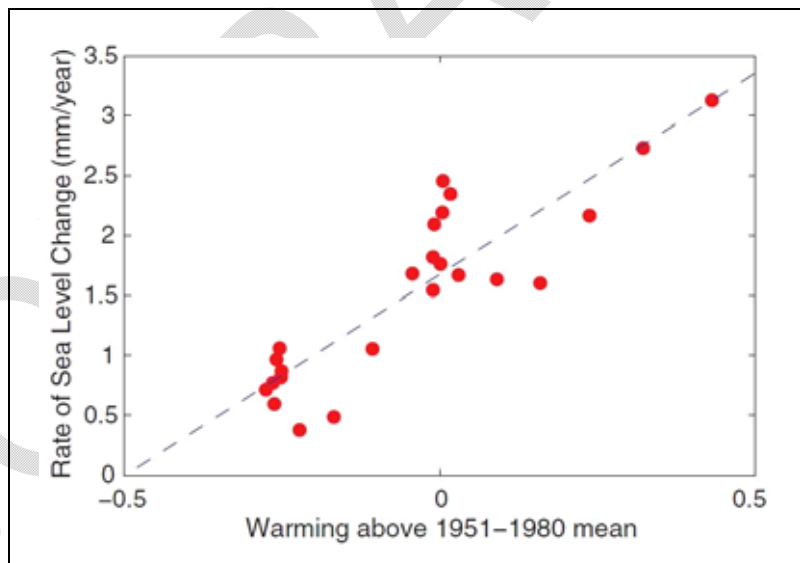
- H : Nivel del mar
 T₀ : Temperatura en tiempo inicial t₀
 T : Temperatura en un tiempo t
 t : Tiempo

La que a su vez permite expresar la variable “H” en función del tiempo, según la expresión:

$$H(t) = a \int_{t_0}^t (T(t') - T_0) dt'$$

Eligiendo algún período de integración para la ecuación anterior, y contrastando con datos medidos de nivel del mar y temperatura superficial del mar, se puede determinar la constante de proporcionalidad “a” (Figura 3-9).

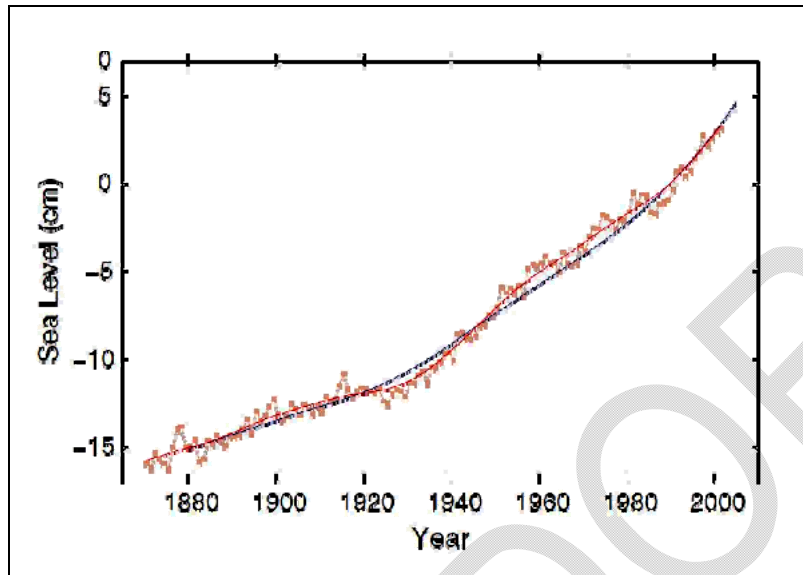
Figura 3-9: Relación entre temperatura superficial y tasa de aumento del nivel del mar.



Fuente: Rahmstorf, 2007.

Esta metodología permite realizar el pronóstico el nivel del mar en el futuro en términos de la temperatura superficial del mar, la que a su vez puede ser estimada mediante modelos globales. La Figura 3-10 muestra la comparación entre los datos de nivel del mar medidos, en cuadrados rojos, y la estimación hecha mediante el método semi-empírico de Rahmstorf (2007), en línea azul. La línea roja indica la señal medida suavizada.

Figura 3-10: Mediciones de nivel del mar y estimación mediante método semi-empírico.

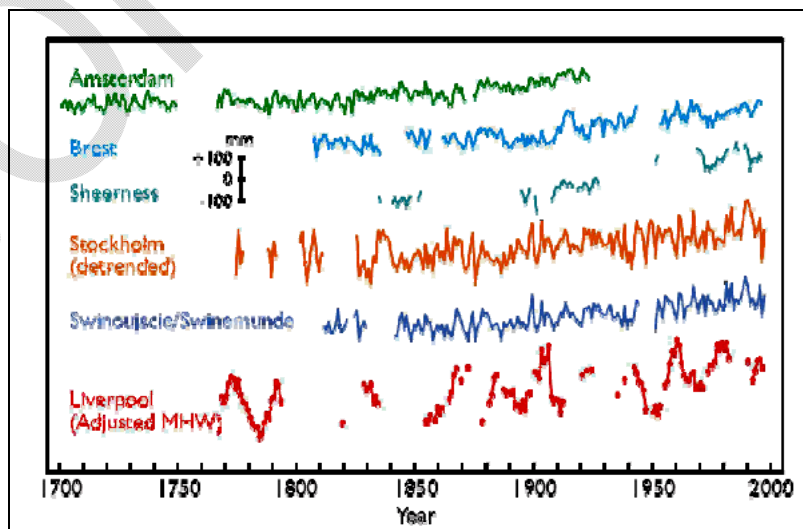


Fuente: Rahmstorf, 2007.

3.3.1.3 ESTIMACIÓN SOBRE LA BASE DE REGISTROS DE ESTACIONES MAREOGRÁFICAS

Los registros de nivel de marea de larga data permiten estudiar la variabilidad temporal del nivel del mar, identificando estacionalidades, tendencias o comportamientos anómalos. El estudio de estos aspectos es esencial en el análisis de los datos, dado que es posible identificar fenómenos de corto, medio y largo plazo que influyen en los registros del nivel del mar, que no son captados mediante las metodologías previamente expuestas. En la Figura 3-11 se presenta una serie de registros de larga data obtenidos en estaciones europeas.

Figura 3-11: Registros de nivel del mar de larga data en Europa.



Fuente: U.S.E.P.A., 2009.

Así, con el fin de determinar una tendencia del nivel del mar es necesario identificar y descontar de las series de tiempo la influencia de la marea astronómica y la marea meteorológica³ en el corto plazo, los efectos estacionales y aquellos debidos a descargas de ríos en el mediano plazo y los cambios en los patrones de circulación oceánica, en la temperatura y densidad del agua, y los fenómenos periódicos no estacionales como El Niño en el largo plazo. Algunas de ellas, como la marea astronómica, son fácilmente identificables, sin embargo, con las restantes esta tarea se dificulta sobremanera.

Este tipo de procedimientos es viable si se cuenta con registros de mareógrafos o redes de medida de amplio rango, tanto espacial como temporalmente. Como limitante, los mareógrafos entregan datos relativos a cotas fijas y por tanto son afectos a movimientos tectónicos, fenómenos de subsidencia, ajuste isostático, entre otros. Estas alteraciones deben ser debidamente identificadas y descontadas de las series temporales. En el capítulo 5 se incluye un análisis de los principales fenómenos tectónicos que se han registrado en Chile.

Peltier (1998) plantea tres criterios en el análisis de series de tiempo de nivel del mar, que surgen como una síntesis de lo planteado en los párrafos precedentes:

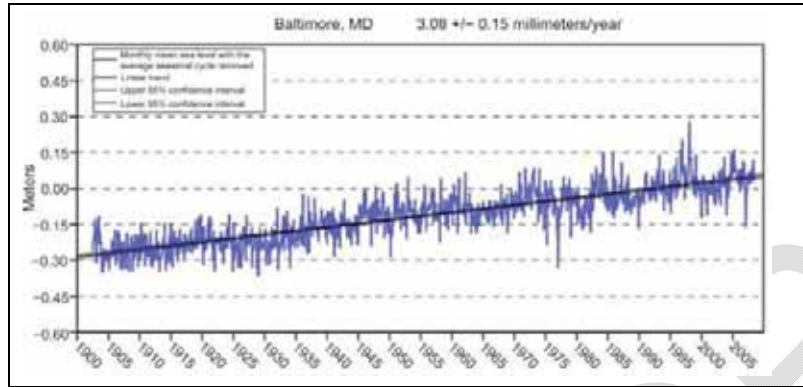
- Los registros deben ser lo suficientemente extensos temporalmente, de tal modo que se eviten los efectos de fenómenos interanuales.
- No considerar los registros donde se sepa exista influencia tectónica o humana de importancia, o en su defecto, estimarla e identificarla adecuadamente (Precisamente ésta es una de las limitaciones que restringen el análisis de los registros en Chile).
- Filtrar los registros para eliminar todos los efectos que afecten las mediciones: ajuste isostático, entre otros.

Por su parte, Gill y Stolz (2005) sugieren el uso del siguiente procedimiento de análisis de registros de nivel del mar:

- **Estimación de tendencia basada en registros individuales:** Se realiza un control de calidad con el fin de detectar y corregir problemas con gaps y outliers en las series de tiempo. Se estima una tendencia provisoria y se resta de la serie original (Figura 3-12). Una serie sintética generada sobre la base de las componentes armónicas de marea es descontada de la serie resultante. Un análisis de mínimos cuadrados permite estimar la tendencia de la señal original. El residuo de esta serie es evaluado mediante pruebas de aleatoriedad, de forma de asegurar con mayor certeza que la tendencia obtenida se debe a variaciones de largo plazo y no efectos interanuales o interdecadales.
- **Estimación de tendencia basada en promedios decadales:** En la Figura 3-13 se muestra los resultados de un análisis de este tipo realizado en San Francisco, una de las estaciones de mayor longitud temporal del sistema NWLON (Gill y Stolz, 2005). El gráfico muestra tendencias del nivel del mar calculadas cada 50 años y superpuestas en intervalos de 5 años y se indica con líneas horizontales tendencias de mayor longitud temporal, pudiendo de esta forma visualizar la dispersión respecto a la media durante algunos períodos.
- **Estudio de las mareas extremas:** Es una herramienta orientada al análisis de datos extremos. Este tipo de análisis permite identificar eventos meteorológicos de inusitada ferocidad y visualizar algunos eventos cíclicos no periódicos como El Niño. Además permite recoger información acerca de la mayor o menor influencia de la marea meteorológica en zonas cercanas (Figura 2-16).

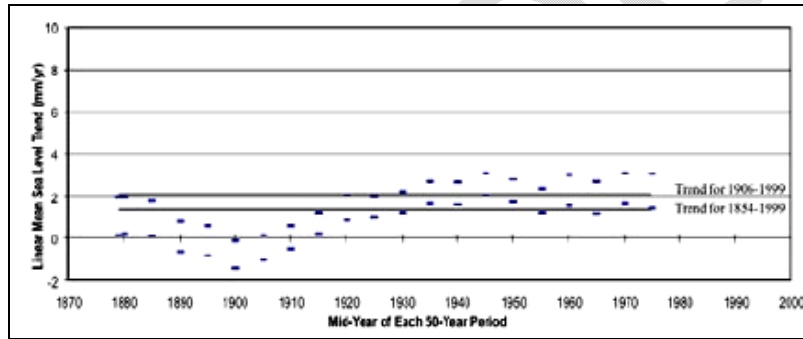
³ La marea meteorológica corresponde a la variación del nivel del mar en el corto plazo (del orden de horas a días) debida a cambios en la presión barométrica y wind set-up.

Figura 3-12: Tendencia media del nivel del mar en Baltimore



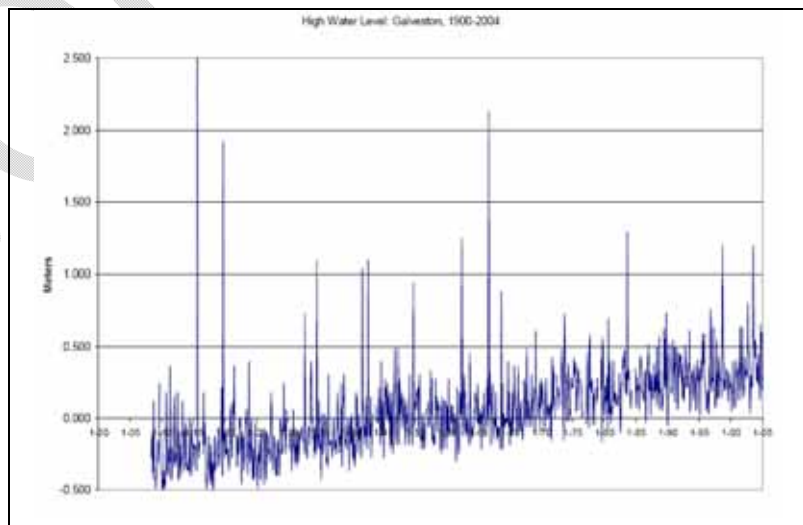
Fuente: Gill y Stolz (2005).

Figura 3-13: Variación de tendencias del nivel del mar en 50 años, San Francisco.



Fuente: Gill y Stolz (2005).

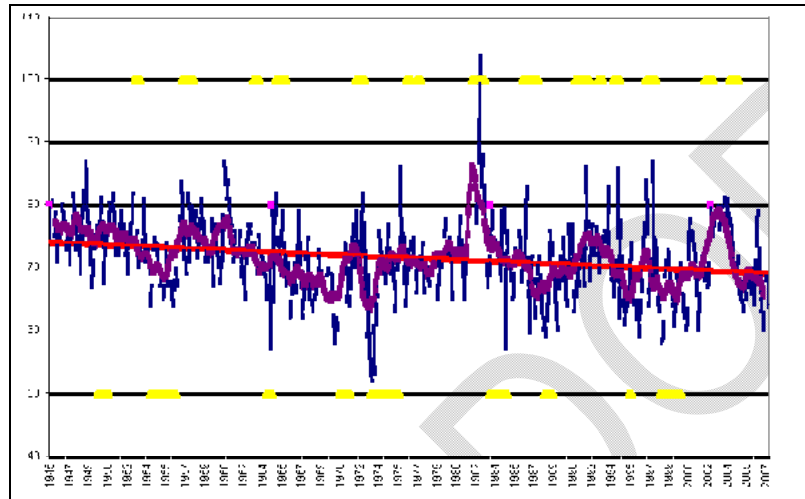
Figura 3-14: Nivel del mar máximo mensual.



Fuente: Gill y Stolz (2005).

En la Figura 3-15 se muestran los máximos mensuales del nivel del mar en el puerto de Antofagasta. Se muestra un ajuste lineal y se han marcado la ocurrencia y duración de los eventos El Niño y la Niña (en amarillo, marcas superiores corresponden a El Niño, las marcas inferiores a La Niña).

Figura 3-15: Valores máximos mensuales del Nivel del Mar en Antofagasta

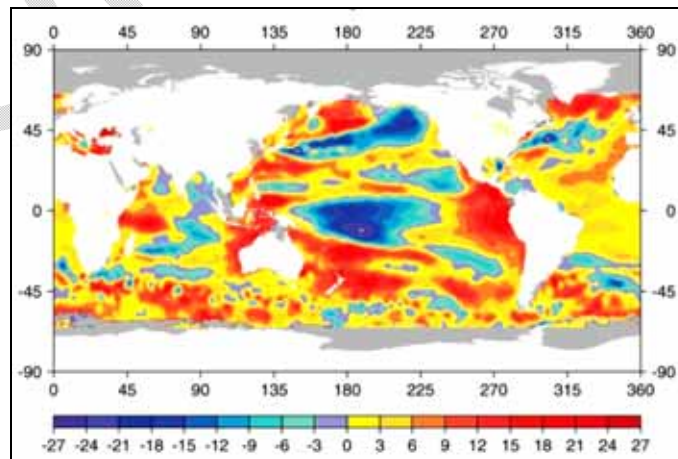


Fuente: Elaboración propia.

3.3.1.4 ESTIMACIÓN SOBRE LA BASE DE REGISTROS DE ALTIMETRÍA SATELITAL

Las técnicas de medición realizadas mediante altimetría satelital se han desarrollado ampliamente en las últimas dos décadas. Los datos de la misión satelital *TOPEX/Poseidon*, cuyo principal objetivo era generar un mapa topográfico oceánico, han provisto de la primera superficie topográfica oceánica global. Sobre la base de los datos obtenidos de esta forma se han podido estimar tendencias globales de variación en el nivel del mar (Figura 3-16), limitadas sin embargo, por la extensión temporal de los registros, que por lo general no superan las dos décadas.

Figura 3-16: Tendencia del nivel del mar 1993-1998 (mm/año). Misión TOPEX-Poseidon.



Fuente: U.S. EPA, 2009.

3.3.2 METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE LOS IMPACTOS

Debido a la necesidad de cuantificar los efectos asociados al aumento del nivel del mar y con ello definir las políticas y acciones más adecuadas para enfrentar los escenarios futuros, es que se han desarrollado diversas metodologías orientadas a determinar en que grado y manera se manifestará el aumento del nivel del mar en distintas zonas costeras. En esta sección se describen algunas de las metodologías y herramientas enfocadas específicamente a la cuantificación del retroceso de la línea de costa y la modificación del régimen de cota de inundación. Cada metodología se identifica por el nombre del organismo autor del documento de referencia. Al final de la sección se incluye un cuadro resumen que sintetiza las principales características de cada metodología.

3.3.2.1 MAINE GEOLOGICAL SURVEY (MGS)

Este estudio es definido como un proyecto de demostración y es realizado por *Maine Geological Survey* en una reserva de la vida salvaje *Rachel Carson National Wildlife Refuge*, ubicada en el estado de Maine (Slovinsky y Dickson, 2006). En el estudio se simulan aumentos estáticos⁴ del nivel del mar de 1, 2 y 3 [pie] en la zona de estudio y a partir de ello se determinan los potenciales impactos por inundación y sobre los hábitat pantanosos de la zona. La metodología contempla esencialmente 2 etapas:

- **Recopilación y adquisición de datos de la región de estudio:** Se utilizan los datos topográficos de 2004 LIDAR de NOAA Coastal Services Center. Se adquiere además ortofotografías aéreas de 1 [pie] de resolución de alta calidad en color verdadero (24-bit).
- **Proyección del aumento estático del nivel del mar y sus impactos en la zona de estudio:** Se definen cuatro tipos de terreno de acuerdo a su altitud y a la vegetación observada.
 - Marisma baja: terrenos ubicados entre el nivel más bajo de la marea (NAVD) y el nivel medio de pleamar (MHW)⁵.
 - Marisma alta: terrenos ubicados entre el nivel medio de pleamar (MHW) y el nivel de marea máxima anual (HAT).
 - Tierras altas: terrenos ubicados por sobre el nivel de marea máxima anual (HAT).
 - Áreas de mar abierto: terrenos ubicados bajo el nivel más bajo de la marea (NAVD).

Sobre la base de esta definición se evalúan los cambios que generaría un aumento estático del nivel del mar de 1, 2 y 3 [pie], en la distribución de áreas de los distintos tipos de terreno, además de la cuantificación e identificación de las zonas de inundación.

Los resultados son entregados en forma de tablas y planos de inundación como los mostrados en la Figura 3-17 y Figura 3-18.

⁴ El concepto en inglés "Static rise in sea level" se refiere al nivel del mar que no considera efectos de oleaje ni marea meteorológica.

⁵ La sigla NAVD se refiere al North American Vertical Datum, 1988. Es el nivel de referencia utilizado en todo el estudio. La sigla MHW se refiere a Mean High Waters, en tanto que la sigla HAT se refiere a Highest Astronomical Tide.

Figura 3-17: Cambios en los terrenos de marisma baja por efecto de MHW.



Fuente: Slovinsky y Dickson, 2006.

Figura 3-18: Ejemplo de plano de inundación.



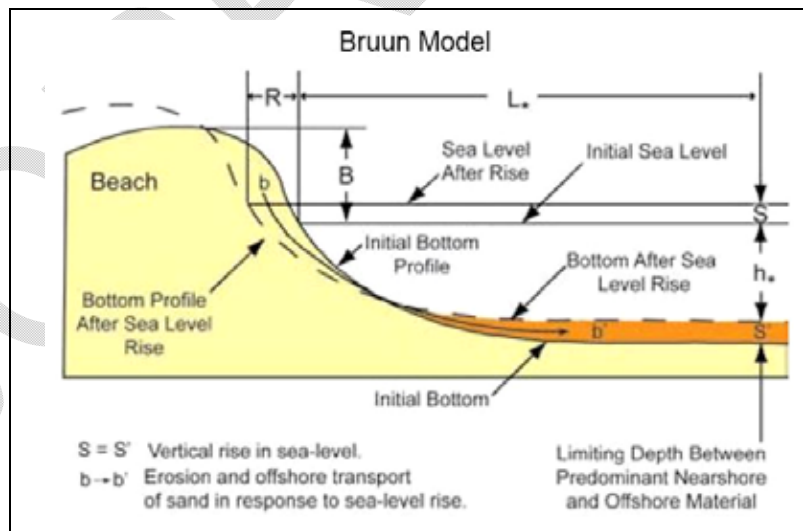
Fuente: Slovinsky y Dickson, 2006.

3.3.2.2 CENTER FOR CLIMATE SYSTEMS RESEARCH, COLUMBIA UNIVERSITY (CCSR)

Gomitz (2000) realiza una evaluación del aumento del nivel del mar y de las amenazas costeras en la Región Metropolitana de la Costa Este. Considerando varios de los escenarios más plausibles de cambio climático en la región de estudio, se estiman los efectos sobre las zonas de inundación, el retroceso de playas, los costos de mantenimiento de playas, entre otros. La metodología utilizada puede sintetizarse de la siguiente manera:

- **Recolección y adquisición de datos:** Se obtuvieron datos históricos de mareógrafos y extrapolaciones basadas en modelos globales de nivel de marea, datos topográficos y batimétricos, además de datos de oleaje y estadísticas meteorológicas.
- **Estimación del aumento del nivel del mar:** El aumento del nivel del mar en la zona de estudio fue estimado sobre la base del análisis histórico de datos de mareógrafos y de varios modelos de circulación global. Los escenarios de aumento del nivel del mar se estimaron mediante extrapolación de las actuales tendencias de largo plazo, además de los modelos de circulación global propuestos por diversas entidades⁶. Los datos de mareógrafos son ajustados de acuerdo a los movimientos verticales de tierra de la región.
- **Determinación del área de inundación:** Para evaluar los cambios en las zonas de inundación se utiliza el WES Implicit Flooding Model; modelo hidrodinámico que incorpora datos topográficos y batimétricos, de marea astronómica, oleaje y efectos meteorológicos.
- **Determinación de la respuesta de la línea de costa:** Para determinar los cambios en la línea de costa se utiliza la regla de Bruun (Figura 3-19).

Figura 3-19: Representación esquemática de regla de Bruun



Fuente: U.S.E.P.A., 2009.

⁶ Entre ellas U.S. National Assessment of Potential Climate Change Impacts, The Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis (CCCMA) y the United Kingdom Hadley Centre.

Los resultados de este estudio son presentados en forma de tablas que entregan el retroceso de la línea de costa y la cota de inundación a futuro. Cada una de ellas es evaluada para diferentes escenarios de aumento de nivel del mar y considerando varios horizontes de temporales.

3.3.2.3 FEDERAL EMERGENCY MANAGEMENT AGENCY (FEMA)

El estudio de la FEMA (1991) surge en el marco del programa *National Flood Insurance Program* y se aboca a la cuantificación de los impactos en las zonas donde existe riesgo de inundación y de la proyección de las pérdidas económicas asociadas al aumento del nivel del mar. La metodología utilizada respecto al aumento del nivel del mar se describe a continuación:

- **Estimación del aumento del nivel del mar:** Se suponen escenarios de aumento del nivel del mar de 1 y 3 [pie] a 100 años plazo. El primero de ellos se propone como un criterio de reevaluación que indicaría el momento propicio para un reestudio de los riesgos de inundación y reformulación de los planos respectivos. El segundo es elegido como un valor medio entre la mejor y la peor estimación propuesta por la IPCC bajo el escenario *"business as usual"*, el más pesimista de ellos (Church, 2001). Para la evaluación de la variación temporal de la temperatura, se utiliza la siguiente expresión:

$$T(t) = \left(0,0012 + \frac{M}{1000} \right) t + b t^2$$

Donde:

- T : Aumento total del nivel del mar en [m]
 t : Tiempo en [año]
 M : Subsistencia (+) o solevantamiento (-) en [mm/año]
 b : Coeficiente cuyo valor debe satisfacer el requerimiento que T (con M=0) asume el valor correcto (asignado previamente) de eustacia para algún valor de t

Los valores adoptados por FEMA para "M" y "b" dependen de la región de estudio y por tanto el detalle de su elección no se incluye en el presente informe. En la práctica esta expresión no se utiliza, no obstante se calibra de modo tal que los coeficientes utilizados son consistentes con los valores futuros de nivel del mar utilizados.

- **Determinación del área de inundación:** Para determinar los cambios en el área de inundación se realizan dos consideraciones. La primera radica en considerar que el nivel dado por T(t) coincide con el nivel de inundación estático (Stillwater flood level) y por tanto no se consideran interacciones de segundo orden ni efectos de marea meteorológica. La segunda consiste en asumir que existe una relación lineal entre el aumento del nivel del mar y el aumento del área de inundación. Esto se sintetiza mediante la expresión:

$$AF = \left(\frac{NMF}{NIE} \right) AA$$

Donde:

- AF : Área de inundación futura
 AA : Área de inundación actual
 NMF : Nivel del mar futuro
 NIE : Nivel de inundación estático

- **Recopilación de antecedentes:** Para realizar el cálculo del área de inundación descrito en el punto anterior es necesario obtener previamente datos topográficos que permitan determinar el área de inundación actual.

- **Determinación de retroceso de la línea de costa debido a erosión:** Aunque existe una sección referida directamente a los efectos erosivos asociados a la variación del nivel del mar, la justificación y el desarrollo del procedimiento utilizado no son del todo claros, y por tanto en este informe no se hará referencia a ellos.

Los resultados de este estudio se presentan fundamentalmente en forma tablas, indicando los cambios en las planicies de inundación para cada sector de estudio debido a aumentos de 1 y 3 [pies] en el nivel del mar, además de gráficos y tablas que muestran los resultados demográficos incluidos en el estudio.

3.3.2.4 GRUPO DE INGENIERÍA OCEANOGRÁFICA Y DE COSTAS, U. CANTABRIA (GIOC).

El Documento Temático “Atlas de Inundación del litoral peninsular español” se crea como parte del Modelo de Ayuda a la Gestión Litoral y tiene como objetivo a desarrollar una metodología que permita la determinación del régimen de cota de inundación en algún punto del litoral. Esta metodología es aplicada a la base de datos instrumentales del litoral para la creación de un atlas de inundación.

A partir de una exposición de los procedimientos utilizados en la determinación de la cota de inundación se determina que, considerando el tipo de datos y recursos disponibles, la metodología óptima para generar el atlas de inundación consiste en la aplicación de un método indirecto de simulación, considerando funciones de distribución para la marea meteorológica, marea astronómica, altura de ola significativa y período *peak*. La metodología utilizada se sintetiza a continuación:

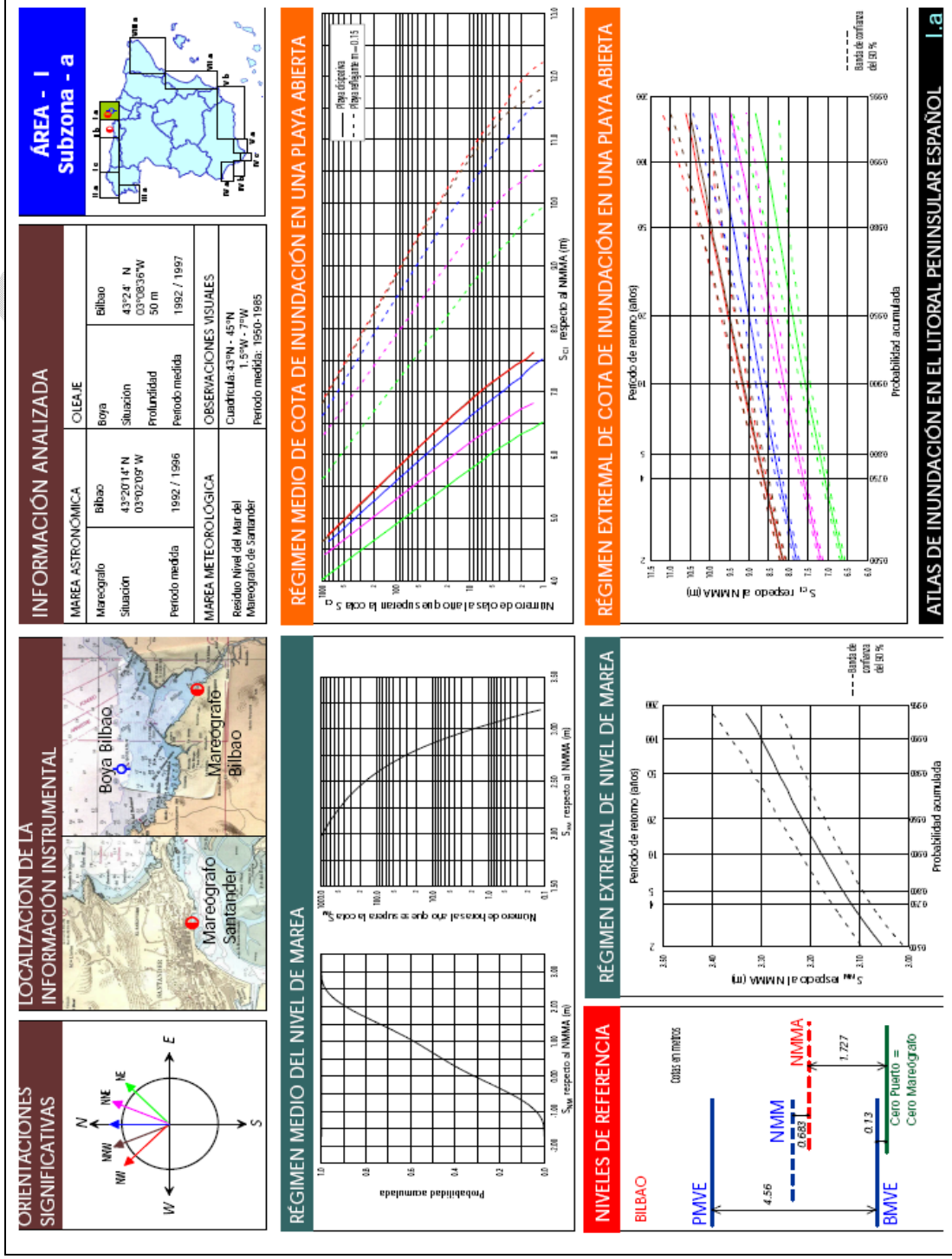
- **Adquisición de datos:** Se adquieren información proveniente de boyas, mareógrafos y datos visuales.
- **Análisis de datos:** Se realiza un estudio de la dependencia estadística entre las variables involucradas, además de un estudio de la dependencia temporal de datos sucesivos. Luego se obtienen las funciones de distribución de las diferentes variables.
- **Obtención de la cota de inundación:** Se establecen las formulaciones necesarias para obtener las variables de las cuales no se dispone información directa, como oleaje en agua someras a partir de oleaje en aguas profundas, run up del oleaje en la playa, entre otros. Se realiza la simulación temporal mediante el método de Monte Carlo. Se determinan los regímenes de cota de inundación y confecciona el atlas.

Los resultados son entregados en forma un atlas de inundación que incluye, para cada zona de estudio, el régimen medio de nivel de marea y el régimen extremal de nivel de marea para zonas de mar abierto, y el régimen medio de cota de inundación y el régimen extremal de cota de inundación para playas abiertas. En la Figura 3-20 muestra un extracto del Atlas de Inundación en el litoral peninsular español.

3.3.2.5 RESUMEN DE METODOLOGÍAS

En la Tabla 3-1 se presenta un resumen de las metodologías presentadas en este capítulo, en términos de los datos de entrada, impactos evaluados y resultados.

Figura 3-20: Extracto Atlas de Inundación en el litoral peninsular español.



Fuente: Grupo de Ingeniería Oceanográfica y de Costas, Universidad de Cantabria.

Tabla 3-1: Resumen de metodologías para el estudio de impactos.

Metodología	Entrada		Impactos evaluados		Resultados	
	Escenarios	Datos	Cota de inundación	Retroceso costa	Salidas gráficas	Probabilidades
MGS	Aumentos estáticos de 1, 2 y 3 [pie]	Topografía de Lidar 2004 Ortofotografías de alta calidad	Se evalúan cambios en la distribución de áreas de diferentes tipos de maismas costeras.	No	Planos de inundación y modificación del tipo de terreno para distintos niveles de marea.	No
CCSR	5 escenarios de aumento	Mareógrafos Datos de marea de modelos globales Topobatimetría Oleaje Datos meteorológicos	Si	Se evalúa el retroceso de la línea de costa de acuerdo a la ley de Bruun.	No	No
FEMA	Escenarios de 1 y 3 [pie]	Información de planicies de inundación actuales.	Si	-	No	No
GIOC	Simulaciones de datos de entrada y fórmulas empíricas.	Nivel de marea Oleaje	Si	No	Atlas de inundación. Incluye régimen medio y extremo de cota de inundación en playas	Probabilidad de excedencia para cotas de inundación definidas

Fuente: Elaboración propia.

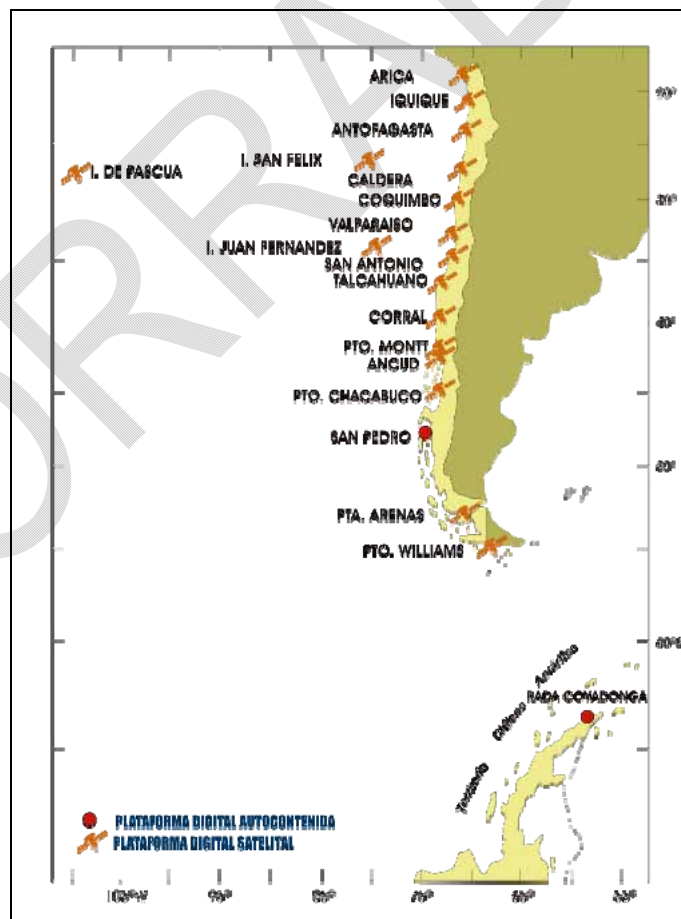
4 ESTUDIO DE NIVEL DEL MAR EN LAS COSTAS DE CHILE

El estudio del nivel medio del mar efectuado en el marco de este estudio se orienta a definir variaciones en el medio y largo plazo, sobre la base del análisis de series horarias de nivel del mar disponible en los principales puertos chilenos. Esta escala temporal de análisis se ha adoptado en razón de que el nivel de la superficie del mar es resultado de la superposición de fenómenos ondulatorios asociados a diferentes mecanismos de generación que abarcan escalas espaciales y temporales en esencia diferentes, y que pueden ser analizadas desagregadas con el objeto de obtener la señal del nivel del mar en forma independiente.

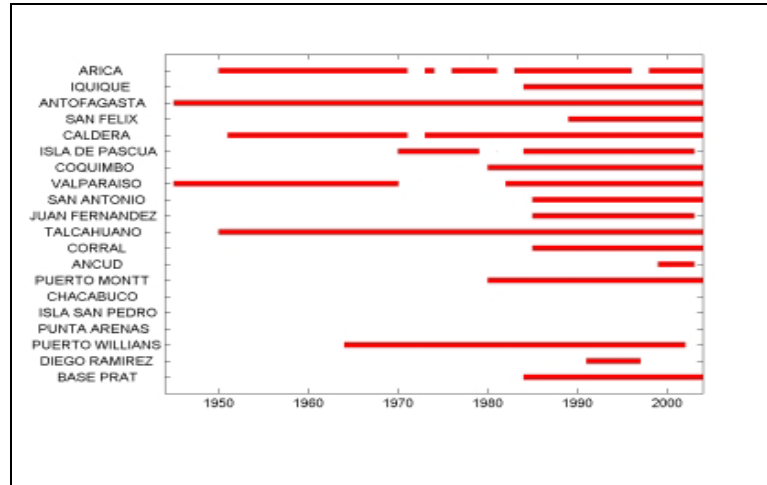
4.1 METODOLOGÍA

El estudio de la variación del nivel del mar en las costas de Chile se realizará en base a las series horarias del nivel del mar, obtenidas de la Red Mareográfica Nacional dependiente del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, que cuenta con 20 mareógrafos en los principales puertos del país (Figura 4-1). En el presente estudio se utiliza la información proporcionada por el Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile, CENDHOC, en las estaciones de Arica, Antofagasta, Caldera, Isla de Pascua, Valparaíso, Talcahuano y Puerto Williams. En la Figura 4-2 se presenta la longitud de los registros en los principales puertos de Chile.

Figura 4-1: Estaciones del nivel del mar en Chile.



Fuente: www.shoa.cl

Figura 4-2: Duración de registro del nivel del mar en las estaciones costeras.

Fuente: www.shoa.cl.

El detalle de las estadísticas utilizadas en las siete localidades seleccionadas se presenta en la Tabla 4-1.

Tabla 4-1: Detalle de estadísticas utilizadas en el análisis del nivel del mar.

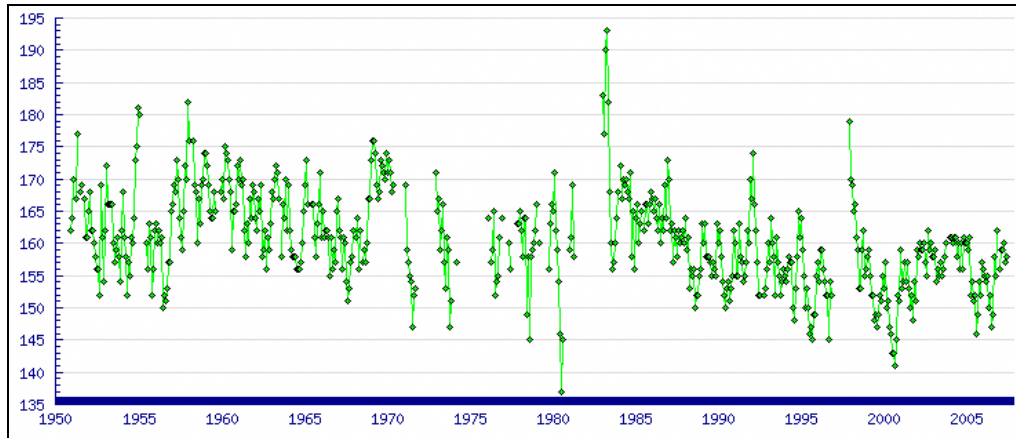
Estación	Latitud	Longitud	Duración	Inicio	Término
Arica	18°28'26"S	70°19'16"W	59 años	06/12/1950	31/12/2008
Antofagasta	23°38'57"S	70°24'09"W	64 años	06/12/1945	30/11/2008
Caldera	27°03'49"S	70°49'25"W	57 años	01/12/1950	30/11/2006
I. de Pascua	27°09'16"S	109°27'33"W	51 años	16/01/1957	29/04/2008
Valparaíso	33°01'38"S	71°37'33"W	65 años	02/01/1944	29/04/2008
Talcahuano	36°42'17"S	73°06'44"W	60 años	01/08/1949	29/06/2008
Pto. Williams	54°55'54"S	67°36'32"W	40 años	04/11/1964	01/04/2005

Fuente: Elaboración propia.

