

**PROYECTO DE UNA DEFENSA COSTERA
EN LA CIUDAD DE RIO GRANDE
(Pcia. De Tierra del Fuego)**

**1ª Etapa - Determinación de las Condiciones Hidrodinámicas
para el Proyecto de las Obras**

Enero, 2001

LHA –198-01-01

INA

LABORATORIO DE HIDRÁULICA y DEL AMBIENTE

Director

Ing. J.C. De Lío

PROGRAMA DE HIDRÁULICA MARÍTIMA

PROGRAMA DE HIDRÁULICA DE OBRAS

PROGRAMA DE HIDRÁULICA FLUVIAL

Informe Producido por

Ing. R. Castellano

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. R. Castellano

Ing. J.D. Bacchiega

Ing. D. Brea

Sr. C.A. Haspert

INDICE DE MATERIAS

INTRODUCCION.....	1
1. ESTUDIOS PREVIOS, ANTECEDENTES E INFORMACION DE BASE	4
1.1. Estudios Básicos	4
1.2. Estudios Antecedentes	5
1.3. Información de base	6
1.3.1. Imágenes satelitales	6
1.3.2. Planos de referencia altimétrica.....	6
1.3.3. Cartografía y Topografía.....	7
1.3.4. Información batimétrica.....	7
1.3.5. Nivel del mar.....	8
1.3.6. Clima de olas	8
2. DESCRIPCION FISICA DE LA REGION	9
2.1. Generalidades	9
2.2. Clima.....	9
2.2.1. Vientos.....	9
2.2.2. Precipitaciones	11
2.2.3. Temperatura	11
2.3. Hidrografía	12
2.4. Olas	13
2.4.1. Estudios de INA	13
2.4.5. Estudios de la DNCPyVN	17
2.5. Nivel del mar.....	18
2.5.1. Marea astronómica	19
2.5.2. Marea meteorológica	19
2.5.3. Calentamiento Global	21
2.5. Geomorfología Costera.....	23
2.6. Perfiles de playa	27
2.7. Características del terreno.....	28
2.8. Sismología	28
3. CONDICIONES HIDRODINAMICAS.....	29
3.1. Consideraciones generales	29
3.2. Período de retorno	29
3.3. Condiciones Hidrodinámicas	30
3.3.1. Frente Oceánico	31
3.3.1.1. Refracción de olas	31
3.3.1.2. Hipótesis básicas	31
3.3.1.3. Implementación	34
3.3.1.4. Cálculo en Región Costera	36
3.3.1.5. Sobreelevación por paso de las olas	37
3.3.1.6. Rotura	38

3.3.1.7. Escenarios de cálculo	39
3.3.1.8. Resultados	40
3.3.1.8.1. Refracción de olas	40
3.3.1.8.2. Región Costera	41
3.3.2. Tramo Fluvial	42
3.3.2.1. Modelo Matemático DIFRAC.	42
3.3.2.2. Implementación	43
3.3.2.3. Escenarios	45
3.3.2.4. Resultados	45
3.4. Sobrepasso de olas	46
CONCLUSIONES	48
REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS ADICIONALES.....	49

FIGURAS

Figura 1	Plano de Ubicación general
Figura 2	Ubicación de las obras de defensa
Figura 3	Altura de ola en función del período de retorno
Figura 4	Nivel del mar en función del período de retorno
Figura 5	Evolución histórica de la Punta Popper
Figura 6	Variación histórica de la desembocadura del río Grande
Figura 7	Perfil de costa
Figura 8	Posición relativa de las grillas de cálculo de propagación de olas
Figura 9	Grilla de cálculo 1
Figura 10	Grilla de cálculo 2
Figura 11 a 16	Trayectorias de rayos sobre la grilla de cálculo 2
Figura 17	Distribución de altura de olas frente a la restinga
Figura 18	Distribución de altura de ola y nivel del mar a lo largo del perfil de costa (tramo oceánico)
Figura 19	Isolíneas de altura de ola en la desembocadura del Río Grande
Figura 20	Distribución de altura de olas frente a la costa. (Tramo fluvial)
Figura 21	Criterios de sobrepaso admisible

INTRODUCCION

La ciudad de Río Grande, fundada oficialmente el 11 de julio de 1921, se halla ubicada sobre la costa atlántica de la Isla Grande de Tierra del Fuego, a orillas de la margen norte del Río Grande (**Figura 1**).

Aunque el casco fundacional ocupó 100 manzanas ubicadas sobre terrenos elevados, el crecimiento gradual de la ciudad llevó a ocupar tierras más bajas, tanto en la planicie de inundación fluvial como en la costa marítima, expuestas al ocasional efecto de inundaciones y procesos erosivos por la acción hídrica.

En la actualidad la población de la ciudad es cercana a los 50.000 habitantes y uno de los problemas urbanísticos es la escasez de espacios verdes y la carencia de un parque a escala urbana.

La recuperación de la costa marítima y de la costa del río Grande como elementos paisajísticos y áreas para el desarrollo de actividades recreativas, sociales y culturales ha llevado a la Municipalidad de Río Grande a plantear el desarrollo de un *Proyecto de Recuperación de la Costa*.

Este proyecto se articula en la construcción de una obra de defensa costera longitudinal que brinde adecuada seguridad ante la acción marina, al mismo tiempo que satisfaga los criterios arquitectónicos y urbanísticos que la naturaleza del proyecto y su emplazamiento exigen.

La Municipalidad de Río Grande (MRG) ha convenido con el Instituto Nacional del Agua y del Ambiente (INA), a través del Laboratorio de Hidráulica y del Ambiente (LHA) la definición de un proyecto de obras de defensa que se desarrollará sobre el frente marítimo, desde la calle Santa Fe en su extremo norte, finalizando a la altura de la calle Rojas, sobre el frente fluvial, según se muestra en

la **Figura 2**. El desarrollo total de la obra será de unos 2100 m, de los cuales 1650 m corresponden al frente marítimo y 450 al frente fluvial.

En esta **Primera Etapa** se caracterizan especialmente los parámetros de diseño hidráulicos necesarios para definir y dimensionar las obras. Para el logro de los objetivos de esta etapa se procedió a efectuar la recopilación de la información concerniente a la descripción física de la región y la aplicación de técnicas de modelación matemática de propagación de olas hasta el emplazamiento de las obras.

En el curso de una **Segunda Etapa**, en función de los resultados obtenidos de los estudios de propagación de oleaje, y de corrientes y mareas, etc., se establecerán las solicitudes a ser consideradas para la definición de la obra de protección.

A partir de esto y teniendo en cuenta otros factores como los aspectos económicos, urbanísticos, arquitectónicos y ambientales, las características del terreno donde se apoyará la obra de defensa, del transporte de sedimentos y la morfología y dinámica de las playas, se estudiarán distintas variantes de obra en lo referente a su funcionalidad y su resistencia estructural, verificándose la estabilidad de la obra de defensa mediante las expresiones convencionales según el tipo de estructura.

Una vez definida la variante elegida se procederá a la realización del Proyecto de la Obra e Ingeniería de Detalle.

La realización de la presente Etapa del proyecto se efectúa mediante un convenio suscripto entre las partes el ... de ... de 20....

Los Términos de Referencia del contrato se incorporan en el Anexo I.

En el Capítulo 1 se presenta un listado de los estudios previos, antecedentes e información de base que serán utilizados en el proyecto de las obras.

En el Capítulo 2 se desarrolla una descripción física del lugar de emplazamiento, con especial énfasis en los aspectos meteorológicos, hidrográficos y de la geomorfología costera, de manera de proveer de una base para el cálculo funcional y estructural de las obras en cuestión.

En el Capítulo 3 se analizan los posibles escenarios hidrodinámicos y se determinan, de manera preliminar, condiciones de diseño de las obras, mediante la utilización de técnicas de simulación numérica de propagación de olas.

1. ESTUDIOS PREVIOS, ANTECEDENTES E INFORMACION DE BASE

En este capítulo se incorpora un listado de los antecedentes consultados para la presente etapa del proyecto. Los mismos han sido clasificados como:

- *Estudios Básicos:* cuando se trata de estudios realizados específicamente con referencia a la formulación de diagnóstico de situación y/o propuesta de soluciones para la protección costera.
- *Estudios Antecedentes:* cuando se analizan estudios efectuados en la región con relación a otros proyectos pero que contienen información de interés referente a la descripción física del área de interés para el presente estudio.
- *Información de Base:* cuando se trata de fuentes de información hidrográfica, cartográfica, etc. a partir de las cuales se han obtenido datos de aplicación al presente estudio.

En el presente informe se utilizará el número que precede a cada título para hacer referencia al mismo. Referencias adicionales se dan por numeración correlativa y se indican al final del Informe bajo el título **Referencias Bibliográficas Adicionales.**

1.1. Estudios Básicos

- 1.1.1. *Balance de volúmenes erosionados y depositados en la playa de la ciudad de Río Grande, Tierra del Fuego (Octubre 1992 – marzo 1993) G.G. Bujalesky, Mayo 1993*
- 1.1.2. *Convenio MRG-SHN. Estudios Hidrográficos. Informe de Avance Primera Parte. Búsqueda y Análisis de Antecedentes. Agosto 1994.*

1.1.3. Convenio MRG-SHN. Estudios Hidrográficos. Informe de Avance Segunda Parte. Programa de mediciones de Campo. Diciembre 1994

1.1.4. Estudio de la defensa de la margen izquierda del Río Grande (Tierra del Fuego.

- Informe de Avance N° 1. Búsqueda y Análisis de Antecedentes. INCYTH, 133-01-94. Diciembre 1994.
- Informe de Avance N° 2. Modelación numérica de olas y corrientes. INCYTH-LHA 133-02-96
- Informe Final. INA – LHA – 133-03-97. Junio de 1997

1.2. Estudios Antecedentes

1.2.1. Puerto de Río Grande. Encuesta y Estudio Preliminar para una Investigación sobre Modelo. Laboratorio Nacional de Hidráulica Aplicada, Ezeiza, Abril de 1971.

1.2.2. Estudio Puerto de Río Grande. Campañas de Mediciones. Laboratorio Nacional de Hidráulica Aplicada 1972/1973

1.2.3. Estudio de la Disposición de Efluentes Cloacales de la Ciudad de Río Grande.

- Campaña Oceanográfica Preliminar. INCYTH. LHA 060-001. Junio 1985
- Campaña Oceanográfica Complementaria. INCYTH. LHA 060-002. 1985
- Campañas Oceanográficas. INCYTH LHA 060-003-86. Septiembre 1986

1.2.4. Estudio del Puerto de Caleta la Misión

- Determinación del régimen de olas en el área de Caleta La Misión. INA – LHA 135-01-94, 1994.
- Estudio de Agitación para el Proyecto Portuario de Caleta La Misión. INCYTH. LHA 135-02-95
- Dinámica de Sedimentos en el Area de Caleta La Misión. INCYTH – LHA

135-05-95.