A modo de ejemplo, en la Figura 4-3 y la Figura 4-9 se muestran gráficos de promedio mensual del nivel del mar mensual de las estaciones en estudio.

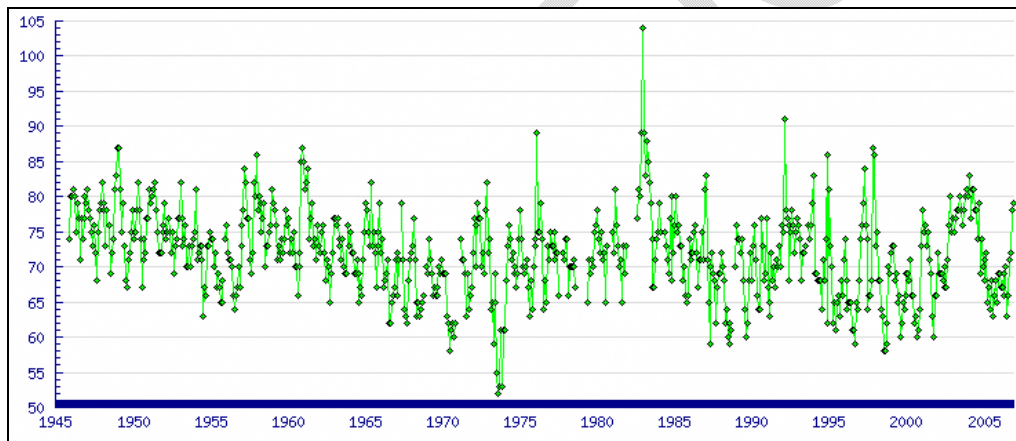
Dichos registros han sido sometidos a controles de calidad y se encuentran referidos a datum conocido. En general, el instrumental ha mantenido la misma ubicación a través del período consignado para cada estación. Sin embargo, han existido cambios al tipo de instrumento utilizado. Inicialmente se utilizaron mareógrafos estándar a flotador con registro gráfico, los que fueron reemplazados entre los años 1980 y 1985 por equipos Metercraft que operan con el sistema de burbuja neumática, registrando la presión hidrostática de la columna de agua. A partir del año 1999, se renovó la red nacional, utilizando instrumentos digitales con la opción de transmisión satelital de los datos recolectados, sistema que se mantiene vigente hasta la fecha. Un análisis apropiado de estos registros con metodologías de series de tiempo para el análisis de registros largos, permite identificar los principales elementos que explican la variabilidad del nivel del mar y estimaciones con cotas de error para valores extremos o más pesimistas.

Figura 4-3: Promedio mensual del nivel del mar en Arica.



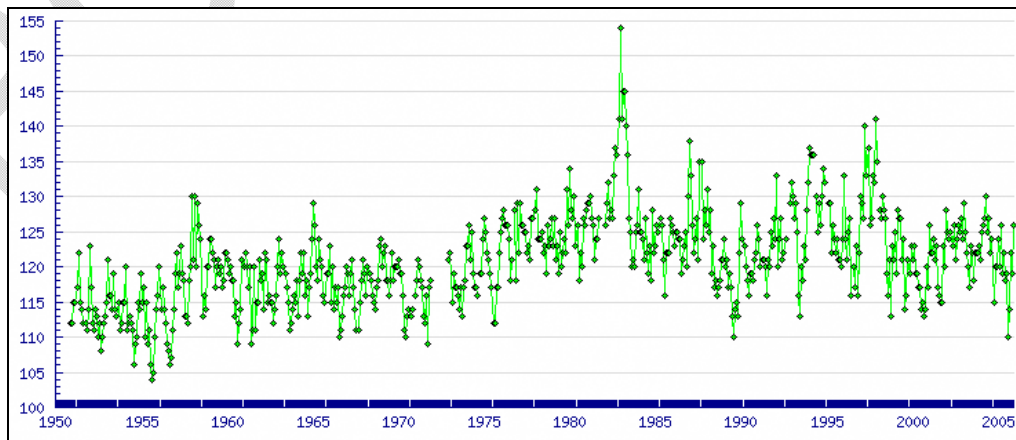
Fuente: Adaptado de www.shoa.cl.

Figura 4-4: Promedio mensual del nivel del mar en Antofagasta.



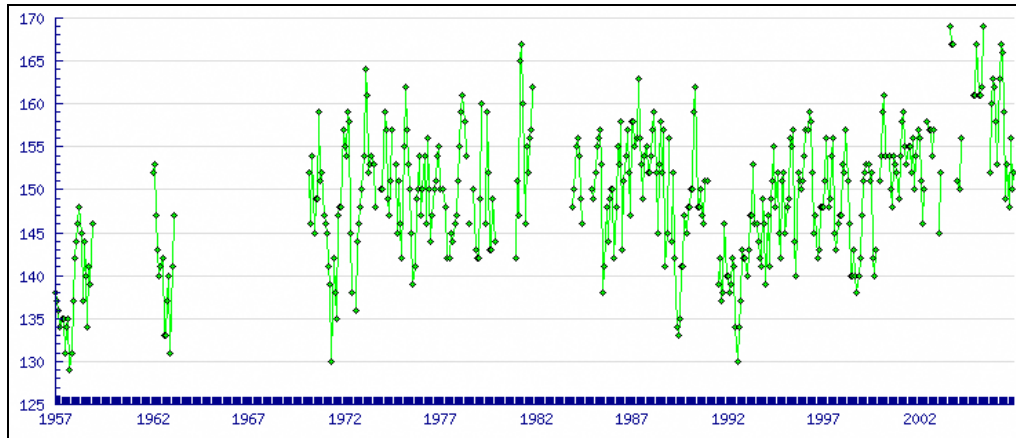
Fuente: Adaptado de www.shoa.cl.

Figura 4-5: Promedio mensual del nivel del mar en Caldera.



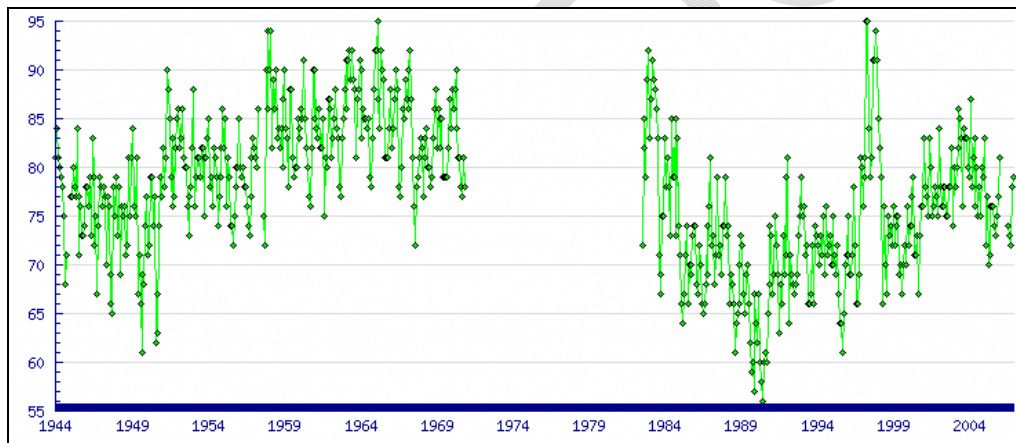
Fuente: Adaptado de www.shoa.cl.

Figura 4-6: Promedio mensual del nivel del mar en Isla de Pascua.



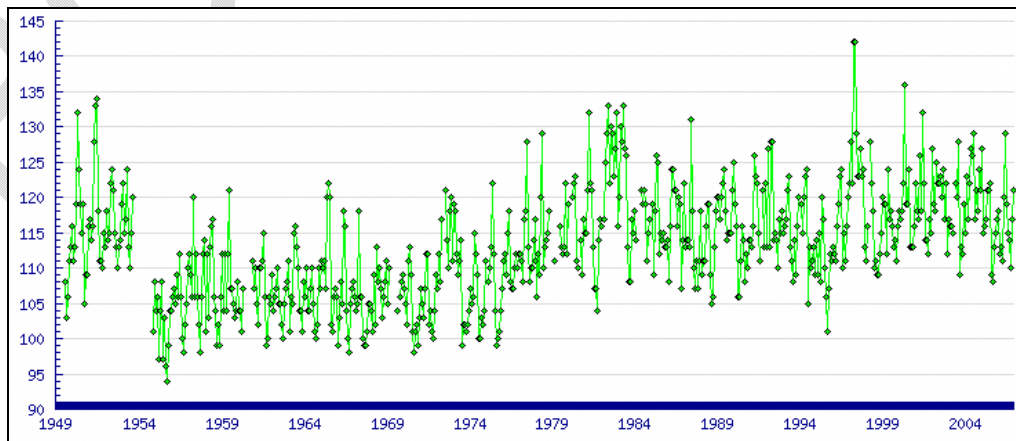
Fuente: Adaptado de www.shoa.cl.

Figura 4-7: Promedio mensual del nivel del mar en Valparaíso.

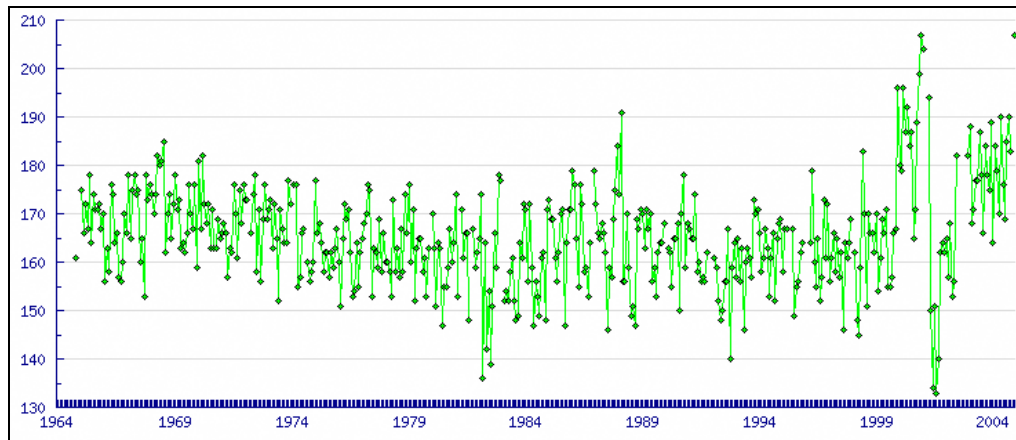


Fuente: Adaptado de www.shoa.cl.

Figura 4-8: Promedio mensual del nivel del mar en Talcahuano.



Fuente: Adaptado de www.shoa.cl.

Figura 4-9: Promedio mensual del nivel del mar en Puerto Williams.

Fuente: Adaptado de www.shoa.cl.

Las siete series horarias de larga duración, en su conjunto comprenden 3.434.761 de datos de nivel del mar (Tabla 4-3), y presentan diferentes grados de calidad. Las series de Caldera, Antofagasta, Talcahuano y Puerto Williams tienen un número dos o tres veces inferior de problemas con respecto a las series de Isla de Pascua, Arica y Valparaíso.

El SHOA proporcionó las series con los *gaps* (datos faltantes) debidamente etiquetados. Adicionalmente se realizó una inspección gráfica y una verificación de estadística básica mensual (media, desviación estándar, máximo, mínimo) y la consistencia de la secuencia temporal de la serie, detectándose un total de 5 *outliers* (datos erróneos) en las siete series. A modo de ejemplo, en la Tabla 4-2 se muestra la distribución del número de *gaps* y *outliers*, por mes y año, presentes en el registro correspondiente a la localidad de Talcahuano. Todas las series presentan *gaps* de diferente extensión (desde una hora faltante, hasta meses y en algunos casos años completos, como es el caso de Valparaíso e Isla de Pascua). En la Tabla 4-3 se muestra el porcentaje total de *gaps* y *outliers*, por registro.

Para superar los *gaps* y *outliers* detectados en las series de nivel del mar, en una primera aproximación se adoptó el criterio de interpolar linealmente aquellas situaciones de extensión de 1 ó 2 datos (1 ó 2 horas). Para situaciones de mayor extensión, se interpoló con una tendencia lineal ajustada para minimizar el error cuadrático, técnica robusta, pues no requiere contar con una serie equiespaciada. Se adoptó este criterio en vez de una técnica clásica de correlación cruzada con una serie vecina o una autocorrelación (Broenkow & Breaker, 2005; Breaker & Broenkow, 2005), pues al ser el objeto de estudio general los cambios de comportamiento de gran escala en el tiempo y no las fluctuaciones horarias, se evita así alterar la estimación de la tendencia lineal.

Tabla 4-2: Número de gaps y outliers por mes y año en Talcahuano.

	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
1949	744	672	744	720	744	720	744	1	0	0	0	0
1950	0	0	0	71	58	0	8	56	0	0	0	0
1951	0	1	0	0	6	1	35	6	0	0	0	73
1952	0	0	0	0	0	0	19	28	0	6	34	10
1953	0	2	0	1	21	1	0	31	0	744	720	744
1954	744	672	744	720	744	720	744	744	720	744	504	0
1955	0	9	0	0	20	11	3	12	71	0	0	214
1956	0	24	13	52	0	0	0	42	0	0	1	0
1957	0	6	2	5	0	0	0	5	0	0	39	56
1958	0	13	0	9	0	0	0	0	0	1	1	0
1959	1	0	31	45	0	3	1	20	0	0	1	0
1960	0	0	0	0	264	720	744	744	720	744	720	18
1961	1	0	21	0	0	0	0	0	0	0	10	0
1962	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1963	0	51	75	72	268	203	96	45	1	162	0	6
1964	192	32	97	15	22	11	0	0	11	0	11	10
1965	1	0	8	0	2	2	0	0	0	0	12	10
1966	0	3	72	10	4	0	0	7	0	0	0	6
1967	2	5	0	1	361	122	11	17	4	5	2	1
1968	0	0	21	342	0	0	0	0	1	0	0	0
1969	0	2	0	720	744	720	744	744	0	720	0	0
1970	0	12	2	0	0	288	25	264	0	0	2	1
1971	144	11	8	0	0	18	5	3	0	0	0	122
1972	32	2	0	1	192	720	744	0	0	15	0	0
1973	2	34	0	13	1	0	12	16	1	0	0	0
1974	13	0	7	4	12	12	25	14	4	0	1	1
1975	0	672	0	0	8	0	61	6	0	0	0	24
1976	0	0	34	21	0	24	6	0	0	7	0	0
1977	0	1	24	1	56	0	21	0	3	9	0	0
1978	48	24	0	0	160	13	0	0	0	0	0	20
1979	744	672	468	192	600	720	744	144	0	75	18	0
1980	0	1	720	437	14	48	0	3	7	720	6	3
1981	0	0	0	0	13	0	23	0	0	10	18	0
1982	95	29	735	12	30	48	123	3	158	43	4	34
1983	313	73	0	0	0	0	0	17	72	0	0	0
1984	106	28	96	718	744	688	230	17	111	0	5	10
1985	27	278	125	11	0	16	25	11	5	38	0	0
1986	17	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	343
1987	49	0	0	0	0	45	12	1	0	0	10	0
1988	30	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0
1989	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1990	24	9	12	0	22	0	9	0	0	7	0	0
1991	32	0	8	0	21	0	0	141	20	744	323	0
1992	0	30	0	0	0	0	0	8	11	63	41	29
1993	0	0	28	140	250	0	141	0	0	25	1	11
1994	43	331	9	137	48	25	0	0	0	26	55	0
1995	0	42	10	74	0	55	44	0	0	45	0	0
1996	0	228	149	214	48	129	0	0	153	27	0	0
1997	0	0	60	0	1	41	1	0	0	0	0	38
1998	0	19	0	479	0	14	25	0	0	0	0	0
1999	0	0	17	14	217	71	16	3	6	22	4	4
2000	3	10	14	169	17	0	3	4	12	18	1	13
2001	4	9	56	12	78	7	0	0	92	32	62	4
2002	37	57	0	15	15	0	10	38	41	63	7	14
2003	27	5	21	1	129	642	5	4	108	51	3	42
2004	91	6	4	64	118	5	28	2	10	12	39	16
2005	4	4	19	3	10	9	54	0	6	14	2	8
2006	5	10	5	52	2	104	11	3	6	4	50	13
2007	3	4	5	6	4	0	18	18	2	74	221	201
2008	1	1	11	4	38	24	744	744	720	744	720	744

Fuente: Elaboración Propia.

Tabla 4-3: Porcentaje de gaps y outliers por localidad.

Localidad	Nº Gaps	Total de Datos	% Gaps
Arica	101.090	502.584	20,11
Antofagasta	44.118	556.322	7,93
Caldera	32.442	491.640	6,60
Isla de Pascua	159.220	449.591	35,41
Valparaíso	121.486	563.904	21,54
Talcahuano	47.202	516.432	9,14
Puerto Williams	29.856	354.288	8,43
TOTAL	535.414	3.434.761	15,59

Fuente: Elaboración Propia

Las series equiespaciadas resultantes fueron analizadas con filtros lineales pasa-bajo (Doodson AD0X y Savinski-Golay) o no lineales (Godin) para evitar la pérdida excesiva de datos y representar correctamente las fluctuaciones extremas (Contreras, 2001). El filtro Doodson en particular, permite eliminar las fluctuaciones diarias atribuibles a la marea (Gómez, 1994). El filtro Savinski-Golay, tiene la propiedad de eliminar las fluctuaciones de alta frecuencia, conservando los valores extremos.

Las series filtradas fueron analizadas con una estadística clásica, asumiendo que ya no son influenciadas con los efectos de las mareas, permitiendo de esta manera estimar cambios en el nivel medio del mar.

4.2 RESULTADOS DEL ESTUDIO DEL NIVEL DEL MAR EN CHILE

A continuación se sintetizan los principales resultados del análisis de series de tiempo de los registros horarios de larga duración en cada una de las localidades donde el SHOA proporcionó los datos.

4.2.1 ARICA

En la Tabla 4-4 se presenta el resumen estadístico de las variaciones del nivel del mar en Arica. Se aprecia que en promedio, el nivel del mar ha disminuido en torno a 8,2 [cm] en 58 años de estadística.

Tabla 4-4: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Arica.

Años	Promedio [cm]	D. Estándar [cm]	Mínimo [cm]	Máximo [cm]
1950 – 1959	163,89	29,71	85	264
1960 – 1969	163,90	29,37	93	254
1970 – 1979	160,52	29,62	85	255
1980 – 1989	162,00	29,49	83	259
1990 – 1999	156,40	28,69	84	253
2000 – 2008	155,67	28,89	82	250

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4-10 se muestra la variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Arica, donde se han graficado las series de promedios mensuales después de filtrar la serie de nivel del mar para eliminar el efecto de las mareas, las estimaciones de normales de la banda de confianza del 67%¹, los valores máximos encontrados y los ajustes lineales tanto para los promedios, como los valores máximos. Se encuentra para los niveles medios una pendiente negativa -0.00002 .

En la Figura 4-11 se muestran las pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en Arica, que permiten evaluar los cambios interanuales experimentados por el nivel del mar en esta localidad. Se observa que las pendientes tienen un comportamiento cíclico irregular, intercalándose relativamente severos valores dependientes negativas con otros de menor magnitud y unos pocos valores positivos, resultando una serie cuya tendencia es decreciente. Sin embargo se debe observar que las pendientes se encuentran en el rango $-0,01$ a $+0,004$.

4.2.2 ANTOFAGASTA

En la Tabla 4-5 se presenta el resumen estadístico de las variaciones del nivel del mar en Antofagasta. Se aprecia que en promedio, el nivel del mar ha disminuido en torno a $5,5$ [cm] en 63 años de estadística. Este comportamiento es similar al de Arica.

Tabla 4-5: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Antofagasta.

Años	Promedio [cm]	D. Estándar [cm]	Mínimo [cm]	Máximo [cm]
1945 – 1949	76,03	31,62	1	173
1950 – 1959	73,93	31,43	-1	173
1960 – 1969	71,52	31,47	-6	175
1970 – 1979	69,35	31,42	-4	173
1980 – 1989	72,80	31,25	-11	171
1990 – 1999	70,17	32,20	-9	175
2000 – 2008	70,46	31,01	-11	171

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4-12 se muestra la variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Antofagasta. Se encuentra para los niveles medios una pendiente negativa -0.00001 . En la Figura 4-13 se muestran las pendientes correspondientes a los ajustes lineales. Salvo el primer año, donde la tendencia de ajustes lineales por año muestra un valor extraordinariamente positivo de 0.02 , éstas oscilan en valores que van desde -0.003 a $+0.004$. Esto revela que posiblemente existe algún problema con el registro durante los años 1945 y 1946. Al descontar esa situación, se aprecia una enorme variación en los años 1981–1983 y 1999–2000, lo que podría evidenciar alguna relación con El Niño. Estos efectos no se apreciaban tan claros en la serie correspondiente a Arica.

¹ Las estimaciones de normales de la banda de confianza del 67% están limitadas por el promedio menos la desviación estándar y el promedio más la desviación estándar.

4.2.3 CALDERA

En la Tabla 4-6 se presenta el resumen estadístico de las variaciones del nivel del mar en Caldera. Se aprecia que en promedio, el nivel del mar ha aumentado en torno a 6,9 [cm] en 58 años de estadística. Esto revela un comportamiento notoriamente diferente a los de Arica y Antofagasta.

Tabla 4-6: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Caldera.

Años	Promedio [cm]	D. Estándar [cm]	Mínimo [cm]	Máximo [cm]
1950 – 1959	115,06	33,24	34	217
1960 – 1969	117,56	33,29	35	218
1970 – 1979	120,72	33,30	30	220
1980 – 1989	125,36	32,95	43	233
1990 – 1999	124,73	32,95	34	223
2000 – 2008	121,93	33,12	34	221

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4-14 se muestra la variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Caldera. Se encuentra para los niveles medios una pendiente positiva de +0.00002. En la Figura 4-15 se muestran las pendientes correspondientes a los ajustes lineales. Nuevamente se pueden apreciar sendas fluctuaciones en los valores de las pendientes de ajuste anual para los años 1982 y 2000.

4.2.4 ISLA DE PASCUA

En la Tabla 4-7 se presenta el resumen estadístico de las variaciones del nivel del mar en isla de Pascua. Se aprecia que en promedio, el nivel del mar ha aumentado en torno a 16,2 [cm] en 51 años de estadística. La serie presenta varios datos faltantes por intervalos de algunos años, lo que dificulta su interpretación.

Tabla 4-7: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Isla de Pascua.

Años	Promedio [cm]	D. Estándar [cm]	Mínimo [cm]	Máximo [cm]
1957 – 1959	138,15	18,85	93	199
1960 – 1969	141,40	19,17	96	201
1970 – 1979	149,66	18,81	92	229
1980 – 1989	150,90	19,95	89	228
1990 – 1999	146,76	18,70	92	216
2000 – 2008	154,33	18,63	94	228

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4-16 se muestra la variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Isla de Pascua. Se encuentra para los niveles medios una pendiente positiva de +0.00002. En la Figura 4-17 se muestran las pendientes correspondientes a los ajustes lineales. Las pendientes parecen ser cada vez más positivas, y oscilan entre valores que van desde -0.002 a +0.006 (salvo el año 1963, que posiblemente puede tener un problema en su registro).

4.2.5 VALPARAÍSO

En la Tabla 4-8 se presenta el resumen estadístico de las variaciones del nivel del mar en Valparaíso. Se aprecia que en promedio, el nivel del mar ha aumentado en torno a 0,6 [cm] en 58 años de estadística. La serie presenta datos faltantes en la década del 70, lo que dificulta su interpretación.

Tabla 4-8: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Valparaíso.

Años	Promedio [cm]	D. Estándar [cm]	Mínimo [cm]	Máximo [cm]
1944 – 1949	75,09	36,27	1	183
1950 – 1959	80,36	36,02	1	195
1960 – 1969	84,19	36,65	-4	194
1970 – 1979	82,69	36,24	0	187
1980 – 1989	73,62	36,78	-22	193
1990 – 1999	72,06	37,68	-19	201
2000 – 2008	75,74	36,14	-11	190

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4-18 se muestra la variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Valparaíso. Se encuentra para los niveles medios una pendiente negativa de -0.00001. En la Figura 4-19 se muestran las pendientes correspondientes a los ajustes lineales. A partir de la década del 80, se puede apreciar que los ajustes lineales anuales presentan en algunas situaciones valores muy positivos, evidenciando un cambio de comportamiento de la señal.

4.2.6 TALCAHUANO

En la Tabla 4-9 se presenta el resumen estadístico de las variaciones del nivel del mar en Talcahuano. Se aprecia que en promedio, el nivel del mar ha aumentado en torno a 8,8 [cm] en 59 años de estadística.

Tabla 4-9: Estadística de variaciones del nivel del mar por décadas en Talcahuano.

Años	Promedio [cm]	D. Estándar [cm]	Mínimo [cm]	Máximo [cm]
1949	108,23	38,41	22	217
1950 – 1959	109,94	39,15	7	267
1960 – 1969	106,56	38,94	14	241
1970 – 1979	109,73	39,19	14	242
1980 – 1989	117,22	39,20	14	250
1990 – 1999	116,44	39,64	16	252
2000 – 2008	117,01	38,87	14	254

Fuente: Elaboración Propia

En la Figura 4-20 se muestra la variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Talcahuano. Se encuentra para los niveles medios una pendiente positiva de 0.00002. En la Figura 4-21 se muestran las pendientes correspondientes a los ajustes lineales. Se presenta en general pendientes que van desde -0.002 a +0.002, siendo un caso excepcional el año 1954.

4.2.7 PUERTO WILLIAMS

En la Tabla 4-10 se presenta el resumen estadístico de las variaciones del nivel del mar en Puerto Williams. Se aprecia que en promedio, el nivel del mar ha aumentado en torno a 9,0 [cm] en 41 años de estadística.

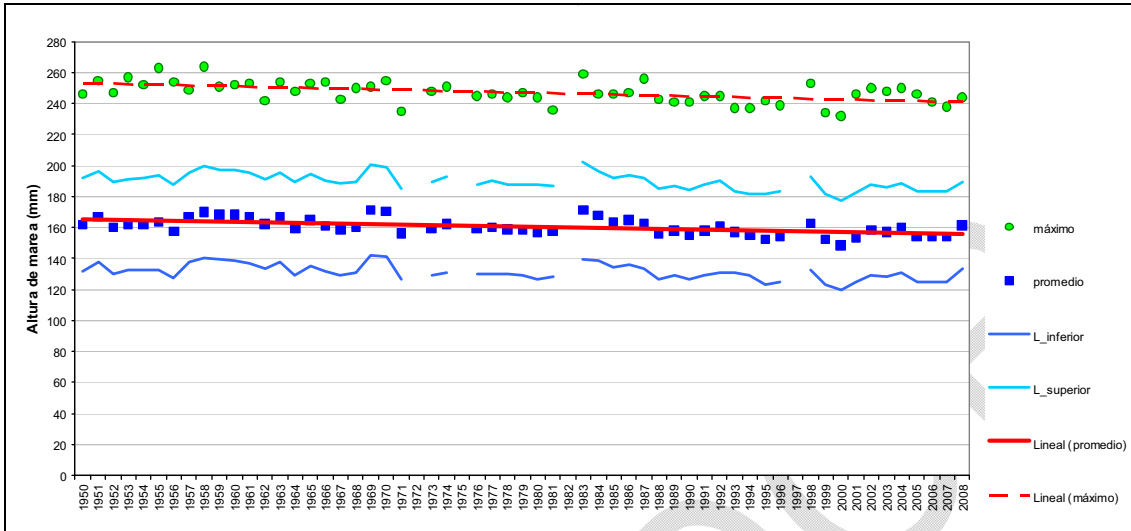
Tabla 4-10: Estadística de variaciones del Nivel del Mar por décadas en Puerto Williams.

Años	Promedio [cm]	D. Estándar [cm]	Mínimo [cm]	Máximo [cm]
1964 – 1969	168,13	47,87	16	299
1970 – 1979	165,02	48,704	13	299
1980 – 1989	162,22	48,378	16	299
1990 – 1999	161,59	48,409	18	299
2000 – 2005	177,09	49,813	12	299

Fuente: Elaboración Propia

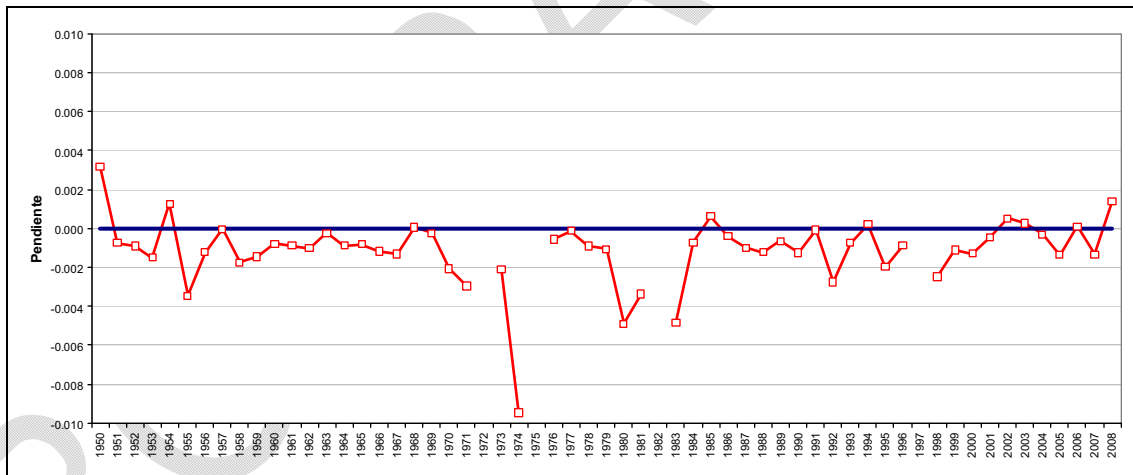
En la Figura 4-22 se muestra la variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Puerto Williams. Si bien el ajuste lineal tiene una pendiente nula, se puede apreciar que en promedio, el nivel del mar descendió durante el siglo pasado, para pasar a subir abruptamente después del año 2000, lo que marca un notorio cambio de comportamiento de la señal del nivel medio del mar. En la Figura 4-23 se muestran las pendientes correspondientes a los ajustes lineales. Se presenta en general pendientes que van desde -0.002 a $+0.001$, aumentado su variación después del año 2000.

Figura 4-10: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Arica.



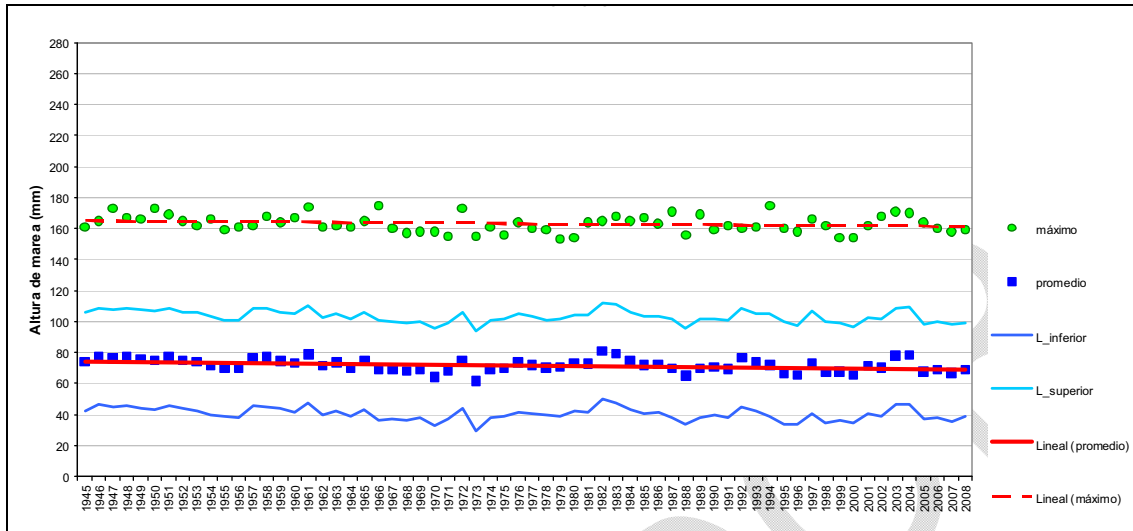
Nota: No se consideran efectos de mareas. Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-11: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en Arica.



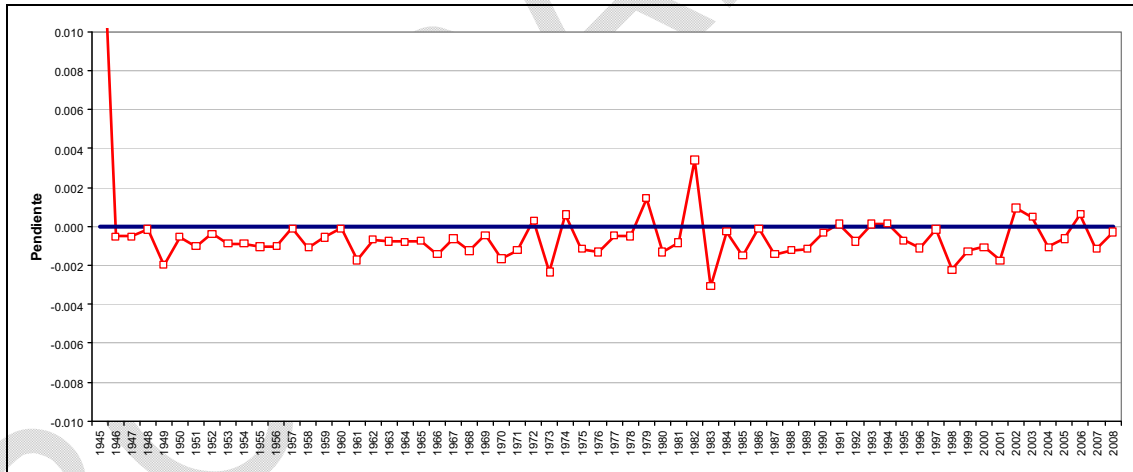
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-12: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Antofagasta.



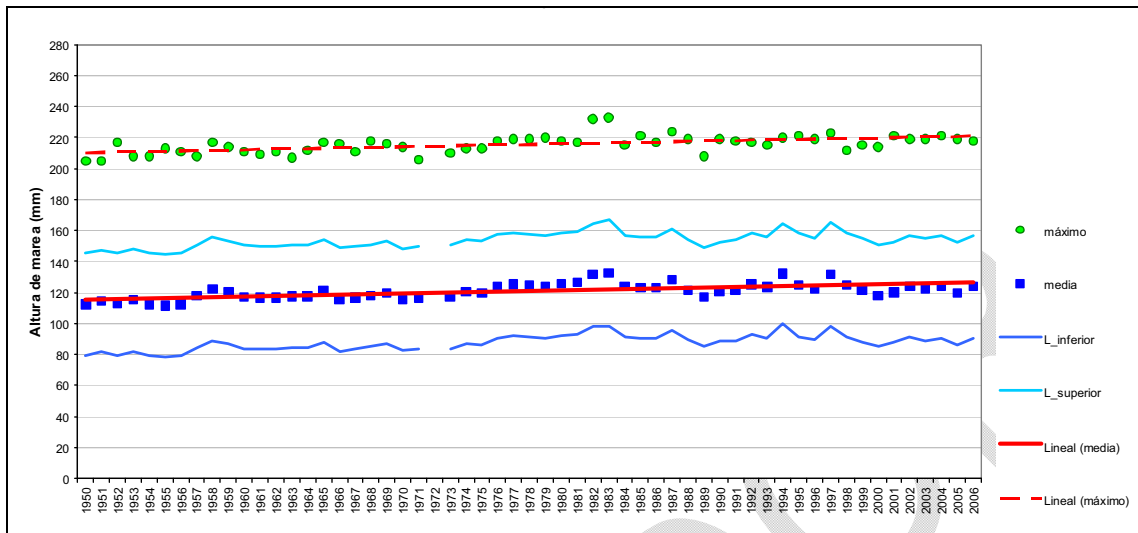
Nota: No se consideran efectos de mareas. Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-13: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en Antofagasta.



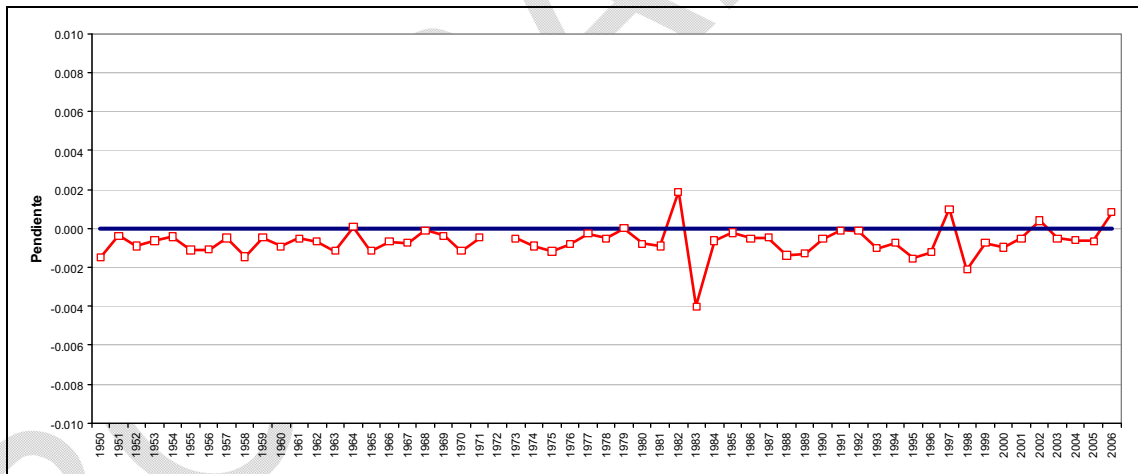
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-14: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Caldera.



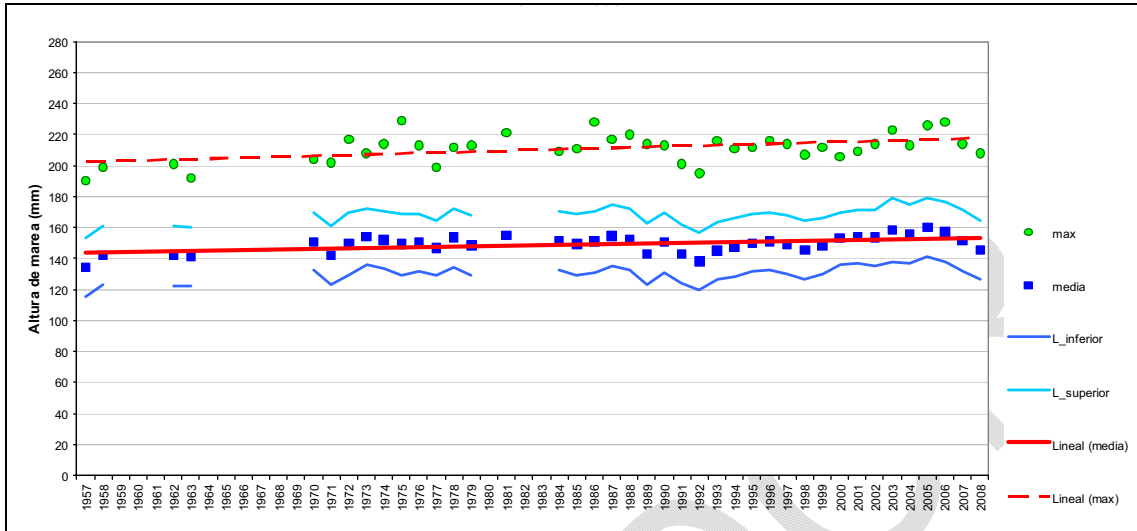
Nota: No se consideran efectos de mareas. Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-15: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en Caldera.



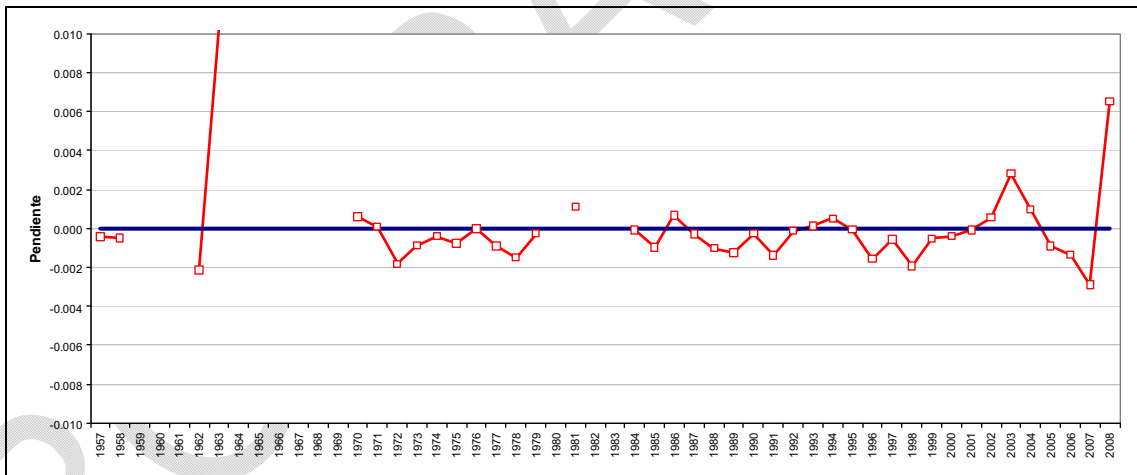
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-16: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en I. de Pascua.



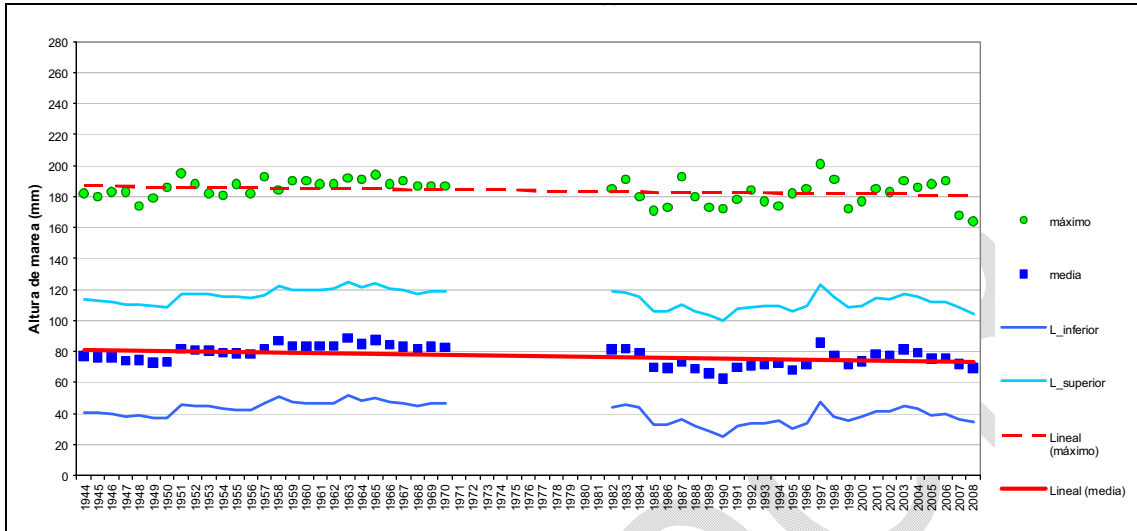
Nota: No se consideran efectos de mareas. Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-17: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en I. de Pascua.



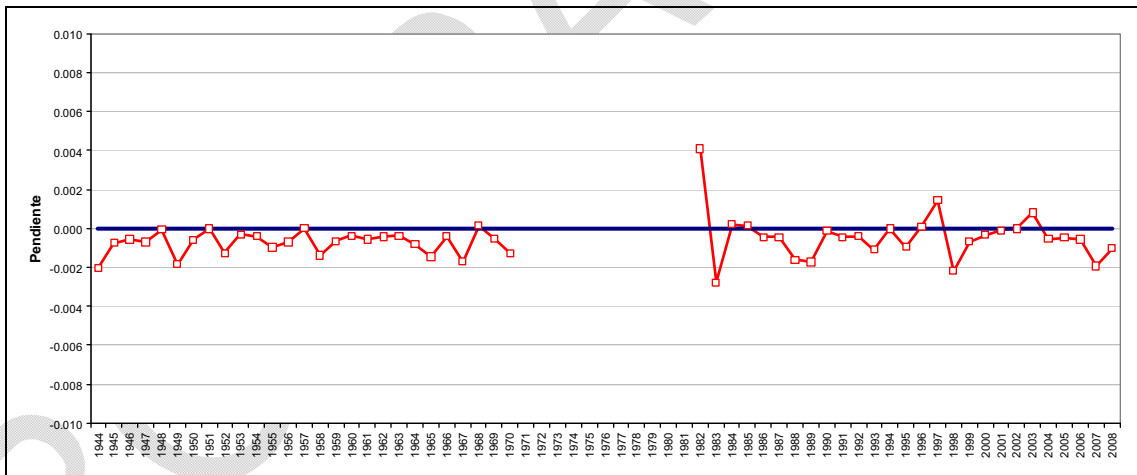
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-18: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Valparaíso.



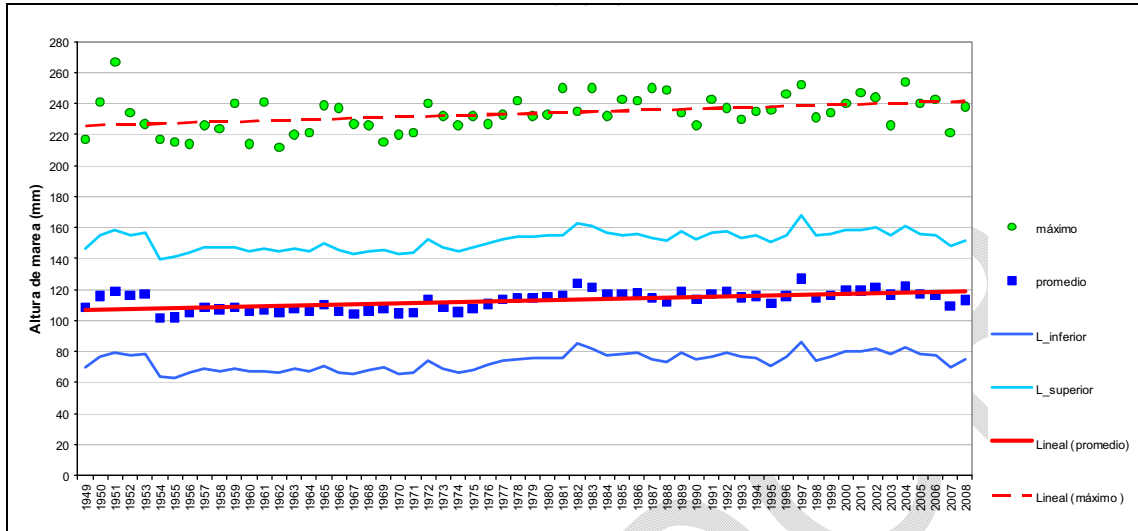
Nota: No se consideran efectos de mareas. Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-19: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en Valparaíso.



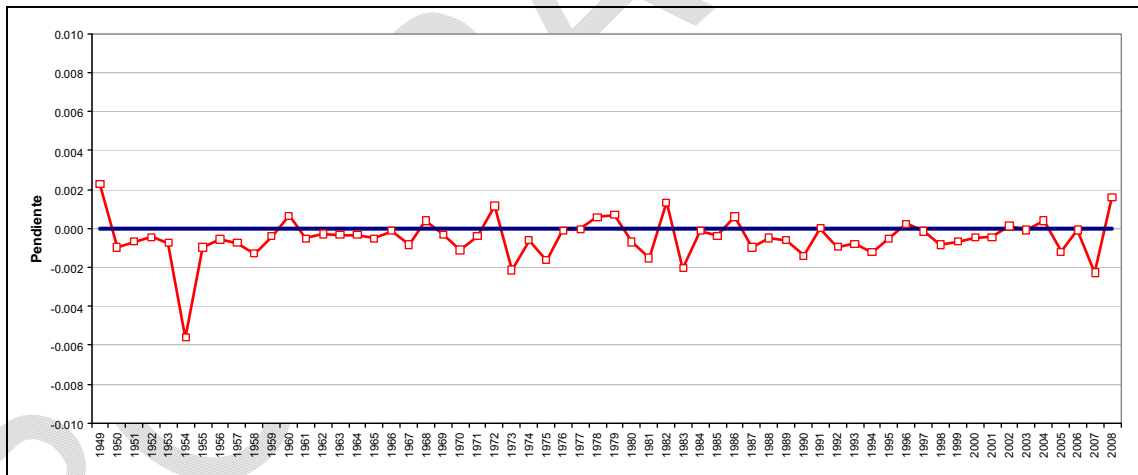
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-20: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en Talcahuano.



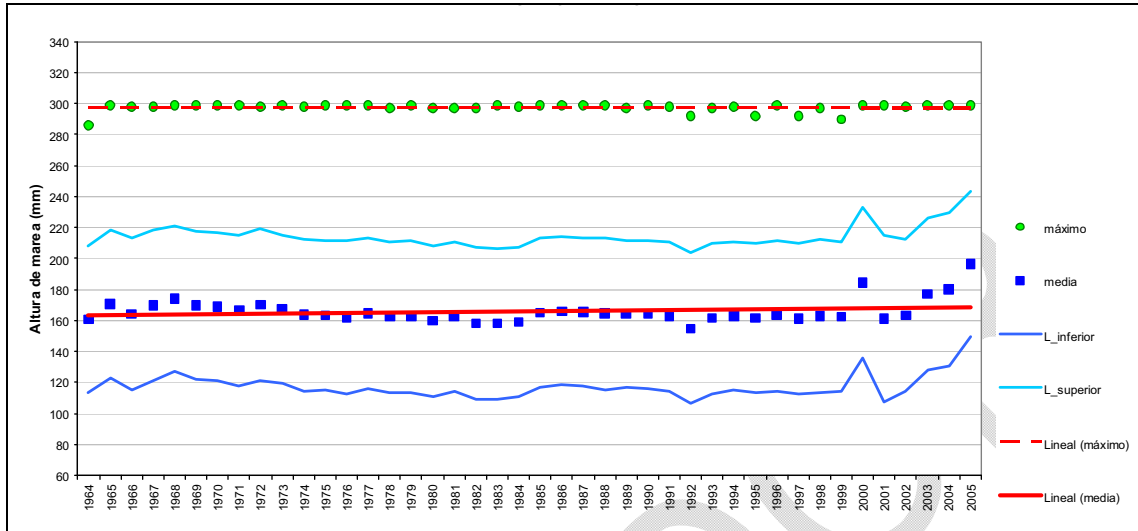
Nota: No se consideran efectos de mareas. Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-21: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en Talcahuano.



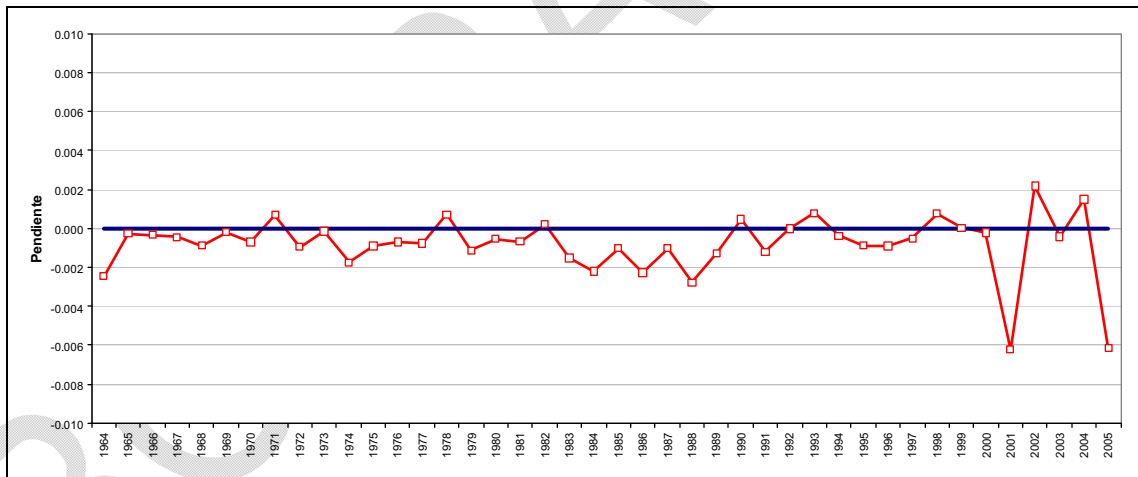
Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-22: Variación temporal del promedio anual de nivel del mar en P. Williams.



Nota: No se consideran efectos de mareas. Fuente: Elaboración Propia

Figura 4-23: Pendientes correspondientes a los ajustes lineales por año en P. Williams.



Fuente: Elaboración Propia

4.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

La variación del nivel del mar medio anual en las estaciones mareográficas de más de 40 años en Chile no es homogénea, abarcando tasas de aumento desde +0,318 [cm/año] a descensos de -0,141 [cm/año]. En localidades como Arica y Antofagasta aparentemente ha existido una reducción, mientras que en Caldera y Talcahuano, se aprecia un aumento. La serie de Valparaíso se encuentra con varios años sin registro durante la década del 70, que imposibilita concluir el tipo de variación experimentado. En Puerto Williams se aprecia una continua reducción en el nivel medio del mar durante el siglo 20, tendencia que se revierte a partir del año 2000. La estación insular de Isla de Pascua también evidencia un aumento comparativamente mayor del nivel medio del mar que las estaciones continentales.

Tabla 4-11: Tasa de variación media anual de estaciones mareográficas en Chile.

Localidad	Variación total [cm]	Tiempo [año]	Variación anual [cm/año]
Arica	- 8,2	58	- 0,141
Antofagasta	- 5,5	63	- 0,087
Caldera	+ 6,9	58	+ 0,119
Isla de Pascua	+ 16,2	51	+ 0,318
Valparaíso	+ 0,6	58	+ 0,010
Talcahuano	+ 8,8	59	+ 0,149
Puerto Williams	+ 9,0	41	+ 0,220

Fuente: Elaboración propia.

Las tasas de variación son relativamente menores a las observadas en algunas estaciones de larga data a nivel mundial indicadas en la Tabla 4-12, que llegan a experimentar aumentos y descensos del orden de centímetros por año, lo que representa un orden de magnitud superior a los observados en Chile². No obstante, las variaciones observadas son comparables a los valores medios obtenidos de estaciones del nivel de mar en diferentes cuadrantes a nivel mundial indicadas en la Figura 4-24, que abarcan desde aumentos de +0,59 [cm/año] a descensos de -0,57 [cm/año].

Lamentablemente existe deficiencia en estaciones del nivel del mar en latitudes polares, sectores ubicados lejos de costas y en el hemisferio sur, como el caso de Chile, debido a la escasa cobertura espacial y temporal de las estaciones de medición del nivel del mar. A nivel global, el nivel del mar está aumentando, no obstante en sectores de confluencia de placas y donde hay rebote viscoelástico postglacial (Alaska, Escandinavia, Escocia y Canadá) puede estar descendiendo. En el Pacífico Central, el nivel permanece aproximadamente constante. Estaciones de larga data (la más antigua es Amsterdam, desde 1682) permiten establecer un aumento del nivel del mar en los últimos 300 años de entre 40 a 150 [cm].

El análisis de los cambios de pendientes interanuales, obtenidos al ajustar linealmente los datos por año, muestran grandes fluctuaciones, las que parecen incrementarse con la presencia de fenómenos como El Niño. Aun cuando los promedios por década del nivel medio del mar muestran variaciones de algunos centímetros -en forma ascendente o descendente, dependiendo de la localidad- los ajustes lineales muestran pendientes de cambio muy reducidas.

² Cabe destacar que esta comparación es sólo referencial pues las estaciones incluidas en la referencia están sujetas a condiciones locales que no han sido revisadas en el marco del estudio. En particular, Halifax y Sitka, se ubican en latitudes afectadas por efectos de deformación cortical postglacial.

Aunque el comportamiento principal del nivel medio del mar en las costas de Chile pareciera no tener grandes fluctuaciones en el tiempo, se encontró evidencia de cambios cíclicos asociados a fenómenos ENOS, con años Niño donde el nivel del mar puede alcanzar aumentos de hasta 30 [cm] sobre la tendencia, y años Niña con disminuciones del mismo orden. Estos ciclos de gran escala y escala temporal del orden de años, generan anomalías en la presión atmosférica y patrones de temperatura que redundan en fluctuaciones severas que pueden ser significativamente superiores al efecto de largo plazo asociado al cambio climático. En efecto, las eventuales alzas del nivel del mar en el largo plazo no parecen ser relevantes en la mayor parte de la costa chilena por tratarse de una zona sísmica activa sujeta a grandes deformaciones corticales y estar afectada por fenómenos de climáticos de medio plazo de mayor relevancia.

A efectos de profundizar en el estudio, se sugiere continuar la investigación efectuando un análisis espectral que dé cuenta de los cambios de frecuencia que puede estar experimentando la variación del nivel del mar, desde una escala de tiempo de horas hasta escalas de tiempo interanuales, de modo de detectar fluctuaciones en los efectos estacionales y de gran escala temporal. Se recomienda asimismo analizar las posibles variaciones en el comportamiento atribuibles a los cambios de instrumento, efectos de los sismos y otros factores similares. Para efectos de estimar la vulnerabilidad futura de las costas, se recomienda efectuar una extrapolación a medio plazo (del orden de décadas, considerando tendencia, efecto estacional y fenómenos ENOS).

Se recomienda complementar los resultados y conclusiones presentados en este informe con el estudio de Efectos del Cambio Climático en las costas de Chile, que será desarrollado por el Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cantabria en el marco de esta convocatoria.

Tabla 4-12: Tasas de aumento del nivel del mar en estaciones mareográficas del mundo.

	Complete Series			1940 Onward
	Latitude	Total Years	Period	
SITKA (Alaska)	57° 03' N	42	1939-1979 -2.5 (0.4)	-2.6 (0.3)
NEWLYN	50° 06' N	65	1916-1980 1.7 (0.2)	1.5 (0.4)
BREST	48° 23' N	141	1807-1981 0.9 (0.1)	0.0 (0.5)
HALIFAX (Nova Scotia)	44° 40' N	62	1897-1980 3.7 (0.1)	3.2 (0.3)
SAN FRANCISCO	37° 48' N	127	1854-1979 3.8 (1.5)	1.5 (0.4)
HONOLULU	21° 19' N	76	1905-1980 1.6 (0.2)	0.8 (0.4)
BOMBAY	18° 55' N	101	1878-1978 1.0 (0.1)	-1.0 (0.4)
SYDNEY (New South Wales)	33° 51' S	85	1897-1981 0.7 (0.1)	2.0 (0.3)

TABLE 2.1 Fits of linear trends to long series of annual mean sea levels; the estimated rates of sea level rise are given in cm per year and the standard errors of the estimates are given in brackets.

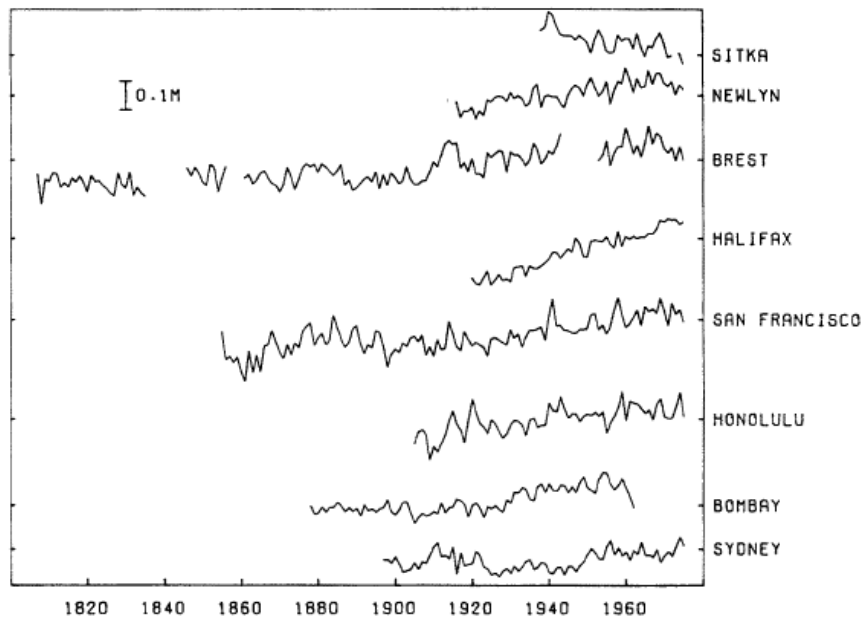
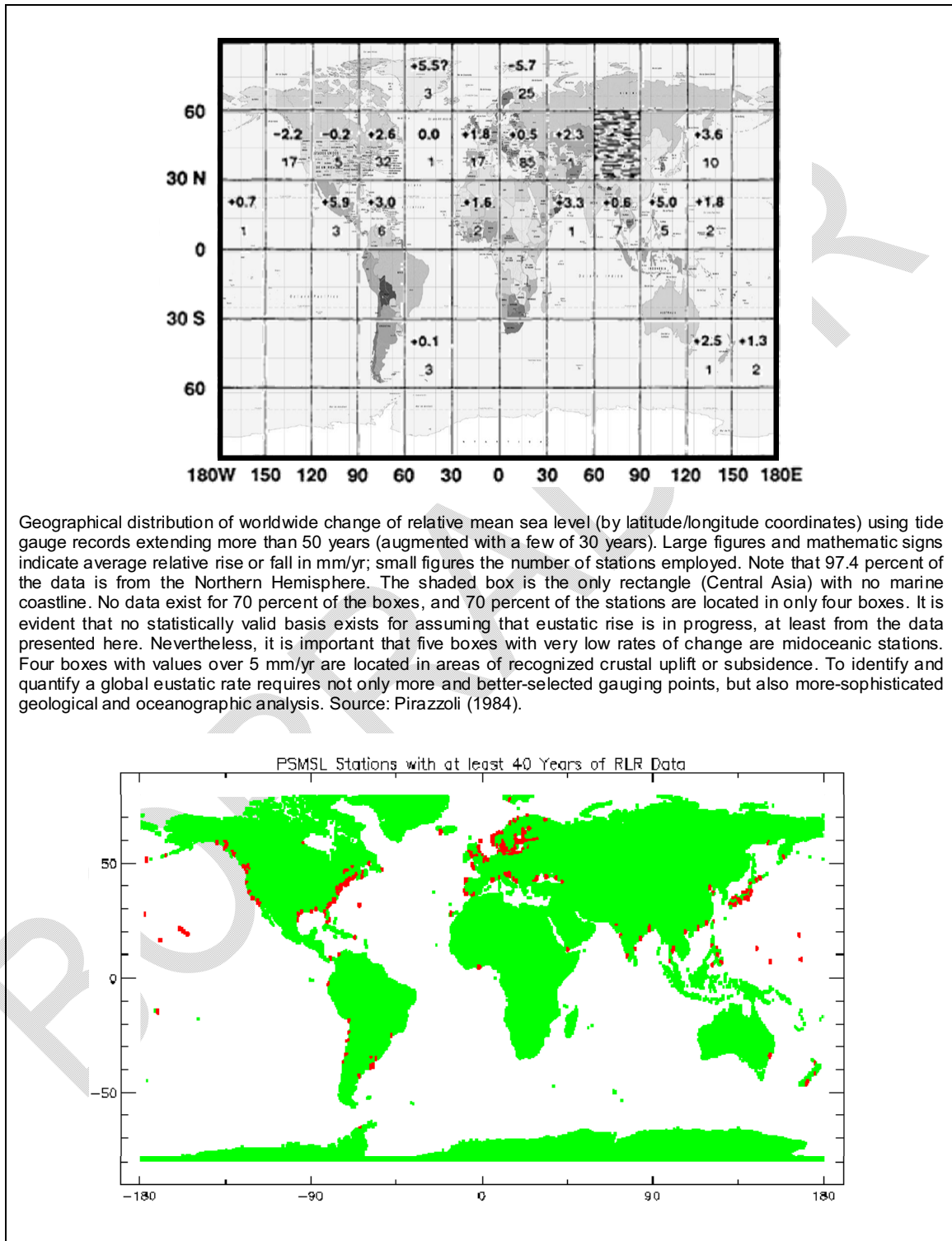


Figure 2.4 Low level frequency changes of sea level at eight stations showing a general upward trend, except at Sitka, and significant interannual variations.

Fuente: "Manual on sea level measurement and interpretation", Ref.20.

Figura 4-24: Tasas de aumento del nivel del mar medias por latitud y longitud.



Fuente: Adaptado de "Responding to Changes in Sea Level: Engineering Implications", Ref.10.

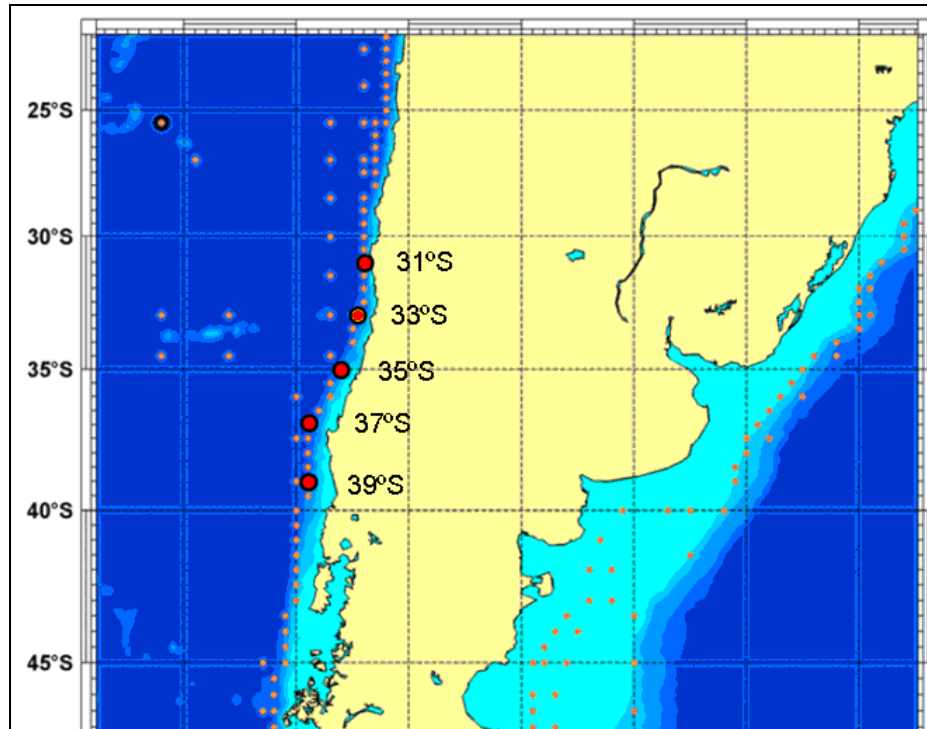
5 ESTUDIO DE OLEAJE

5.1 GENERALIDADES

Las olas que legan a la costa de Chile son generadas por mecanismos de origen local y también remoto. En el primer caso, los vientos locales generan olas en la zona inmediata, denominadas “seas” en la literatura especializada, con períodos típicos del orden de 4 a 8 [s]. En el caso de las olas de origen remoto, denominadas “swell”, éstas pueden provenir desde cualquier región de la cuenca del océano Pacífico, con períodos típicos del orden de 10 a 25 [s]. Las características del oleaje en las costas abiertas de Chile se ven dominadas por la presencia de este último. 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 las costas de Chile, el régimen reinante del oleaje (dirección correspondiente al mayor porcentaje de incidencia) está asociado a vientos en general débiles generados por el Centro de Altas Presiones permanente del Pacífico Sur. Estos vientos son de carácter anticiclónico y soplan durante la mayor parte del año desde el 3^{er} cuadrante, generando así el oleaje del SW que predomina en la costa centro-sur del país. Estas olas no son en general de gran energía, es decir, son de alturas moderadas a bajas y tienen períodos relativamente largos. Durante los meses de invierno las condiciones pueden cambiar ya que se presentan frentes ciclónicos de baja presión que suben desde las latitudes australes, desplazan el centro permanente de altas presiones, denominado Anticiclón del Pacífico Sur, y pueden alcanzar la zona central del país. Estos centros pueden ser desviados y penetrar en el continente por lo que es usual que, además de fuertes marejadas, provoquen también temporales de lluvia. Por su carácter ciclónico, estos vientos giran en sentido horario, razón por la cual generan frentes de oleaje que inciden en la zona central desde el 4^{to} cuadrante, dirección general del NW. Estos frentes generan fuertes vientos, por lo que en general constituyen la condición dominante (dirección de los temporales de mayor intensidad).

Algunas estadísticas de altura, período y dirección obtenidas de la base de datos del Grupo de Ingeniería de Ingeniería Oceánica para la zona centro sur de Chile se presentan en la Tabla 5-1. En la Tabla 5-2 y Figura 5-2 se presentan los histogramas de período y altura frente a Valparaíso. La localización de donde se obtuvieron los datos de aguas profundas, en diferentes latitudes, se señala en la Figura 5-1.

Figura 5-1 Posición de Nodos en el estudio de las estadísticas del oleaje

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5-1: Resumen estadística de oleaje en la zona de estudio (1985 a 2006).

Coordenadas	Altura Hmo		Período Tm		Dirección
	Promedio	Máxima	Promedio	10% Exc.	Media
31°S	2,48	5,89	8,93	11,07	226°
33°S	2,45	6,79	9,00	10,47	243°
35°S	2,64	8,04	9,04	11,17	235°
37°S	2,86	8,47	9,15	11,15	237°
39°S	2,88	9,16	9,21	11,12	242°

Fuente: Elaboración propia.

Como el origen del oleaje se encuentra en el régimen de vientos, los cambios climáticos pueden alterar su patrón de comportamiento, afectando de esta manera las costas. Por este motivo, el estudio de oleaje se orienta a definir alteraciones en el patrón de comportamiento de la estadística realizando análisis comparativo por año. Del análisis de las series de tiempo de parámetros de resumen del oleaje, se busca identificar cambios en el comportamiento de la tendencia y de las variaciones porcentuales respecto a la media de cada uno de los parámetros que den indicios de efectos del cambio climático global en el comportamiento del oleaje local.

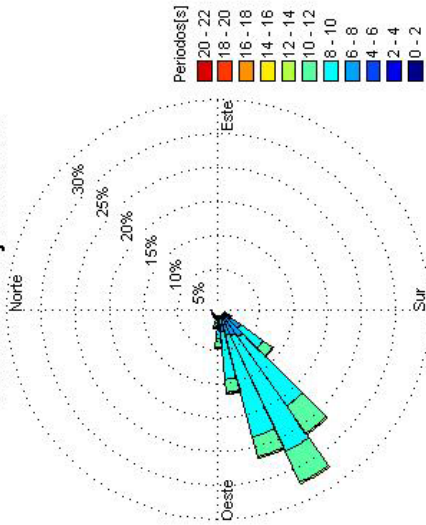
Tabla 5-2: Estadística bivariada de altura (Hmo), período (Tm) y dirección en latitud 33°S.

Periodos (seg)	Alturas (metros)															
	[0.5:1.0]	[1.0:1.5]	[1.5:2.0]	[2.0:2.5]	[2.5:3.0]	[3.0:3.5]	[3.5:4.0]	[4.0:4.5]	[4.5:5.0]	[5.0:5.5]	[5.5:6.0]	[6.0:6.5]	Suma	FR	FRA	
[4:6]	2	81	219	362	401	210	133	40	7	2	0	0	1447	2.5	2.5	
[6:8]	385	1684	2703	2235	1178	625	273	141	80	40	6	1	9351	16	18.5	
[8:10]	375	2566	7568	10492	8707	4189	1302	401	127	47	17	16	35797	61.3	79.8	
[10:12]	44	372	981	1756	2694	2624	1428	671	201	72	29	15	10887	18.6	98.4	
[12:14]	7	34	120	158	198	198	106	47	8	4	1	2	883	1.5	99.9	
[14:16]	0	3	6	11	2	1	2	0	0	0	0	0	25	0	100	
[16:18]	0	0	11	5	0	0	0	0	0	0	0	0	16	0	100	
[18:20]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	
[20:22]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	
[22:24]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	
Suma	813	4740	11608	14999	13180	7847	3244	1300	423	165	53	34	0	100.0	0	
FR	1.4	8.1	19.9	25.7	22.6	13.4	5.6	2.2	0.7	0.3	0.1	0.1	0			
FRA	1.4	9.5	29.4	55.1	77.6	91.1	96.6	98.8	99.6	99.9	99.9	100				

Periodos (seg)	Direcciones													
	[168.8: 191.3]	[191.3: 213.8]	[213.8: 236.3]	[236.3: 258.8]	[258.8: 281.3]	[281.3: 303.8]	[303.8: 326.3]	[326.3: 348.8]	[348.8: 371.3]	[371.3: 393.8]	[393.8: 416.3]	Suma	FR	FRA
[4:6]	0	226	1006	53	29	53	96	14	0	0	0	1447	2.5	2.5
[6:8]	0	110	3378	3945	1521	280	109	13	0	0	0	9356	16	18.5
[8:10]	0	124	10907	21119	3532	113	12	0	0	0	0	35807	61.3	79.8
[10:12]	0	35	4254	4781	1670	146	1	0	0	0	0	10887	18.6	98.4
[12:14]	0	6	211	340	275	51	0	0	0	0	0	883	1.5	99.9
[14:16]	0	0	1	17	7	0	0	0	0	0	0	25	0	100
[16:18]	0	0	0	8	8	0	0	0	0	0	0	16	0	100
[18:20]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
[20:22]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
[22:24]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Suma	0	501	19757	30263	7042	643	188	27	0	0	0	0	100.0	0
FR	0	0.9	33.8	51.8	42.1	25.1	11.1	0.3	0	0	0	0		
FRA	0	0.9	34.7	86.5	98.5	99.6	100	100	100	100	100	100		

Alturas (metros)	Direcciones													
	[168.8: 191.3]	[191.3: 213.8]	[213.8: 236.3]	[236.3: 258.8]	[258.8: 281.3]	[281.3: 303.8]	[303.8: 326.3]	[326.3: 348.8]	[348.8: 371.3]	[371.3: 393.8]	[393.8: 416.3]	Suma	FR	FRA
[0.5:1.0]	0	0	278	490	45	0	0	0	0	0	0	813	1.4	1.4
[1.0:1.5]	0	3	1523	2897	510	7	0	0	0	0	0	4740	8.1	9.5
[1.5:2.0]	0	47	3519	6710	1294	38	6	0	0	0	0	11608	19.9	23.4
[2.0:2.5]	0	85	4785	8291	1754	86	6	0	0	0	0	14999	25.7	29.4
[2.5:3.0]	0	130	4684	3698	1026	121	11	0	0	0	0	17830	34.7	41.6
[3.0:3.5]	0	83	1321	1395	388	110	40	7	0	0	0	3244	5.6	9.6
[3.5:4.0]	0	45	492	486	157	34	27	8	0	0	0	1300	2.2	9.8
[4.0:4.5]	0	16	152	119	67	39	20	4	0	0	0	423	0.7	9.6
[4.5:5.0]	0	1	48	21	19	20	8	0	0	0	0	165	0.3	9.9
[5.0:5.5]	0	0	3	13	17	5	4	1	0	0	0	53	0.1	9.9
[5.5:6.0]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	34	0.1	100
[6.0:6.5]	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100
Suma	0	501	19757	30263	7035	637	186	27	0	0	0	0	100.0	0
FR	0	0.9	33.8	51.8	42.1	25.1	11.1	0.3	0	0	0	0		
FRA	0	0.9	34.7	86.5	98.5	99.6	100	100	100	100	100	100		

Periodo oleaje Nodo 33



Altura oleaje Nodo 33

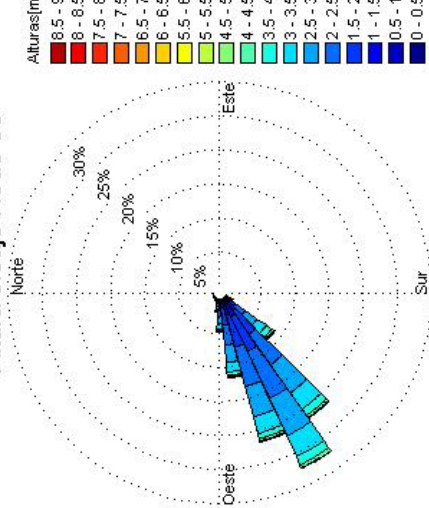
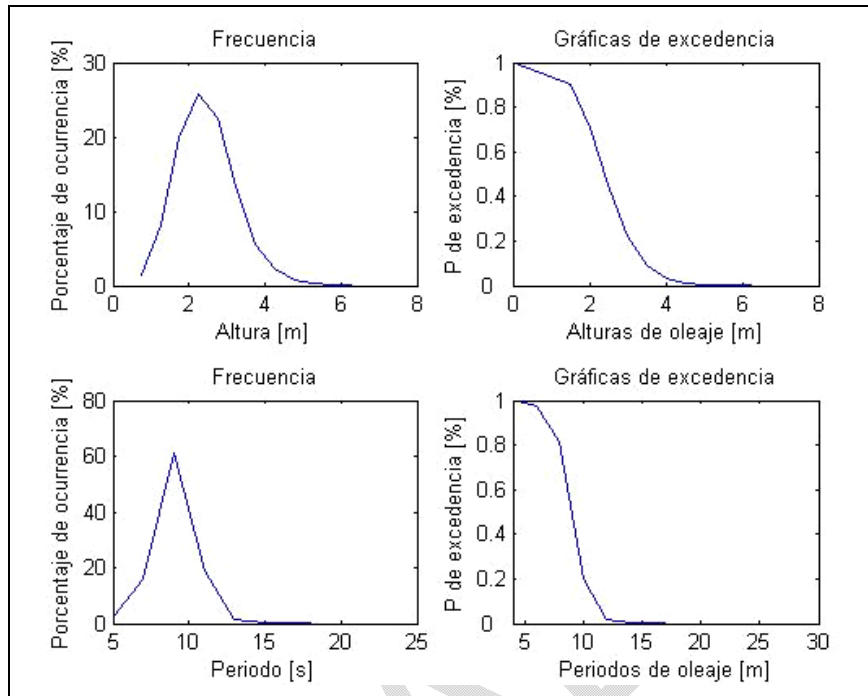


Figura 5-2: Histograma de frecuencias de altura (Hmo) y período (Tm) en latitud 33°S.

Fuente: Elaboración propia.

5.2 METODOLOGÍA

Se utiliza para el análisis una serie de tiempo de 20 años consistente en parámetros de resumen de estados de mar de 3 horas de duración, cuya descripción se realiza mediante la altura significativa espectral, período medio y dirección media. La estadística se obtiene mediante un modelo numérico de escala global en la coordenada 35°S entre 1985 y 2006, presentando una discontinuidad de 2 años a partir del 31/05/ 1991 hasta el 01/06/1993. A partir de la serie de tiempo se calcula la potencia media para cada estado de mar, parámetro que es particularmente relevante en los procesos costeros y que involucra implícitamente los parámetros de altura, período y dirección.