1.2.5. *Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías Navegables. Estudio de Vinculación Marítima entre Punta Loyola y la Isla Grande de Tierra del Fuego. Proyecto del Sistema de Transporte y Facilidades Portuarias. MINISTERIO DE DEFENSA. 1982*

- *Sección II. Trabajos de Campaña. DIGID. MINISTERIO DE DEFENSA. 1982*
- *Sección III. Estudio de Olas y Corrientes en la Bahía San Sebastián. DIGID.*

1.2.6. *Morfodinámica y evolución histórica de la espiga Punta Popper y la boca de mareas del río Grande, Tierra del Fuego. G.G. Bujalesky. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 52(2) 1997.*

1.2.7. *Plan de desarrollo Urbano de la Ciudad de Río Grande. Tesis de Maestría en Desarrollo Urbano. Arq. Ana Karina Valdeiglesias. Julio, 2000.*

1.3. Información de base

A continuación se presenta un listado y una breve descripción de contenidos de la documentación consultada que contiene datos e información de base utilizada en el presente estudio.

1.3.1. Imágenes satelitales

- Carta de Imagen Satelitaria 5639-36-2. Río Grande. Escala 1:50.000 (Spot) Coordenadas en Sistema Inchauspe 69. **(Fotografía 1)**

1.3.2. Planos de referencia altimétrica

En la **Tabla 1.1** se muestra la relación entre los planos de referencia

hidrográficos y puntos fijos terrestres indicados en la monografía del SHN que acompañó el registro de mareas en el Muelle Fiscal de Río Grande.

Tabla 1.1. Planos de Referencia Altimétrica

Descripción	Cota (m)
Plano de referencia de la Tabla de Mareas	0.00
Plano de reducción Carta H-462 1ª Edición 1969	1.41
Nivel Medio del mar	4.50
Pilar Prefectura CAP(1) 1966	9.77
Repere Prefectura MOP 24	10.00

1.3.3. Cartografía y Topografía

Carta Topográfica de la R. A. 5369-23. Río Grande. Escala 1:100.000. Instituto Geográfico Militar.

1.3.4. Información batimétrica

Se utilizaron las siguientes Cartas Náuticas publicadas por el Servicio de Hidrografía Naval de la Armada Argentina (SHN):

- H4 – Archipiélago Fueguino e Islas Malvinas. Escala 1: 1.500.000. Proyección Mercator. Referida al límite inferior de la media de todas las bajamares de Sicigias.
- H424 – Estrecho de Magallanes, de Cabo Vírgenes a Bahía San Sebastián. Proyección Mercator. Escala 1:100.000. Referida al límite Inferior de las Bajamares de Sicigias.
- H425 – De Bahía San Sebastián a Punta María. Proyección Mercator. Escala 1:100.000. Referida al límite inferior de la media de las Bajamares de Sicigias.

- Carta 90 – Río Grande y Proximidades. Proyección Mercator. Escala 1:100.000. Profundidades en brazas, referida a las mayores bajamares de Sicigias.
- Puerto de Río Grande – Plano Hidrográfico. Proyección Gauss-Kruger. Escala 1:5.000. Servicio de Hidrografía Naval. 1988. Cotas referidas al plano de reducción que pasa 4.5 m debajo del Nivel Medio, y 10 m debajo del Mojón MOP XXIV.

1.3.5. Nivel del mar

- Tablas de Mareas Publicadas por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) de la Armada Argentina.
- Registros Mareográficos en Río Grande, (SHN) 1966- 1980. (Anexo II)

1.3.6. Clima de olas

Además de los estudios básicos y antecedentes indicados más arriba, se consultaron las siguientes fuentes de información:

- *TOTAL AUSTRAL - CARINA FEASIBILITY STUDY. Appendix 2. Meteocean data. 1997*
- *PLATAFORMA ARIES*
- *TOTAL AUSTRAL - YACIMIENTO ARA (Cullen)*

2. DESCRIPCION FISICA DE LA REGION

2.1. Generalidades

La ciudad de Río Grande, se halla ubicada en la costa atlántica fueguina en la latitud de 53° 45' S y 67° 40' de longitud W, sobre la margen norte del río homónimo, tal como puede apreciarse en la **Figura 1 y Foto 1**.

La costa atlántica fueguina se extiende de NW a SE, sobre un frente de unos 300 Km entre Cabo Espíritu Santo en su extremo Norte a Cabo San Diego en el Sur. Sobre este frente se desarrolla una importante formación de origen glaciario, que es la Bahía San Sebastián.

2.2. Clima

En las referencias indicadas en el Capítulo 1 se encuentra una descripción detallada del clima en la región, no obstante lo cual se indica a continuación una breve reseña de sus principales características.

2.2.1. Vientos

La región de Río Grande, como toda la región oriental de la Patagonia, se halla sujeta a vientos predominantes del sector oeste, de gran persistencia e intensidad hacia fines del verano.

En la **Tabla 2.1.** se presentan valores medios mensuales para el período 1973-1978, registrados en la Base Aeronaval Río Grande. En la parte superior de cada celda se indica la frecuencia de ocurrencia en por mil. Debajo, la velocidad media mensual en Km/h.

**Tabla 2.1. Frecuencia de ocurrencia de vientos medios mensuales
(1973-1978)**

¡Error! Marcador no definido.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
N	55 28	57 24	56 24	53 30	54 26	22 20	6 39	19 26	68 24	79 24	90 22	90 26
NE	50 24	23 17	24 26	18 30	39 19	40 22	44 19	6 13	20 20	19 15	63 17	34 26
E	39 24	30 13	23 22	12 22	6 11	7 15	60 22	13 15	25 19	29 22	48 22	55 22
SE	29 22	5 37	11 26	12 17	21 28	37 19	55 20	3 7 9	17 9	24 24	35 22	9 22
S	18 22	11 24	6 17	3 15	11 15	7 11	8 11	15 22	13 13	11 20	27 19	22 22
SW	116 31	145 33	89 30	157 31	115 28	112 24	94 17	66 22	93 26	132 30	118 33	165 39
W	440 33	431 35	523 33	390 31	292 31	238 24	277 28	489 33	410 35	440 37	388 35	391 35
NW	97 30	121 28	58 30	103 26	87 22	100 28	87 28	106 30	143 30	110 28	78 28	117 30
C	166	177	210	253	395	438	369	282	210	155	152	117

Puede observarse que la época más ventosa es de septiembre a marzo, con vientos predominantes son del W cuyas intensidades medias mensuales son de 35

a 37 km/h. En los meses de mayo, junio y julio se produce la mayor cantidad de días de calma (C). De los vientos que soplan del mar (N a SE), el N es en general el que presenta mayores intensidades medias (de 24 a 39 Km/h según la época del año) y mayor frecuencia de ocurrencia, especialmente en los meses de septiembre a diciembre (70 a 90 por mil). El NW y el SE si bien son vientos aproximadamente paralelos a la costa, presentan intensidades medias considerables, y que superan en algunos meses a los vientos francamente oceánicos.

2.2.2. Precipitaciones

La región presenta bajas tasas de precipitación pluvial. El aire húmedo del W es interceptado por la cordillera de los Andes que actúa reteniendo la humedad. En el período 1974-1979 la Base Aeronaval Alte. H. Quijada reportó un valor medio de 341.6mm, bastante homogéneo a lo largo del año, y con un máximo medio mensual de 59.1 mm en el mes de abril.

En la misma ubicación, en el período 1941-1950, se ha registrado una media anual de 380 mm, con una mínima en los meses de junio, julio y agosto, del orden de los 21.0 a 25.0 mm, y una máxima en el período de diciembre a marzo, con hasta 52.0 mm medios mensuales en marzo.

En el período 1973/78 la media anual en Río Grande fue de 340 mm, con una mínima en los meses de agosto, septiembre y octubre del orden de los 14 a 19 mm mensuales y máxima de noviembre a abril (45 mm en abril).

Finalmente, en [1.2.7.] se indica una precipitación anual media de 415 mm en el período 1978-1996.

2.2.3. Temperatura

Las características marítimas del clima hacen que la variación anual de temperatura sea relativamente pequeña, siendo las máximas y mínimas poco

extremas en verano e invierno respectivamente. En la **Tabla 2.2.** tomada de [1.2.1.] se indican valores medios mensuales y valores extremos de temperaturas máximas y mínimas.

Tabla 2.2. Temperaturas anuales en Río Grande.

MES	Temperaturas				
	Medias			Extremas	
	Mensual	Máxima	Mínima	Máxima	Mínima
ENE	10.4	16.3	5.4	24.3	-2.8
FEB	9.8	15.6	5.2	22.5	-1.0
MAR	7.9	13.4	3.3	21.4	-5.3
ABR	4.4	9.3	-0.1	17.0	-8.2
MAY	2.0	5.9	-1.2	15.0	-11.0
JUN	0.2	3.1	-3.2	10.5	-14.2
JUL	0.6	3.2	-2.3	9.6	-16.0
AGO	1.6	5.2	-1.6	10.9	-10.0
SEP	2.9	7.7	-0.2	15.0	-9.9
OCT	5.5	10.8	1.9	18.2	-3.5
NOV	6.9	12.1	2.7	19.5	-6.0
DIC	9.4	14.7	5.1	22.0	1.6
ANUAL	5.1	9.8	1.3	24.3	-16.0

2.3. Hidrografía

El río Grande es el más importante de la isla Grande de Tierra del Fuego y abarca una cuenca de unos 7.000 Km².

El sistema hidrográfico de la cuenca se encuentra entroncado por el río Grande, que atraviesa la isla Oeste a Este, teniendo sus nacientes en el sector

chileno y recibiendo en el trayecto hasta su desembocadura en el océano Atlántico los siguientes afluentes: Rassmussen, Menéndez, Mac Lennan, Candelaria, Moneta y Herminita.

Los caudales de crecida, ocurren entre septiembre y octubre y alcanzan valores de 155 m³/s.

La desembocadura conforma un estuario, en el que la marea (de gran amplitud en la región) penetra hasta 20 Km aguas arriba. Como consecuencia de ello, se originan en la desembocadura del río corrientes intensas de flujo y reflujo que pueden alcanzar los 2 m/s.