El proceso de análisis consistió en la separación anual de la estadística de oleaje, identificando percentiles y promedios mensuales para cada uno de los 4 parámetros considerados.

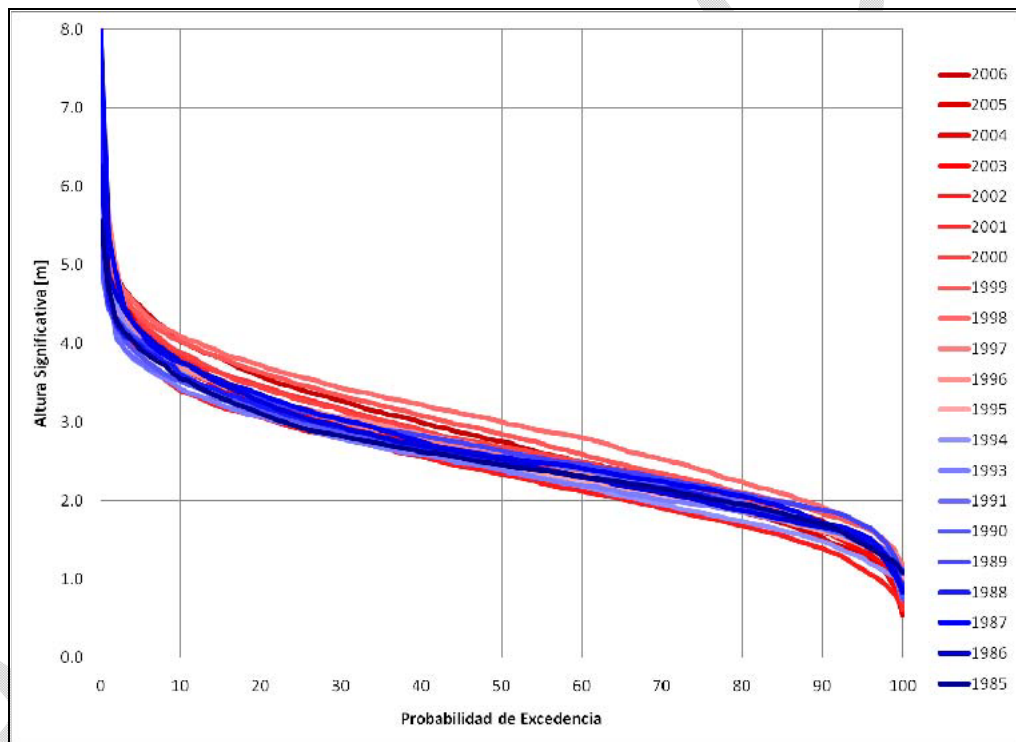
Respecto al análisis de los promedios mensuales, se graficó la evolución con respecto al tiempo y se ajustó una tendencia lineal, de manera de describir el comportamiento de la estadística en los 20 años de duración. En cuanto a los percentiles anuales identificados por parámetro, se construyó una curva de excedencias anuales, las cuales fueron comparadas en una sola gráfica. Para facilitar la identificación de cada una se utilizó una graduación de colores por cada año. Para sensibilizar la comparación, se realizó la estimación de las variaciones porcentuales de cada año respecto de la curva de excedencia promedio de todos los años.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 ALTURA DE OLA

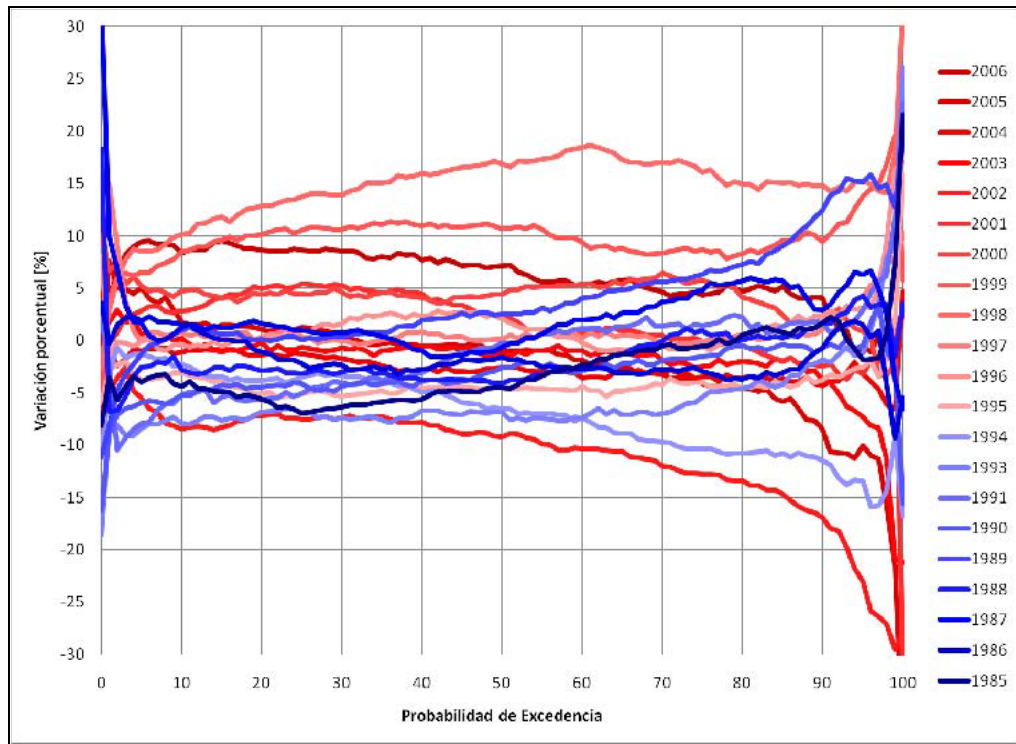
La estadística de altura significativa espectral del oleaje cubre desde los 0.54 [m] hasta los 8.04 [m], siendo el 99% menor que 4.92 [m] y intervalo de 2 a 4 [m] el que concentra el 71.40% de los datos. La verificación de la evolución de las condiciones de altura de ola puede realizarse mediante la comparación de las curvas de probabilidad de excedencia para cada año, tal como lo presentado en la Figura 5-3. A partir de su análisis es posible señalar que los años iniciales de la estadística (representados en color azul) presentan curvas de probabilidad de forma y variación distinta a lo presentado por los años recientes (color rojo). Por una parte los años recientes presentan mayor altura de ola que los iniciales a una misma probabilidad en parte importante del tramo entre 5% y 50%, mientras que sus valores tienden a equipararse en el tramo de 50% a 90%. Por otro lado al observar la pendiente presentada por las curvas en el intervalo 10%-90%, los años recientes presentan una pendiente más fuerte que la de los iniciales.

Figura 5-3: Curvas de probabilidad de excedencia anual de altura significativa.



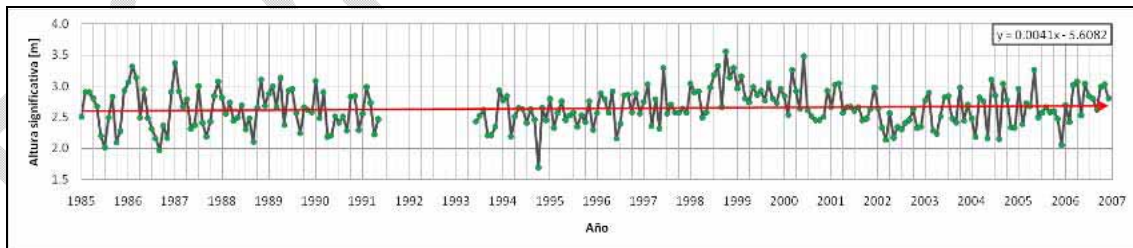
Fuente: Elaboración propia.

Al realizar la división de cada curva de probabilidad de excedencia por la obtenida al promediar todas las curvas se obtienen las variaciones porcentuales presentadas en la Figura 5-4. Se identifica claramente la separación entre el comportamiento de los años recientes con los iniciales, sin embargo en esta figura es posible identificar las variaciones porcentuales que muestran que respecto a la curva de probabilidad promedio, los años iniciales presentan una variación principalmente negativa (de +3 a -8%) en el tramo de 5 a 50% de probabilidad, mientras que en el mismo intervalo los años recientes presentan variaciones positivas (de -5 a +15% a excepción del año 2002) aspecto que muestra mayor valor de la altura de ola a una misma probabilidad de excedencia en años recientes frente a los anteriores.

Figura 5-4: Variación porcentual de la probabilidad de excedencia de altura significativa.

Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-5 del promedio mensual de la altura de oleaje como serie anual denota un comportamiento uniforme entre 1985 y 1997, para luego describir un comportamiento de mayor variabilidad. El comportamiento total de la serie puede ser evaluada al ajustar una curva de tendencia lineal, cuya ecuación se presenta en el extremo superior derecho. Dado que la pendiente es positiva con valor 0.0041, se identifica un incremento anual de 4.1 [mm/año] en la altura de ola.

Figura 5-5: Promedio mensual de la altura significativa y tendencia lineal.

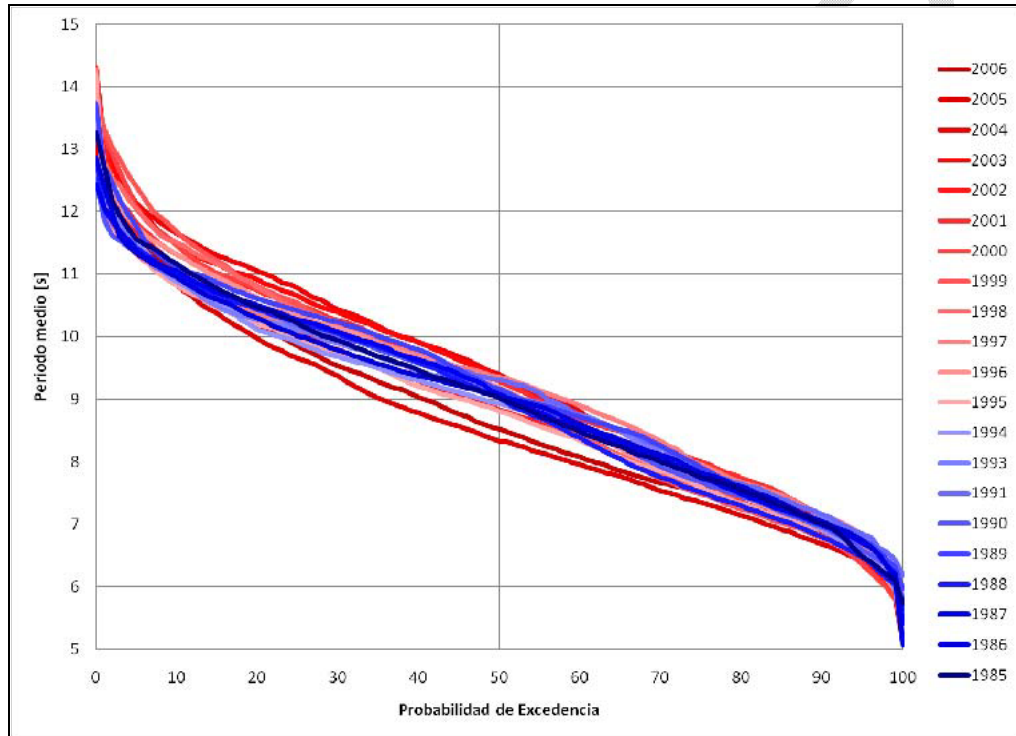
Fuente: Elaboración propia.

5.3.2 PERIODO MEDIO

El periodo de ola a utilizar corresponde al periodo medio espectral, el que permite considerar la importancia de cada periodo presente en el espectro. Los valores presentes en la estadística van de los 5.07 a los 14.31 [s], siendo el 99% de ellos menor a 12.72 [s] y el intervalo de 7 a 11 [s] el que contiene el 76.75% de los datos.

La Figura 5-6 presenta la disposición comparativa entre las curvas de probabilidad de excedencia para todos los años, en donde se repite el comportamiento presentado en la descripción de la altura de ola, consistente en el incremento del valor del periodo para una misma probabilidad de excedencia en los años recientes comparado con los anteriores principalmente para el intervalo de 5 a 30%, manteniéndose en el restante intervalo una cierta similitud entre los valores alcanzados para todos los años. De lo anterior se exceptúan los años 2005 y 2006, años que presentan una disminución en el valor del periodo para el intervalo de probabilidad de 20 a 80%.

Figura 5-6 Curvas de probabilidad de Excedencia anual del Periodo medio.

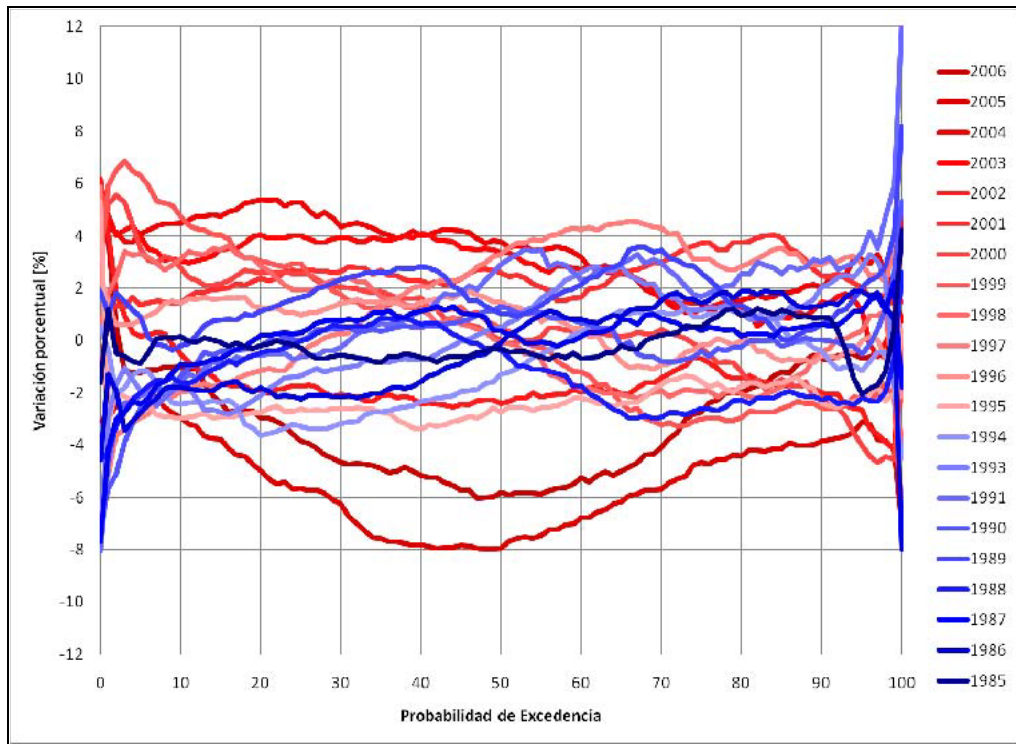


Fuente: Elaboración propia.

Las variaciones porcentuales descritas en la Figura 5-7 muestran que para el intervalo de probabilidad de excedencia entre 30 y 95% los años no difieren más de 4% respecto a la distribución de probabilidad promedio. Sin embargo en el intervalo de 5 a 30% se presentan diferencias entre el comportamiento de los años iniciales y los recientes. Por un lado, los valores de los años iniciales no superan a la probabilidad promedio en más de 2%, mientras que los años recientes llegan a casi un 6% de variación por sobre la probabilidad promedio.

Lo descrito anteriormente exceptúa al comportamiento de los años 2005 y 2006, los cuales presentan una disminución en el valor del periodo que van desde 4 hasta 8% respecto a la probabilidad promedio

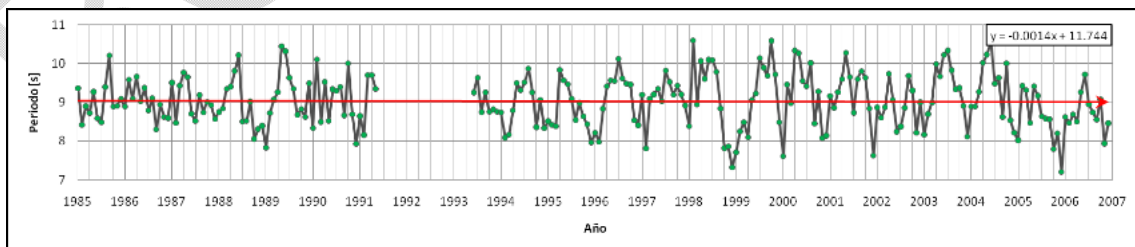
Figura 5-7: Variación porcentual de la probabilidad de excedencia del Periodo medio.



Fuente: Elaboración propia.

La descripción del periodo promedio mensual como serie de tiempo (Figura 5-8) muestra que las variaciones hasta el año 1996 son moderadas entre un mes y otro, mientras que a partir del año 1997 las variaciones se intensifican, lográndose valores máximos y mínimos por sobre los presentes en el tramo anterior. Estas variaciones son explicadas por el incremento de la probabilidad de excedencia de los periodos altos en los años recientes. Sin embargo este aumento de probabilidad en los periodos mayores se ve compensado por la acción de los últimos dos años que presentan periodos mucho mas bajos que los ocurrido en los restantes años, situación que se ve reflejada en el bajo valor de la pendiente determinada, que si bien es negativa, solo representa una variación de 0.0014 [s] anuales.

Figura 5-8 Promedio mensual del Periodo medio y tendencia lineal.



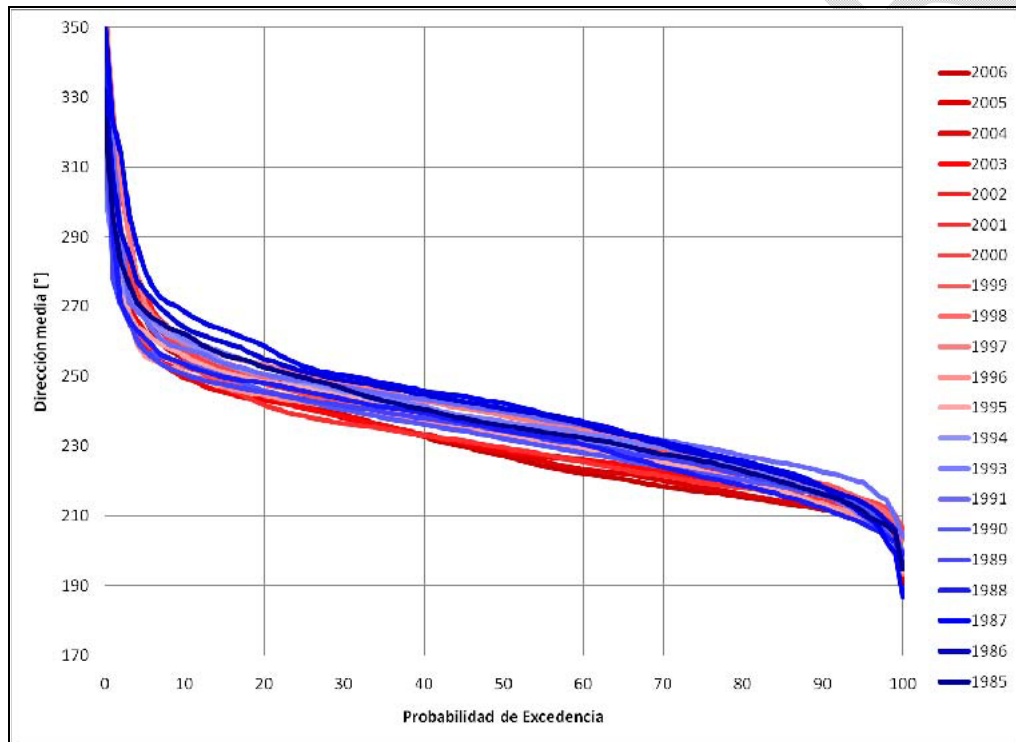
Fuente: Elaboración propia.

5.3.3 DIRECCIÓN MEDIA

La dirección de incidencia de oleaje corresponde a la dirección media espectral de incidencia. Los valores de las estadística van desde los 186.9° a los 359.7° , con el 99% de ellos menor que 301.77° y el intervalo 220° a 260° el que contiene el 73.04% de ellos.

La Figura 5-9 describe la probabilidad de excedencia para cada año, en donde se manifiesta una similitud entre todas las distribuciones en cuanto a la pendiente entre los 10 y 90% de probabilidad, mientras que la variación se presenta en los valores alcanzados para una misma probabilidad.

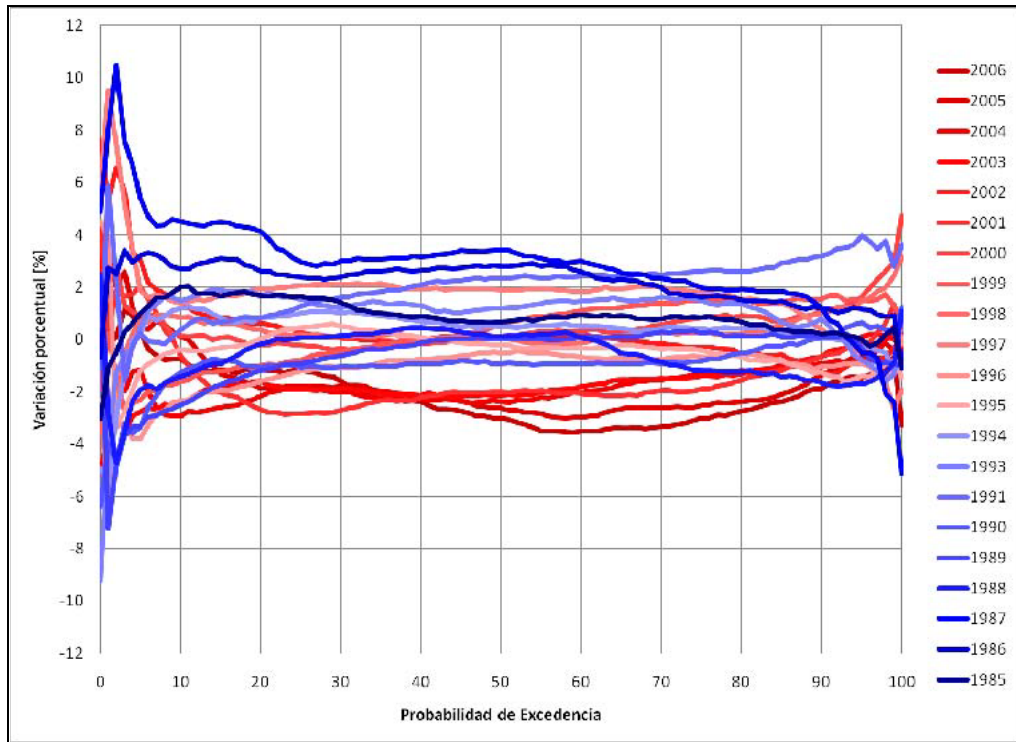
Figura 5-9 Curvas de probabilidad de Excedencia anual de la Dirección media



Fuente: Elaboración propia.

La variación porcentual de las probabilidades de excedencia descrita en la Figura 5-10 señala con pocas excepciones un decrecimiento en el ángulo de incidencia del oleaje en años consecutivos para toda la estadística, característica que indica que las distribuciones no varían sino que los intervalos de dirección entre los que se presenta.

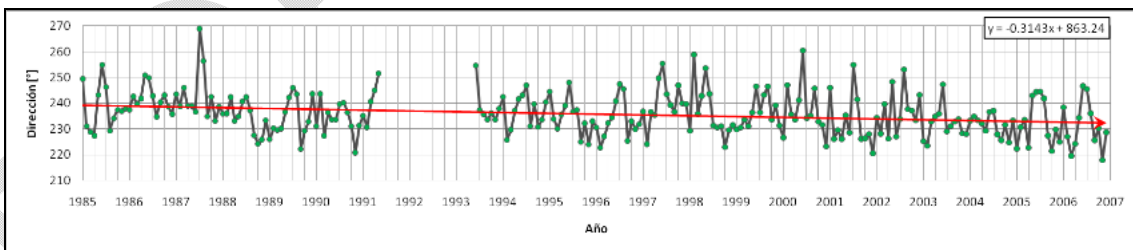
Figura 5-10 Variación porcentual de la probabilidad de Excedencia de la Dirección media.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-11 muestra que la variación mensual de la dirección tiene un comportamiento regular, sin embargo la ecuación del ajuste de tendencia lineal señala una pendiente negativa, cuyo valor es 0.3141, es decir, la estadística presenta un decrecimiento anual de 0.31° en la dirección de incidencia del oleaje.

Figura 5-11 Promedio mensual de la Dirección media y tendencia lineal.



Fuente: Elaboración propia.

5.3.4 POTENCIA DE OLAJE

La potencia del oleaje corresponde al parámetro que representa de forma más general el recurso energético disponible en un determinado sitio. La potencia (P) de una ola sinusoidal de amplitud (a), viene dado por:

$$P = \frac{\rho g}{2} \times a^2 \times C_g$$

Donde (C_g) es la celeridad de grupo, (ρ) es la densidad del agua y (g) es la aceleración de gravedad. La celeridad de grupo se expresa según:

$$C_g = \frac{1}{2} \times \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \times C$$

Donde (C) es la celeridad de la ola y viene dada por:

$$C = \left(\frac{g}{k} \times \tanh kh \right)^{1/2}$$

En aguas profundas, la celeridad de grupo se expresa:

$$C_{g0} = \frac{g}{4\pi \times f} = \frac{g \times T}{4\pi}$$

Para un sistema unidireccional de oleaje la ecuación anterior se puede generalizar como:

$$P = (\rho g) \times \int C_g(f) \times S(f) df$$

Reemplazando, se tiene:

$$P_o = \left(\frac{\rho g}{4\pi} \right) \times \int f^{-1} \times S(f) df$$

La ecuación anterior puede reescribirse en función del momento de orden o (m_{-1}), según:

$$P_o = \frac{\rho g}{4\pi} \times m_{-1}$$

Por otra parte, el período energético (T_e) se expresa como:

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$$

La altura significativa espectral (H_{s0}) se expresa, para espectros angostos, como:

$$H_{mo} \approx 4\sqrt{m_o}$$

Por lo que la potencia en aguas profundas (P_o) se expresa de la siguiente forma:

$$P_o = \left(\frac{\rho g^2}{4\pi}\right) \times m_{-1} = \left(\frac{\rho g^2}{4\pi}\right) \times m_o \times T_e = \left(\frac{\rho g^2}{4\pi}\right) \times \left(\frac{H_{mo}^2}{16}\right) \times T$$

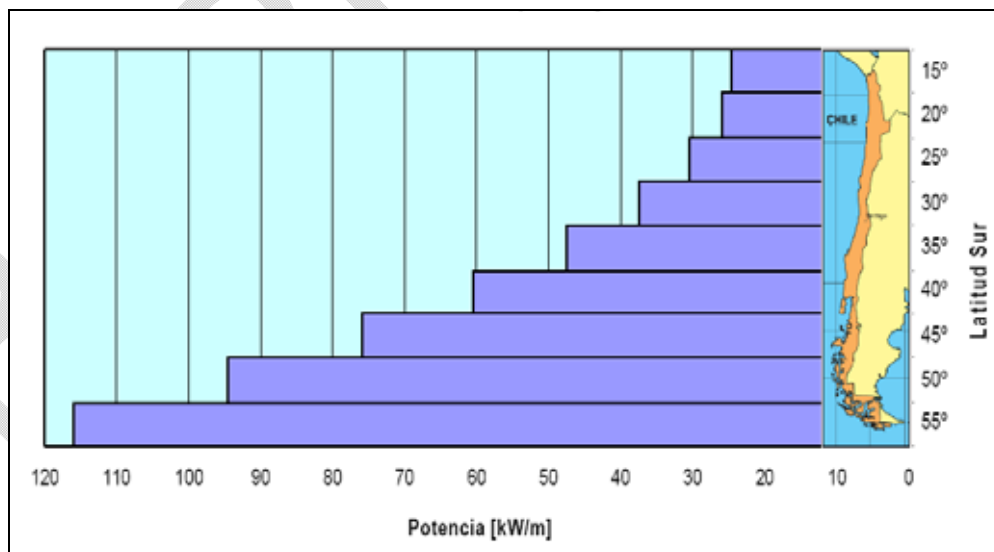
Con lo que se obtiene que la potencia en aguas profundas se define en función de la altura significativa en aguas profundas y el período energético (T_e):

$$P_o = \left(\frac{\rho g^2}{64\pi}\right) \times H_{mo}^2 \times T_e \approx 0,49 \times H_{mo}^2 \times T_e \quad [\text{kW/m}]$$

Esta expresión cuantifica las características irregulares a través de la altura significativa espectral y el período energético y por tanto de cuenta de la variabilidad de las características del oleaje en un estado de mar¹. Asimismo, la potencia puede obtenerse por medio del período Peak (T_p) el cual es el máximo de las olas incidentes.

En la Figura 5-12 se muestra de manera esquemática la distribución latitudinal de la potencia en aguas profundas, estimada por Acuña y Monárdez (Ref.31) a partir de la base de datos de Olas Chile. La potencia en aguas profundas tiene una distribución parabólica a lo largo del territorio nacional, que va desde los 25 [kW/m] en el extremo norte hasta valores cercanos a los 110 [kW/m] en el extremo sur. De acuerdo a estos autores, para la zona comprendida en el estudio, la potencia está en el rango de 37 a 61 [kW/m]. Una característica de los climas de oleaje oceánicos es la baja ocurrencia de períodos de calma.

Figura 5-12: Potencia del oleaje en aguas profundas en todo Chile.



Fuente: Acuña y Monárdez.

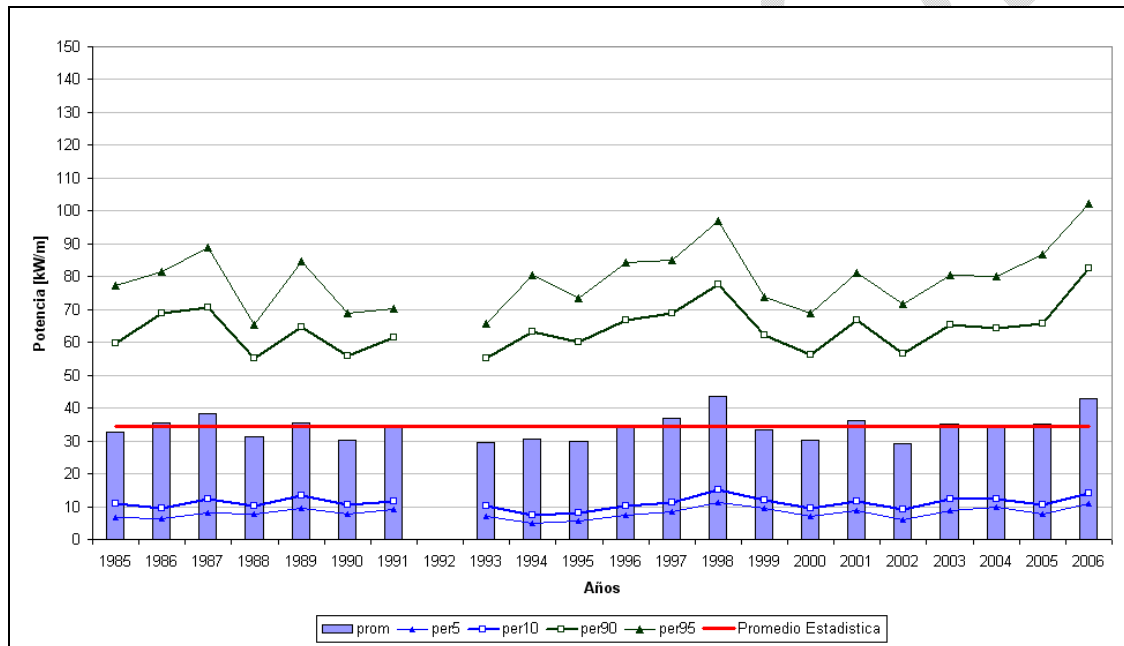
¹ Para estos efectos se define un estado de mar como un lapso de tiempo en que los parámetros estadísticos y/o espectrales se mantienen aproximadamente constantes

Para diferentes latitudes en aguas profundas se estimó la potencia disponible como el promedio temporal de las potencias asociadas a todos los estados de mar a lo largo de la estadística. Se efectuó un análisis de variabilidad anual, mensual y diaria en aguas profundas.

5.3.4.1 VARIABILIDAD ANUAL PERÍODO 1985 A 2006

La variabilidad anual se relaciona con los ciclos atmosféricos de largo plazo que influyen en la generación del oleaje. En la Figura 5-13 se presentan los valores de potencia media anual en la latitud 33°, los niveles de excedencia de 5%, 10%, 90% y 95% y el promedio de todos los años comprendidos en la estadística. Estos valores han sido obtenidos considerando la altura significativa y el período energético. Los niveles de excedencia se obtienen a partir de los gráficos de excedencia, indicando el nivel de potencia que es excedido durante determinados porcentajes del tiempo. No se cuenta con estadística apropiada para el año 1992, razón que explica el vacío en los gráficos.

Figura 5-13: Potencia media anual del oleaje en nodo 33 (1985 a 2006).



Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos resultados se elabora la Tabla 5-3, donde se presentan los valores medios, máximos y mínimos de la potencia media anual en la zona de estudio. Cabe mencionar que existe una alta dependencia del fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS), lo que se evidencia en que la máxima potencia para todos los nodos ocurre en 1998, reconocido por ser un año niño. En contraste, el año 1993 corresponde al del mínimo valor a lo largo de la estadística.

Tabla 5-3: Potencia media anual de oleaje en la zona de estudio (1985 a 2006).

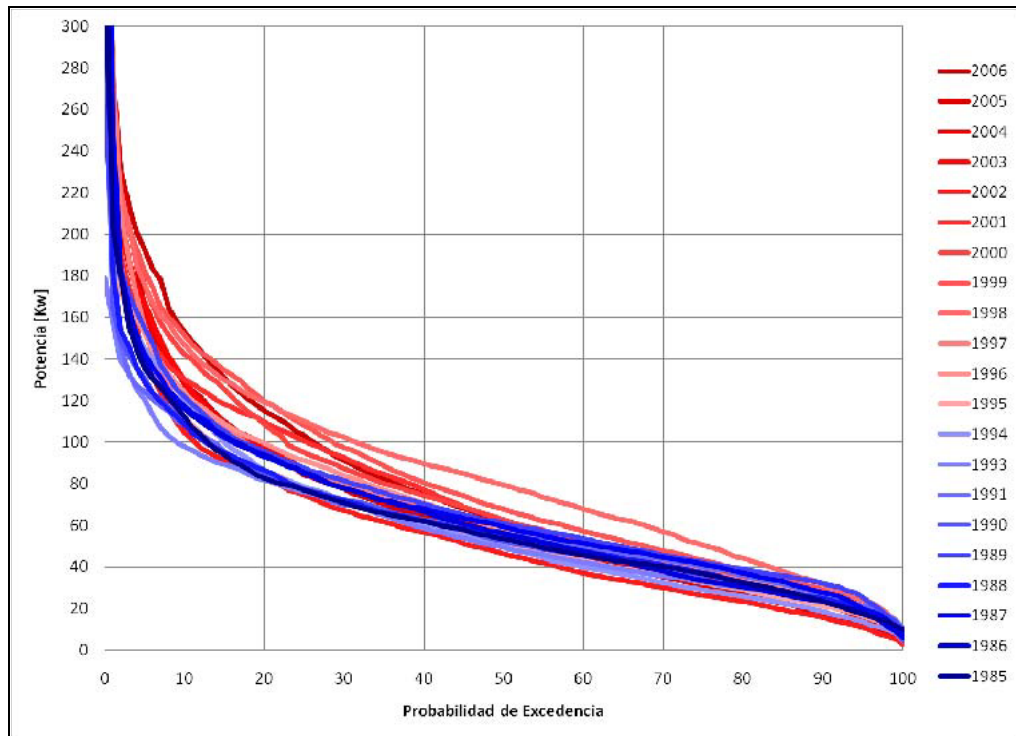
Nodo	Potencia media anual [kW/m]		
	Promedio	Máxima	Mínima
31	33	44	29
33	34	53	30
35	39	52	33
37	46	57	39
39	48	58	41

Fuente: Elaboración propia.

Para la zona de estudio se obtiene un rango entre 33 y 48 [kW/m] para el promedio de las potencias medias anuales. Estos valores son algo menores que los estimados por Acuña y Monárdez, quienes proponen para la zona comprendida en el estudio una potencia en el rango de 37 a 61 [kW/m]. La diferencia se debe a que la potencia es estimada en el referido estudio con el periodo peak, que es superior entre un 18 y un 23% que el período energético, de acuerdo a comparaciones efectuadas ente ambos parámetros en las bases de datos en aguas profundas proporcionadas. Para efectos de comparación, considerando una relación aproximada de $T_p = 1,2 T_c$ y la expresión utilizada en el referido estudio, se obtienen valores de entre 40 y 59 [kW/m], que son concordantes a los estimados en dicha referencia.

Se efectuó asimismo, un análisis a nivel de datos individuales para complementar los análisis de variabilidad medios presentados anteriormente. A partir de éste se desprende que valores de potencia para cada estado de mar se encuentran entre los 2.82 y 577.91 [Kw], siendo el 99% menor a 231.98 [Kw] y el tramo de 20 a 80 [Kw] el que contiene el 63.23% de ellos.

Las probabilidades de excedencia anuales se presentan en la Figura 5-14. Los años iniciales presentan distribuciones similares en formas y un intervalo pequeño de variación de potencia a una misma probabilidad, mientras que en los años recientes la forma varía (pendiente más inclinada principalmente) y el intervalo de potencia a una misma probabilidad es mayor. De todas formas, las variaciones principales se presentan en el intervalo de 5 a 50% de probabilidad, tramo importante ya que se relaciona con la excedencia de las potencias mayores, siendo los años recientes los que presentan mayores potencias frente a los años iniciales.

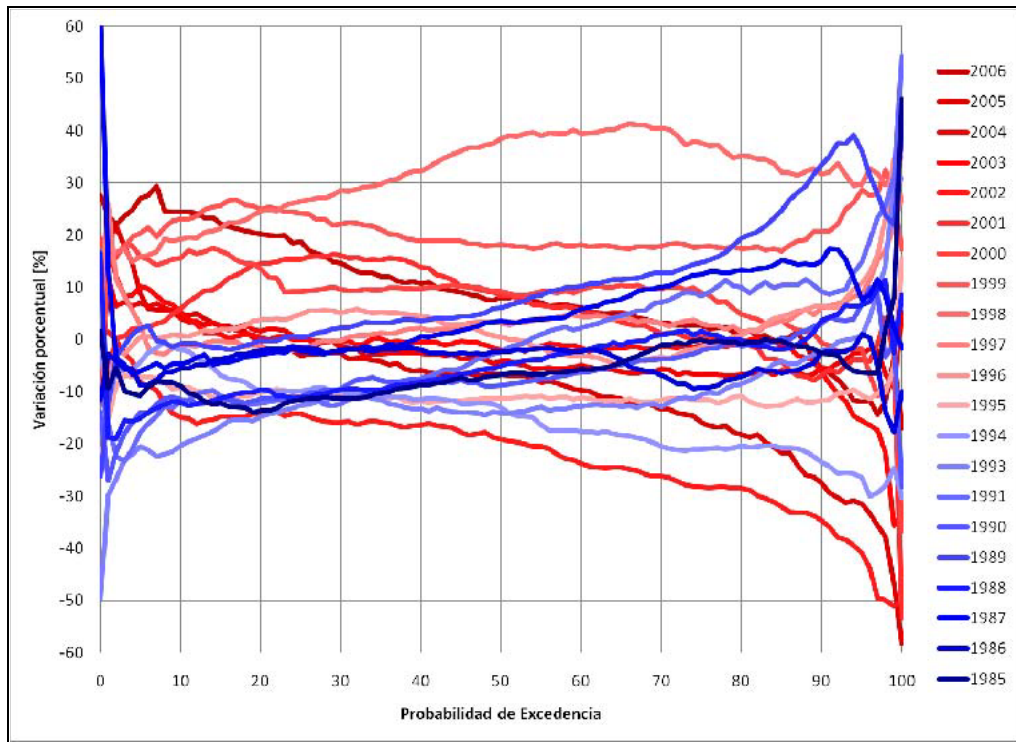
Figura 5-14: Curvas de probabilidad de excedencia anual de potencia de oleaje.

Fuente: Elaboración propia.

Las variaciones porcentuales de la probabilidad de excedencia que se muestran en la Figura 5-15, son de mayor magnitud que las presentadas en los parámetros anteriores, alcanzando hasta 40%.

Sectorizando el análisis, en el intervalo de probabilidad de 5 a 20%, asociada a la excedencia de las mayores potencias, los años iniciales sólo presenta variaciones negativas menores a 20% respecto a la distribución de probabilidad promedio, mientras que los recientes sólo presentan variaciones positivas (a excepción del año 2002) alcanzando el 30%. Para el intervalo de 20 a 50% de probabilidad de excedencia, las variaciones tienden a disminuir para todo los años (a excepción del año 1998) siendo las variaciones menores al 20%. Para el tramo de 50 a 95%, correspondiente a los valores bajos de potencia, las variaciones positivas son principalmente en los años iniciales mientras que los recientes tienen amplia variación. Mención especial tiene el año Niño de 1998 ya que sus valores de potencia exceden a los restantes años entre un 30 y 40 %.

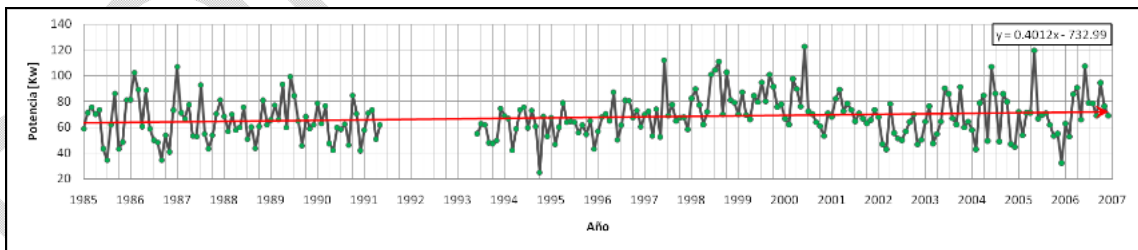
Figura 5-15: Variación porcentual de la probabilidad de excedencia de potencia de oleaje.



Fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-16, que describe la serie de tiempo de los promedios mensuales, muestra que para toda la estadística las variaciones mensuales se mantienen regulares hasta el año 1997, para luego presentar variaciones mayores, sin embargo esto no es impedimento para ajustar una curva de tendencia lineal, la cual presenta una pendiente positiva de valor 0.4012, lo que implica que la potencia de oleaje se incrementa en 0.4 [Kw/año].

Figura 5-16: Promedio mensual de la potencia de oleaje y tendencia lineal.

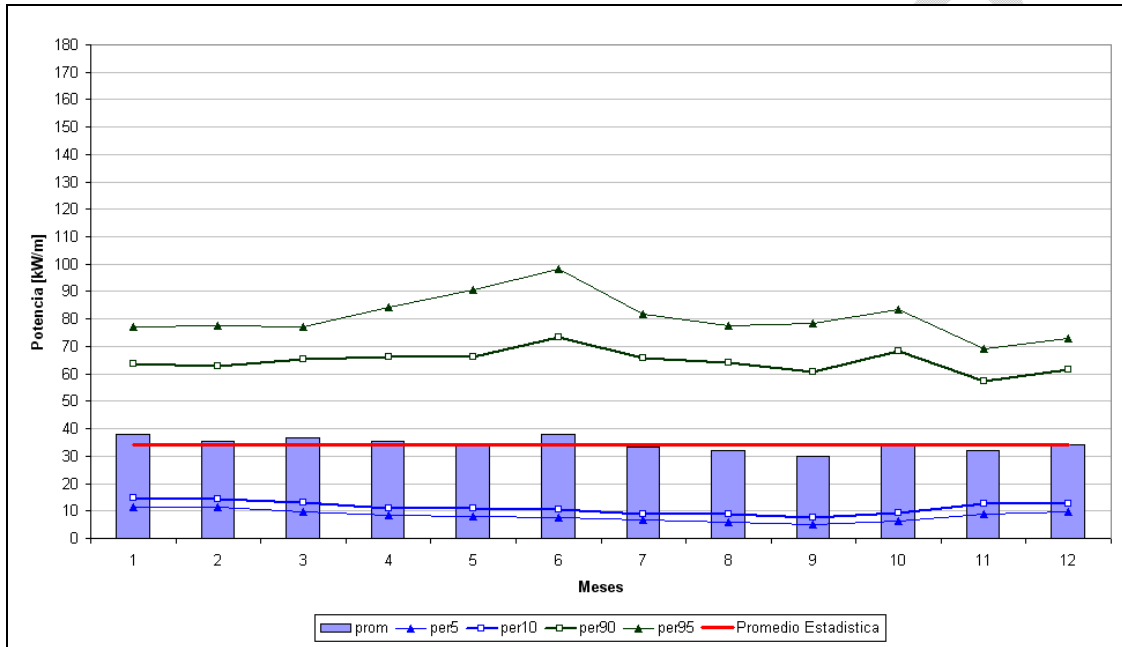


Fuente: Elaboración propia.

5.3.4.2 VARIABILIDAD MENSUAL PERÍODO 1985 A 2006

La variabilidad mensual se relaciona con el movimiento relativo del planeta en torno al sol, y la variación de la declinación solar respecto del ecuador celeste a lo largo del año. En la Figura 5-17 se presentan los valores de la potencia media mensual en aguas profundas en la latitud 33°, los niveles de excedencia de 5%, 10%, 90% y 95%, y el promedio anual de toda la estadística. Estos valores han sido obtenidos considerando la altura significativa y el período energético.

Figura 5-17: Potencia media mensual del oleaje en nodo 33 (1985 a 2006).



Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos resultados se elabora la Tabla 5-4, donde se presentan los valores máximos, mínimos y promedios anuales de la potencia media mensual en la zona de estudio. Cabe mencionar que existe una dependencia mensual manifestándose en que la máxima potencia ocurre en junio.

Tabla 5-4: Potencia media mensual de oleaje en la zona de estudio (1985 a 2006).

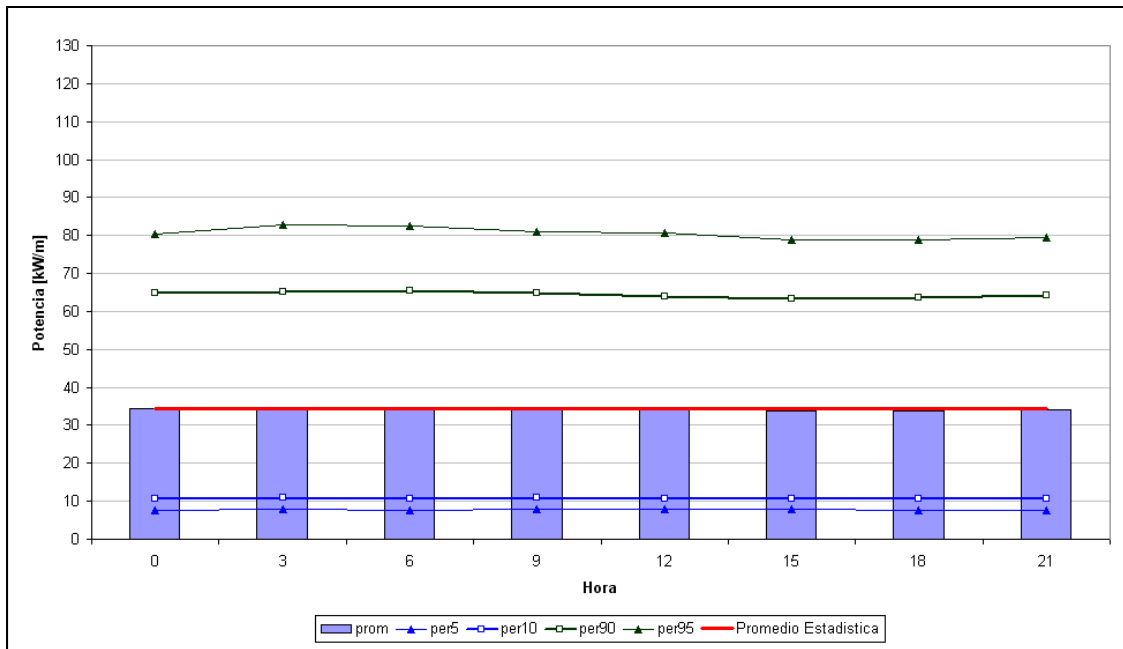
Nodo	Potencia media mensual [kW/m]		
	Promedio	Máxima	Mínima
31	33	36	31
33	34	38	30
35	39	45	37
37	46	57	38
39	48	62	38

Fuente: Elaboración propia.

5.3.4.3 VARIABILIDAD HORARIA PERÍODO 1985 A 2006

La variabilidad horaria se asocia a fluctuaciones en el recurso por efecto del día y de la noche. En la Figura 5-18 se presentan los valores de la potencia media horaria en aguas profundas en la latitud 33°, los niveles de excedencia de 5%, 10%, 90% y 95% y el promedio de toda la estadística. Estos valores han sido obtenidos considerando la altura significativa y el período energético.

Figura 5-18: Potencia media horaria del oleaje en nodo 33 (1985 a 2006).



Fuente: Elaboración propia.

A partir de estos resultados se elabora la Tabla 5-5, donde se presentan los valores medios, máximos y mínimos de la potencia media horaria del oleaje en la zona de estudio. Cabe mencionar que existe una débil dependencia horaria, lo que se debe a que el ciclo horario afecta principalmente al oleaje de generación local, sea, que tiene poca capacidad de generación de energía.

Tabla 5-5: Potencia media horaria de oleaje en la zona de estudio (1985 a 2006).

Nodo	Potencia media horaria [kW/m]		
	Promedio	Máxima	Mínima
31	33	33	33
33	34	34	33
35	39	41	39
37	46	47	45
39	48	49	48

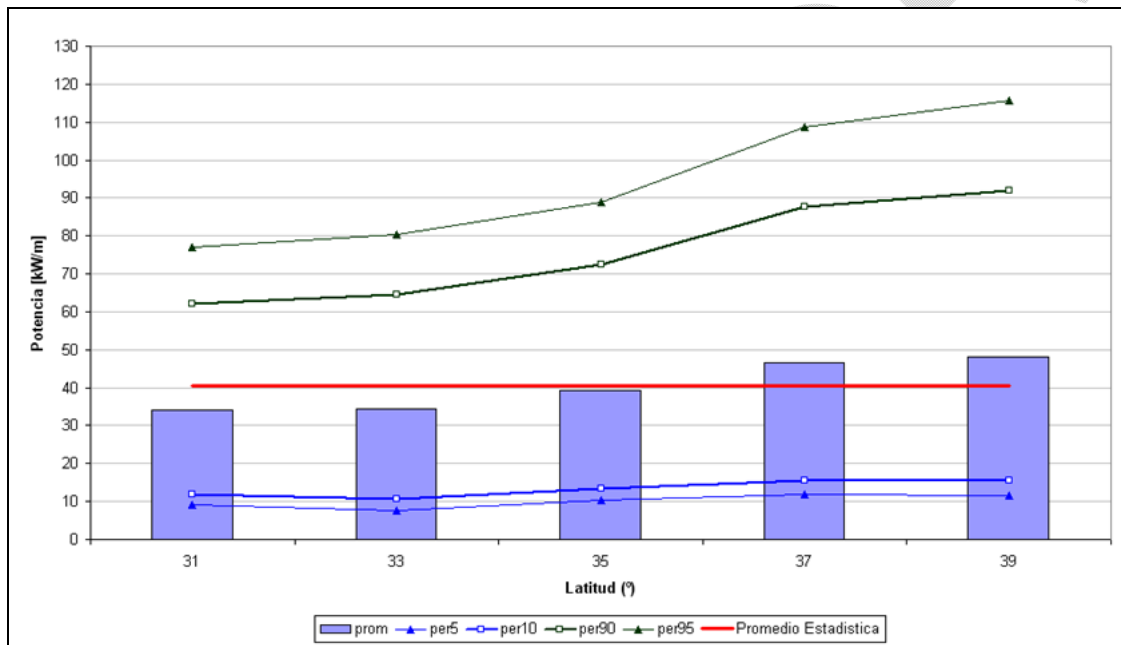
Fuente: Elaboración propia.

5.3.4.4 VARIACIÓN LATITUDINAL PERÍODO 1985 A 2006

La variabilidad latitudinal se debe a la posición relativa de cada nodo respecto de los grandes sistemas climáticos del Pacífico Sur, caracterizados por la presencia del Anticiclón del Pacífico Sur y la presencia intermitente de sistemas de baja presión provenientes de altas latitudes, sobretodo durante la época invernal. Esto redundo en que la potencia del oleaje aumenta con la latitud, alcanzando los mínimos en el nodo 31 y los máximos en el nodo 39.

En la Figura 5-19 se presentan las potencias promedio en toda la estadística en aguas profundas para todos los nodos en toda la estadística, los niveles de excedencia de 5%, 10%, 90% y 95%.

Figura 5-19: Potencia media del oleaje en todos los nodos (1985 a 2006).



Fuente: Elaboración propia.

5.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Debido al exiguo plazo disponible, el estudio se focalizó en la estadística de oleaje reinante, o de mayor frecuencia, sin considerar la estadística de temporales. Para los cuatro parámetros de resumen estudiados² se observó un cambio de comportamiento de la distribución anual de probabilidad de excedencia entre los años iniciales (1985–1994) y los recientes (1995-2006). Las variaciones encontradas sugieren en general un incremento de la altura de ola en los últimos años, acompañado de periodos más altos y con direcciones cada vez más hacia el sur. El incremento en los periodos y alturas implican un aumento aún más importante en los valores de potencia oleaje.

En la altura significativa espectral se observó un incremento en la probabilidad de excedencia anual de eventos de magnitud superior al promedio que llega a valores cercanos del 10%. Se observó asimismo un comportamiento atípico del año 2002 (Niña), el cual presenta alturas por bajo del comportamiento de los años cercanos y del año 1998 (Niño) que presenta alturas por mayores. El incremento promedio en la altura es 0.0041 [m/año].

En el periodo medio espectral se observó un incremento en la probabilidad de excedencia anual de eventos de magnitud superior al promedio que llega a cerca de un 5%. Se observó asimismo un comportamiento atípico de los años 2005 y 2006, los que presentan periodos muy por debajo de los años anteriores.

En la dirección media espectral se observó una variación uniforme y decreciente de la probabilidad de excedencia anual, lo que indica que el oleaje incide con una dirección cada vez más hacia el S, con una variación promedio anual de -0.31 [°/año].

En la potencia de oleaje se observó un incremento en la probabilidad de excedencia anual de eventos de magnitud superior al promedio que llega a cerca de un 25%. Se observó un aumento promedio de 0.4 [Kw/año] y variaciones interanuales y estacionales significativas. La potencia del oleaje aumenta progresivamente con la latitud. Por otro lado, el aumento en la potencia del oleaje redundará en mayores costos de instalación, mantención y reposiciones imprevistas.

A efectos de profundizar en el estudio, se sugiere continuar la investigación efectuando un análisis de estadísticas de mayor longitud, provenientes de modelos globales de oleaje de 40 o más años a lo largo de la costa de Chile, que dé cuenta de los cambios que puede estar experimentando el oleaje, desde una escala de tiempo de horas hasta escalas de tiempo interanuales, de modo de detectar fluctuaciones en los efectos estacionales y de gran escala temporal. Para efectos de estimar la vulnerabilidad futura de las costas, se recomienda efectuar una extrapolación a medio plazo (del orden de décadas), considerando tendencia, efecto estacional y fenómenos ENOS. Se recomienda asimismo efectuar un análisis de eventos extremos y simular la propagación de oleajes en aguas someras, de modo de facilitar la futura evaluación de los riesgos asociados e modificaciones en el clima del oleaje en las costas de Chile.

Se recomienda complementar los resultados y conclusiones presentados en este informe con el estudio de Efectos del Cambio Climático en las costas de Chile, que será desarrollado por el Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cantabria en el marco de esta convocatoria.

² Los parámetros son altura significativa espectral, periodo medio espectral, dirección media espectral y potencia.

6 ESTUDIO DE SISMICIDAD Y TSUNAMIS

Este capítulo se orienta a recabar información sobre las variaciones en la superficie por efecto de los sismos, permitiendo complementar la evaluación de los posibles efectos de cambio en el clima marítimo en las costas chilenas. El estudio se focaliza en la identificación de los eventos más relevantes en la historia de registros sísmicos y sus efectos en deformaciones corticales, como solevantamientos o subsidencias costeras, que puedan afectar las mediciones de los parámetros oceanográficos, como la marea astronómica. Asimismo, se revisan antecedentes sobre tsunamis de campo cercano ocurridos en las costas de nuestro país.

Sobre la base de la literatura existente se catastraron los mayores movimientos sísmicos registrados en Chile, con especial interés en los parámetros geofísicos como la posición del epicentro, largo, ancho, dislocación, profundidad, magnitud Richter, momento sísmico, solevantamientos y subsidencias costeras, entre otros. De la misma forma, se recopiló información general de tsunamis, sin focalizarse en la determinación de las zonas de inundación. Con la información reunida, se clasifican y describen los terremotos trascendentales en la zona norte, central y sur, comparándose así eventos sísmicos contenidos entre barreras geológicas comunes.

6.1 PROCESOS TECTÓNICOS

Chile se encuentra en una localización crítica en el contexto de los procesos tectónicos inter-placa. La Placa de Nazca subduce en forma constante a la Placa Continental a razón de 10 [cm/año], lo que se traduce en una acumulación de energía expresada en deformación y fuerza en el plano de subsidencia, que luego de sobrepasar un determinado umbral genera sismos (Kausel, 1986). Se aprecian distintos fenómenos secundarios asociados al movimiento tectónico entre los que destacan los tsunamis y las variaciones bruscas en la topografía traducidas en solevantamientos, subsidencias costeras o desplazamientos horizontales de los terrenos. Ello sugiere que, en un país sísmico como Chile, el análisis de procesos costeros en el largo plazo está indisolublemente ligado a los fenómenos sísmicos y a estos efectos secundarios. Los eventos sísmicos de gran intensidad se han repetido en la historia de Chile y se presentan en la Figura 6-1.

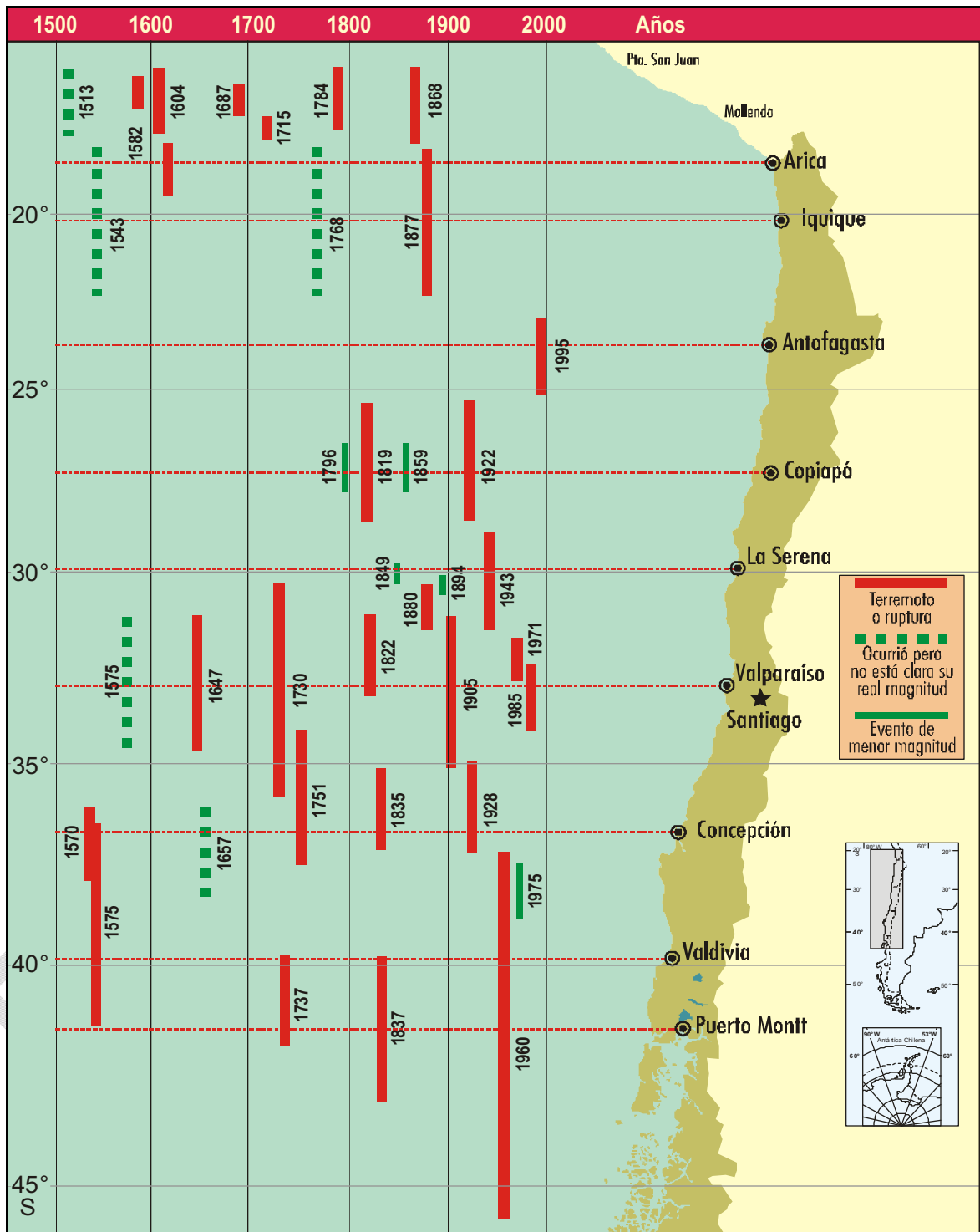
Por lo general, las rupturas se originan bajo la placa continental, en zonas cercanas al Océano Pacífico, o simplemente bajo éste de Concepción al sur (Lomnitz, 1970). Esto define importantes fenómenos marítimos y costeros que pueden ser más importantes que el sismo en sí. En cuanto a la magnitud, frecuencia y efectos, estos aún no pueden ser cabalmente parametrizados y menos pronosticados. Sin embargo, la constante acumulación y la gran diferencia entre la energía liberada por sismos medianos y fuertes, hacen posible una estimación de la frecuencia de los últimos.

La alta sismicidad costera de Chile produce dos efectos trascendentales para el estudio del nivel del mar en relación a los planos de referencia y vulnerabilidad de las obras. Por un lado se reconocen importantes variaciones verticales y horizontales en la topografía, proporcionales a la acumulación y liberación de la energía en los procesos tectónicos. En particular, las verticales -o corticales- se producen en distintas magnitudes y sentidos según las características del terremoto y la localización de la ruptura. Además se suman otros efectos más complejos e impredecibles, pero que actúan a escala local, como los procesos de consolidación. En la Figura 6-2 se observan los efectos del terremoto de 1960 en Valdivia.

Por otro lado, los tsunamis generados por las grandes rupturas costa afuera impulsan a las masas de agua y tienen un importante impacto en la vulnerabilidad de la infraestructura costera. Cabe destacar que los sismos y tsunamis ocurren en una escala temporal bastante menor³ a la escala temporal asociada a los procesos de cambio climático. Sin embargo, para un horizonte de estudio del orden de décadas, pueden esperarse resultados que ambos procesos ocurran en magnitudes comparables.

³ Los sismos ocurren en una escala de segundos a minutos y los tsunamis en una escala de minutos a horas.

Figura 6-1: Diagrama espacio temporal de los sismos fuertes en Chile Continental.



Fuente: Universidad de Chile. Departamento de Geofísica.

Figura 6-2: Efectos del terremoto de 1960 en Valdivia.



Fuente: Base de datos ICOUV.

6.2 REGISTRO DE EVENTOS SÍSMICOS

6.2.1 DESCRIPCIÓN DE PARÁMETROS GEOFÍSICOS DE SISMOS FUERTES

Se presentan los parámetros tectónicos recopilados para los eventos sísmicos en el territorio chileno continental entre 1550 y 2005. El catastro corresponde principalmente a los datos entregados por el Servicio Sismológico de la Universidad de Chile (<http://ssn.dgf.uchile.cl/>), complementados con otros documentos técnicos. Los sismos denominados sismos fuertes, para este estudio, son aquellos en los que se registraron magnitudes Richter mayor a 7 grados. Los parámetros presentados en el catastro son los siguientes:

- **Lugar del epicentro:** Se trata de ubicar el epicentro de los eventos sísmicos para un posterior análisis del proceso tectónico. Como en algunos terremotos pasados pueden existir incertezas en la ubicación del epicentro, éstos son posicionados en la ciudad más afectada, según lo descrito en los registros históricos.
- **Geometría de la ruptura:** Es importante conocer las longitudes de la zona de ruptura, ya que esta define la magnitud de la energía liberada. En algunos casos, sólo es posible encontrar registros gráficos como los de la Figura 6-1, en el que se miden las longitudes. Si existe la información, también se señala el ancho de la ruptura.

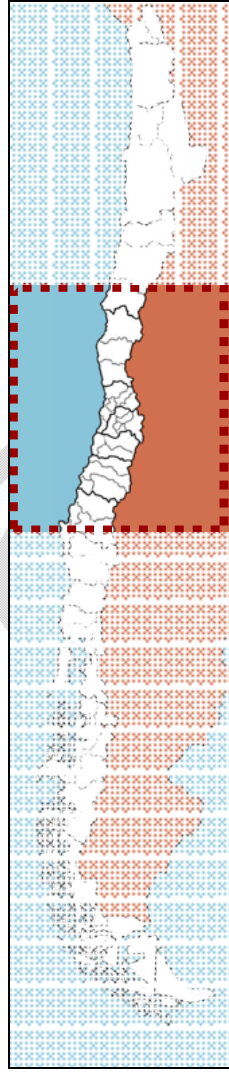
- **Momento Sísmico:** Cuando éste haya sido estimado, se señala la magnitud del sismo a partir del momento sísmico. La magnitud puede ser mejor que la magnitud Richter para la determinación de la energía liberada. Sin embargo, la cantidad de parámetros que se necesitan para su determinación imposibilitan un análisis comparativo con todos los terremotos históricos chilenos.
- **Profundidad del hipocentro:** Información que logra determinar el comportamiento del evento sísmico y su potencial tsunamigénico.
- **Fecha:** Es importante datar a escala de horas el evento sísmico. Con ello se podrán localizar, por simple auscultación, las distorsiones en los registros de los niveles del mar.
- **Altura de ola de tsunami:** El principal parámetro del tsunami es la altura máxima de las olas. La altura se relaciona con la energía liberada en el evento sísmico, batimetría y cercanía de la localidad a la ruptura. Además, debe indicarse la localidad en donde se registro dicha altura. Con lo anterior, podrá analizarse el comportamiento de la ola.
- **Categoría del tsunami:** El Servicio Sismológico de la Universidad de Chile pondera a los tsunamis según el grado de destrucción que este provocó en las zonas siniestradas. Se clasifica según, presencia de tsunami (T), tsunami moderado con marejada importante (TM) y tsunami destructor y mayor (TD). Además, se señalan tsunamis que ocurrieron, pero que no cuentan con una descripción de la destrucción (NA).
- **Deformaciones verticales:** Debido a los cambios del nivel del mar relativos a las obras marítimas es que se hace importante la determinación de las deformaciones verticales.

6.2.2 RESUMEN DEL CATASTRO

Los datos obtenidos de la bibliografía tanto para la descripción tectónica del evento, como de los efectos trascendentales en las condiciones marítimas se resumen en las tablas del Anexo 1. Se señala que los datos del Servicio Sismológico de la Universidad de Chile son obtenidos del GUC y del NEIC. Cuando estos datos sean complementados con otros estudios, será debidamente señalado en la tabla, perteneciendo estos a Winckler, Astroza, Kausel y Comte.

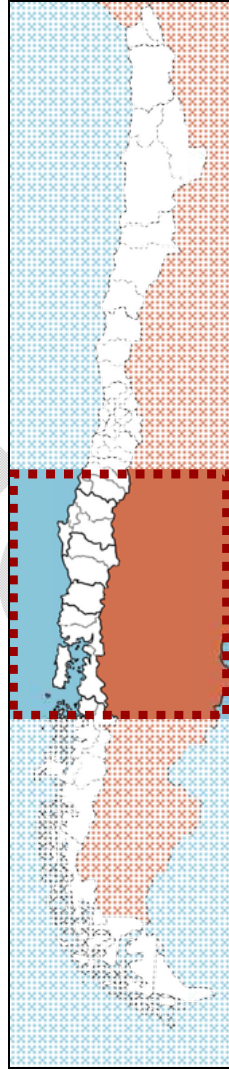
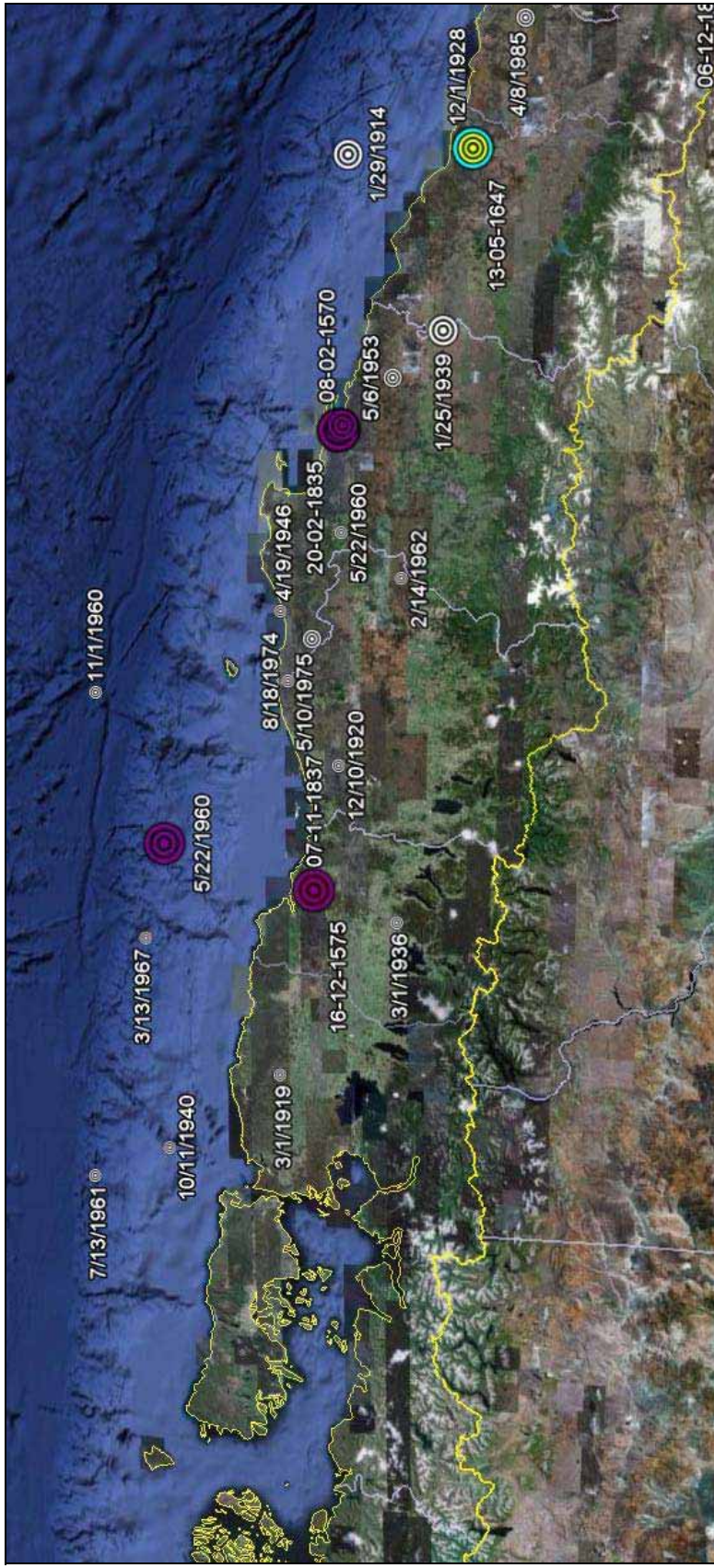
El tamaño de los íconos es proporcional a la energía liberada – magnitud Richter - en el evento sísmico. Por otro lado, el color del ícono es amarillo para indicar existencia de tsunamis pequeños (T), rojo para tsunamis moderados (TM), y mora para los tsunamis grandes y destructores (TD). El color blanco indica la no existencia de tsunamis y el color celeste indicios de que hubo, pero no se logró encontrar información.

Figura 6-4: Localización de los sismos catastrados desde la III a la VIII Región.



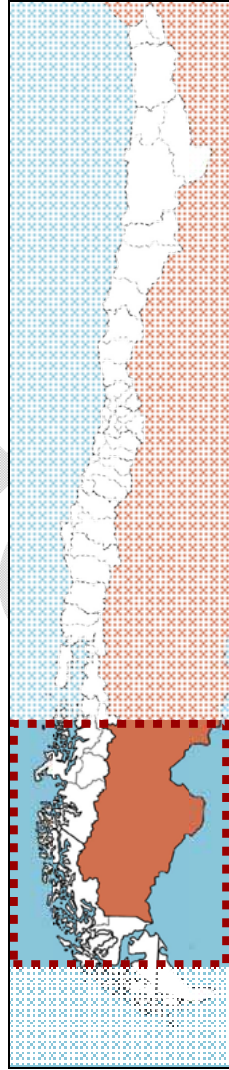
Elaboración: Google Earth y propia.

Figura 6-5: Localización de los sismos catastrados desde la VII a la X Región.



Elaboración: Google Earth y propia.

Figura 6-6: Localización de los sismos catastrados en la XI y XII Región.



Elaboración: Google Earth y propia.

6.3 DESCRIPCIÓN DE LOS EVENTOS SÍSMICOS MÁS IMPORTANTES

En esta sección se describen los eventos sísmicos más importantes en el contexto de los efectos en las condiciones marítimas. Debido a las diferentes barreras geológicas, procesos tectónicos, y efectos marítimos, es apropiado separar los eventos en las zonas norte, central y sur.

6.3.1 EVENTOS OCURRIDOS EN LA ZONA NORTE

24 de Noviembre de 1604

El terremoto se sintió fuertemente en Perú. El extremo norte de Chile lo sintió de manera importante. El tsunami fue grande, estimándose una ola de 16 [m] en Arica, afectando cerca de 1200 [Km] de costa (SHOA, N.D.). No se registraron variaciones en la topografía.

11 de Abril de 1819

Fuerte sismo en Copiapó, con destrucción total de sus edificaciones. Se señala un tsunami mayor en Caldera y Huasco con un aumento en el nivel del mar de 4 [m]. En el puerto de Constitución la nave Fortunata varó. No se registraron variaciones en la topografía.

17 de Noviembre de 1849

El terremoto afectó principalmente a La Serena y Coquimbo. No fue grande y no produjo mayores pérdidas. El tsunami fue moderado, con una ola fue de 5 [m] que destruyó dos atracaderos y cinco calderas para la refinación del cobre. No se registraron variaciones en la topografía.

26 de Mayo de 1851

El terremoto afectó a Copiapó, Huasco y Vallenar entre otros. Se generó un tsunami menor de 3 [m] de altura en Huasco. No se registraron variaciones en la topografía.

5 de Octubre de 1859

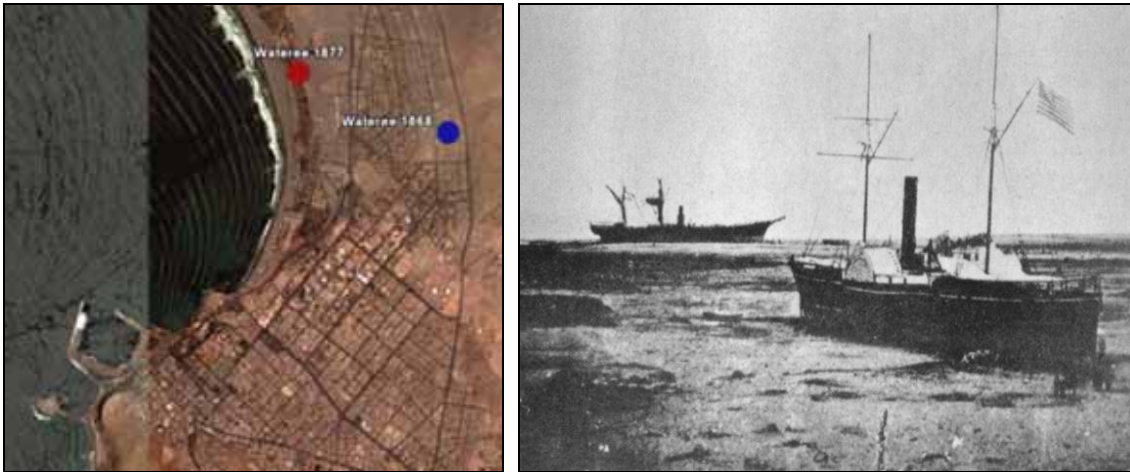
Afectó principalmente a Copiapó. Las líneas ferroviarias fueron cortadas en 25 [Km]. El tsunami destruyó las instalaciones portuarias de Caldera con una ola de 6 [m]. No se registraron variaciones en la topografía.

13 de Agosto de 1868

Es uno de los terremotos más grandes que han afectado al norte del país. Arica fue totalmente destruida, salvo algunas edificaciones. En Iquique y Pisagua la destrucción también fue mayor. La altura del tsunami se estima en 20 [m] para la segunda ola y se adentró más de 450 [m] al interior. No se registraron variaciones en la topografía.

A continuación se presenta un fragmento del relato del oficial L.G. Billings¹, del navío de bandera norteamericana Wateree, que junto al Fredonia, al acorazado peruano América y a otra docena de embarcaciones se encontraban anclados en la rada de Arica, a la sazón bajo dominio peruano, la tarde del 8 de Agosto de 1868, fecha en que, como había ocurrido en cada siglo de la existencia de esa entonces floreciente ciudad, la fuerza de un terremoto y posterior tsunami destruyó casi todo lo que los hombres habían construido. En la Figura 6-7 se ilustra la ubicación del vapor Wateree que fuera desplazado por las olas y varado al interior de la actual playa Cavanha.

¹ Adaptado de www.educared.net/educared/visualizacion/htm/primerasnoticias/uni/terre/texto.htm.

Figura 6-7: Ubicación del Wateree después de tsunamis de 1868 y 1877, en Arica.

Fuente: Observatorio de tsunamis, Marcelo Lagos. www.geo.puc.cl/observatorio/lagos.htm.