2.4. Olas

La caracterización del clima de olas en el entorno de la obra permite por una parte determinar las máximas solicitaciones a las que ésta resultará expuesta, y brinda de esta manera las bases para el cálculo de estabilidad la obra de defensa. Además permitirá evaluar los aspectos funcionales de la misma, tal como su capacidad de proveer protección a las áreas urbanas ubicadas detrás, reduciendo la posibilidad de sobrepaso por olas e inundación.

2.4.1. Estudios de INA

El INA ([1.2.4.]) presenta un análisis de diversas fuentes y un cálculo sobre la base de vientos. La **Tabla 2.3.** presenta los valores de Hs y período para distintos períodos de retorno.

Tabla 2.3. Estadística de olas (Fuente INA)

Recurrencia (años)	Hs (m)	T (s)
10	6.0	8.3
25	6.9	8.6
50	7.9	8.9
100	8.7	9.1

El valor para 50 años de período de retorno R es similar al correspondiente a dirección SE del proyecto Carina (8.0 m). Para R = 25 años el proyecto Carina (ver 2.4.2. y **Tabla 2.9**) prevé una altura de 7,50 m (casi un 10% superior al estimado por el INA). Sin embargo, dada la orientación de la costa (NW a SE) a la región costera arriban especialmente las olas procedentes del sector NE. Para esta dirección el INA indica un valor probable de altura de ola de 6.60 m, una vez en 25 años mientras que el Proyecto Carina el valor para el mismo período de retorno es de 6.90 m.

2.4.2. TOTAL AUSTRAL- CARINA FEASIBILITY STUDY. *Appendix 2. Meteocean data. 1997*

Contiene información estadística especialmente concerniente a clima de olas en una zona ubicada en la región de estudio entre 52°40' - 53° 00' S, 67° 10' - 67° 30' W, con una profundidad de 85-90 m MSL (región **C** en la **Figura 1**).

De esta fuente se extrajo la siguiente **Tabla 2.4**.

Tabla 2.4. – Estadística direccional de olas (Fuente: Proyecto Carina)

Recurrencia (años)	Dirección							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW
1	4.3	4.5	4.5	5.0	4.3	4.2	4.2	4.0
5	5.2	5.5	5.5	6.2	5.2	4.9	4.9	4.6
10	5.6	6.0	6.0	6.8	5.6	5.3	5.3	4.9
50	6.5	7.0	7.0	8.0	6.5	6.0	6.0	5.5

Una descripción más detallada de los parámetros que describen el clima de olas para las direcciones de interés (es decir las que pueden alcanzar la costa) se da en las tablas siguientes:

Tabla 2.5. Olas de dirección N

Parámetro	Recurrencia (años)		
	5	10	50
Hmax	9.7	10.4	12.1
T	10.7	11.3	12.6
Hs	5.2	5.6	6.5
Tp	10.2	10.8	12.0

Tabla 2.6. Olas de dirección NE

Parámetro	Recurrencia (años)		
	5	10	50
Hmax	10.3	11.1	13.0
T	11.4	11.7	12.6
Hs	5.5	6.0	7.0
Tp	10.8	11.2	12.0

Tabla 2.7. Olas de dirección E

Parámetro	Recurrencia (años)		
	5	10	50
Hmax	10.3	11.1	13.0
T	11.4	11.7	12.6
Hs	5.5	6.0	7.0
Tp	10.8	11.2	12.0

Tabla 2.8. Olas de dirección SE

	Recurrencia (años)		
	5	10	50
Hmax	11.6	12.6	14.9
T	12.4	12.8	13.7
Hs	6.2	6.8	8
Tp	11.8	12.2	13.0

En la **Figura 3** se muestra la altura significativa Hs en función de la recurrencia, para períodos de retorno de 1 a 100 años.

Los ajustes para las cuatro direcciones predominantes en la región costera son los siguientes:

$$\begin{aligned}
 H_s &= 0.56 \ln(R) + 4.3 && (N) \\
 H_s &= 0.64 \ln(R) + 4.5 && (NE \text{ y } E) \\
 H_s &= 0.77 \ln(R) + 5.0 && (SE)
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

donde H_s es la altura significativa en metros y R el período de retorno en años.

En la siguiente **Tabla 2.9.** se indican los valores resultantes de altura de ola significativa H_s en m para períodos de retorno Tr de 10, 20, 25 y 50 años, para cada una de las direcciones indicadas.

Tabla 2.9 Clima de Olas (Fuente: Proyecto Carina)

Tr (años)	Dirección			
	N	NE	E	SE
10	5.6	6.0	6.0	6.8
20	6.0	6.4	6.4	7.3
25	6.1	6.6	6.6	7.5
50	6.5	7.0	7.0	8.0

2.4.3. PLATAFORMA ARIES

Presenta información estadística de olas en una zona ubicada en Latitud $52^\circ 41' S$ y Longitud $68^\circ 02' W$, con una profundidad entre 60-65 m (**Figura 1**). Los valores a 50 años de la Plataforma Aries se presentan en la **Tabla 2.10**, donde puede notarse que resultan sistemáticamente inferiores a los del Proyecto Carina para todas las direcciones.

Tabla 2.10. Estadística direccional de Olas (Fuente: Plataforma Aries)

	Dirección							
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW

1	4.0	4.4	4.2	4.6	4.3	2.4	2.7	3.6
50	6.0	6.1	6.0	7.6	5.9	6.0	3.5	4.8

2.4.4. TOTAL AUSTRAL - YACIMIENTO ARA

De los registros de TOTAL AUSTRAL - YACIMIENTO ARA, en Cullen (la ubicación se indica con la letra **A** en la **Figura 1**) surge que la altura significativa H_s es de 4.5 m para 1 año de período de retorno y 7.4 m a 50 años. Dirección 15 – 65 ° (es decir NE) $T_{1/3} = 8.7$ y 12 s respectivamente. El valor a 50 años es levemente inferior al determinado en la Plataforma Aries.

2.4.5. Estudios de la DNCPyVN

Los valores de la DIRECCION NACIONAL DE CONSTRUCCIONES PORTUARIAS Y VIAS NAVEGABLES ([1.2.5]), obtenidos a lo largo de 5 años se presentan en la **Tabla 2.11**

El estudio contiene un análisis del clima de olas en la región, incluyendo una estadística de olas para el punto de coordenadas 52° 47'46" S 67° 42'44" W, ubicado al NE de la Bahía San Sebastián, en una profundidad de 73 m (indicado como **B** en la **Figura 1**). La estadística está elaborada sobre la base de datos diarios en el período comprendido entre mayo de 1976 y enero de 1981.

Observación
DNCPyVN)

H (m)	Direccion								TOTAL
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	
0.1-0.5	14	12	9	14	22	10	2	11	94
0.5-1.0	32	19	8	33	57	52	48	82	331
1.0-1.5	56	19	18	55	50	186	76	153	613
1.5-2.0	50	23	19	38	37	138	47	75	427
2.0-2.50	17	6	7	4	6	17	8	21	86
2.5-3.0	3	2	7	4	3	13	9	4	45
3.0-3.5	4	2	0	0	0	1	3	0	10
3.5-4.0	2	0	0	0	1	0	1	1	5
4.0-4.5	1	0	0	0	1	0	0	1	3
4.5-5.0	0	1	1	0	0	0	0	0	2
5.0-5.5	0	0	0	0	0	0	0	1	1
5.5-6.0	0	0	0	0	0	1	0	0	1
6.0-6.5	0	1	0	0	0	0	0	0	1
TOTAL	179	85	69	148	177	418	194	349	1619
								Calma	39
								Total	1658

Tabla 2.11.
de olas (Fuente

Aunque no se ha realizado un ajuste mediante una ley de valores extremos, puede notarse la existencia de un valor de 6.0 a 6.5 m (1 valor en 5 años de observaciones) correspondiente a la dirección NE. La **Tabla 2.11** muestra además la preponderancia de olas de dirección N y NE, teniendo en cuenta que, por la orientación general de la costa las direcciones SE, S SW, W y NW no generan olas de importancia para la región costera que se estudia.

Como conclusión general al régimen de olas puede decirse que la información más moderna resulta más completa en virtud de las mediciones sistemáticas que se llevan a cabo. Estas se han realizado especialmente en relación a la explotación de hidrocarburos. Por otro lado las distintas fuentes son razonablemente consistentes en la descripción general del clima de olas.

Debido a la gran preponderancia de vientos del W y del NW (alrededor del 70%), las olas que arriban a la costa no son generadas localmente. Las olas del sector N y NE resultan las de mayor relevancia en la región costera. Para estas direcciones alturas de ola del orden de los 8 m son probables en promedio una vez cada 50 años.

2.5. Nivel del mar

El nivel del mar es una de las variables hidrodinámicas básicas, en cuanto a que determina la profundidad de agua en la región costera y limita la

posibilidad de llegada de las grandes olas de temporal. El nivel del mar resulta afectado por factores de corto y largo plazo, algunos periódicos como la marea astronómica y otros ocasionales como los meteorológicos. A largo plazo la tendencia a un incremento del nivel medio del mar debido al calentamiento global es un hecho aceptado en el ámbito científico, aunque de difícil proyección futura.

2.5.1. Marea astronómica

El régimen de mareas en la región de Río Grande es semidiurno, siendo el nivel medio de 4.50 m respecto del plano de referencia SHN. En la **Tabla 2.12**, tomada de valores publicados por el SHN, se indican los niveles de marea astronómica en Río Grande.

Tabla 2.12 - Marea Astronómica en Río Grande

Alturas en metros sobre el plano de reducción					Amplitudes	
Marea	Pleamares		Bajamares			
	Sicigias	Cuadraturas	Sicigias	Cuadraturas	Sicigias	Cuadraturas
Equinocciales de Perigeo	8.7	5.6	0.3	3.4	8.4	2.2
De Perigeo	8.50	5.8	0.5	3.2	8.0	2.6
Medias	7.8	6.4	1.2	2.6	6.6	3.8

2.5.2. Marea meteorológica

Ocasionalmente otras fuerzas no periódicas se agregan a las generadoras de la marea astronómica, e inducen modificaciones a esta última. Hay cuatro mecanismos básicos que reconocen sus orígenes en causas meteorológicas, por los que se pueden producir apartamientos (y en particular incrementos) ocasionales de los niveles debidos a causas puramente astronómicas: a) Por reducción de la presión atmosférica. B) por efecto de vientos soplando hacia la costa. C) por el

peralte de origen geostrófico (fuerzas de Coriolis) actuando sobre corrientes paralelas a la costa, generadas por vientos en esa dirección. D) por efecto del paso de las olas.