"Hacia las cuatro de la tarde me encontraba en la cabina del comandante cuando nos sobresaltamos, pues el barco vibraba como cuando se deja caer el ancla y la cadena gime en los escobenes. Seguros de que no podía tratarse de esto, corrimos hacia el puente. Atrajo nuestra atención una nube de polvo que avanzaba desde el sureste por tierra, al mismo tiempo que crecía la intensidad del ruido. Ante nuestros ojos estupefactos las colinas parecían tambalearse, y el suelo se agitaba igual que las pequeñas olas de un mar picado. (...). Temerosos por la llegada de un maremoto, mirábamos hacia el mar abierto; pero el mar estaba tranquilo y se podía creer que los cuatro o cinco minutos que acabábamos de vivir, así como el desolado espectáculo al que volvíamos momentáneamente la espalda, habían sido una pesadilla. Por prudencia, el comandante hizo fondear las anclas suplementarias, cerrar las escotillas, amarrar los cañones, poner alambreras. (...). A partir de ese instante, el mar pareció desafiar todas las leyes de la naturaleza. Diversas corrientes se precipitaban en direcciones opuestas y nos arrastraban a una velocidad que jamás hubiéramos alcanzado, aunque marchásemos a todo vapor. La tierra temblaba continuamente, en intervalos regulares, cada vez con menos violencia y durante menos tiempo (...). La noche había caído hacía largo tiempo cuando el vigía gritó sobre el puente para anunciar que una ola gigantesca se aproximaba. Escrutando la oscuridad percibimos primero una débil línea fosforescente que, como un extraño espejismo, parecía subir cada vez más hacia el cielo; su cresta, coronada por la lúgubre luz de un resplandor fosforescente, revelaba siniestras masas de agua negra que se agitaban por debajo de ella. Anunciándose con el estruendo de miles de truenos que rugían al unísono, el maremoto que temíamos desde hacía horas había llegado finalmente.

9 de Mayo de 1877

El terremoto se sintió con mayor intensidad en Iquique y Antofagasta, siendo Tocopilla totalmente destruida. Este tsunami causó daños en Iquique, caleta Pabellón de Pica, Chanabaya, Punta Lobos, Huanillos, Tocopilla, Cobija, Mejillones y Antofagasta. Según SHOA la mayor altura del tsunami fue de 21 [m] en Mejillones. No se registraron variaciones en la topografía.

Figura 6-8: Efectos de tsunami del 9 de mayo de 1977 en la Iglesia de San Marcos, Arica.

Fuente: indeterminada.

4 de Diciembre de 1918

El terremoto destruyó el 21% de las viviendas en Copiapó y el muelle de ferrocarril en Caldera. El tsunami fue moderado, con una altura de ola de 5 [m] en Caldera. No se registraron variaciones en la topografía.

10 de Noviembre de 1922

La destrucción abarcó toda la Región de Atacama, con mayores intensidades de Copiapó a Coquimbo. El tsunami actuó desde Huasco a Caldera. En La Serena la altura máxima de ola fue de 7 [m] y ahogó a un centenar de personas. En Chañaral la destrucción por el tsunami fue total, registrándose una altura de ola de 9 [m]. No se registraron variaciones en la topografía. En la Figura 6-10 se ilustra una fotografía de los efectos del tsunami de 1922 en Coquimbo.

Figura 6-9: Bodegas y oficina del ferrocarril de Coquimbo.



Fuente: indeterminada.

Figura 6-10: Efectos del tsunami de 1922 en Coquimbo.



"Maremoto de 1922: Todo fue desolación y ruina. En el grabado, el vapor "Potrerillos" de don Juan José Mac Auliffe quedó varado en Playa Changa a corta distancia de la laguna de "Puente Negro". Varios lanchones fueron conducidos por las aguas hasta el estero "El Culebrón", donde enterraron sus proas. La población "Victoria" y la venida General Baquedano fueron devastadas en toda su extensión por la braveza del mar".

Fuente: indeterminada.

6 de Abril de 1943

El terremoto destruyó Combarbalá, Ovalle, Salamanca e Illapel. El tsunami fue leve con una altura de ola de 1 [m] en Los Vilos. No se registraron variaciones en la topografía.

30 de Julio de 1995

El terremoto generó daños en 120 viviendas en Antofagasta y el nivel del mar aumentó 2.8 [m], sin generar grandes daños más que los propios producidos por el movimiento telúrico. Se notan deformaciones de la corteza de 0,9 [m] cerca del epicentro y 0,1 [m] a 200 [Km] de él (Reigber, N.D.).

6.3.2 EVENTOS OCURRIDOS EN LA ZONA CENTRAL**17 de Marzo de 1575**

El terremoto tuvo una intensidad de Mercalli VII-VIII en Valparaíso (Kausel, 1986). Según el texto Historia General de Chile de Diego Barros Arana, el terremoto fue de poca intensidad pero prolongado en duración. No se registran efectos marítimos.

13 de Mayo de 1647

El terremoto de 1647 conocido también como Nuestro Señor de Mayo, afectó desde la zona del Río Choapa al Río Maule. La duración fue de aproximadamente 7 minutos, y se posiciona como uno de los cinco terremotos mas fuertes que afectaron a la zona central. Debido al remezón, murieron aproximadamente 600 personas (Wikipedia, 2009a).

En cuanto a los efectos marítimos, se recopilan declaraciones de pescadores, describiendo *“tanta extraordinaria violencia en las olas de mar que se subían sobre las mas altas sierras que las cercan”* (Oidores de la Real Audiencia, N.D.). En cuanto a cambios en la topografía, se encuentra información sobre inundaciones en el valle de Colchagua, tal como lo señala el párrafo (*sic*).

“Mudaronse las veredas de los caminos, secaronse los manantiales que en mucho tiempo no dieron agua. Y en todo el partido de Colchagua corregimiento de indios, ubo una inundación tan furiosa que cubrio los arboles mayores su impetu y se llevo tras el de mas de sesenta mill cabezas de ganado, a un mes de sucedido el terremoto, y en esta ciudad nebo tres dias continuos y con ser tan benigno el clima que varias o ningunas veces se podian distinguir los trueno que otras...” (Párrafo extraído de la Carta de los Oidores de la Real Audiencia en 1647).

8 de Julio de 1730

Se estima que el terremoto de 1730 fue el de mayor magnitud y destrucción que se ha podido conocer en la zona central. La destrucción fue mayor en Valparaíso aunque no menor en Santiago. El terremoto se provocó por una ruptura excepcionalmente mayor que los otros terremotos de la zona, prolongándose más hacia el norte. Esto puede deberse a que barreras comunes para otros terremotos, fueron traspasadas por este terremoto. Así, se presume que la destrucción llegó con gran intensidad a La Serena.

En cuanto a los efectos marítimos, el tsunami se sintió en forma importante en Valparaíso y Concepción. En particular, el sector El Almendral de Valparaíso fue completamente barrido por la ola, llegando esta al altar mayor de la Iglesia La Merced (Kausel, 1986). En cuanto a cambios en la topografía, no se encuentra información.

19 de Noviembre de 1822

Es de los primeros terremotos en los que se puede recopilar información importante sobre los efectos en las condiciones marítimas, de la mano de la escritora e ilustradora María Graham y el cronista Longueville Vowell, citados por Leopoldo Castedo. Se describen daños importantes en las edificaciones de Valparaíso con un sismo que duró aproximadamente 3 minutos (Siglos Curiosos, 2007). La intensidad del evento se estima en VII-VIII Mercalli en Valparaíso.

El tsunami fue moderado con tres retrocesos y regresos de ola, menores a 4 [m]. El puerto de Quintero quedó completamente destruido. En cuanto a los cambios en la topografía, se identifican solevamientos de 0.9 [m] en Valparaíso y 1.2 [m] en Quintero (Kausel, 1986). Se reconocen también solevamientos leves en la desembocadura del Río Rapel.

16 de Agosto de 1906

La intensidad fue de VIII Mercalli en Santiago. En Valparaíso el sismo fue especialmente dañino en El Almendral.

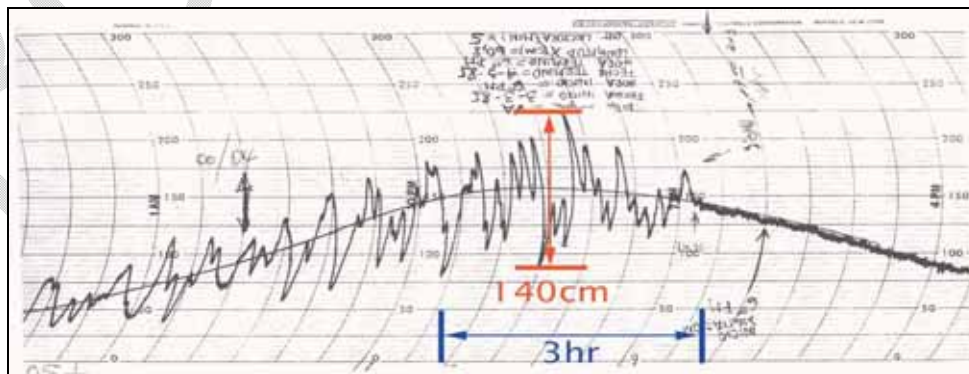
En cuanto a tsunamis, se registra una ola pequeña, con una altura menor a 1 [m]. No se registraron daños en el puerto (Kausel, *op.cit.*). En cuanto a las variaciones en la topografía, se registran solevamientos de 0.4 [m] en Pichilemu y LLico y de 0.8 [m] en Quintero y Zapallar. En Valparaíso el solevamiento fue de 0.6 [m].

3 de Marzo de 1985

Ha sido el último de los eventos sísmicos fuertes de la serie que afecta a la zona central de Chile. Sin embargo, la magnitud de éste y el de 1906 fue menor que la de los eventos anteriores (bajo 8 Richter). Se logra identificar también la atenuación de la intensidad al aumentar la distancia al epicentro.

En cuanto a tsunamis, se registró uno pequeño con el mareógrafo de Valparaíso. Este registro determinó un aumento del nivel del mar de 0.2 [m] a las 22:50 GMT y una amplitud máxima de 1.15 metros (Kausel, *op.cit.*). Se registra también una amplitud máxima de 0.55 [m] en Coquimbo, 1.82 metros en Talcahuano, 0.5 [m] en Arica, y Caldera, Antofagasta e Iquique una amplitud menor a 0.3 [m]. En cuanto a los comentarios de los pobladores se registran 2 [m] en Quintay, 1.5 [m] en Algarrobo, 2-3 [m] en Cartagena, y 3-4 [m] en San Antonio.

Figura 6-11: Registro de 1985 en estación del SHOA.



Fuente: Base de datos ICOUV.

Los sollevamientos fueron apreciables. En Algarrobo se comprobó un sollevamiento de 0.3 [m], en Rapel los pescadores estimaron el sollevamiento de 0,2 a 0,3 [m]. Se observan también recuperaciones de las deformaciones semanas después en ciertas zonas y otras que subsisten como en Algarrobo y San Antonio. Además, logra determinarse el perfil de deformación de la corteza, existiendo sollevamientos en la costa, y hundimientos en el interior. El punto de inflexión se encuentra en Casablanca, no existiendo deformaciones (Kausel, 1986). Se señala también que en el lago Rapel se identifican desniveles entre extremos del lago, poniéndose en tela de juicio posibles inclinaciones de la corteza, en adición a hundimientos y sollevamientos. En la Figura 6-12 se muestra parte de los efectos del terremoto de 1985 en el Puerto de San Antonio.

Figura 6-12: Efectos del terremoto de 1985 en el Puerto de San Antonio.



Fuente: Base de datos ICOUV.

6.3.3 EVENTOS OCURRIDOS EN LA ZONA SUR

8 de Febrero de 1570

Se produjo a las nueve de la mañana en Concepción (actual Penco) cuando la gente se encontraba en misa. El sismo fue bastante fuerte, pero la población logró escapar a los cerros. No se registraron muertes.

El tsunami fue bastante destructor, anegando la mayor parte del pueblo con varias olas sucesivas que arremetían con gran ímpetu (Barros Arana, ND).

16 de diciembre de 1575

Un par de meses después del terremoto de Santiago. Fue de semejante envergadura que el terremoto de 1960. Además se registran otros efectos como el colapso de los tacos en la desembocadura del lago Riñihue, con la consecuente destrucción de Valdivia y otras localidades meses después.

El Servicio Sismológico de la Universidad de Chile señala que el tsunami tuvo categoría TD (mayor). Se registran inundaciones cerca de Imperial, Valdivia y Castro, lo que hace suponer que existió subsidencia (Comte, 2009).

8 de Julio de 1730

Es el mismo descrito en la zona central, teniendo efectos en la zona Sur del país. Astroza (2009) señala un Tsunami de 16 metros sobre el nivel del mar en Concepción.

24 de Diciembre de 1737

Daño en asentamientos al sur de Concepción. Se reporta un tsunami de pequeña magnitud (Comte, 2009).

25 de Mayo de 1751

El terremoto se sintió fuerte en Concepción y fue precedido por precursoros que alertaron una parte de la población. Duró aproximadamente 6 minutos y se sintió también en la Zona Central. A raíz de la destrucción, la ciudad de Concepción fue trasladada desde la actual Penco. El puerto también cambia su ubicación hacia el SW de la bahía Concepción y recibe el nombre de Talcahuano.

El mar se recogió más de 1 [km] y originó 7 minutos mas tarde, 3 olas fuertes con alturas en aumento, siendo la última la más alta. En el archipiélago de Juan Fernández murieron 35 personas.

En cuanto a las deformaciones, no se tiene más registro que el cambio del recorrido de un río más de 15 cuadras en Chillán (Wikipedia, 2009c).

20 de Febrero de 1835

El terremoto fue destructor. Afectó una zona comprendida entre los ríos Cachapoal a Valdivia. Las ciudades más afectadas fueron Concepción y Chillán. El movimiento del terremoto se describía en dirección norte-sur.

Se describe un tsunami que abarcó las costas desde Constitución hasta el extremo sur. En Talcahuano el nivel del mar subió 30 [pie] y arrasó la población. Esto se repitió varias veces. En general, en todos los puertos se barrieron las edificaciones (Encina y Castedo, 1985). El tsunami fue documentado por el naturalista inglés Charles Darwin y por el capitán del buque de su expedición Fitz Roy, embarcación que se encontraba fondeada en la bahía Concepción al momento del sismo. De acuerdo a la descripción: *"inicialmente el tsunami se manifestó con una gran disminución del nivel de las aguas dentro de la bahía. Media hora después del terremoto, la bahía se vació casi completamente y los buques anclados en aguas de 13 metros quedaron varados. Luego, una ola de alrededor de 9 metros (30 pies) de altura se desplazó por el sector occidental de la bahía, volcando los barcos e inundando Talcahuano. El fenómeno se repitió dos veces más, siendo la tercera la mayor. Las olas parecieron venir del océano y se dividieron al chocar con la Isla Quiriquina. En la isla, se reportaron alturas de ola de entre 9 y 12 metros, y la inundación alcanzó la cota de los 12 metros (40 pies) sobre el nivel medio del mar. En el lado este de la bahía, la ola no fue tan grande, alcanzando una altura máxima de alrededor de 4.6 metros (14 pies) en Tomé y en bahía Coliumo"*.

El tsunami causó algunos daños en lugares tan lejanos como Castro. Las olas continuaron siendo observadas a intervalos a lo largo del día siguiente. En Valparaíso las amplitudes fueron bastante pequeñas. El tsunami inundó las instalaciones del puerto en la Isla Juan Fernández, retirándose rápidamente y regresando con una mayor amplitud. A poca distancia de la costa un volcán se puso activo en el momento del primer retiro del mar. Una fuerte detonación fue oída, acompañada

por el temblor de la explosión inicial; entonces se vio una pluma de vapor y humo ascendiendo a la distancia. Se observaron llamaradas intermitentes de luz a lo largo de la noche. No se describe caída de ceniza u otros productos volcánicos; los sondeos no revelaron ningún cambio en la topografía de fondo, cerca del lugar donde se creía que había ocurrido la erupción. Montessus de Balore cuestiona la ocurrencia del episodio volcánico; pero las descripciones dadas por el Gobernador de Juan Fernández, Thomas Sutcliffe, son consistentes y creíbles.

En Talcahuano se informó un alzamiento topográfico de 2.7 metros. Darwin dio una descripción detallada de los efectos geológicos en la Isla Quiriquina, donde el basamento rocoso del Paleozoico está expuesto. La roca, un esquisto cristalino, estaba destruida en la superficie como en las explosiones. Grandes fisuras se abrieron de norte-sur, y grandes masas de roca se desprendieron del acantilado hacia el mar o la estrecha playa. La isla entera se elevó en aproximadamente 8 pies sobre su nivel anterior. Un levantamiento costero similar se observó en la Isla Santa María (8 a 10 pies, máximo en el extremo norte de la isla); Talcahuano (4 a 5 pies); Tubul (6 pies), etc., los informes indican que el levantamiento se puede haber localizado a lo largo de la costa de Arauco y las islas fuera de la costa (incluso la Isla Mocha). Negativas observaciones en otros puntos costeros fueron usadas por Suess y Montessus de Balore para desacreditar las conclusiones de Darwin sobre el levantamiento. Gran parte del levantamiento desapareció a través de una lenta recuperación dentro del período de secuencia de réplicas. Según Fritz Roy, muchos residentes informaron hundimiento en el estuario del Río de Maule.

Figura 6-13: Ilustraciones del tsunami de 1835 en Juan Fernández.



Fuente: www.angelfire.com/nt/terremotoConce1835

El tsunami causó algunos daños en lugares tan lejanos como Castro. Las olas continuaron siendo observadas a intervalos a lo largo del día siguiente. En Valparaíso las amplitudes fueron bastante pequeñas. El tsunami inundó las instalaciones del puerto en la Isla Juan Fernández, retirándose rápidamente y regresando con una mayor amplitud. A poca distancia de la costa un volcán se puso activo en el momento del primer retiro del mar. Una fuerte detonación fue oída, acompañada por el temblor de la explosión inicial; entonces se vio una pluma de vapor y humo ascendiendo a la distancia. Se observaron llamaradas intermitentes de luz a lo largo de la noche. No se describe caída de ceniza u otros productos volcánicos; los sondeos no revelaron ningún cambio en la topografía de fondo, cerca del lugar donde se creía que había ocurrido la erupción. Montessus de Balore cuestiona la ocurrencia del episodio volcánico; pero las descripciones dadas por el Gobernador de Juan Fernández, Thomas Sutcliffe, son consistentes y creíbles.

Este maremoto también se propagó al archipiélago Juan Fernández, donde “se supone” la ocurrencia de una erupción submarina. Las observaciones concuerdan con el hecho que se expulsaron chorros verticales de agua y vapor en las bocas de las bahías Concepción y San Vicente, generándose un gran remolino en esta última. Estas emanaciones presentaron un fuerte olor sulfuroso y numerosos peces aparecieron muertos en la orilla de ambas bahías.

7 de Noviembre de 1837

El sismo genera estragos en Valdivia, Osorno y Ancud. El fuerte sismo dejó destruida dos iglesias y todos los edificios fiscales en Valdivia. Se presume que se liberó la mitad del momento sísmico del terremoto de 1960.

Se cita la siguiente carta del Intendente de Valdivia, Isidro Vergara, al Intendente de Concepción, Manuel Bulnes, fechada el mismo día del sismo:

“El gran terremoto que ha experimentado en este pueblo en la mañana de este día, se puede asegurar que sea el mayor de los hasta aquí acontecidos ya que con dificultad podía un hombre sostenerse en pié. Las dos únicas iglesias que había en este pueblo, y todos los edificios fiscales se han arruinado completamente; y si no les han cabido igual suerte a las demás casas de esta población ha contribuido sin duda la circunstancia de ser ellas de madera (...) al saber que no ha perecido una sola persona.”

Existen antecedentes de un tsunami moderado. Astroza (2009) señala un aumento en el nivel del mar de 2 [m] en Ancud. No se encuentran registros de deformaciones corticales.

1 de Diciembre de 1928

Conocido como el Terremoto de Talca, generó importantes daños entre Talca (3/4 de la ciudad colapsó) y Constitución con 300 muertos. El tranque Barahona, receptor de los relaves de El Teniente colapsó generando una avalancha de 314.000 [m³] de agua con 4 millones de toneladas de material sólido, matando a 55 personas en la pequeña estación de Barahona.

Se registra un aumento del nivel del mar de 1.5 [m] por efecto del tsunami en Constitución. No se registran deformaciones en la topografía.

24 de Enero de 1939

Es conocido como el Gran Terremoto de Chillán. Se registran 30.000 víctimas fatales, y destrucción de Chillán a Concepción (Wikipedia, 2009d). El terremoto no genera tsunami, y no se registran deformaciones de topografía.

22 de Mayo de 1960

Conviene reunir en un mismo evento el terremoto del 21 de Mayo de 1960 a las 6:02 de la mañana y el del 22 de Mayo a las 15:11 de la tarde. El primero fue un precursor con epicentro en la costa de la Península de Arauco. El segundo terremoto del 22 de mayo, ha sido el de mayor magnitud en el mundo, liberándose una energía de magnitud 9.5 grados obtenido mediante el momento sísmico. Se sintió en toda la zona sur y central del país. El epicentro se encontró frente a Valdivia y abarcó una falla de 850 [Km] de largo.

El tsunami devastó la zona sur de Chile, destruyendo completamente los puertos de Corral, Queule y Puerto Saavedra. Las ondas se propagaron hacia el norte, ingresando al litoral de la región del Bío-Bío, produciendo en tres ocasiones avances y retrocesos del mar, cada uno de ellos de aproximadamente 15 minutos de duración, con olas de variadas alturas en el litoral de la VIII Región.

En Lebu, las alturas máximas se registraron en la segunda ola, la que alcanzó los 6,0 [m], penetrando por el río e inundando gran parte de la ciudad. En Laico, al sur de punta Lavapié en el Golfo de Arauco, se registró también una altura máxima de 6,0 [m] y en Arauco se informó una altura máxima de 2,5 [m]. En Coronel, el mar se retiró bajo la línea de bajamar y las aguas regresaron como una inundación “tranquila”, situación similar a lo informado para Talcahuano. En bahía Coliumo, la ola máxima observada alcanzó los 6 [m], arrastrando al mar 4 personas que se

ahogaron. En Corral, el nivel del mar subió 10 [m] y en Isla Mocha 25 [m] (Astroza, 2009). La velocidad de la ola en Corral se estimó en 150 [Km/h] (Wikipedia, 2009). En Puerto Saavedra se observaron olas de 20 [m] de altura aproximadamente (Figura 6-14).

Figura 6-14: Tsunami del 22 de mayo de 1960 en Puerto Saavedra.



Fuente: Foto archivo Benjamín Subercaseaux.

Este gran terremoto y maremoto produjo más de 2500 víctimas en el país y en sitios distantes en el contorno del Océano Pacífico. Se derribaron varios Moais en Isla de Pascua y se provocaron millonarios daños y víctimas en Hawaii y Japón.

En cuanto a las deformaciones corticales en la topografía, pueden notarse grandes magnitudes frente a los 850 [Km] de ruptura. Hernández (1961) estima subsidencias en ciertas partes de Valdivia igual a 1.5 [m]. Con esto, campos quedaron hundidos en forma permanente. En Queule, pueden verse también hundimientos considerables (Figura 6-15).

Figura 6-15: Subsistencia experimentada en el Río Queule debido al terremoto de 1960.



Fuente: Comte, 2009.

Además de los aumentos relativos del nivel de las aguas por efecto del hundimiento del terreno (riberas del río Calle-Calle y Queule) y del tsunami en toda la zona, falta mencionar otro suceso que afectó a Valdivia y otras localidades ribereñas al Río Calle-Calle. Los deslizamientos en la desembocadura del Lago Riñihue generaron tres tacos que taparon el desagüe natural del lago, acumulándose millones de metros cúbicos, y que tuvieron que desaguarse de manera controlada. En el caudal *peak* de descarga, se alcanzaron aproximadamente 9.000 [m³/s], generándose grandes desbordes en Valdivia y otras localidades.

En la Figura 6-16 se ilustra la inundación transitoria debida posiblemente a la crecida por efecto de la descarga del lago Riñihue, en el sector de Collico de Valdivia. En la Figura 6-17 se muestra la inundación en el Mercado Municipal de Valdivia. En la foto actual se ven aumentos en las cotas del malecón reconstruido después del terremoto. Se señala que las fotos actuales fueron capturadas el 24 de Mayo del 2009 y corresponden por tanto a las mismas condiciones estacionales.

Figura 6-16: Inundación en el sector Collico en 1960 y foto actual.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 6-17: Inundación en el sector Mercado Municipal de Valdivia en 1960 y foto actual.



Fuente: Elaboración propia.

6.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

El estudio se focalizó en la recopilación bibliográfica de los principales terremotos y tsunamis ocurridos en Chile desde la existencia de registros históricos. Cabe mencionar la heterogeneidad de la información disponible y la escasez de datos relacionados con las deformaciones corticales generadas por los terremotos y la extensión de las zonas de inundación debidas a los grandes tsunamis. No obstante lo anterior, las magnitudes asociadas a levantamientos o subsidencias costeras son considerablemente superiores a las variaciones en el nivel del mar en el largo plazo evidenciadas en los mareógrafos chilenos y por ende deberían ser materia de estudio.

A efectos de profundizar en el estudio, se sugiere continuar la investigación efectuando un análisis de las señales de mareógrafos antes, durante y después de los movimientos sísmicos, de forma de establecer si a través de ellas es posible identificar alteraciones en el nivel de referencia altimétrico de medición del nivel del mar. El establecimiento de futuros escenarios conservadores de deformación cortical para la zona sur, central y norte puede resultar satisfactoria gracias a la uniformidad relativa de los eventos entre barreras comunes. Se sugiere asimismo obtener información de eventuales cambios en el régimen de propagación de marea y oleaje por efecto de los movimientos sísmicos.

Otra línea de estudio corresponde al estudio de los principales tsunamis ocurridos en las costas chilenas, con particular énfasis en la determinación de las zonas de inundación.

7 CONCLUSIONES

La estimación de los efectos asociados a cambios en el clima marítimo requiere del estudio detallado de agentes oceanográficos como el nivel del mar, parámetros de oleaje reinante y dominante, la marea astronómica y meteorológica, los fenómenos ENOS (El niño oscilación Sur), entre otros. La profundidad de las herramientas a utilizar dependerá de la cobertura y calidad de la información disponible, además de disponibilidad de herramientas apropiadas para su procesamiento y análisis. La combinación de estos agentes puede generar los siguientes efectos físicos en el borde costero:

- Inundación de las zonas costeras
- Aumento de las planicies de inundación
- Pérdida de territorios deltaicos
- Desaparición de humedales
- Erosión costera en playas y acantilados
- Efectos en la cota de inundación en playas
- Efectos en la forma en planta y perfil de las playas por basculamiento
- Modificación del balance sedimentario costero
- Efectos en la dinámica de las dunas
- Efectos en la hidrodinámica y morfodinámica de estuarios
- Efectos sobre el comportamiento operacional y estructural de las obras marítimas
- Aumento del daño durante inundaciones y tormentas
- Intrusión salina en acuíferos
- Subida del nivel de la capa freática

Cabe mencionar que el cambio climático puede constituir un factor más en la vulnerabilidad de las costas, que puede interactuar en forma sinérgica con otras acciones de carácter antrópico como el emplazamiento de infraestructura en zonas bajas de alto riesgo, la extracción indiscriminada de sedimentos de los lechos fluviales, la fijación de suelo erosionable, la ocupación de campos dunares debida a la urbanización masiva, entre otros. En Chile, la evidencia de malas prácticas en estos términos es evidente y la predicción de los efectos del cambio climático puede ser determinante en el establecimiento de medidas de mitigación y adaptación futuras.

A continuación se presentan los resultados y conclusiones asociadas a los estudios de nivel del mar, oleaje, sismicidad y tsunamis acometidos en el presente estudio. Cabe mencionar que, en razón de los exiguos plazos disponibles para su ejecución, este estudio corresponde a una recopilación bibliográfica y la aplicación incipiente de técnicas de análisis de datos oceanográficos que debieran servir de base para estudios ulteriores de mayor profundidad.

7.1 NIVEL DEL MAR

La variación del nivel del mar en las estaciones mareográficas de más de 40 años en Chile no es homogénea, abarcando tasas de aumento desde +0,318 [cm/año] a descensos de -0,141 [cm/año]. En localidades como Arica y Antofagasta aparentemente ha existido una reducción, mientras que en Caldera y Talcahuano, se aprecia un aumento. La serie de Valparaíso se encuentra con varios años sin registro durante la década del 70, que imposibilita concluir el tipo de variación experimentado. En Puerto Williams se aprecia una continua reducción en el nivel medio del mar durante el siglo 20, tendencia que se revierte a partir del año 2000. La estación insular de

Isla de Pascua también evidencia un aumento comparativamente mayor del nivel medio del mar que las estaciones continentales.

Las tasas de variación son relativamente menores a las observadas en algunas estaciones de larga data a nivel mundial, que llegan a experimentar aumentos y descensos del orden de centímetros por año, lo que representa un orden de magnitud superior a los observados en Chile. No obstante, las variaciones observadas son comparables a los valores medios obtenidos de estaciones del nivel de mar en diferentes cuadrantes a nivel mundial, que abarcan desde aumentos de +0,59 [cm/año] a descensos de -0,57 [cm/año].

Lamentablemente existe deficiencia en estaciones del nivel del mar en latitudes polares, sectores ubicados lejos de costas y en el hemisferio sur, como el caso de Chile, debido a la escasa cobertura espacial y temporal de las estaciones de medición del nivel del mar. A nivel global, el nivel del mar está aumentando, no obstante en sectores de confluencia de placas y donde hay rebote viscoelástico postglacial (Alaska, Escandinavia, Escocia y Canadá) puede estar descendiendo. En el Pacífico Central, el nivel permanece aproximadamente constante.

Aunque el comportamiento principal del nivel medio del mar en las costas de Chile pareciera no tener grandes fluctuaciones en el tiempo, se encontró evidencia de cambios cíclicos asociados a fenómenos ENOS, con años Niño donde el nivel del mar puede alcanzar aumentos de hasta 30 [cm] sobre la tendencia, y años Niña con disminuciones del mismo orden. Estos ciclos de gran escala y escala temporal del orden de años, generan anomalías en la presión atmosférica y patrones de temperatura que redundan en fluctuaciones severas que pueden ser significativamente superiores al efecto de largo plazo asociado al cambio climático. En efecto, las eventuales alzas del nivel del mar en el largo plazo no parecen ser relevantes en la mayor parte de la costa chilena por tratarse de una zona sísmica activa sujeta a grandes deformaciones corticales y estar afectar a fenómenos de climáticos de medio plazo de mayor relevancia.

7.2 OLEAJE

El estudio se focalizó en la estadística de oleaje reinante, o de mayor frecuencia, sin considerar la estadística de temporales. Para los cuatro parámetros de resumen estudiados se observó un cambio de comportamiento de la distribución anual de probabilidad de excedencia entre los años iniciales (1985–1994) y los recientes (1995–2006). Las variaciones encontradas sugieren en general un incremento de la altura de ola en los últimos años, acompañado de periodos más altos y con direcciones cada vez más hacia el sur. El incremento en los periodos y alturas implican un aumento aún más importante en los valores de potencia oleaje.

En la potencia de oleaje se observó un incremento en la probabilidad de excedencia anual de eventos de magnitud superior al promedio que llega a cerca de un 25%. Se observó un aumento promedio de 0.4 [Kw/año] y variaciones internuales y estacionales significativas. La potencia del oleaje aumenta progresivamente con la latitud. Por otro lado, el aumento en la potencia del oleaje redundan en mayores costos de instalación, mantención y reposiciones imprevistas.

7.3 SISMICIDAD Y TSUNAMIS

El estudio se focalizó en la recopilación bibliográfica de los principales terremotos y tsunamis ocurridos en Chile desde la existencia de registros históricos. Cabe mencionar la heterogeneidad de la información disponible y la escasez de datos relacionados con las deformaciones corticales generadas por los terremotos y la extensión de las zonas de inundación debidas a los grandes tsunamis. No obstante lo anterior, las magnitudes asociadas solevantamientos o subsidencias costeras son considerablemente superiores a las variaciones en el nivel del mar en el largo plazo evidenciadas en los mareógrafos chilenos y por ende debieran ser materia de estudio.

7.4 INFRAESTRUCTURA

Se efectuó una recopilación preliminar de antecedentes relativos al uso del borde costero, con énfasis en el desarrollo marítimo portuario del país y en la identificación de zonas de interés ambiental. Para ello se consultó la base de datos disponible en la Dirección de Obras Portuarias (DOP) del Ministerio de Obras Públicas, el Servicio Nacional de Pesca (SERNAPESCA), estadísticas de Transporte Marítimo de la Subsecretaría de Transportes del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, además de la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Esta información permite visualizar el grado de ocupación del borde costero y cuantificar el número de personas, actividades o patrimonio ambiental directamente relacionados con los sitios catastrados.

El aumento del nivel del mar y el recrudescimiento de las condiciones del oleaje que podrían presentarse como consecuencia del fenómeno de calentamiento global, podrían impactar negativamente en el nivel de operación de estas obras o en la biodiversidad o riqueza ambiental de las zonas protegidas con consecuencias importantes en la economía nacional. El catastro presentado puede servir de punto de partida para el riesgo y las consecuencias económicas asociadas a eventuales alteraciones en el clima marítimo por efecto del cambio climático.

7.5 FUTUROS ESTUDIOS

Se sugiere continuar la investigación efectuando un análisis espectral de datos del nivel del mar que dé cuenta de los cambios de frecuencia que puede estar experimentando, desde una escala de tiempo de horas hasta escalas de tiempo interanuales, de modo de detectar fluctuaciones en los efectos estacionales y de gran escala temporal. Se recomienda asimismo analizar las posibles variaciones en el comportamiento atribuibles a los cambios de instrumento, efectos de los sismos y otros factores similares. Para efectos de estimar la vulnerabilidad futura de las costas, se recomienda efectuar una extrapolación a medio plazo (del orden de décadas, considerando tendencia, efecto estacional y fenómenos ENOS).

Se sugiere continuar la investigación efectuando un análisis de estadísticas de oleaje de mayor longitud, provenientes de modelos globales de 40 o más años a lo largo de la costa de Chile, que dé cuenta de los cambios que puede estar experimentando el oleaje, desde una escala de tiempo de horas hasta escalas de tiempo interanuales, de modo de detectar fluctuaciones en los efectos estacionales y de gran escala temporal. Para efectos de estimar la vulnerabilidad futura de las costas, se recomienda efectuar una extrapolación a medio plazo (del orden de décadas), considerando tendencia, efecto estacional y fenómenos ENOS. Se recomienda asimismo efectuar un análisis de eventos extremos y simular la propagación de oleajes en aguas someras, de modo de facilitar la futura evaluación de los riesgos asociados e modificaciones en el clima del oleaje en las costas de Chile.

Se sugiere continuar la investigación efectuando un análisis de las señales de mareógrafos antes, durante y después de los movimientos sísmicos, de forma de establecer si a través de ellas es posible identificar alteraciones en el nivel de referencia altimétrico de medición del nivel del mar. El establecimiento de futuros escenarios conservadores de deformación cortical para la zona sur, central y norte puede resultar satisfactoria gracias a la uniformidad relativa de los eventos entre barreras comunes. Se sugiere asimismo obtener información de eventuales cambios en el régimen de propagación de marea y oleaje por efecto de los movimientos sísmicos. Otra línea de estudio corresponde al estudio de los principales tsunamis ocurridos en las costas chilenas, con particular énfasis en la determinación de las zonas de inundación.

Se recomienda complementar los resultados y conclusiones presentados en este informe con el estudio de Efectos del Cambio Climático en las costas de Chile, que será desarrollado por el Instituto de Hidráulica de la Universidad de Cantabria en el marco de esta convocatoria.



EFFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COSTAS DE CHILE

INFORME DE RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS PRELIMINAR DE ANTECEDENTES **ANEXOS**

PREPARADO PARA:

Centro de Cambio Climático
Pontificia Universidad Católica de Chile

FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y DE RECURSOS NATURALES
GRUPO DE INGENIERÍA CIVIL OCEÁNICA
UNIVERSIDAD DE VALPARAÍSO

Av. Borgoño 16344 Montemar, Reñaca
Teléfonos (32) 2507824 - (32) 2507860
Fax (32) 2507859 - 09-3244665
www.ingenieriaoceanica.cl

JULIO 2009

INFORMACION PROYECTO

DATOS GENERALES

Proyecto	EFFECTOS DE CAMBIO CLIMÁTICO EN LAS COSTAS DE CHILE
Documento	INFORME DE RECOPIACIÓN Y ANÁLISIS PRELIMINAR DE ANTECEDENTES. ANEXOS
Cliente	Centro de Cambio Climático. Pontificia Universidad Católica de Chile
Código cliente	No aplica
Fecha entrega	
Autores	<p>Rodrigo Cienfuegos Ingeniero Civil Docteur Ing. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Ambiental PUC</p> <p>Carlos Bravo Ramírez Ingeniero Civil €</p> <p>Patricio Winckler Grez Ingeniero Civil MSc. In Environmental Technology Master en Ingeniería de puertos y costas</p> <p>Manuel Contreras López Matemático Ingeniero Informático Magíster (c) Estadística</p>
Código interno	2009 PUC – Cambio climático
Archivo	2009 PUC - Cambio climático Anexos Rev.A.doc
Archivo planos	No aplica

CONTROL INTERNO

Revisión	Elaboró			Revisó			Aprobó			Observaciones
	Nombre	Fecha	Firma	Nombre	Fecha	Firma	Nombre	Fecha	Firma	
A	CBR	06/07/09		RC	06/07/09		PWG	06/07/09		Para revisión CCC - PUC
							PWG	30/07/09		

RESUMEN

En el marco de este estudio, se ha efectuado una recopilación preliminar de antecedentes relativos al uso del borde costero. Se ha puesto especial énfasis en el desarrollo marítimo portuario del país y en la identificación de zonas de interés ambiental. Para ello se ha consultado la base de datos disponible en la Dirección de Obras Portuarias (DOP) del Ministerio de Obras Públicas, el Servicio Nacional de Pesca (SERNAPESCA), estadísticas de Transporte Marítimo de la Subsecretaría de Transportes del Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones, además de la Corporación Nacional Forestal (CONAF). Esta información permite visualizar el grado de ocupación del borde costero y cuantificar el número de personas, actividades o patrimonio ambiental directamente relacionados con los sitios catastrados. El aumento del nivel del mar y el recrudecimiento de las condiciones del oleaje que podrían presentarse como consecuencia del fenómeno de calentamiento global, podrían impactar negativamente en el nivel de operación de estas obras o en la biodiversidad o riqueza ambiental de las zonas protegidas con consecuencias importantes en la economía nacional.

A continuación se presenta un resumen del catastro efectuado señalando algunos ejemplos de zonas que han sido afectadas en forma importante por el embate del oleaje y que pudieran presentar problemas de pérdidas de suelo producto del calentamiento global. Se adjunta un catastro de los sismos y tsunamis ocurridos en Chile.

CONTENIDOS

1	ANEXO 1: PARAMETROS DE PRINCIPALES SISMOS EN CHILE.....	5
2	ANEXO 2: EL SISTEMA PORTUARIO CHILENO.....	14
	2.1 ESTADÍSTICAS PRODUCTIVAS.....	15
	2.2 DETALLE DE INFRAESTRUCTURA POR PUERTOS.....	16
3	ANEXO 3: INFRAESTRUCTURA DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS.....	22
	3.1 PROGRAMAS DE LA DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS.....	22
	3.1.1 <i>PROGRAMA DE PROTECCIÓN DE RIBERAS Y DE LITORAL COSTERO.....</i>	22
	3.1.2 <i>PROGRAMA DE MEJORAMIENTO DEL BORDE COSTERO.....</i>	23
	3.2 INFRAESTRUCTURA PORTUARIA PESQUERA ARTESANAL.....	25
4	ANEXO 4: ZONAS PROTEGIDAS EN CHILE.....	37

1 ANEXO 1: PARAMETROS DE PRINCIPALES SISMOS EN CHILE

BORRADOR

Tabla 1-1: Sismos Fuertes desde 1570 a 1822.