La sobreelevación por efectos meteorológicos es un fenómeno complejo que involucra muchas variables meteorológicas y no resulta de estimación sencilla. Una manera de determinarla es como diferencia entre la marea registrada y la marea astronómica predicha para el mismo lugar. En la **Tabla 2.13.** se presenta una estimación a partir de mediciones en el Yacimiento Cullen (ver [1.3.6.] y ubicación **A** en la **Figura 1**) en función de la recurrencia R:

Tabla 2.13. - Marea meteorológica

R (años)	Ss (m)
1	0.50
5	0.80
10	0.90
50	1.00

Se dispuso además de registros del nivel del mar realizados por el SHN, obtenidos mediante un mareógrafo instalado en el muelle de la Prefectura Naval Argentina en el estuario del Río Grande. (Anexo II).

La serie de valores máximos mensuales registrados entre enero de 1966 y diciembre de 1980 presenta importantes discontinuidades y se compuso de un total de 93 datos (Anexo I). El máximo registrado en el período indicado es de +8.83 m, es decir solamente 13 cm por encima de la marea astronómica máxima correspondiente a Pleamares de Sicigias Equinocciales de Perigeo.

La serie de valores fue ajustada mediante una distribución de valores extremos de Weibull. Se consideraron solamente valores de nivel del mar superiores a 8.60 m. En la **Figura 4** se muestran los datos y el ajuste. La **Tabla 2.14.** muestra los niveles máximos de marea astronómica que surgen del análisis de éstos datos.

Tabla 2.14.

Tr (años)	NM (m)
5	8.85
10	8.90
20	8.96
25	9.00
50	9.03
100	9.08

Según esta estimación, para un período de retorno de 25 años el máximo nivel probable del mar resulta 9.00 m. Este valor incluye efectos meteorológicos que, por diferencia con la marea astronómica predicha para esta ubicación entonces resultan estimados en 0,30 m.

Debe recordarse que en Río Grande el máximo nivel del mar por efectos astronómicos varía, según la época del año, entre +5.60 m y +8.70 m, siendo las pleamares medias de Sicigias y Cuadraturas de +7.80 m y +6.40 m respectivamente.

La probabilidad combinada de la máxima marea astronómica de +8.70 con una sobreelevación por efecto meteorológico del orden de +0.80 a 1.0 m es muy reducida, y es posible que esta sea la razón por la que no ha sido observado un nivel del mar mayor que +8.83 en 14 años de registro (con interrupciones).

2.5.3. Calentamiento Global

La creciente acumulación de dióxido de carbono y otros gases (metano, clorofluorocarbonos, etc.) en la atmósfera, producidos por la actividad humana y conocido como “efecto invernadero”, es una posible causa de incremento de las temperaturas medias de la atmósfera, las que según las tendencias actuales podrían elevarse en algunos grados Celsius en los próximos 100 años.

Algunos estudios han concluido en que, como consecuencia de los cambios climáticos, el nivel medio del mar se ha incrementado a un ritmo de 1.0 a 1.5 mm/año a partir de 1880. (**Ref.[A1]**). Otros autores han encontrado un ritmo de incremento de 2.0 mm/año en los últimos 50 años.

Algunos investigadores han explicado la tendencia de aumento del nivel del mar como consecuencia de la expansión térmica de las capas superiores del océano, resultado a su vez del calentamiento global de 0.4°C que se ha observado en el último siglo, el que puede explicar un aumento de 0.4 a 0.5 mm/año en el nivel medio del mar.

El incremento de las temperaturas medias globales también puede ser causa de un incremento en las tasas de fusión de casquetes polares y glaciares, lo que constituiría un factor adicional en el incremento del nivel medio del mar. Mayores temperaturas inducirán una mayor presencia de vapor de agua en la atmósfera, que también es un gas invernadero, generándose una aceleración del proceso.

La proyección a futuro de esta situación es compleja por la naturaleza intrínseca del problema y por la dificultad de estimar en qué medida los países serán capaces de limitar o restringir sus emisiones de gases invernadero, y de qué manera ello afecta la temperatura media global. Todas las proyecciones se basan en la continuidad de las actuales tendencias de emisión.

Algunos investigadores (**Ref.[A3]**) han utilizado modelos que han permitido establecer que un calentamiento global de 1 a 2.6°C resultará en una expansión térmica que provocará una sobre elevación del nivel medio del mar de 12 a 26 cm hacia el año 2050. Para el año 2100, un aumento de temperatura de 2.3 a 7.0°C resultará, según esta estimación, en una sobre elevación del nivel medio del mar de 28 a 83 cm.

La contribución de la fusión de masas de hielo es más incierta. Algunos autores indican como, probables valores de 28 cm para el 2050 como contribución del continente Antártico, y en la hipótesis de un incremento de temperatura media de 3°C, y de 20 a 80 cm para el 2100.

La **Tabla 2.15** presenta resultados de estimaciones realizadas por diversos autores. Puede notarse la variabilidad y dispersión de resultados.

Más recientemente (Enero 2001) el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) de las Naciones Unidas ha estimado proyecciones a futuro de entre 3 a 5.8°C para el año 2100, y una sobreelevación del nivel medio del mar de hasta 1 m para esa fecha.

Tabla 2.15 Sobreelevación del nivel del mar (cm) por efecto invernadero

Autor		Año				
		2025	2050	2075	2085	2100
Revelle		-	-	-	70	-
Hoffman	Bajo	13	23	38	-	56
	Bajo medio	26	53	91	-	144.4
	Alto medio	39	79	137	-	216.6
	alto	55	117	212	-	345
Hoffman	Bajo	10	20	36	44	57
	alto	21	55	191	258	368

2.5. Geomorfología Costera

La línea costera comprendida entre Cabo San Sebastián y el Cabo Peñas, de unos 80 Km de desarrollo, presenta una alineación con rumbo marcadamente NW a SE, y una forma suavemente cóncava.

Las obras de defensa que se proyecta ejecutar estarán emplazadas en dos tramos costeros de características marcadamente diferentes: un frente oceánico rectilíneo, donde prepondera la acción del oleaje en mareas altas, y un frente fluvial estrechamente ligado al sistema sedimentario de la Punta Popper, de características fuertemente dinámicas desde el punto de vista morfológico, sujeto a intensas corrientes de flujo y reflujos en correspondencia con la propagación de la onda de marea que en la región presenta grandes amplitudes (**Figura 2, Foto 1**)

Para la descripción del entorno costero en que se ubicarán las obras desde el punto de vista sedimentológico se han seguido fundamentalmente los estudios efectuados por Bujalesky ([1.1.3] y [1.2.6.]) referentes a la Punta Popper y los del INA vinculados tanto al diagnóstico de falla del muro costanero construido en 1991 ([1.1.4.]), como al proyecto de una descarga cloacal en el área ([1.2.3.]) y al proyecto portuario de Caleta La Misión ([1.2.4.]).

Sobre el frente oceánico, entre Cabo Domingo y Cabo Peñas se desarrolla una plataforma de abrasión (la restinga) de extensión variable entre 800 y 3000 m, y que resulta expuesta en bajamar. Durante las mareas altas la restinga resulta cubierta por el agua y permite la propagación hasta la costa de las olas. La limitación de profundidad y los efectos de fricción del fondo por efecto de esta plataforma favorecen su decaimiento y rotura de las olas. La playa resulta de esta manera relativamente protegida de la acción de las olas en una región en la que los temporales son frecuentes e intensos.

Sobre el litoral atlántico, el tramo costero analizado se caracteriza por la existencia de amplias playas de gravas finas y medianas y arenas de granulometría variada. Bujalesky ([1.2.6.]) reconoce en el perfil de playa del frente marítimo cuatro zonas: a) La playa de tormenta, alcanzada solamente por las olas de temporal en ocasiones de mareas altas, y compuesta de grava y arenas medianas y gruesas. B) zona intermareal alta, sometida a la acción de olas durante todo el año compuesta de materiales y pendientes similares, de 5° a 7° y extensión de

unos 40 m. C) zona intermareal baja arenosa compuesta de arena fina y mediana, pendiente 1° y extensión de unos 70 m y D) zona intermareal baja fangosa compuesta de limos y arcillas que cubren la extensa plataforma de abrasión con pendientes inferiores a 1°.

En el tramo costero al norte de la desembocadura del río Grande el transporte litoral tiene una componente neta hacia el SE ([1.2.4] y [1.2.6.]), característico en de la región meridional de la Patagonia, y puesto en evidencia en el crecimiento hacia el Sur de puntas de acreción, entre las que cabe destacar particularmente la Península El Páramo en Tierra del Fuego, que ha crecido unos 20 Km en esa dirección, cerrando parcialmente la Bahía San Sebastián. Entre Cabo San Sebastián y Cabo Peñas también es posible observar el desarrollo de cordones litorales de grava que han producido la migración de las desembocaduras de ríos y arroyos hacia el Sur (Arroyo Gama, Río Chico, Arroyo la Misión).

Entre Cabo Domingo (15 Km. al NW) y la desembocadura del río Grande, se desarrolla una planicie de cordones litorales paralelos a la actual costa que manifiestan el sentido de crecimiento hacia el SE, internándose en el estuario del Río Grande. (Bujalesky)

La fuente de suministro de material sedimentario que compone el transporte litoral estaría ubicada en los acantilados de la zona de Cabo San Sebastián, los que presentan un fuerte proceso de retrogradación esencialmente por efecto de la erosión marina ([1.2.4.]) sobre la base de un acantilado que presenta una muy débil cohesión. Los valores de retroceso medios indicados por Malagnino (Ref.[A1]) varían de 0,13 a 0,76 m/año. Esta intensa degradación de los acantilados, sumada a la existencia de un régimen de olas oceánicas con dirección de incidencia preponderantemente del N y NE, inducen el desarrollo de un intenso transporte litoral con una componente neta que se dirige desde el NW hacia el SE.

De esta manera las playas comprendidas entre Cabo San Sebastián y la desembocadura del río Grande estarían en condiciones de mantener un

equilibrio dinámico a largo plazo, siendo alimentadas con aportes de sedimentos desde el NW.

El Río Grande desemboca en el océano atlántico a través de una depresión en la plataforma de abrasión, que conforma un canal de dirección variable. La marea, de gran amplitud en la región, penetra en el estuario del río hasta unos 20 Km aguas arriba. Aunque el Río Grande tiene un caudal medio reducido (ver **2.3.**) el prisma de marea induce corrientes intensas entrantes o salientes en la desembocadura del orden de 1 a 2 m/s. Los sedimentos que se movilizan desde el NW hacia el SE a lo largo de la costa atlántica son forzados a ingresar al estuario por la acción de olas y corrientes en marea creciente desplazándose a lo largo de la margen septentrional.

En marea bajante los sedimentos son transportados hacia el mar y depositados sobre la Punta Popper. El flujo de la marea bajante en el estuario actúa como una barrera hidrodinámica desviando la corriente de deriva litoral hacia el mar y originando una celda de recirculación en sentido dextrógiro, opuesto localmente al sentido general de circulación de los sedimentos. De esta manera, la costa atlántica de la Punta Popper presenta una deriva litoral de SE a NW. En fotografías aéreas puede observarse el crecimiento de la espiga y el avance de la línea de costa en dirección al NE. Esto ha forzado al río Grande a torcer la dirección de la desembocadura en dirección N, formando un extenso meandro.

En la playa interna de la Punta Popper las corrientes y las olas generadas sobre el estuario por los vientos del W transportan los sedimentos hacia su extremo produciendo su elongación.

Mar adentro, los agentes hidrodinámicos que movilizan los sedimentos pierden su capacidad de transporte, favoreciendo la depositación de los mismos. Como consecuencia de ello se ha desarrollado un extenso sistema de bancos submareales.

Bujalesky ha realizado un análisis e interpretación de la evolución histórica de la Punta Popper, indicando la existencia de ciclos de elongación y rotura de la espiga por los efectos combinados de olas y corrientes. En la **Figura 5** se muestran planimetrías de la Punta Popper desde 1945, tomadas de **[2.1.6]**.

En particular señala que el ancho de la desembocadura sufre reducciones importantes por crecimiento de la espiga, lo que induce el desarrollo de corrientes más intensas en la marea bajante y la erosión de la costa septentrional del río en la desembocadura. Esta situación también ha sido señalada en estudios realizados por el INA y resulta particularmente importante pues es la zona de emplazamiento de un tramo de las obras de defensa proyectadas. En la **Figura 6** (tomada de **[2.1.6]**) se presenta una estimación de la sección transversal de descarga del río en función del tiempo. Puede notarse que en 1991 la sección transversal del río en su desembocadura presentaba sus valores mínimos y ha sido señalado por el INA como una de las causas que aceleraron el colapso del muro costanero construido en esa época.

El diagnóstico formulado por el INA en relación al muro costanero construido en 1991 indicó (**[1.1.4]**) la existencia de un desbalance longitudinal en el transporte de sedimentos a lo largo de la margen norte del río Grande, situación estrechamente vinculada a la morfología de la Punta Popper y a las intensas corrientes de marea generadas en la desembocadura. Un sistema de espigones precarios construidos en 1993 para preservar el muro dañado, mostró ser efectivo en su capacidad de retener sedimentos y permitir la recuperación del perfil de la playa, con el consiguiente beneficio para la estabilidad del muro.

2.6. Perfiles de playa

Como parte de los estudios de base a realizarse vinculados al proyecto la Municipalidad de Río Grande realiza el relevamiento de 40 perfiles transversales de la zona costera a lo largo de la traza del muro. Se ha previsto la realización de

algunos perfiles de mayor extensión a los efectos de caracterizar la altimetría de la restinga.

Entre octubre de 1992 y marzo de 1993 la Municipalidad de Río Grande efectuó relevamientos de perfiles de playa ([1.1.3.] y [1.1.4]) desde la costa atlántica hasta el interior del río y la playa atlántica de la Punta Popper. En el tramo fluvial la pendiente media de los perfiles es del orden de 10 a 12%. Las conclusiones de la comparación de perfiles fue que la playa atlántica ubicada al norte de la desembocadura mostró una tendencia a la depositación mientras que la margen izquierda (norte) del río mostró tendencias erosivas. Los perfiles de playa relevados y su ubicación planimétrica se encuentran en [1.1.3].

Un perfil de playa y batimétrico relevado por el INCYTH (actualmente INA) en 1986, ubicado a la altura del barrio Chacra II y que abarca una gran extensión de la restinga se presenta en la **Figura N° 7**.

2.7. Características del terreno

Se ha previsto la realización de un estudio de suelos a lo largo de la traza de la obra, el que será ejecutado en el curso de la Segunda Etapa del Proyecto.

2.8. Sismología

La región de Río Grande se encuadra en la categoría de zona sísmica moderada de nivel 2. El Municipio de la ciudad se adhiere a las normas SIREA/CIRSOC.

3. CONDICIONES HIDRODINAMICAS

3.1. Consideraciones generales

Para la realización del proyecto de las obras de defensa deben cuantificarse una serie de variables que lo determinan. Las mismas pueden agruparse según se refieran a aspectos estructurales, funcionales, ambientales, arquitectónicos, urbanísticos, etc.

El objetivo central del presente Informe ha sido determinar aquellas variables vinculadas con las condiciones hidrodinámicas y sedimentológicas en la región de emplazamiento de las obras.

Para caracterizar valores de proyecto de aquellas variables que describen las condiciones físicas naturales del medio en que se ubicará la obra, es necesario establecer en primera instancia un período de retorno para aquellas variables de carácter estadístico, con vistas a determinar el valor máximo que la misma pueda adquirir ese lapso.

3.2. Período de retorno

El período de retorno de un determinado valor de una variable es el lapso en el cual es probable que dicho valor sea igualado o superado al menos una vez. El período de retorno de proyecto estará asociado al tipo de obra, su reserva de resistencia en caso de superarse el valor de diseño, y aspectos funcionales como por ejemplo el riesgo para el área protegida cuando se igualan o superan los valores de diseño. Es posible escoger períodos de retorno diferentes para distintos grupos de variables. La adopción de un período de retorno determinado deberá efectuarse teniendo en cuenta además factores económicos.

Para la definición de los escenarios de cálculo se ha escogido en esta etapa

un período de retorno para las variables estadísticas de 25 años.

3.3. Condiciones Hidrodinámicas

Para la determinación de la altura de ola incidente sobre las obras de defensa a proyectar, se han considerado dos tramos de costa de características marcadamente diferentes, y en los que se han utilizado técnicas de resolución distintas, en función de las hipótesis de cálculo necesarias en cada caso.

El **frente oceánico** está constituido por una costa rectilínea, precedida de una plataforma rocosa de muy poca pendiente y gran extensión, que resulta sumergida para mareas altas. La propagación de olas desde aguas profundas hacia zonas costeras produce modificaciones en algunos de sus parámetros característicos, tales como la dirección de propagación, la celeridad y longitud de la onda y su amplitud, proceso que en términos generales se denomina refracción. En su fase final de aproximación a la costa, en aguas de limitada profundidad se produce disipación de la energía por fricción con el fondo rocoso al propagarse las olas a lo largo de una distancia de 1000 y 3000 m de restinga. Finalmente la rotura en la playa implica una fuerte y localizada disipación de la energía portada por la onda. Según lo expuesto, se asume que la energía de las olas se propaga esencialmente en la dirección del movimiento, siendo despreciables tanto la reflexión como la difracción (transferencia lateral de la energía). Las características de las olas que se propagan hacia la zona de emplazamiento de las obras de defensa resultan dadas por los fenómenos de refracción, bajío y rotura de las olas.

La refracción de olas puede ser planteada matemáticamente y resuelta mediante técnicas computacionales. El modelo matemático de refracción de olas aplicado en este estudio se describe en 3.3.1.1. a 3.3.1.8. En la zona costera y playa se modeló la propagación de la ola a lo largo de un perfil perpendicular a la línea de costa, lo que se describe en 3.3.1.4.

En el **tramo fluvial** los fenómenos de difracción y reflexión de las olas no son despreciables, debido a la morfología de la costa y la presencia de los bancos y la Punta Popper, por lo que la distribución de altura de ola a lo largo de este tramo de costa se computó mediante el sistema DIFRAC, desarrollado en el LHA, y cuya implementación y resultados se describen en 3.3.2.

3.3.1. Frente Oceánico

3.3.1.1. Refracción de olas

El modelo de refracción de olas es una herramienta adecuada para resolver la propagación de olas en regiones extensas, donde los procesos físicos dominantes permiten despreciar el efecto de la reflexión y la difracción de las olas: la energía de las olas se propaga esencialmente en su dirección de avance. En estas áreas costeras es el lecho marino el que modifica gradualmente la altura y dirección de propagación de las olas cuando las profundidades son relativamente pequeñas respecto de la longitud de onda.

A partir de la caracterización del clima de olas indicado en el Capítulo 2, el modelo matemático fue utilizado para trasladar esta información hasta las proximidades de la costa en Río Grande.

La modelación fue utilizada específicamente para determinar la altura de ola a lo largo de la costa donde se proyecta la defensa costera, a los efectos de definir condiciones de diseño para la misma.

3.3.1.2. Hipótesis básicas

Se considera una onda caracterizada por su periodo T , su longitud L (separación entre dos crestas sucesivas) y una celeridad C , es decir la velocidad de avance de la onda. Las dos últimas dependen de la profundidad d en la que la misma se propaga. Si la celeridad de la onda es distinta en distintos puntos a lo

largo de su cresta originalmente rectilínea, ésta se deforma, curvándose.

Se denomina rayo a la trayectoria que describe un punto ubicado sobre la cresta de la onda, y que avanza con celeridad C perpendicularmente a la orientación local de la cresta de la ola. El modelo matemático de rayos permite el cómputo de la trayectoria de estos puntos y la altura de ola a lo largo de esa trayectoria. La hipótesis básica para plantear el modelo de propagación es que la energía de la ola (proporcional al cuadrado de su altura H) se mantiene constante entre dos rayos próximos.

La teoría lineal de ondas de pequeña amplitud permite establecer la siguiente relación entre la celeridad $C = L/T$ y la profundidad d en que la onda se propaga, denominada relación de dispersión:

$$\omega^2 = g.k.tanh(k.d) \quad 3.1$$

en la que $\omega=2\pi / T$ es la frecuencia angular, T el período, $k = 2\pi / L$ el número de onda y L la longitud de onda. $Tanh()$ es la función tangente hiperbólica.