Latitud	Longitud	Fecha	Hora	M _L	M _w	Profundidad [Km]	Ruptura [Km]	Ancho [Km]	Altura de ola [m]	Lugar Tsunami	Categoría Tsunami	Desnivelac. [m]
-36.8	-73	08-02-1570	9:00	8.3			189 (Winckler)		4[m] (Astroza)	Concepción	TD	
-33.4	-70.6	17-03-1575	10:00	7.3			284 (Winckler)					
-39.8	-73.2	16-12-1575	14:30	8.5			529 (Winckler)				TD	
-18.5	-70.4	24-11-1604	12:30	8.5		30	170 (Winckler)		16[m] (Astroza)	Arica	TD	
-18.5	-70.35	16-09-1615	23:30	8.8			132 (Winckler)				TM	
-35	-72	13-05-1647	22:30	8.5			350 (Kausel)				NA	
-36.83	-73.03	15-03-1657	19:30	8			236 (Winckler)		4[m] (Astroza)		TD	
-18.5	-70.35	10-03-1681		7.3								
-32.75	-70.73	12-07-1687	2:00	7.3			76 (Winckler)					
-33.05	-71.63	08-07-1730	4:45	8.7			350-450 (Kausel)		16 [m] (Astroza)	Concepción	TD	
-39.8	-73.2	24-12-1737		7.7			227 (Winckler)				T	
-36.83	-73.03	25-05-1751	1:00	8.5			350 (Winckler)		3.5[m] (Astroza)	Concepción	TM	
-27.35	-70.35	30-03-1796	6:45	7.7			132 (Winckler)					
-27.35	-70.35	11-04-1819	10:00	8.3			331 (Winckler)		4[m] (Astroza)	Caldera	TD	
-33.05	-71.63	19-11-1822	22:30	8.5			200-250 (Kausel)		4[m] (Kausel)		TM	1.2 [m] Quintero, 0.9 [m] Valpo.

Tabla 1-2: Sismos fuertes desde 1829 a 1878

Latitud	Longitud	Fecha	Hora	M _L	M _w	Profundidad [Km]	Ruptura [Km]	Ancho [Km]	Altura de ola [m]	Lugar Tsunami	Categoría Tsunami	Desnivelac. [m]
-33.05	-71.63	26-09-1829	14:00	7			57 (Winckler)					
-18.5	-71	08-10-1831	6:00	7.8								
-18.5	-70.4	18-09-1833	5:45	7.7		60						
-36.83	-73.03	20-02-1835	11:30	8.5			208 (Winckler)		13[m] (Astroza)	Isla Quiriquina	TD	
-39.8	-73.2	07-11-1837	8:00	8			378 (Winckler)		2[m] (Astroza)	Ancud	TM	
-31.61	-71.18	08-10-1847	11:30	7.3								
-29.95	-71.37	17-12-1849	6:00	7.5					5 [m] (Astroza)	Coquimbo	TM	
-33.81	-70.22	06-12-1850	6:52	7.3								
-33.32	-71.42	02-04-1851	6:48	7.1					3[m] (Astroza)	Huasco		
-27.35	-70.35	05-10-1859	8:00	7.6			132 (Winckler)		6[m] (Astroza)	Caldera	TM	
-18.5	-70.35	13-08-1868	16:45	8.5			198 (Winckler)		20[m] (Astroza)	Arica	TD	
-19.6	-70.23	24-08-1869	13:30	7.5							TM	
-20.2	-70.17	05-10-1871	5:00	7.3							T	
-19.6	-70.23	09-05-1877	21:16	8.5			378 (Winckler)		21[m] (Astroza)	Mejillones	TD	
-20	-70.3	23-01-1878	8:00	7.9		40						

Tabla 1-3: Sismos fuertes desde 1879 a 1922

Latitud	Longitud	Fecha	Hora	M _L	M _w	Profundidad [Km]	Ruptura [Km]	Ancho [Km]	Altura de ola [m]	Lugar Tsunami	Categoría Tsunami	Desnivelac. [m]
-53	-70.67	02-02-1879	6:30	7.3								
-31.62	-71.18	15-08-1880	8:48	7.7			113 (Winckler)					
-33	-72	16-08-1906	19:48	7.9	8.2	25	330-365 (Kausel)		1[m] (Kausel)		TM	0.6 m Valparaiso (Kausel)
-26.5	-70.5	08-06-1909	1:00	7.6								
-22	-69	04-10-1910	19:00	7.3								
-20	-72	15-09-1911	8:10	7.3								
-35	-73	29-01-1914	23:30	8.2								
-30	-73	14-02-1917	20:48	7								
-28.5	-71.5	20-05-1918	12:57	7.9								
-26	-71	04-12-1918	7:47	8.2		60			5[m] (Astroza)	Caldera	TM	
-41	-73.5	01-03-1919	23:37	7.2		40						
-41	-73.5	02-03-1919	7:45	7.3		40						
-39	-73	10-12-1920	0:25	7.4								
-28	-72	07-11-1922	19:00	7			321 (Winckler)					
-28.5	-70	10-11-1922	23:53	8.4	8.5	25			9[m] (Astroza)	Chañaral	TM	

Tabla 1-4: Sismos fuertes de 1923 a 1942

Latitud	Longitud	Fecha	Hora	M _L	M _w	Profundidad [Km]	Ruptura [Km]	Ancho [Km]	Altura de ola [m]	Lugar Tsunami	Categoría Tsunami	Desnivelac. [m]
-28.75	-71.75	04-05-1923	17:47	7		60						
-26	-71.5	15-05-1925	7:18	7.1		50						
-24	-69	28-04-1926	7:13	7		180						
-44.5	-73	21-11-1927	19:17	7.1							TM	
-22.5	-70.5	20-11-1928	16:35	7.1		25						
-35	-72	01-12-1928	0:06	8.3			246 (Winckler)		1.5[m] (Astroza)	Constitución	T	
-23	-69	19-10-1929	16:18	7.5		100						
-32.5	-72	18-03-1931	4:02	7.1								
-20	-71	23-02-1933	4:09	7.6		40						
-40	-72.5	01-03-1936	17:45	7.1		120						
-24.5	-70	13-07-1936	7:12	7.3		60						
-36.2	-72.2	25-01-1939	23:32	8.3		60						
-27	-70.5	18-04-1939	2:22	7.4		100						
-41.5	-74.5	11-10-1940	14:41	7		-						
-24	-70	08-07-1942	1:55	7		140						

Tabla 1-5: Sismos fuertes de 1943 a 1954.

Latitud	Longitud	Fecha	Hora	M _L	M _w	Profundidad [Km]	Ruptura [Km]	Ancho [Km]	Altura de ola [m]	Lugar Tsunami	Categoría Tsunami	Desnivelac. [m]
-20	-69.5	14-03-1943	14:37	7.2		150						
-30.75	-72	06-04-1943	12:07	8.3	8.2	55	246 (Winckler)		0.91[m] (Winckler)		T	
-21	-69	01-12-1943	6:34	7		100						
-33.25	-70.5	13-07-1945	7:17	7.1		100						
-26.5	-70.5	02-08-1946	15:19	7.9		50						
-38	-73.5	19-04-1946	23:29	7.3		70						
-19.75	-69	25-04-1949	9:54	7.3		110						
-22	-69	29-05-1949	21:32	7		100						
-54	-71	17-12-1949	2:53	7.8								
-54	-71	17-12-1949	11:07	7.8								
-53.5	-71.5	29-01-1950	20:56	7								
-23.5	-67.5	09-12-1950	17:38	8.3		100						
-36.5	-72.6	06-05-1953	13:16	7.6		60						
-22.1	-68.7	06-12-1953	22:05	7.4		128						
-29	-70.5	08-02-1954		7.7								

Tabla 1-6: Sismos fuertes de 1955 a 1965.

Latitud	Longitud	Fecha	Hora	M _L	M _w	Profundidad [Km]	Ruptura [Km]	Ancho [Km]	Altura de ola [m]	Lugar Tsunami	Categoría Tsunami	Desnivelac. [m]
-30	-72	19-04-1955	16:24	7.1							T	
-19	-70	08-01-1956	16:54	7.1		11						
-25.5	-68.5	17-12-1956	22:31	7								
-23.5	-71.5	29-07-1957	13:15	7								
-20.42	-69	13-06-1959	20:12	7.5		83						
-37.5	-73.5	21-05-1960	6:02	7.3								
-37.5	-73	22-05-1960	6:32	7.3			800-1000 (Kausel)					
-39.5	-74.5	22-05-1960	15:11	8.5	9.5		800-1000 (Kausel)		25 a 10[m] (Astroza)	Isla Mocha a Corral resp.	TD	-1.5[m] (Hernández)
-38	-73.5	19-06-1960	22:01	7.3								
-38.5	-75.1	01-11-1960	4:45	7.4		55						
-41.7	-75.2	13-07-1961	17:19	7		40						
-37.8	-72.5	14-02-1962	2:36	7.3		45						
-23.3	-68.1	03-08-1962	4:56	7.1		107						
-25.67	-70.63	23-02-1965	18:11	7		36						
-32.418	-71.1	28-03-1965	12:33	7.4		68						

Tabla 1-7: Sismos fuertes de 1966 a 1987.

Latitud	Longitud	Fecha	Hora	M _L	M _w	Profundidad [Km]	Ruptura [Km]	Ancho [Km]	Altura de ola [m]	Lugar Tsunami	Categoría Tsunami	Desnivelac. [m]
-25.51	-70.74	28-12-1966	4:18	7.8		23			0.8[m] (Astroza)	Caldera		
-40.12	-74.68	13-03-1967	12:06	7.3		33						
-21.8	-70	21-12-1967	22:25	7.5		33						
-25.402	-69.058	17-06-1971	17:00	7		76						
-32.511	-71.207	08-07-1971	23:03	7.5		40	113 (Winckler)		1.5[m] (Winckler)		TM	
-38.453	-73.431	18-08-1974	6:44	7.1		36						
-38.183	-73.232	10-05-1975	10:27	7.7		6	142 (Winckler)					
-20.52	-68.919	29-11-1976	21:40	7.3		82						
-26.518	-70.664	03-08-1979	14:11	7		49						
-33.134	-73.074	16-10-1981	0:25	7.5		33						
-26.535	-70.563	04-10-1983	14:52	7.3		14						
-33.24	-71.85	03-03-1985	19:46	7.8	8	33	170 (Kausel)		1.5[m] (Astroza)		T	0.3 m en San Antonio y Algarrobo (Kausel)
-34.131	-71.618	08-04-1985	21:56	7.5		37						
-24.388	-70.161	05-03-1987	6:17	7.3		62					T	

Tabla 1-8: Sismos fuertes de 1987 a 2005.

Latitud	Longitud	Fecha	Hora	M _L	M _w	Profundidad [Km]	Ruptura [Km]	Ancho [Km]	Altura de ola [m]	Lugar Tsunami	Categoría Tsunami	Desnivelac. [m]
-19	-70	08-08-1987	11:48	7.1		42						
-23.36	-70.31	30-07-1995	1:11	7.3	8	47	185[Km] (Comite)	90[Km] (Comite)	2.8[m] (Astroza)		T	
-19.895	-69.125	13-06-2005	18:44	7.8	7.8	108	119[Km] (Comite)					
-19	-70	08-08-1987	11:48	7.1		42						

2 ANEXO 2: EL SISTEMA PORTUARIO CHILENO

El sistema portuario chileno está compuesto por puertos de uso público y puertos de uso privado, que totalizan (56). Los puertos de uso público (24) prestan los servicios de infraestructura (sitios de atraque, acopio, bodegaje) y servicios especializados (procesos de embarque, recepción, acopio y desacopio de cargas, porteo, desembarco, descarga, agenciamiento y otros) a cualquier solicitante que los requiera. Estos puertos pueden ser de propiedad del Estado o de propiedad privada. Los puertos de uso privado corresponden aquellos que prestan servicios a una empresa determinada y su existencia es anexa a las labores que ésta desarrolla. Estas instituciones eligen esta opción debido a la complejidad que presenta transportar los grandes volúmenes de carga que mueven. En nuestro país los puertos de uso privado se pueden dividir en puertos mineros (15) y puertos petroleros (17). A continuación se enumeran las instalaciones portuarias existentes al año 2005.

Puerto de uso público

1.	Empresa Portuaria Arica	Arica
2.	Empresa Portuaria Iquique	Iquique
3.	Puerto Electroandina	Tocopilla
4.	Complejo Portuario Mejillones	Mejillones
5.	Puerto de Mejillones S.A.	Mejillones
6.	Empresa Portuaria Antofagasta	Antofagasta
7.	Terminal Portuario Amarcal	Punta Caleta
8.	Empresa Portuaria Coquimbo	Coquimbo
9.	Puerto Ventanas	Quintero
10.	Oxiquim	Quintero
11.	Empresa Portuaria Valparaíso	Valparaíso
12.	Empresa Portuaria San Antonio	San Antonio
13.	Puerto Lirquén	Lirquén
14.	Muelle de Penco	Penco
15.	Empresa Portuaria Talcahuano	Talcahuano, San Vicente
16.	Muelle Cap	San Vicente
17.	Empresa Portuaria Cabo Froward	Coronel
18.	Puerto de Coronel	Coronel
19.	Terminal Oxiquim Escuadrón	Playa El Escuadrón
20.	Empresa Portuaria Puerto Montt	Puerto Montt
21.	Puerto Corral	Corral
22.	Puerto San José de Calbuco	Calbuco
23.	Empresa Portuaria Chacabuco	Chacabuco
24.	Empresa Portuaria Austral	Punta Arenas, Puerto Natales

Puertos mineros

25.	Muelle Endesa	Patache
26.	Muelle Collahuasi	Patache
27.	Muelle Patillos	Patillos
28.	Terminal Marítimo Caleta Coloso	Antofagasta
29.	Terminal Marítimo Interacid Chile S.A.	Mejillones
30.	Terminal Enaex S.A.	Mejillones
31.	Terminal Marítimo Minera Michilla S.A.	Michilla
32.	Brazo Mecanizado Sit	Tocopilla
33.	Terminal Punta Padrones	Caldera
34.	Terminal Guacolda I	Huasco
35.	Terminal Guacolda II	Huasco
36.	Puerto Chañaral Terminal Barquito	Chañaral
37.	Terminal CMP Guayacán	Coquimbo

38.	Muelle Punta Chungo - Los Pelambres	Los Vilos
39.	Terminal Pecket Punta Arenas	Puerto Arenas

Terminales petroleros

40.	Terminal Sica Sica	Arica
41.	Terminal Copec Iquique	Iquique
42.	Terminal Esso	Iquique
43.	Terminal Rocas Negras	Caldera
44.	Terminal Petrolero Barquito	Chañaral
45.	Terminal Copec Guayacan	Coquimbo
46.	Terminal Multiboya RPC	Concón
47.	Terminal LPG	Concón
48.	Terminal Monoboya	Concón
49.	Terminal Petrox B	San Vicente
50.	Terminal Petrox C	San Vicente
51.	Terminal Marítimo Comaco	Puerto Aysén
52.	Terminal Marítimo Copec	Puerto Chacabuco
53.	Terminal Cabo Negro	Punta Arenas
54.	Muelle Laredo	Punta Arenas
55.	Terminal Gregorio	Punta Arenas
56.	Terminal Clarenia	Punta Arenas

2.1 ESTADÍSTICAS PRODUCTIVAS

En Chile existen 10 puertos principales de propiedad estatal. Estos puertos concentran la actividad portuaria comercial del país y son operados en su mayoría por empresas privadas a través de un sistema de concesiones. En la Tabla 2-1 se presenta un resumen del tonelaje transferido durante el año 2008 además del número de naves recaladas en ese mismo año, la que es profundizada para cada puerto entre el Gráfico 2-1 y el Gráfico 2-10, obtenidos de la Subsecretaría de Transportes. Es posible apreciar que los puertos de Valparaíso, San Antonio y Talcahuano concentran cerca del 75% de la actividad portuaria del país.

Tabla 2-1: Tonelaje y naves recaladas en 2008.

Puerto	Tonelaje transferido 2008 (ton)	Naves Recaladas 2008
Arica	1.745.061	283
Iquique	3.018.361	754
Antofagasta	2.696.018	335
Coquimbo	248.516	181
Valparaíso	10.414.555	1.104
San Antonio	13.207.496	1.111
Talcahuano	7.299.813	464
Puerto Montt	1.448.976	2.023
Chacabuco	631.994	9.139
Austral	355.439	895

Fuente: Estadísticas de Transporte Marítimo, Subsecretaría de Transportes

Si bien no se han apreciado en estas obras problemas críticos derivados del aumento del nivel del mar o recrudecimiento de las condiciones del oleaje, es posible que en el futuro exista un compromiso en el nivel de servicio u operatividad de los puertos como consecuencia de los efectos del calentamiento global. En vista de la importancia estratégica y económica que revisten para el país estas obras de infraestructura, se hace indispensable contar con antecedentes que permitan prever los eventuales impactos que pudieran tener sobre ellos un eventual aumento del nivel del mar y/o una mayor frecuencia de fenómenos climáticos extremos que generen marejadas que comprometan la operación normal de estos puertos.

2.2 DETALLE DE INFRAESTRUCTURA POR PUERTOS

La Dirección Nacional de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas elaboró -con el apoyo de la Dirección de Intereses Marítimos y Medio Ambiente Acuático de la Armada de Chile- el documento denominado "Sistema Portuario de Chile 2005", en que se presenta la siguiente información para los puertos e instalaciones portuarias:

- Breve reseña histórica
- Condiciones de accesibilidad
- Clima
- Infraestructura (características físicas, sitios de atraque, equipamiento, áreas de emplazamiento)
- Transferencia de carga
- Proyectos de inversión

El documento se encuentra disponible en el sitio www.dop.cl.

Gráfico 2-1: Estadísticas Puerto de Arica.

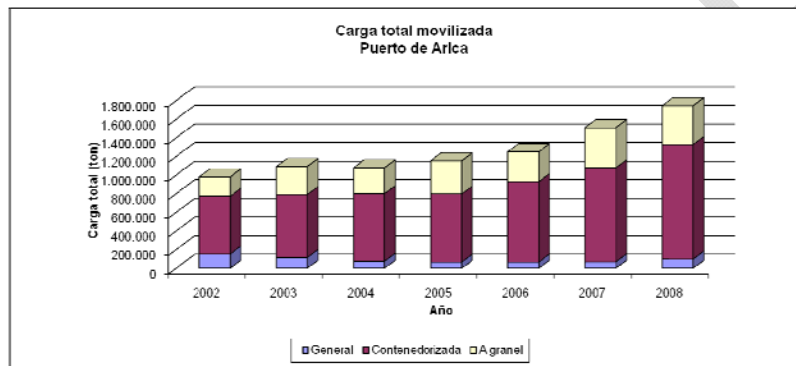
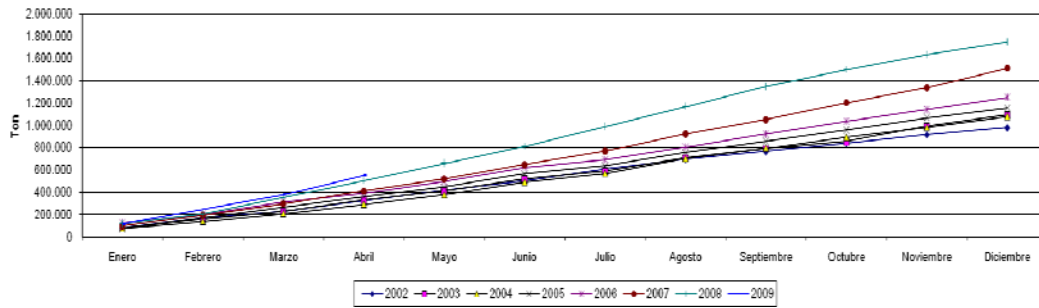


Gráfico 2-2: Estadísticas Puerto de Iquique.

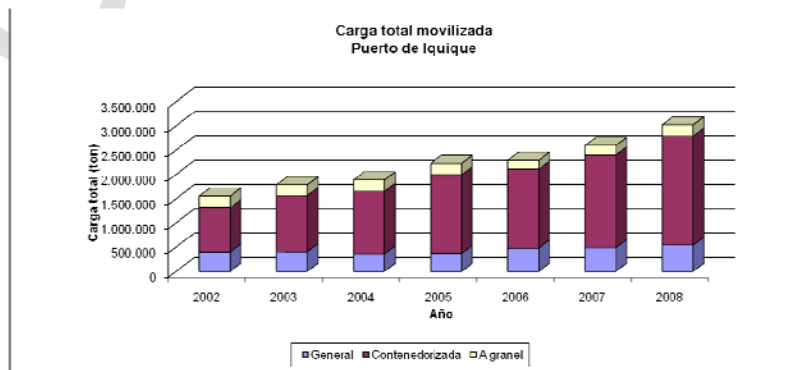
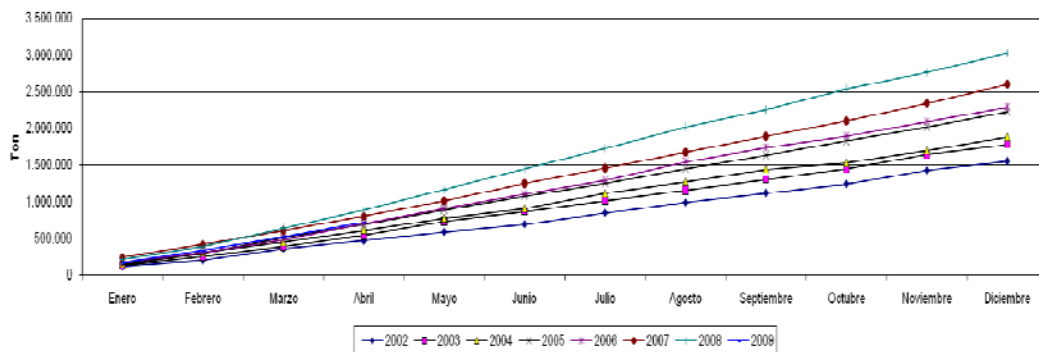


Gráfico 2-3: Estadísticas Puerto de Antofagasta.

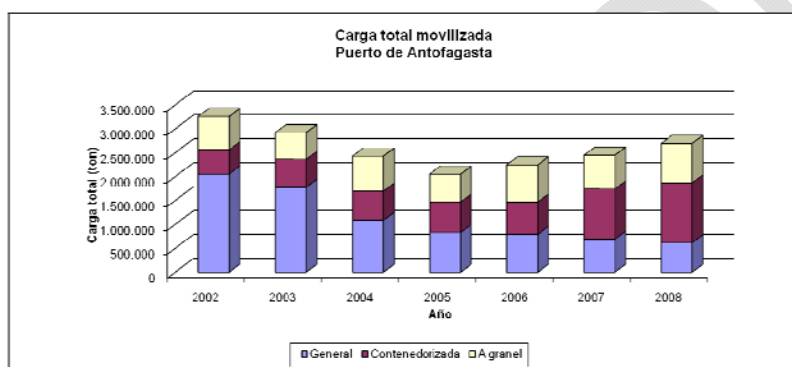
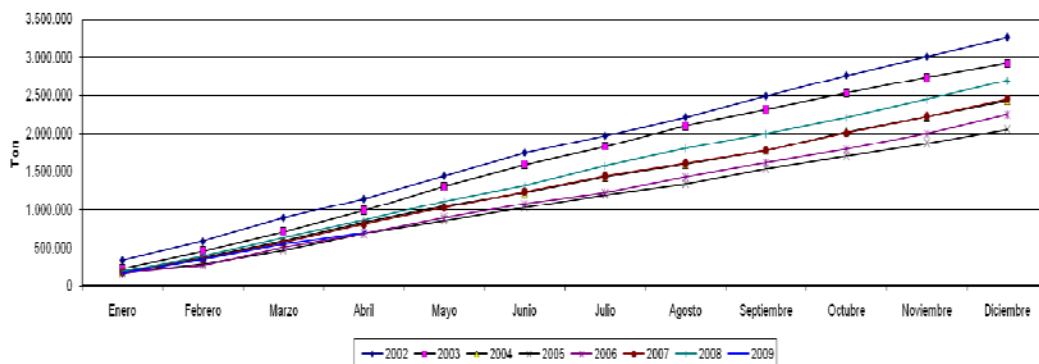


Gráfico 2-4: Estadísticas Puerto de Coquimbo.

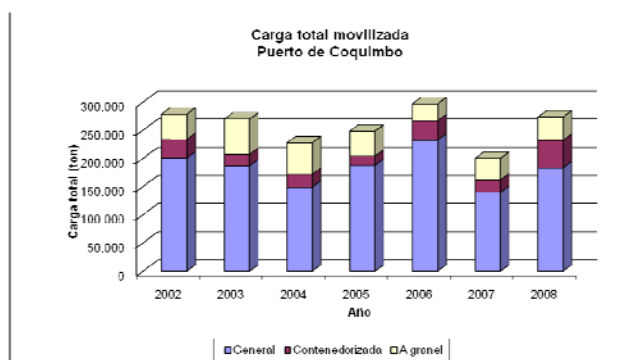
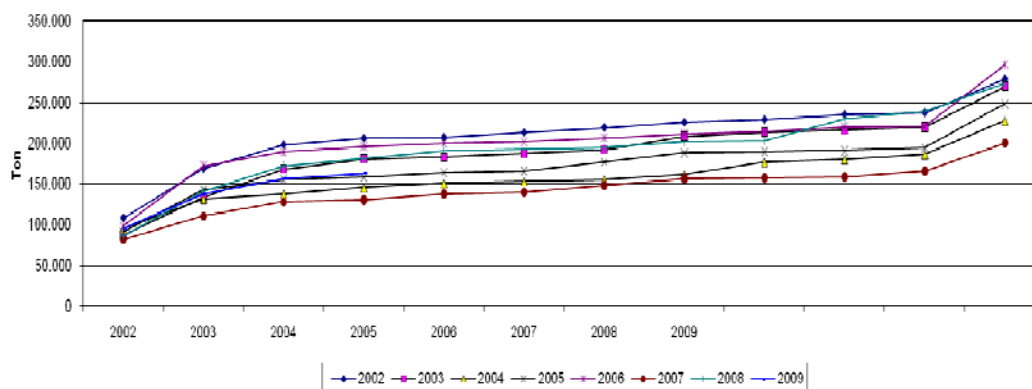


Gráfico 2-5: Estadísticas Puerto de Valparaíso.

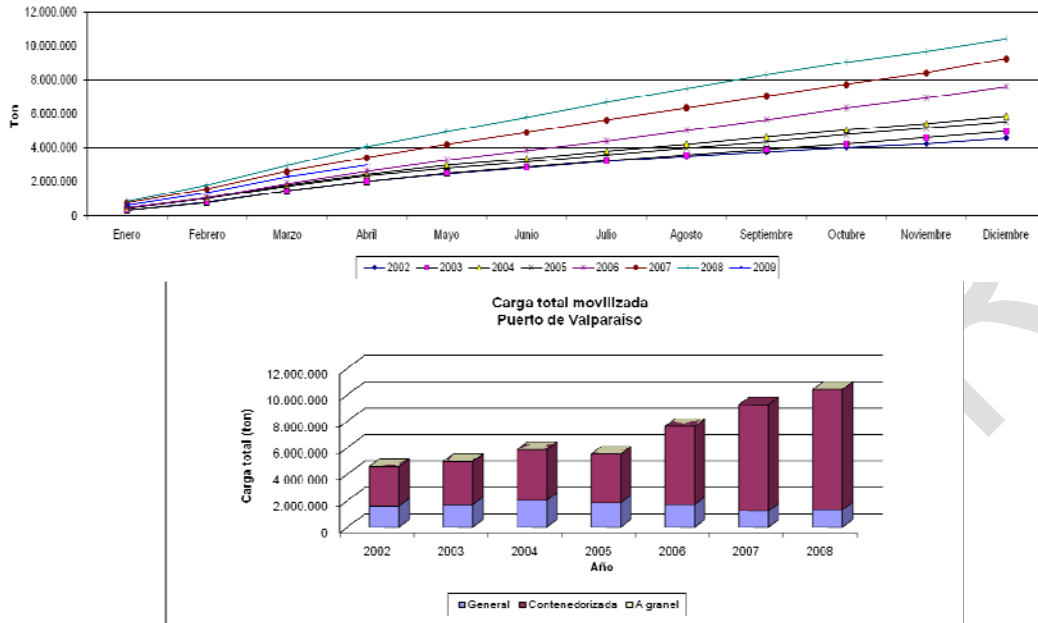


Gráfico 2-6: Estadísticas Puerto de San Antonio.

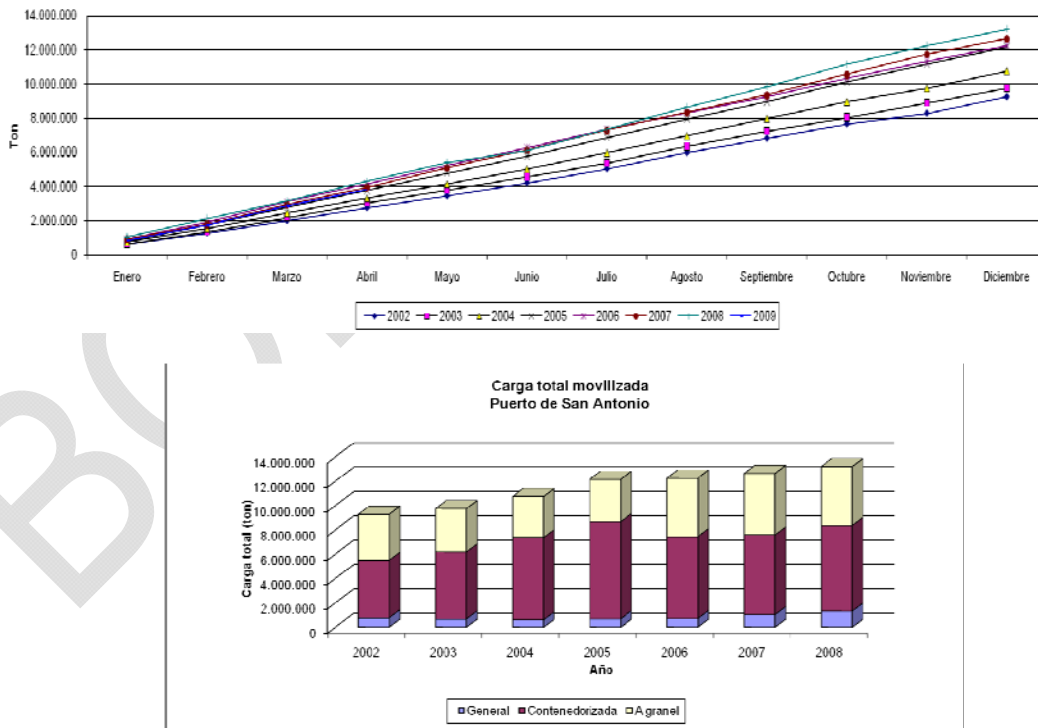


Gráfico 2-7: Estadísticas Puerto de Talcahuano-San Vicente.

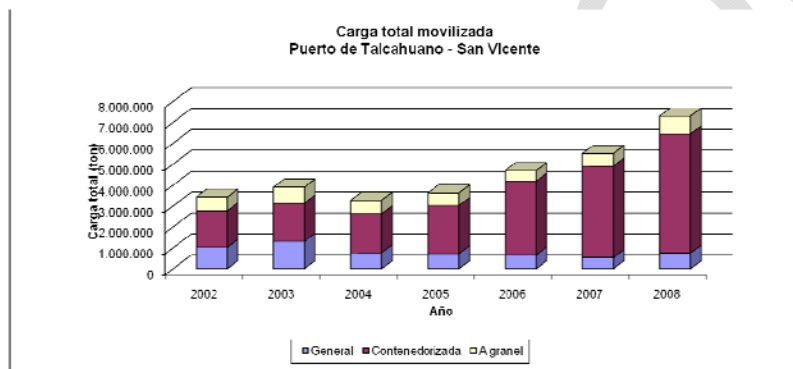
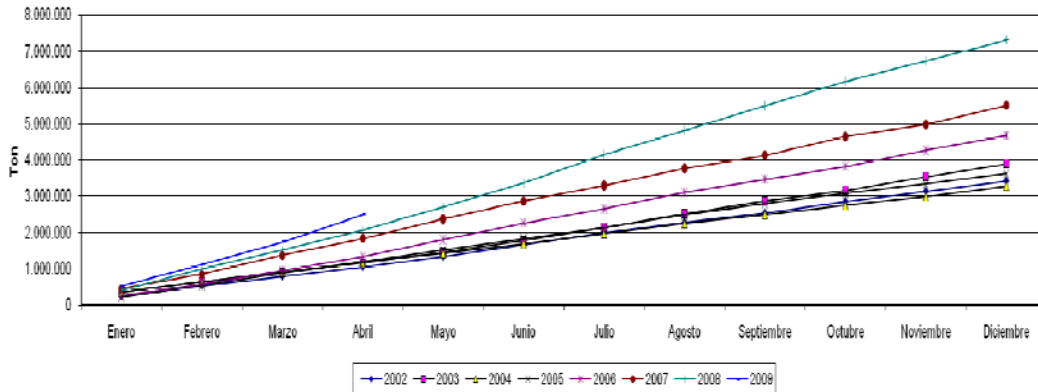


Gráfico 2-8: Estadísticas Puerto de Puerto Montt.

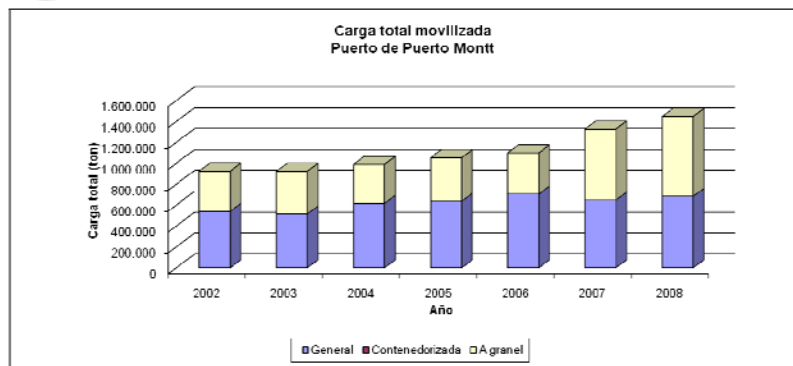
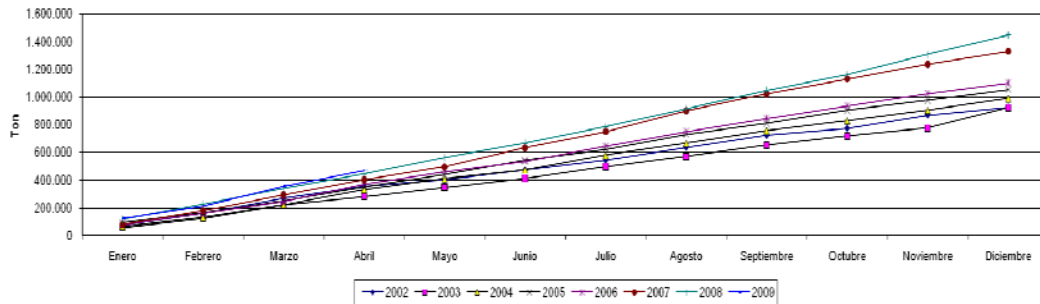


Gráfico 2-9: Estadísticas Puerto de Chacabuco.

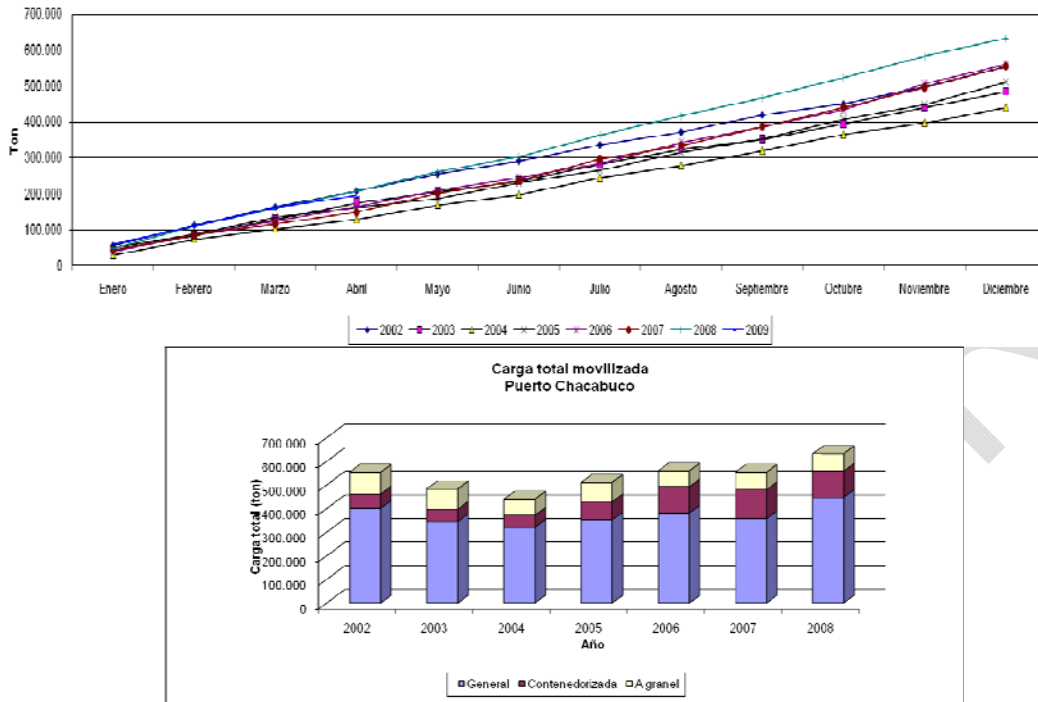
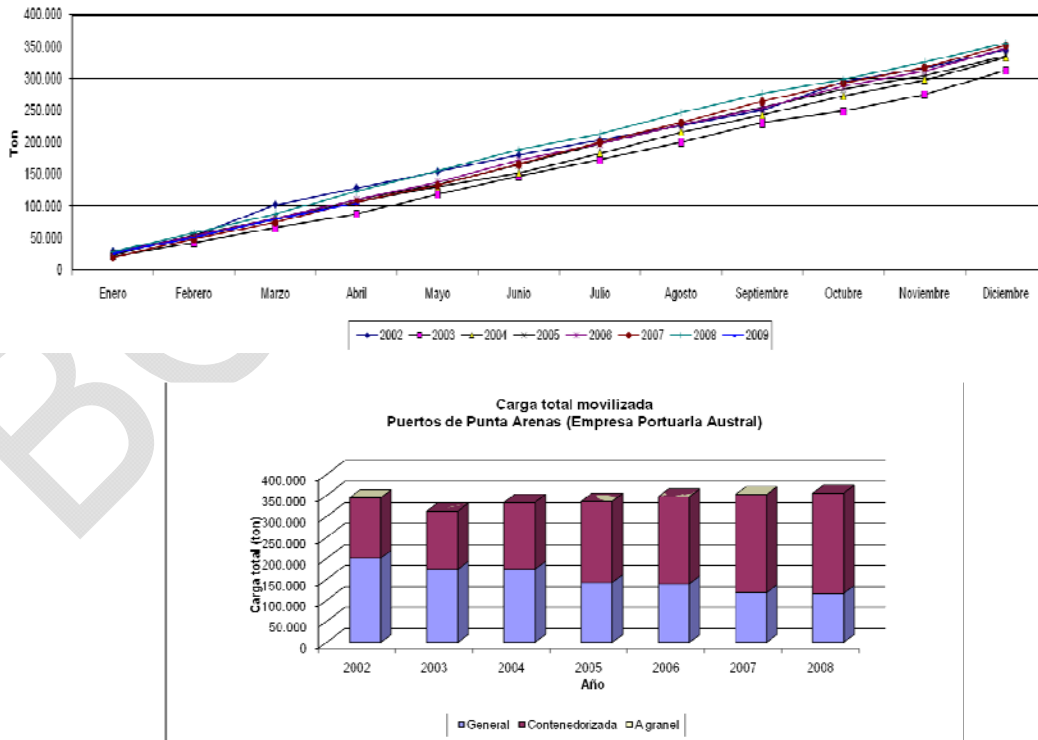


Gráfico 2-10: Estadísticas Puerto de Punta Arenas.