Considerando un sistema cartesiano de coordenadas (X,Y) y siendo θ el ángulo entre la dirección local de un rayo en puntos de coordenadas (x_i,y_i) y el eje X , la ley de Snell de la óptica es aplicable y valen las siguientes relaciones entre dos puntos 1 y 2 ubicados sobre la trayectoria de un mismo rayo:

$$\frac{L_1}{L_2} = \frac{\text{sen}(\theta_1)}{\text{sen}(\theta_2)} \quad ; \quad \frac{\beta_2}{\beta_1} = \frac{\text{cos}(\theta_2)}{\text{cos}(\theta_1)} \quad 3.2$$

donde β es la separación entre dos rayos próximos.

La conservación de la energía entre dos rayos próximos, separados por una distancia β , se expresa como:

$$\beta_1 \frac{\gamma H_1^2 L_1 n_1}{8} = \beta_2 \frac{\gamma H_2^2 L_2 n_2}{8} \quad 3.3$$

donde

$$n = \frac{1}{2} \left[1 + \frac{4\pi d / L}{\sinh(4\pi d / L)} \right] \quad 3.4$$

Así la relación entre las alturas de ola entre dos puntos sucesivos de un rayo resulta:

$$H_2 = H_1 \sqrt{\frac{L_1 n_1}{L_2 n_2}} \cdot \sqrt{\frac{\beta_1}{\beta_2}} \cdot H_1 = K_s \cdot K_r \cdot H_1 \quad 3.5$$

donde K_s y K_r son respectivamente los coeficientes de bajío y refracción.

Puesto que L_1 y L_2 , n_1 y n_2 dependen de las profundidades en los puntos 1 y 2, el cálculo de K_s es inmediato.

Finalmente, consideraciones cinemáticas permiten formular las siguientes relaciones entre los desplazamientos dx , dy , ds (éste último a lo largo de la trayectoria de un rayo), el intervalo de tiempo dt y la celeridad C :

$$\frac{ds}{dt} = C \quad ; \quad \frac{dx}{dt} = C \cos \theta \quad ; \quad \frac{dy}{dt} = C \sin \theta$$

$$\frac{d\theta}{ds} = \frac{1}{C} \left(\frac{\partial C}{\partial x} \sin \theta - \frac{\partial C}{\partial y} \cos \theta \right) \quad 3.6$$

Para el cálculo de K_r es necesario determinar la separación β . Esto es posible mediante la resolución de la siguiente ecuación diferencial de segundo orden, basada en la conservación de la energía entre rayos:

$$\frac{d^2 \beta}{ds^2} + p(s) \frac{d\beta}{ds} + q(s) \beta = 0 \quad 3.7$$

Donde los coeficientes $p(s)$ y $q(s)$ se expresan en función de la celeridad C y el ángulo θ como:

$$p(s) = -\frac{\cos \theta}{C} \frac{\partial C}{\partial x} - \frac{\sen \theta}{C} \frac{\partial C}{\partial y} \quad 3.8$$

$$q(s) = \frac{\sen^2 \theta}{C} \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - 2 \frac{\sen \theta \cos \theta}{C} \frac{\partial^2 C}{\partial x \partial y} + \frac{\cos^2 \theta}{C} \frac{\partial^2 C}{\partial y^2}$$

Las ecuaciones indicadas se plantean en un esquema en diferencias finitas y el cálculo se inicia en un punto de coordenadas x_0, y_0 donde se conoce la altura de ola y el ángulo θ . A partir de esta condición inicial la solución avanza a lo largo de sucesivos puntos de un mismo rayo mediante el cálculo de θ , x , y (ec. 3.6.), β (ec. 3.7), K_r , K_s y H (ec. 3.5).

Una descripción completa del modelo utilizado, de las hipótesis de base y de las técnicas de resolución numérica utilizadas se da en la **Ref.[A2]**.

3.3.1.3. Implementación

El cálculo se realiza sobre una región rectangular en la que se dispone de la información batimétrica en posiciones o nodos equidistantes.

Para ello se define un sistema cartesiano de coordenadas X, Y , en el que cada nodo resulta separado de otros por una distancia Δx y Δy , conformando una grilla de cálculo. La profundidad correspondiente a cada nodo de la grilla se obtuvo de las cartas náuticas y relevamientos batimétricos indicados en el Capítulo 1.

El cálculo se efectúa a partir de un borde de la región, en el que se conocen las

condiciones iniciales: altura de ola H y la dirección de propagación θ , definida ésta a partir del eje $+X$, en sentido antihorario.

Dada la extensión de la región de estudio, el cálculo se efectuó en dos regiones anidadas, la segunda con una con menor extensión y menor separación entre nodos que la primera, de manera de asegurar una adecuada resolución en el entorno de la zona de interés, donde además la conformación del lecho marino es más compleja y cambiante, y requiere en consecuencia de mayor densidad de información.

La primera grilla de cálculo representó una región de 300 Km x 200 Km, con el eje $+Y$ orientado hacia el NW y el eje $+X$ hacia el NE. Las profundidades en los nodos se basaron en las Cartas Náuticas del SHN. La separación entre nodos fue $\Delta x = \Delta y = 2500$ m.

La segunda grilla consistió en una región de 44500 m x 50000 m (90 x 101 nodos) con el eje $+Y$ orientado hacia el NW y el eje $+X$ hacia el NE. La separación entre nodos fue $\Delta x = \Delta y = 500$ m y las profundidades en los nodos fueron obtenidas a partir de Cartas del SHN.

En la **Figura 8** se muestra la posición, dimensiones relativas de las grillas 1 y 2 como así también las líneas batimétricas que describen la conformación del lecho marino. La grilla 1 utilizada en la modelación se muestra en la **Figura 9**.

En la grilla 2 (**Figura 10**) se ha agregado un segmento de recta que representa aproximadamente la isobata de 3 m frente al tramo de costa de interés.

El cálculo se inició en el borde exterior de la grilla 1, donde se conocen la altura de ola y dirección de propagación y donde puede suponerse que el frente de onda es rectilíneo dadas las grandes profundidades. En cada caso se propagaron grupos de 10 rayos simultáneamente, con separaciones del orden de 50 a 100 m, según el

caso. El paso de tiempo para el cálculo de sucesivos puntos de un rayo fue del orden de los 5 a 20 segundos en la grilla 1 y de 3 a 5 segundos en la grilla 2. Cada rayo estuvo compuesto de aproximadamente 1000 puntos de cálculo.

3.3.1.4. Cálculo en Región Costera

El modelo de refracción descrito en 3.3.1.1. y 3.3.1.2. fue aplicado, bajo distintos escenarios de cálculo que se describen en 3.3.1.5, hasta un tramo de la costa de unos 4000 m de longitud correspondiente al borde exterior de la restinga que se desarrolla sobre el frente atlántico cuyos extremos se identifican en **la Figura 10** como **A** y **B**. Como se ha indicado, el cálculo mediante el modelo de rayos se realizó hasta la isobata de 3 m (SHN), obteniéndose a lo largo de este segmento imaginario, la altura de ola y su dirección de propagación .

A partir de allí, y hasta la playa, se abordó el cálculo en forma unidimensional, computándose la propagación de las olas a lo largo de un perfil perpendicular a la costa. Desde el punto de vista del cálculo, esto es posible pues en el tramo analizado la costa es rectilínea, y las líneas batimétricas son francamente paralelas entre sí, lo que permite introducir algunas hipótesis simplificadoras para la evaluación de los procesos de refracción y bajío.

El cálculo sobre un perfil definido ofrece la ventaja de permitir la incorporación de la batimetría del mismo con todo detalle, y el cálculo preciso de la altura de ola en las zonas en donde se producen rápidas variaciones del perfil de la playa, esto sin la necesidad de una tercera grilla de detalle y tiempos de cómputo más prolongados.

Para el cálculo se adoptó un perfil relevado en 1986 ([1.2.3.]) el que se muestra en la **Figura 7**. Si bien el perfil no corresponde estrictamente al área donde se proyecta la obra de defensa, dada su proximidad y la homogeneidad morfológica de este tramo de costa, el mismo ha sido considerado representativo de la misma y los resultados se ajustarán cuando se disponga de los perfiles

específicos, cuyo relevamiento ha sido previsto para la realización del proyecto.

Se incorporó, en este tramo, el cálculo de la rotura de la ola y la sobreelevación del nivel del agua por el paso de la ola, S_w (set-up). Esto es particularmente importante en la región costera comprendida entre la línea de rompiente y la costa, donde la sobreelevación del nivel medio (respecto del nivel de agua en reposo) por la presencia de las olas rompientes modifica de modo considerable la altura de ola en la playa y debe ser considerado en el proyecto de las obras de defensa.

3.3.1.5. Sobreelevación por paso de las olas

El alzamiento o set-up es la variación del nivel medio del mar como consecuencia de la variación de la altura de ola a medida que se propaga hacia la playa, especialmente después de la rotura. Una formulación simple del problema permite estimar la variación de nivel medio del mar en la línea de playa en función de la altura de ola rompiente H_b . El set-up se mide desde la posición del nivel del agua en reposo y una expresión simple para su estimación en la línea de playa es:

$$S_w = 0.25 \approx 0.30H_b$$

Esto indica la importancia del problema, si se tiene en cuenta que para las condiciones extremas del mar pueden presentarse olas rompientes del orden de los 7 m. Aunque ésta rompiente se producirá lejos de la playa, inducirá una sobreelevación del nivel de agua del orden de 1.50 m a 1.80 m permitiendo la propagación sobre la restinga de olas más altas.

El cómputo del set-up (S_w) a lo largo del perfil de playa se realizó mediante la ecuación que expresa el balance de fuerzas entre dos secciones sucesivas a lo largo del perfil:

$$\frac{dS_{xx}}{dx} = -\rho g D \frac{dS_w}{dx}$$

donde:

- ρ y g son respectivamente la masa específica del agua y la aceleración de la gravedad,
- S_{xx} la tensión radiante ejercida por el paso de las olas en la dirección x , normal a la playa, y que es función de la altura de ola.
- D es la profundidad del fondo bajo el nivel del agua en reposo.
- Sw es negativo (set-down) antes de producirse la rotura de la ola y positivo (set-up) entre la rompiente y la costa.

3.3.1.6. Rotura

Para el cálculo de la rotura de la ola, se adoptó la metodología propuesta por Goda (**Ref. [A3]**) para determinar la altura de ola significativa H_s al pie de las obras de defensa. El modelo de Goda tiene en cuenta que, por su carácter de distribución espectral, las olas que se propagan hacia la costa son alteradas por la presencia del fondo de manera diferente según la frecuencia y amplitud de la componente de la que se trate. De esta manera el espectro de densidad de energía y por lo tanto la altura significativa H_s de las olas, no mantiene una relación lineal al pasar a aguas poco profundas y al producirse la rotura de parte de sus componentes.

$$H_s = K_s H_o \quad \text{para } d / L_o > 0.2$$

$$H_s = \min \{ \beta_o H_o + \beta_1 d, \beta_{max} H_o', K_s H_o \} \quad \text{para } d / L_o < 0.2$$

$$\beta_o = 0.028 \left(\frac{H_o}{L_o} \right)^{-0.38} \exp[20 \tan^{1.5} \theta]$$

$$\beta_1 = 0.52 \exp[4.2 \tan \theta]$$

$$\beta_{max} = \max \left\{ 0.92, 0.32 \left(\frac{H_o}{L_o} \right)^{-0.29}, \exp[2.4 \tan \theta] \right\}$$

donde K_s es el coeficiente de bajío (shoaling), $H'o=H / K_s$, β_o , β_1 y β_{max} son funciones de la pendiente del lecho marino θ y de la pendiente de la ola $H'o/L_o$. L_o

es la longitud de onda en aguas profundas y h la profundidad local donde se estima H_s . La función $\min\{ \}$ indica el valor mínimo de los parámetros entre llaves.

3.3.1.7. Escenarios de cálculo

De acuerdo a lo indicado en 2.5. se adoptó como máximo nivel del mar al correspondiente a la pleamar de Sicigias Equinociales de Perigeo, (+ 8.7 m) con el agregado de 0.80 m por acción meteorológica y 0.25 m como sobreelevación por efecto invernadero estimado para 25 años. Referido al plano de reducción del SHN, esto resulta en un nivel máximo del mar de +9.75 m.

Para las olas, se adoptó la estadística correspondiente al Proyecto Carina (**Tabla 2.8**). Esto se fundamentó en la extensión en tiempo de los registros, en su ubicación respecto del tramo de costa donde se proyecta la obra de defensa (al NE, que es la dirección de procedencia de las olas más intensas), y además por contener una buena descripción direccional del clima de olas.

En virtud de los requerimientos de protección se escogió como período de retorno de proyecto $R = 25$ años. En consecuencia y utilizando las relaciones 3.1. para su determinación, los valores de altura de ola en mar abierto para el cálculo de refracción resultaron según se indica en la **Tabla 3.1**. El período correspondiente a cada situación se obtuvo de los valores tabulados en las **Tablas 2.4. a 2.6**.

Tabla 3.1 – Valores de proyecto

Dirección	H_s (m)	T_s (s)	NM (m)
N	6.1	12	9.75
NE	6.6	12	9.75
E	6.6	12	9.75

En la **Tabla 3.2** se da un listado de las 6 situaciones para las que se realizaron cálculos de refracción de olas. En todos los casos se adoptó la altura de ola en aguas profundas correspondiente a una recurrencia de 25 años que surgen de la **Tabla 2.10**.

Tabla 3.2. – Escenarios de cálculo de refracción de olas

Escenario	Dir	NM	Hs	T
1	NE	+9.75	6.6	12
2	NE	+9.75	6.6	10
3	NE	+9.75	6.6	14
4	N	+9.75	6.1	12
5	E	+9.75	6.6	12
6	NE	+9.00	6.6	12

Para el cálculo detallado en la región costera se utilizó el perfil de costa indicado en la **Figura 7**, el que fue discretizado mediante valores de cota cada 2 a 50 m según la variación de la profundidad.

3.3.1.8. Resultados

3.3.1.8.1. Refracción de olas

Los resultados se presentan agrupados primero para la región general (modelo matemático de rayos), bajo la forma de gráficos que muestran las trayectorias de los rayos (**Figuras 11 a 16**). La reducción de la distancia entre rayos indica crecimiento de la altura de ola. En las **Figuras 17.a a 17.f** se indica la altura de ola resultante sobre un segmento imaginario ubicado paralelamente a la costa, sobre la isobata 3 m (SHN) (**Figura 10**). En estos gráficos la progresiva se mide sobre el segmento de recta A-B a partir del extremo A.

Para la dirección NE (Casos 1, 2 y 3, **Figuras 17.a, b y c** respectivamente) puede notarse un patrón de distribución de altura de ola similar, con máximos de hasta 6,60 m entre progresivas 4000 a 5000 m. En el caso 2 la distribución longitudinal resulta más homogénea debido al menor período (10 segundos) de las olas. Por la misma razón, el caso 3 (T=14 s) los efectos de refracción son más marcados que en el caso 1 (T=12 s).

Las direcciones N y E (casos 4 y 5, **Figuras 17.d** y **e** respectivamente) producen alturas de ola del orden de los 6 m como máximo, lo que fundamenta en principio la elección de la dirección NE como el caso más crítico para las obras de defensa.

Finalmente en la **Figura 17.f** se ha graficado la distribución longitudinal de altura de ola para el caso de olas del NE, $T=12$ s y un nivel de agua de 9.50 m, lo que permite evaluar, por comparación con el caso 1 (Nivel del mar = 9.75 m), la sensibilidad al nivel de agua adoptado. Puede notarse que, en esta región, los resultados son equivalentes. No será así en el último tramo de cálculo, hasta llegar a la playa, en cuyo caso el nivel del mar determinará las condiciones de rotura de las olas. Sin embargo, los resultados de refracción de olas en la zona exterior serán válidos y podrán utilizarse como datos de entrada en el cómputo del perfil en la región costera aún con distintos niveles de mar.

3.3.1.8.2. Región Costera

En la región costera, como se indicó más arriba, el cálculo se efectuó sobre un perfil perpendicular a la playa, sobre el que se indican, la profundidad local D_0 bajo el nivel de agua en reposo (que incluye la marea astronómica y la meteorológica) la sobreelevación por el paso de la ola Sw (set-up / set-down), la profundidad total resultante D .

En las dos últimas columnas de la **Tabla 3.3** que se presenta a continuación, se indican la altura significativa H_s y el ángulo α entre la dirección de propagación de la ola y el perfil. El cálculo se efectuó para el Escenario 1 (NE, $T=12$ s). En la isobata de 3 m de profundidad la altura de ola fue de 6,60 m, de acuerdo al resultado de refracción presentado en la **Figura 17.a**.

La progresiva corresponde a la del perfil relevado, cuyo origen de coordenadas está ubicado sobre la playa (**Figura 7**).

Tabla 3.3.

Dir	Parámetro			Prog. (m)	Do (m)	Sw (m)	D (m)	Hs (m)	α (°)
	Ho (m)	T (s)	NM (n)						
NE	6.6	12	9.75	66	0.06	1.13	1.19	1.37	0
				68	0.20	1.10	1.30	1.44	0
				70	0.32	1.08	1.40	1.49	0
				76	0.75	1.01	1.76	1.68	0
				100	1.65	0.88	2.53	2.09	0
				150	2.25	0.87	3.12	2.37	0
				200	4.05	0.59	4.64	3.21	0

La **Figura 18** muestra el perfil de altura de ola y nivel del mar en el perfil de playa adoptado para el cálculo.

3.3.2. Tramo Fluvial

El tramo fluvial está constituido por la desembocadura del río Grande en el mar, la que conforma un estuario cerrado parcialmente por la Punta Popper. Para abordar la solución del problema de propagación de olas en esta región, la desembocadura del río fue asimilada a un recinto cuasi cerrado delimitado por un contorno constituido por ambas márgenes del río y la Punta Popper, y un borde matemático por el cual se produce el ingreso de las olas oceánicas.

3.3.2.1. Modelo Matemático DIFRAC.

El modelo matemático básico de agitación fue desarrollado por Berkhoff (Ref.[A4]). Combinando su “ecuación para los taludes suaves” con apropiadas condiciones de borde, es posible simular adecuadamente cualquier problema práctico, una vez definida la ola incidente.

La solución del problema matemático planteado se encara, en general, por el

método de los elementos finitos, especialmente apto para problemas diferenciales elípticos. La red de cálculo se genera de modo de, por un lado, ajustarse al área de cálculo y, por el otro, tener un paso suficientemente pequeño respecto de la longitud de onda de la ola más corta, de modo de representarla adecuadamente.

Como solución, el modelo de Berkhoff provee la distribución espacial de alturas de ola, que es el resultado de interés ingenieril y, eventualmente, el campo de direcciones de propagación.

El LHA dispone del programa DIFRAC (**Ref.[A5]**), que tiene implementada la metodología descripta.

En los campos de olas generados por vientos, la energía se presenta distribuida en función de la frecuencia de cada componente, denominándose esta función el espectro de frecuencias. El modelo de Berkhoff puede resolver estas situaciones apelando al principio de superposición, dado el carácter lineal de las ecuaciones, al igual que el caso de espectros distribuidos no solo en frecuencia, sino también en dirección.

3.3.2.2. Implementación

Para la resolución de las distribuciones de ola dentro del río, y particularmente en el tramo costero, se generó una red de elementos finitos que abarcó la desembocadura del río. El contorno de esta región está constituido por límites, algunos de ellos físicos (ambas márgenes del río) y otros matemáticos (los límites de la región exterior a unos 1000 m de la desembocadura del río y la sección transversal del río unos 1200 m aguas arriba del tramo estudiado, posiciones consideradas suficientemente alejadas de los puntos de interés.

El espaciamiento medio entre nodos se tomó del orden de los 3 m, que resulta suficiente para representar las oscilaciones más significativas. De esta manera,

resultaron 80840 elementos y 40960 nodos para caracterizar la malla de cálculo.

A cada elemento se le asignó la profundidad correspondiente, de acuerdo a la batimetría utilizada que surgió del relevamiento del interior del río realizado por el SHN en 1987.

Para los contornos físicos, constituidos por playas de fuerte pendiente en el río, se adoptó como coeficiente de absorción el valor de 0.95. Esto se fundamentó en valores indicados en el Shore Protection Manual (**Ref.[A6]**, pág. 2-118) en el que se grafican coeficientes de reflexión para playas en función del parámetro adimensional de Iribarren:

$$\xi = \frac{\tan \alpha}{\sqrt{\frac{H}{L_o}}}$$

Donde $\tan \alpha$ es la pendiente de la playa y H y L_o son respectivamente la altura de ola y su longitud.

En el tramo correspondiente a la traza de la obra de defensa se adoptó un coeficiente de absorción de 0.6, asumiendo que se tratará de una obra de paramento aproximadamente vertical con una playa de fuerte pendiente al pie del mismo.

Respecto de los bordes matemáticos, el extremo E del dominio se comportará como un contorno transparente para las olas entrantes y de radiación para las olas salientes. El extremo W correspondiente al borde que cruza el río Grande es un borde de radiación para las olas salientes.