3 ANEXO 3: INFRAESTRUCTURA DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS

3.1 PROGRAMAS DE LA DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS

El litoral chileno posee infraestructura portuaria pesquera artesanal, de conexión de zonas geográficamente aisladas, de protección de riberas y del litoral costero además de obras de infraestructura cuyo objetivo es el mejoramiento del borde costero y los espacios públicos. Todas ellas tienen para el país un elevado valor social que ha justificado una acción sostenida y coordinada por parte del Ministerio de Obras Públicas para asegurar un adecuado manejo, conservación y protección de este tipo de infraestructura.

El actual nivel de desarrollo alcanzado por Chile, caracterizado por un sostenido crecimiento económico, una mayor integración global, una disminución de las principales carencias sociales y una creciente valoración de los recursos ambientales, plantean nuevas exigencias en cuanto a infraestructura. En este sentido, el Ministerio de Obras Públicas, ha definido el rol de la infraestructura portuaria y costera como un instrumento activo que debe permitir el fomento de la competitividad de los sectores productivos y, a la vez, elevar los estándares de calidad de vida de los ciudadanos. Desde el año 1990 y sobre todo a partir del año 2000, la DOP ha llevado a cabo los siguientes programas de inversión:

- Infraestructura portuaria pesquera artesanal
- Infraestructura de conexión de zonas geográficamente aisladas
- Infraestructura de protección de riberas y de litoral costero
- Infraestructura de mejoramiento del borde costero

3.1.1 PROGRAMA DE PROTECCIÓN DE RIBERAS Y DE LITORAL COSTERO

El programa de protección de riberas y de litoral costero ha considerado específicamente el diseño de obras de infraestructura con el fin de evitar las consecuencias que las inundaciones, erosión y marejadas asociadas a tormentas marítimas pudieran tener sobre los asentamientos humanos y centros de producción. Como ejemplos recientes llevados a cabo por este programa destacan la construcción del Muro Costanera Lengua en la comuna de Talcahuano y el proyecto de mejoramiento del Borde Costero Duao-Iloca en la comuna de Licantén, provincia del Maule.

La costanera de Lengua sufre constantes socavaciones producto de la acción del oleaje contra el sector contiguo al camino de acceso, deteriorándose un sector donde existe un paseo costero natural, el que debe resguardarse con la ejecución de este proyecto. El proyecto consiste en la construcción de un tramo de 400 m lineales de defensas costeras y rellenos a trasdos del muro, generándose una franja para equipamiento de 10 m adicionales. En la Figura 3-1 es posible apreciar la deteriorada situación del borde litoral en la zona de la Caleta de Lengua.

Figura 3-1 Proyecto Costanera Lengua, comuna de Talcahuano.



Fuente: Dirección de Obras Portuarias

Otro ejemplo es el proyecto de mejoramiento del borde costero de Duao-Iloca en la comuna de Licantén. En este sector, existe un severo riesgo de que la socavación del oleaje provoque un colapso en la ribera del sector, lo que afectaría infraestructura vial, habitacional y recreacional tanto pública como privada, además de pérdidas de desarrollo de actividades productivas. El proyecto contempla la construcción de un muro de defensa de hormigón en un tramo que va desde la caleta de pescadores hasta la plaza de Armas de la localidad de Duao, pasando por un sector de la Ruta Costera, consolidando un tramo de aproximadamente 400 m lineales. El muro será conformado por losetas de hormigón prefabricadas soportadas por pilotes HN o por una configuración gravitacional de hormigón en masa.

3.1.2 PROGRAMA DE MEJORAMIENTO DEL BORDE COSTERO

El Programa de mejoramiento del borde costero ha buscado potenciar la actividad productiva vinculada al turismo mediante intervenciones específicas de mejoramiento y recuperación de playas, paseos costeros, muelles recreativos, miradores y accesos a balnearios. Del mismo modo, este programa ha contemplado la generación de mejores espacios públicos costeros además de

facilitar el acceso ciudadano a los recursos naturales y paisajísticos de la costa, en armonía con la identidad y tradición local, propiciando un mejor ordenamiento del litoral.

La experiencia de gestión del programa demuestra renovaciones urbanas inéditas en nuestro país. Entre ellas destaca la recuperación del borde costero de la ciudad de Antofagasta, mediante la construcción de playas artificiales de uso masivo en lugares constituidos sólo por roqueríos. Estos esfuerzos se han llevado a cabo además mediante innovaciones tecnológicas de ingeniería costera inéditas en Chile. Estas intervenciones han demostrado relevantes beneficios tanto sociales como productivos en el ámbito del desarrollo turístico, al incorporar zonas de esparcimiento con aporte urbanístico, condiciones de seguridad y libres de contaminación. El Mejoramiento del balneario de Antofagasta, la construcción de playas artificiales de Antofagasta, Playa Paraíso (Figura 3-2) y Trocadero, además de la playa Covadonga en Tocopilla, han producido beneficios en aspectos sociales, turísticos y de mejoramiento en la calidad de vida de los habitantes de la II región.

El proyecto de mejoramiento del balneario de Antofagasta consistió en la rehabilitación integral de la playa, en la construcción un nuevo molo, y el desrocamiento y ampliación de la playa solanera a una longitud de 140 m lineales, con 5.500 [m²] de arenas. La playa permite la estadía de aproximadamente 1375 personas por día. La playa Paraíso es la primera playa artificial del país, la cual cuenta con 360 m lineales de frente. La playa Trocadero contempló la protección y creación de una poza abrigada y la habilitación de una playa de 190 m lineales. Cabe destacar el financiamiento mixto para el desarrollo de estos proyectos, en el que ha participado activamente el Gobierno Regional de Antofagasta y el Ministerio de Obras Públicas.

Figura 3-2: Playa Paraíso de Antofagasta.



Fuente: Dirección de Obras Portuarias.

Otra experiencia destacada la constituye el paseo Wheelwright en Valparaíso (Figura 3-3), iniciativa que posibilitó la incorporación de más de dos kilómetros de paseo costero, reforzando la identidad marítima de esta ciudad declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO. Todas estas iniciativas muestran un cambio importante en la valoración del borde costero que ha sido la consecuencia directa del elevado nivel de desarrollo alcanzado por nuestro país en los últimos años.

Figura 3-3: Paseo costero Wheelwright de Valparaíso.

Fuente: Dirección de Obras Portuarias.

3.2 INFRAESTRUCTURA PORTUARIA PESQUERA ARTESANAL

Respecto a las actividades de pesca artesanal, registros del SERNAPESCA al año 2005 señalan una población de 50.291 pescadores, repartidos en 436 caletas artesanales definidas en el Decreto Supremo N° 240. El Gobierno de Chile, ha llevado adelante desde el año 1990 políticas de mejora de las condiciones de operación, higiene y seguridad a través de programas de inversión que han contemplado la construcción y/o rehabilitación de infraestructura portuaria. Este programa depende de la DOP del Ministerio de Obras Públicas y ha abarcado a todas las regiones del país concentrándose en aquellas caletas que presentan condiciones favorables para una explotación del recurso marino y niveles de producción sustentables a futuro.

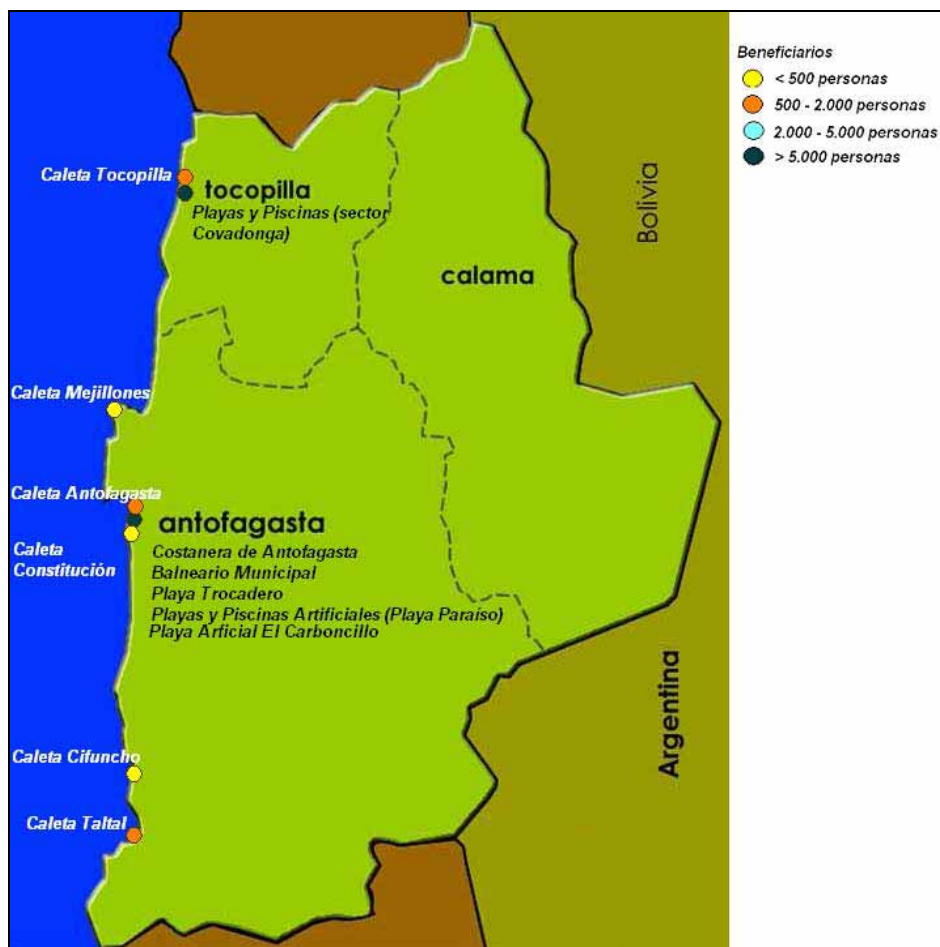
En las siguientes figuras se presenta la infraestructura portuaria catastrada en base a los diversos programas llevados a cabo por la DOP, separada por región, indicando en cada caso el número de personas beneficiarias y la categoría de infraestructura.



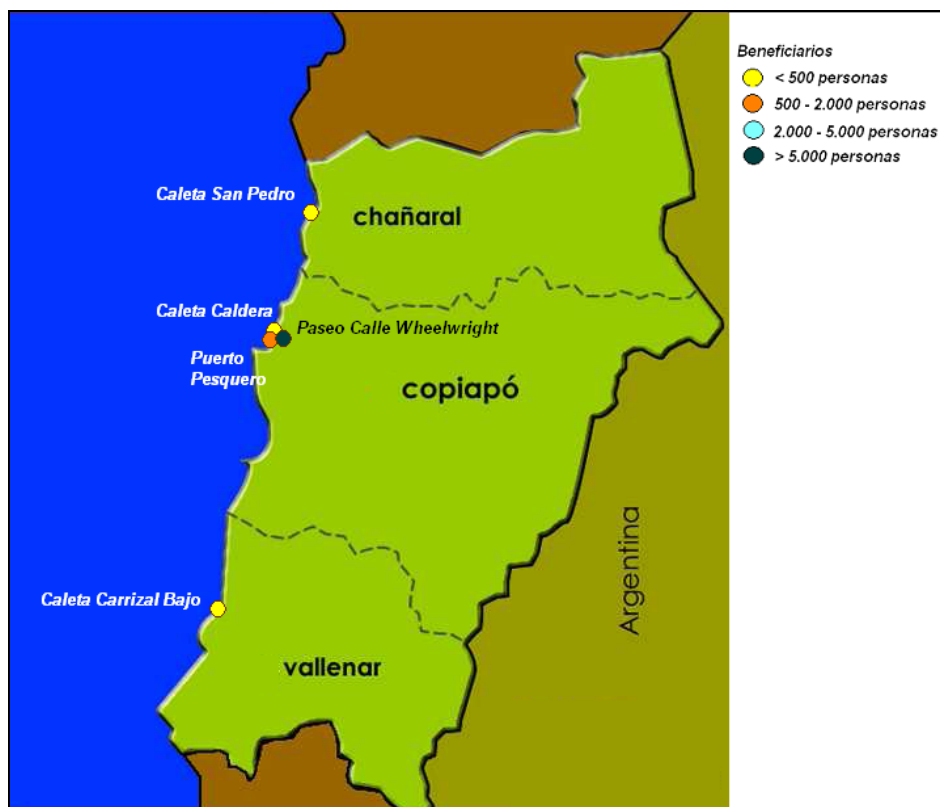
Región Arica y Parinacota			
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría
Caleta de Arica	Arica	1.107	Pesquera Artesanal
Caleta de Camarones	Camarones	40	Pesquera Artesanal



Región Tarapacá			
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura
Caleta Guardiamarina Riquelme	Iquique	1.615	Pesquera Artesanal
Caleta Pisagua	Huara	130	Pesquera Artesanal
Caleta Río Seco	Iquique	27	Pesquera Artesanal
Caleta Chanavayita	Iquique	88	Pesquera Artesanal
Caleta San Marcos	Iquique	98	Pesquera Artesanal
Caleta Cañamo	Iquique	24	Pesquera Artesanal
Caleta Cavancha	Iquique	104	Pesquera Artesanal
Caleta Chanavaya	Iquique	28	Pesquera Artesanal
Caleta Chipana	Iquique	13	Pesquera Artesanal
Caleta Los Verdes	Iquique	13	Pesquera Artesanal
Atracadero y obras complementarias en caleta Río Seco	Iquique	27	Litoral Costero
Obras complementarias caleta Pisagua	Huara	130	Litoral Costero
Muelle y obras complementarias caleta Chanavayita	Iquique	88	Litoral Costero
Explanada, sombreadero y boxes caleta San Marcos	Iquique	98	Litoral Costero
Molo de abrigo y obras complementarias caleta Chanavaya	Iquique	39	Litoral Costero



Región	Antofagasta		
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura
Caleta Taltal	Taltal	758	Pesquera Artesanal
Caleta Antofagasta	Antofagasta	952	Pesquera Artesanal
Caleta Mejillones	Mejillones	460	Pesquera Artesanal
Caleta Tocopilla	Tocopilla	701	Pesquera Artesanal
Caleta Cifuncho	Taltal	34	Pesquera Artesanal
Caleta Constitución (Isla Santa María)	Antofagasta	122	Pesquera Artesanal
Caleta Paposó	Taltal	70	Pesquera Artesanal
Muelle pesquero de Tocopilla	Tocopilla	457	Litoral Costero
Infraestructura portuaria Coloso	Antofagasta	82	Litoral Costero
Muelle caleta Punta Arenas	Tocopilla	47	Litoral Costero
Muelle pesquero de Mejillones	Mejillones	300	Litoral Costero
Muelle pescadores de Taltal	Taltal	499	Litoral Costero
Costanera de Antofagasta	Antofagasta	250.000	Mejoramiento Borde Costero
Balneario Municipal	Antofagasta	250.000	Mejoramiento Borde Costero
Balneario Playa Trocadero	Antofagasta	318.779	Mejoramiento Borde Costero
Playas y Piscinas Artificiales, Sector Centro Playa Paraiso	Antofagasta	318.779	Mejoramiento Borde Costero
Costanera sur Antofagasta	Antofagasta	250.000	Mejoramiento Borde Costero
Borde costero de Mejillones	Mejillones	-	Mejoramiento Borde Costero
Playas y piscinas sector balneario Covadonga	Tocopilla	25.000	Mejoramiento Borde Costero
Playa artificial el Carboncillo	Antofagasta	295.792	Mejoramiento Borde Costero



Región	Atacama		
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura
Paseo peatonal calle Wheelwright, Caldera	Caldera	13.734	Mejoramiento Borde Costero
Infraestructura terrestre caleta Caldera	Caldera	980	Litoral Costero
Obras Portuarias Menores Caleta San Pedro de Chañaral	Chañaral	481	Litoral Costero
Obras Portuarias Menores Caleta Carrizal Bajo	Huasco	214	Litoral Costero
Puerto Pesquero de Caldera, Obras Terrestres, Edificio de Administración	Caldera	1.500	Litoral Costero
Caleta Caldera	Caldera	450	Pesquera Artesanal



Región	Coquimbo		
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura
Caleta Coquimbo	Coquimbo	4.525	Pesquera Artesanal
Caleta Peñuelas	Coquimbo	209	Pesquera Artesanal
Caleta Guanaqueros	Coquimbo	191	Pesquera Artesanal
Caleta Pichidanguí	Los Vilos	135	Pesquera Artesanal
Caleta Chungungo	La Higuera	99	Pesquera Artesanal
Caleta San Agustín en Punta de Choros	La Higuera	190	Pesquera Artesanal
Muelle caleta Puerto Aldea	Coquimbo	76	Litoral Costero
Enrocado caleta La Cebada	Ovalle	66	Litoral Costero
Frente de atraque y explanada caleta Guanaqueros	Coquimbo	211	Litoral Costero



Región		Valparaíso		
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura	
Sector Pesquero Artesanal Puertecito	San Antonio	1.310	Pesquera Artesanal	
Caleta San Pedro	Con-Cón	72	Pesquera Artesanal	
Caleta El Membrillo	Valparaíso	450	Pesquera Artesanal	
Caleta Puertecito	San Antonio	1.937	Pesquera Artesanal	
Caleta Loncura	Quintero	300	Pesquera Artesanal	
Caleta Portales	Valparaíso	242	Pesquera Artesanal	
Caleta El Manzano	Quintero	584	Pesquera Artesanal	
Caleta Higerillas	Con-Cón	87	Pesquera Artesanal	
Varadero isla Selkirk, habilitación provisional	Juan Fernández	32	Litoral Costero	
Infraestructura de apoyo caleta Algarrobo	Algarrobo	100	Litoral Costero	
Muro verteolas en caleta El Membrillo	Valparaíso	307	Litoral Costero	
Base de muro de contención caleta Maitencillo	Puchuncaví	47	Litoral Costero	
Obras terrestres caleta Pichicuy	La Ligua	145	Litoral Costero	
Muelle, boxes y galpón de encarnado caleta El Manzano	Quintero	115	Litoral Costero	
Frente de atraque caleta El Embarcadero	Quintero	31	Litoral Costero	
Infraestructura terrestre Caleta Portales	Valparaíso	242	Litoral Costero	
Muelle Bahía El Padre Isla Juan Fernandez	Juan Fernández	633	Litoral Costero	
Paseo Wheelright entre Caleta Portales y Muelle Barón	Valparaíso	876.022	Mejoramiento Borde Costero	
Paseo costero entre Tomamesa y Muelle Barón	Valparaíso	275.982	Mejoramiento Borde Costero	
Paseo costero entre caleta Portales y Tomamesa	Valparaíso	275.982	Mejoramiento Borde Costero	
Paseo costero Cartagena	Cartagena	16.875	Mejoramiento Borde Costero	



Región		Libertador Bernardo O'Higgins		
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura	
Caleta Pichilemu	Pichilemu	419	Pesquera Artesanal	
Caleta La Boca de Rapel	Navidad	178	Pesquera Artesanal	
Caleta Matanzas	Navidad	34	Pesquera Artesanal	
Infraestructura terrestre caleta Bucalemu	Paredones	129	Litoral Costero	



Región	Maule		
	Comuna	Beneficiarios	Categoría infraestructura
Infraestructura			
Rampa y explanada caleta Pellines	Constitución	44	Litoral Costero
Infraestructura de apoyo caleta Pelluhue	Pelluhue	250	Litoral Costero
Infraestructura de apoyo caleta Pellines	Constitución	50	Litoral Costero
Infraestructura de apoyo caleta Loanco	Chanco	65	Litoral Costero
Infraestructura de apoyo caleta Duao	Licantén	173	Litoral Costero
Muros de defensa y rampa caleta Duao	Licantén	173	Litoral Costero
Desrocamiento caletas Llico y Boyeruca	Vichuquén	107	Litoral Costero
Muros de defensas prismáticas caleta Curanipe	Curanipe	57	Litoral Costero
Malecón de atraque, mercado y embarcadero El Pasaje	Constitución	93	Litoral Costero
Espigón Piedra del Dique, Río Maule	Constitución	33.914	Litoral Costero
Caleta Pellines	Constitución	52	Pesquera Artesanal
Caleta Pelluhue	Pelluhue	222	Pesquera Artesanal
Caleta Loanco	Chanco	72	Pesquera Artesanal
Caleta Duao	Licantén	193	Pesquera Artesanal
Caleta Curanipe	Curanipe	102	Pesquera Artesanal



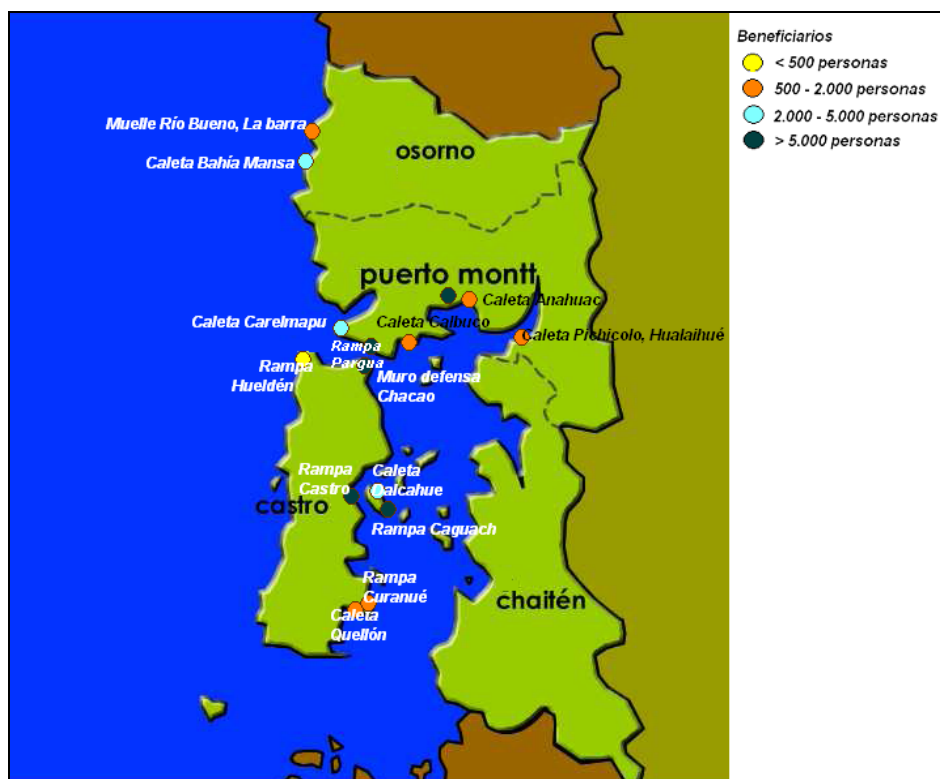
Región	Bío-Bío		
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura
Caleta Rocuant	Talcahuano	34	Pesquera Artesanal
Caleta chica Cocholgue	Tome	200	Pesquera Artesanal
Caleta Lo Rojas	Coronel	929	Pesquera Artesanal
Caleta El refugio	Penco	80	Pesquera Artesanal
Caleta Rumena	Arauco	92	Pesquera Artesanal
Caleta Punta Lavapié	Arauco	1.987	Pesquera Artesanal
Caleta Coliumo	Tome	250	Pesquera Artesanal
Caleta Lirquén	Penco	968	Pesquera Artesanal
Caleta Quidico	Quidico	130	Pesquera Artesanal
Caleta Lebu	Lebu	1.872	Pesquera Artesanal
Caletas Tirúa y Llico	Tirúa y Arauco	295	Pesquera Artesanal
Infraestructura marítima Isla Mocha	Lebu	1.000	Litoral Costero
Muros de defensa río Tirúa	Tirúa	200	Litoral Costero
Muro de defensa caleta chica Cocholgue	Tome	200	Litoral Costero
Muro de defensa y rampa Puerto Sur, Isla Santa María	Coronel	1.400	Litoral Costero
Muro sur río Lebu	Lebu	-	Litoral Costero
Muelle pesquero artesanal caleta Lo Rojas	Coronel	929	Litoral Costero
Muro de defensa de Coliumo	Tome	174	Litoral Costero
Infraestructura de apoyo caleta El Refugio	Penco	80	Litoral Costero
Muros de encauzamiento, rampa y espigón fluvial río Tirúa	Tirúa	-	Litoral Costero
Infraestructura de apoyo caleta Llico	Arauco	81	Litoral Costero
Muelle, chaza e instalación de grúa caleta Lo Rojas	Coronel	100	Litoral Costero
Infraestructura de apoyo caleta Tirúa	Tirúa	-	Litoral Costero
Muelle pesquero artesanal caleta Lota Bajo	Lota	1.987	Litoral Costero
Enrocado de defensa Pto. Nuevo	Lota	500	Litoral Costero
Infraestructura desembocadura río Lebu	Lebu	1.872	Litoral Costero
Infraestructura de apoyo caleta Villarrica, Dichato	Tome	181	Litoral Costero
Muro costanera Lengua	Hualpen	500	Litoral Costero
Espigones de Encauzamiento Río Tirúa	Tirúa	912	Litoral Costero



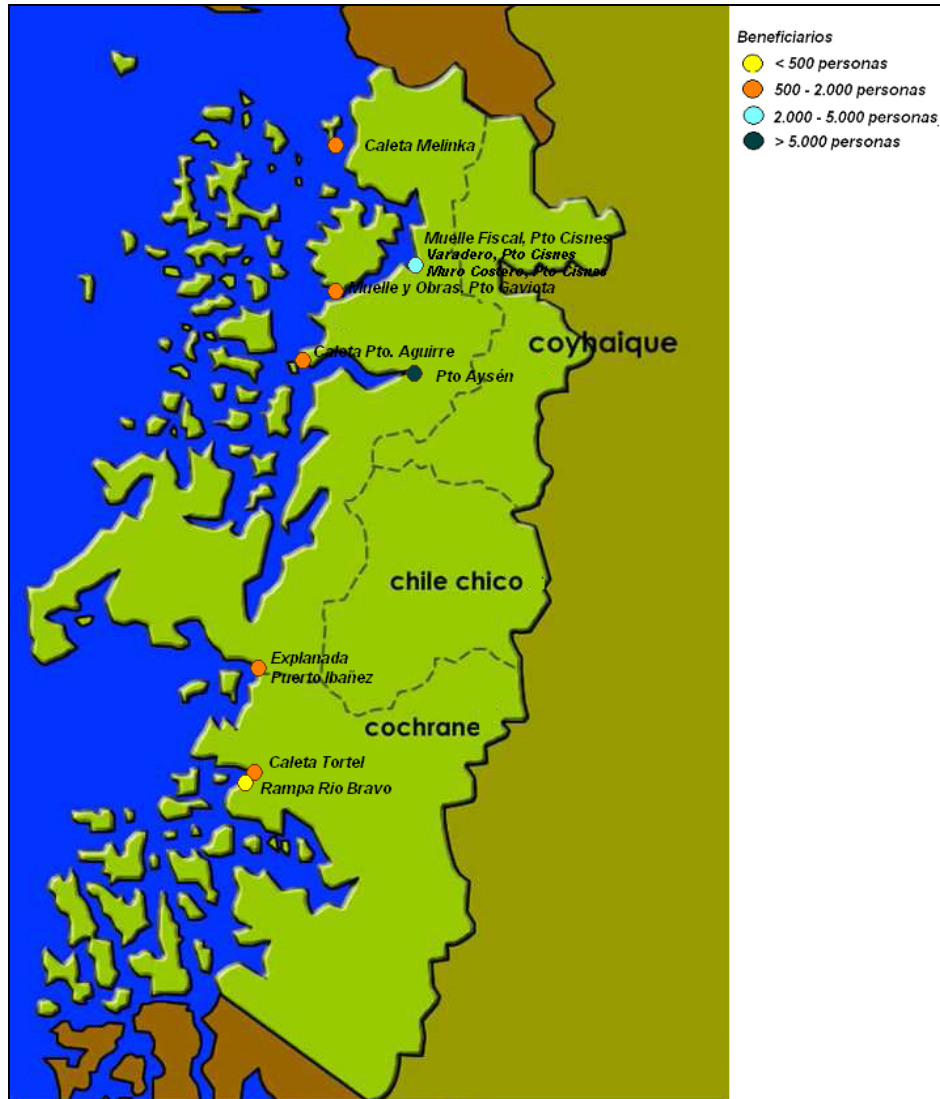
Región		Araucanía	
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura
Caleta Pto. Dominguez	Puerto Saavedra	800	Pesquera Artesanal
Muro de defensa sector central Puerto Saavedra	Puerto Saavedra	2.349	Litoral Costero
Embarcadero Puerto Dominguez, Lago Budi	Puerto Saavedra	2.000	Litoral Costero
Puerto pesquero artesanal de Queule	Tolten	143	Litoral Costero
Rampas para balsas	Puerto Saavedra	5.000	Litoral Costero
Rampas para balsas	Tolten	4.688	Litoral Costero
Muro de defensa costera	Puerto Saavedra	66	Litoral Costero
Rampas para balsas	Lonquimay, Galvarino y Lumaco	4.691	Litoral Costero
Muro de defensa costero sector central Pto. Saavedra	Puerto Saavedra	2.349	Litoral Costero
Embarcadero El Huilque, Puerto Saavedra	Puerto Saavedra	62	Litoral Costero
Muro de defensa costero Puerto Saavedra, Sector El Estero	Puerto Saavedra	2.349	Litoral Costero



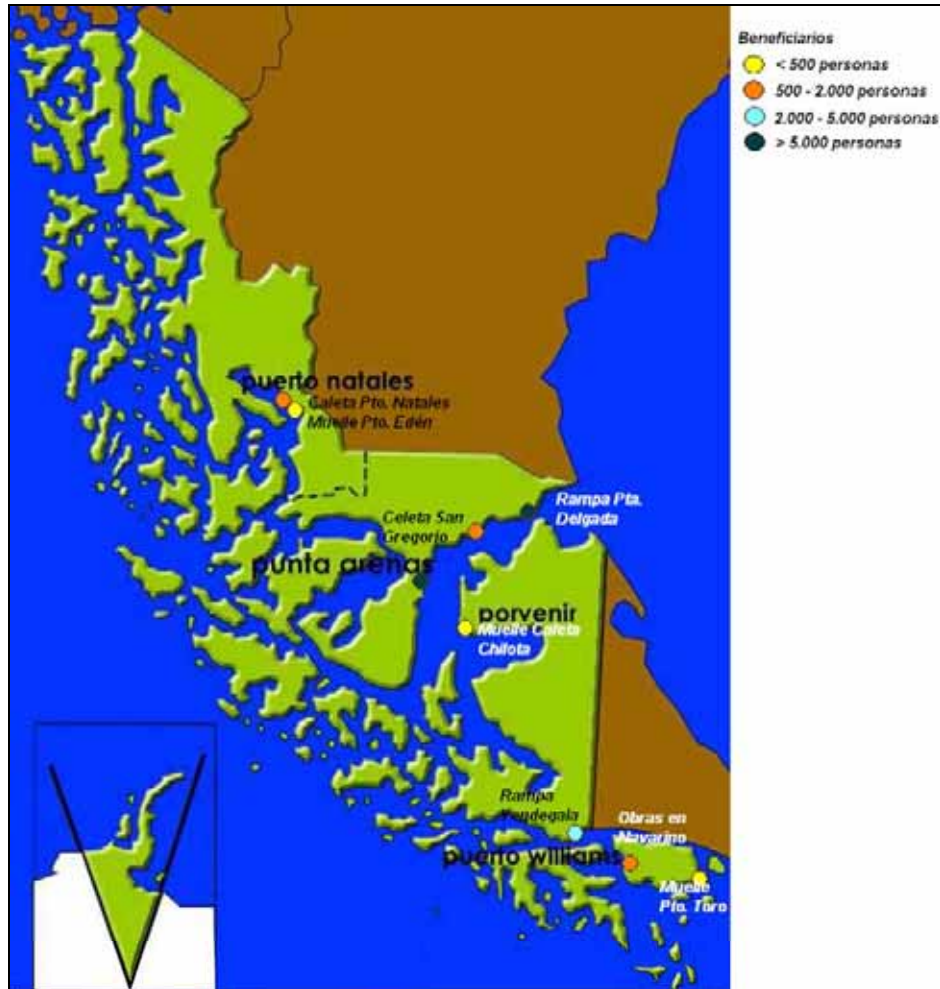
Región		De Los Ríos	
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura
Caleta Niebla	Valdivia	622	Pesquera Artesanal
Muelle Carboneros	Corral	5.463	Litoral Costero
rampas para transbordadores en Niebla y Corral	Valdivia/Corral	-	Litoral Costero
muro costero isla Mancera	Corral	53	Litoral Costero



Región	De Los Lagos		
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura
Caleta Anahuac	Puerto Montt	930	Pesquera Artesanal
Caleta Carelmapu	Maulín	4.560	Pesquera Artesanal
Caleta comuna de Hualaihué (caleta Pichicolo)	Hualaihué	788	Pesquera Artesanal
Caleta Bahía Mansa	San Juan de la Costa	2.641	Pesquera Artesanal
Caleta Dalcahue	Dalcahue	2.794	Pesquera Artesanal
Caleta Quellón	Quellón	1.750	Pesquera Artesanal
Caleta Calbuco	Calbuco	1.397	Pesquera Artesanal
Caleta Dalcahue	Dalcahue	126	Pesquera Artesanal
Caleta Ancud	Ancud	-	Pesquera Artesanal
Muelle Río Bueno, sector La Barra	San Juan de la Costa	1.000	Litoral Costero
Rampa de Castro	Castro	7.102	Litoral Costero
Rampa Curanué	Quellón	680	Litoral Costero
Muro y rampa en Hueldén	Ancud	361	Litoral Costero
Muro de defensa de Linao	Ancud	200	Litoral Costero
Caleta Carelmapu, obras terrestres	Maulín	760	Litoral Costero
Muro de defensa Chacao	Ancud	154.766	Litoral Costero
Rampa Tenaún	Dalcahue	10.693	Litoral Costero
Rampa sector Caguach	Quinchao	8.976	Litoral Costero
Caleta Bahía Mansa, obras terrestres	San Juan de la Costa	46	Litoral Costero
Terminales Portuarios en Huicha	Chonchi - Chulchuy - Puqueldón	-	Litoral Costero
Rampa Ayacara	Chaitén	-	Litoral Costero
Terminal Portuario en Machil, Isla Puluqui y La Capilla, Isla Chidhuapi	Calbuco	-	Litoral Costero
Terminales Portuarios en Huicha Comuna de Chonchi y Chulchuy	De Puqueldón	-	Litoral Costero
Terminal portuario sector Los Pinos isla Lin Lin	Quinchao	-	Litoral Costero
Terminal portuario sector Metahue en isla Butachauques	Quemchi	-	Litoral Costero
Rampa en Buill	Chaitén	-	Litoral Costero
Terminal Portuario Multipropósito de Castro	Castro	-	Litoral Costero
Rampa Sector Voigue y Rampa Quicaví	Quemchi	-	Litoral Costero
Rampa de Pargua	Calbuco	154.766	Conexión Zonas Aisladas
Rampa isla Quellín	Calbuco	31.070	Conexión Zonas Aisladas
Rampa para pasajeros y carga Isla Chaulín	Quellón	21.823	Conexión Zonas Aisladas



Región	Aysén del General Carlos Ibañez del Campo		
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura
Caleta Melinka	Las Guaitecas	662	Pesquera Artesanal
Caleta Puerto Aguirre	Aysén	528	Pesquera Artesanal
Caleta Tortel	Tortel	507	Pesquera Artesanal
Muelle y obras complementarias en Lago Verde	Lago Verde	450	Litoral Costero
Explanada de Puerto Ibañez	Río Ibañez	805	Litoral Costero
Estero Aguas Muertas, Puerto Aysén	Cisnes	19.580	Litoral Costero
Muro Explanada Puerto Raúl Marín Balmaceda	Cisnes	284	Litoral Costero
Varadero de Puerto Cisnes	Cisnes	2.507	Litoral Costero
Muro Costero Puerto Cisnes	Cisnes	2.507	Litoral Costero
Muelle-Rampa y Obras Complementarias Puerto Gaviota	Cisnes	570	Conexión Zonas Aisladas
Segunda Rampa Río Bravo	O'Higgins	4.402	Conexión Zonas Aisladas
Rampa Puerto Cisnes	Cisnes	8.957	Conexión Zonas Aisladas
Infraestructura Portuaria de Conexión Isla Toto	Cisnes	5.739	Conexión Zonas Aisladas
rampa para barcazas en Puerto Raúl Marín Balmaceda	Cisnes	500	Conexión Zonas Aisladas
rampa Río Bravo	Tortel	467	Conexión Zonas Aisladas
Infraestructura portuaria isla Toto	Cisnes	408	Conexión Zonas Aisladas
Muelle Fiscal de Puerto Cisnes	Cisnes	2.507	Conexión Zonas Aisladas
Muelle Fiscal de Puyuhuapi	Cisnes	-	Conexión Zonas Aisladas



Región	Magallanes y La Antártica Chilena		
Infraestructura	Comuna	Beneficiarios	Categoría Infraestructura
Infraestructura Portuaria En Puerto Williams, Navarino	Cabo De Hornos	1.952	Litoral Costero
Explanada, boxes y servicios caleta Puerto Natales	Puerto Natales	715	Litoral Costero
Caleta Punta Arenas	San Gregorio y Primavera	1.754	Pesquera Artesanal
Muelle pesquero artesanal Bahía Chilota	Porvenir	97	Litoral Costero
Muelle Puerto Toro	Puerto Williams	241	Litoral Costero
Infraestructura portuaria de Puerto Edén	Puerto Natales	200	Litoral Costero
Infraestructura portuaria de Puerto Edén	Puerto Natales	227	Litoral Costero
Rampas en Punta Delgada y Bahía Azul	San Gregorio – Primavera	10.000	Conexión Zonas Aisladas
Rampa en Yendegaia	Cabo de Hornos	2.262	Conexión Zonas Aisladas
Rampas Primera Angostura	San Gregorio y Primavera	-	Conexión Zonas Aisladas

4 ANEXO 4: ZONAS PROTEGIDAS EN CHILE

En la Tabla 4-1 se presenta un resumen de los santuarios naturales ubicados en la costa de Chile.

Tabla 4-1: Superficie Santuarios Naturales.

	Región	Superficie (ha.)
Monumento Natural La Portada	II	31,0
Parque Nacional Pan de Azúcar	II-III	43.769,0
Reserva Nacional Pingüino de Humboldt	III-IV	859,3
Parque Nacional Bosque Fray Jorge	IV	9.959,0
Monumento Natural Isla Cachagua	V	4,5
Reserva Nacional El Yali	V	11.500,0
Parque Nacional Rapa Nui	V	7.130,0
Parque Nacional Archipiélago Juan Fernández	V	9.571,0
Reserva Nacional Federico Albert	VII	145,0
Reserva Nacional Isla Mocha	VIII	2.368,0
Parque Nacional Chiloé	X	43.057,0
Parque Nacional Isla Guamblin	XI	10.625,0
Parque Nacional Isla Magdalena	XI	157.616,0
Reserva Nacional Las Guaitecas	XI	1.097.975,0
Reserva Nacional Katalalixar	XI	674.500,0
Parque Nacional Bdo. O'Higgins	XI-XII	3.525.901,0
Parque Nacional Torres del Paine	XII	181.414,0
Reserva Nacional Alacalufes	XII	2.313.875,0
Parque Nacional Alberto de Agostini	XII	1.460.000,0
Parque Nacional Cabo de Hornos	XII	63.093,0
Monumento Natural Los Pingüinos	XII	97,0

Fuente: Corporación Nacional Forestal, CONAF.