Se adoptó un espectro direccional (Bretschneider-Mitsuyasu) con un rango de frecuencias comprendido entre 0.025 Hz y 0.25 Hz, discretizado mediante un intervalo de frecuencias $\Delta f = 0.025$ Hz. La distribución direccional correspondió a la de un espectro determinado entre $\pm 15^\circ$ alrededor de la dirección principal, con un

intervalo de discretización $\Delta\theta = 10^\circ$. Como condición de rotura se adoptó $H_b = 0.8 d$.

3.3.2.3. Escenarios

Se efectuó el cómputo de una situación de olas del E de 12 s de período de pico y altura significativa $H_s = 6.0$ m. Este valor surge de los resultados de propagación de olas mediante el método de rayos para el Caso 5 (olas de dirección E, $T = 12$ s $H_o = 6,60$ m, teniendo en cuenta que el borde E de la región de cálculo (**Figura 19**) se halla comprendido aproximadamente entre las progresivas 0 y 2400 de la **Figura 17.a**. La progresiva 0 corresponde a la ubicación **A** indicada en la **Figura 11**.

3.3.2.4. Resultados

En la **Figura 19** se muestran las Isolíneas de altura de ola en la región de cálculo dentro del río. Puede notarse la entrada de grandes olas en el tramo de costa que se extiende especialmente hasta el Muelle Fiscal. La Punta Popper produce un fuerte efecto de difracción generando un área protegida del oleaje en el resto del estuario.

En la **Figura 20** se ha obtenido el perfil de altura de ola H a lo largo del contorno matemático frente a la costa. La progresiva 0 corresponde al punto **A** indicado en la **Figura 19**. Los puntos **B** y **C** de la misma **Figura 19** indican el inicio y fin del tramo de obra de defensa correspondiente al frente fluvial.

El borde matemático aquí computado se halla ubicado a una distancia variable entre 25 a 50 m de la posible traza de la obra de defensa en este tramo. La altura de ola definitiva al pie de las obras deberá tener en cuenta la batimetría local, mediante el relevamiento de los perfiles de playa previstos en esta etapa de los estudios.

Puede notarse que los primeros 250 m resultan de este tramo costero resultan

expuestos a las olas más grandes, reduciéndose fuertemente la amplitud de las mismas a medida que se ingresa en el estuario. A lo largo de la costa, la llegada de las grandes olas está restringida por la profundidad local. El cómputo de altura de ola incidente sobre la obra de defensa se completará cuando se disponga de los perfiles de costa que se hallan en etapa de relevamiento.

3.4. Sobrepasso de olas

Las olas que llegan al pie de la obra de defensa pueden llegar a rebasarla bajo ciertas circunstancias. Desde el punto de vista funcional, la obra de defensa debe ser diseñada de modo de reducir o evitar la inundación de tierras ubicadas detrás.

El volumen de agua que eventualmente rebasa la obra por unidad de tiempo y por unidad de longitud de obra se denomina caudal medio de sobrepasso. La estimación de esta variable es parte esencial del diseño de la obra de defensa.

El caudal de sobrepasso es función no solamente de las condiciones hidráulicas en las proximidades de las obras (altura y período de la ola incidente, nivel del mar) sino que también depende fuertemente de la geometría de la sección (talud, altura sobre el nivel del mar, materiales constructivos, etc).

Para una estimación preliminar del caudal de sobrepasso Q puede recurrirse a las curvas de Goda (**Ref. [A3]**) o a diversas fórmulas empíricas desarrolladas a partir de experiencias en modelos hidráulicos, en la medida en que la sección transversal adoptada presente similitudes con los casos estudiados.

Para el proyecto definitivo de obras es recomendable una verificación del funcionamiento hidráulico de la sección (tanto funcional como estructural), lo que puede llevarse a cabo mediante un modelo físico en escala reducida,

En esta etapa resulta importante establecer los criterios que debe satisfacer la obra de defensa en cuanto al grado de protección que debe ofrecer a la zona

urbana ubicada detrás. En términos generales ninguna obra se diseña para no ser rebasada. El diseño de la sección transversal debe satisfacer criterios económicos en los que se debe encontrar un balance económico entre la obra de defensa y el valor de los bienes e instalaciones que se protegen.

El sobrepaso admisible depende del uso de la tierra ubicada detrás de la obra de defensa, del valor de inmuebles o instalaciones, de la resistencia del pavimento (si lo hay) al impacto de la masa de agua que cae, la capacidad del sistema de drenaje para evacuar el agua acumulada, el riesgo de daño a vehículos y personas que puedan circular, etc.

La definición de los límites tolerables para el sobrepaso es un tema no resuelto, dada la irregularidad del fenómeno y la dificultad de medirlo y evaluar sus consecuencias.

En Japón (**Ref.[A7]**) un caudal medio $q = 0.010 \text{ m}^3/\text{m}/\text{s}$ se emplea para el diseño de muros costeros en áreas densamente pobladas. En la **Figura 21** puede observarse que este valor puede considerarse como límite para la seguridad de peatones. En cuanto a la seguridad estructural, la misma figura muestra que los valores admisibles se hallan en el rango de los 20 a 100 l/s/m, dependiendo del tipo de estructura.

En el caso de vehículos la seguridad de su circulación a lo largo de caminos o rutas costeras requiere valores tan bajos como 0.0001 m³/s/m.

CONCLUSIONES

1. Se ha actualizado la información de base para la realización del proyecto de las obras de defensa y se han adoptado valores para las variables hidrodinámicas básicas para el diseño de las obras.

2. Se ha implementado el cálculo de altura de ola a lo largo de la traza de la obra, y se realizaron primeros cálculos que tendrán que ser ajustados sobre la base de los perfiles de playa que están en etapa de relevamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS ADICIONALES

- A1. *Evaluación del Retroceso del Acantilado Activo Presente en la Sección de Costa que se extiende al sur de la Bahía San Sebastián. Tierra del Fuego. Eduardo C. Malagnino, Octubre 1999.*
- A2. *Cálculo de la Refracción de Olas Mediante el Método de Rayos. R. Castellano. LHA-S4-93, septiembre 1993.*
- A3. *HANDBOOK ON COASTAL AND OCEAN ENGINEERING. J. Herbich Editor. Gulf Publishing Company. 1990*
- A4. *Computation of Combined Refraction –Diffraction. J.C.W. Berkhoff, ASCE, XIII International Concerence on Coastal Engineering, 1976.*
- A5. *Difracción Refracción combinadas en ondas de agua. J.C. Vionnet. LHA 064-02-87, 1987.*
- A6. *Shore Protection Manual. US. ARMY, CORPS OF ENGINEERS, 1984.*
- A7. *Wave overtopping on vertical an composite breakwaters. ASCE, XXIV Cosatal Engineering Conference 1994 Cap. 75, Pág. 1030.*

FIGURA 19

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

2. *Evaluación del Retroceso del Acantilado Activo Presente en la Sección de Costa que se extiende al sur de la Bahía San Sebastián. Tierra del Fuego. Eduardo C. Malagnino, Octubre 1999.*

4. *Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías navegables. Estudio de Vinculación Marítima entre Punta Loyola y la Isla Grande de Tierra del Fuego. Proyecto del Sistema de Transporte y Facilidades Portuarias. Sección II. Trabajos de Campaña. DIGID. MINISTERIO DE DEFENSA. 1982*

5. *Dirección Nacional de Construcciones Portuarias y Vías navegables. Estudio de Vinculación Marítima entre Punta Loyola y la Isla Grande de Tierra del Fuego. Proyecto del Sistema de Transporte y Facilidades Portuarias. Sección III. Estudio de Olas y Corrientes en la Bahía San Sebastián. DIGID. MINISTERIO DE DEFENSA. 1982*

6. *Dinámica de Sedimentos en el Area de Caleta La Misión. INA*

7. *Determinación del régimen de olas en el área de Caleta La Misión. INA – LHA 135-01-94, 1994.*

9. *TOTAL AUSTRAL - CARINA FEASIBILITY STUDY. Appendix 2. Meteocean data. 1997*

10. *PLATAFORMA ARIES*

11. *TOTAL AUSTRAL - YACIMIENTO ARA (Cullen)*

12. *Shore Protection Manual. US. ARMY, CORPS OF ENGINEERS, 1984.*

13. *Cálculo de la Refracción de Olas Mediante el Método de Rayos.* R. Castellano. LHA-S4-93, septiembre 1993.

14. *MANUAL ON THE USE OF ROCK CIRIA/ CUR 1991*

15 . Overtopping reduction in Crownwall design. CEC 1996 CH 140. PP 1803

16 Experiments on non – wave overtopping type seawall. CEC 1996 CH 143. PP1840

17 Seawall effects on historical receding shorelines CEC 1996, CH 154 PP 1985

18. Design wave height related to structure lifetime. CEC 1996 CH 198 PP2560

19. Wave Overtopping rate and reflection coefficient for obliquely incident waves. CEC 1996. CH 201 PP 2598

20. sediment transport and wave reflection near seawall. CEC 1996 CH 202 PP 2612

21. Prediction of the maximum wave on the coral flat. CEC 1994. CH 45 PP 609.

22. OVERTOPPING OF SEA WALLS UNDER RANDOM WAVES. CEC 1994 CH 82. PP 1130.

23 WAVE OVERTOPPING ON RUBBLE MOUND BREAKWATERS. CEC 1994, CH 57 PP 770

24 SEAWALL OVERTOPPING MODEL CEC 1994 CH 59 PP 795.

25 CLOSED FORM SOLUTION FOR THE PROBABILITY DENSITY OF WAVE HEIGHT IN THE SUR ZONE. CEC 1994 CH 60 PP 807

26 WAVE RUN UP AND OVERTOPPING ON COASTAL STRUCTURES. CEC 1992 CH 134 PP 1758.

27 WIND EFFECTS ON RUN UP AND OVERTOPPING OF COASTAL STRUCTURES. CEC 1996 CH 171 PP2206

28. NUMERICALLY MODELING PERSONEL DANGER ON A PROMENADE CEC 1994 CH 74 PP 1016

29. WAVE OVERTOPPING ON VERTICAL AN COMPOSITE BREAKWATERS. CEC 1994 CH 75 PP 1030.

30 AN INVESTIGATION OF THE BREAKWATER FORCES ACTING ON
BREAKWATER HANDRAILS. CEC 1994 CH 76 PP 1046.

FIGURAS

FOTOGRAFIAS

ANEXO I