



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SUBSECRETARIA DE RECURSOS HÍDRICOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
REPÚBLICA ARGENTINA



MODELACIÓN DEL IMPACTO DE UN RELLENO COSTERO SOBRE LA DINÁMICA DEL RÍO DE LA PLATA

Informe de Avance N° 2



Proyecto LHA 300
Informe LHA 03-300-09
Ezeiza, Febrero de 2009

Laboratorio de Hidráulica

MODELACIÓN DEL IMPACTO DE UN RELLENO COSTERO SOBRE LA DINÁMICA DEL RÍO DE LA PLATA

Informe de Avance 2

Determinación del Clima de Oleaje

RESUMEN

Se presenta el estado de avance de una modelación matemática dirigida a evaluar el clima de olas en el entorno de las obras de un relleno costero en la ciudad de Buenos Aires. Se describen las variables básicas determinantes (vientos, niveles del río, topografía del lecho del río), el modelo matemático a utilizar y su implementación para este caso particular.

PALABRAS CLAVE

Clima de olas - Relleno Costero - Río de la Plata - Buenos Aires - Costanera Sur - Boca del Riachuelo.

Informe	LHA-300-03-09
Fecha	Febrero, 2009
PROYECTO	854
COMITENTE	GOBIERNO DE LA CIUDAD DE BUENOS AIRES

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Raúl A. LOPARDO

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Jorge A. MAZA

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

DIRECTOR DEL PROYECTO

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. N. Tomazin

Ing. R. Cáceres

Téc. Mec. C.A. Haspert

M.M.O. S.L. Peralta

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Roberto CASTELLANO

TABLA DE CONTENIDOS

1	INTRODUCCION.....	1
2	SINTESIS Y ESTADO DE AVANCE	2
3	METODOLOGIA.....	3
4	UBICACIÓN Y CARACTERISTICAS DEL PROYECTO.....	5
5	DESCRIPCION FISICA DEL AREA.....	6
5.1	Régimen de Vientos	6
5.1.1	Fuentes de información y características generales.....	6
5.1.2	Vientos extremos	18
5.1.3	Métodos de ajuste y resultados.....	19
5.2	Nivel del río.....	21
5.2.1	Marea astronómica	21
5.2.2	Marea meteorológica	22
5.2.3	Niveles extremos	24
5.2.4	Persistencia de niveles	27
5.3	Clima de olas	29
6	MODELACION MATEMATICA	40
6.1	Mapa digital.....	40
6.2	Implementación del modelo	41
6.3	Escenarios.....	42
	ANEXO I MODELO MATEMATICO DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE OLAS.....	44

MODELACIÓN DEL IMPACTO DE UN RELLENO COSTERO SOBRE LA DINÁMICA DEL RÍO DE LA PLATA

Informe de Avance 2 Determinación del Clima de Olas

Febrero, 2009

1 INTRODUCCION

La construcción del aliviador del Arroyo Maldonado originará un volumen muy significativo de tierra y escombros en el área urbana. El Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires ha proyectado la construcción de un relleno en el Río de la Plata, adyacente a la Isla Demarchi, para disponer de ese material.

Los estudios hidráulicos destinados a evaluar el impacto de esa obra en el área adyacente del Río de la Plata y a estimar las variables necesarias para el proyecto estructural de la obra se desarrollan de acuerdo a los términos de referencia del convenio celebrado entre el Instituto Nacional del Agua y el Ministerio de Desarrollo Urbano del Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires.

El presente Informe de Avance 2 se refiere a las tareas relacionadas con la evaluación del clima de olas en el sitio de emplazamiento de las obras.

2 SINTESIS Y ESTADO DE AVANCE

El propósito de esta etapa del estudio es la caracterización de las condiciones de oleaje en un área costera de la ciudad de Buenos Aires sobre el Río de la Plata, a los efectos de proveer de la información de base para el dimensionamiento de algunas estructuras que conformarán el área de relleno proyectada.

La caracterización del clima de olas se realizará mediante la modelación matemática de la generación de olas en el estuario por acción del viento.

El presente Informe de Avance N° 2 describe las tareas realizadas con referencia a ello, y que han consistido en la búsqueda y análisis de datos y antecedentes disponibles en la región. Acorde con los requerimientos de la modelación a realizar, se ha prestado especial atención a la caracterización del régimen de vientos y niveles del río, como así también a la búsqueda de información referida a determinaciones de oleaje. Se halla en gestión la obtención de datos de viento correspondientes a la Estación Aeroparque.

Con el mismo propósito se procedió a la implementación del modelo matemático mediante la digitalización de cartas náuticas del Río de la Plata, la construcción de un mapa digital del lecho del río y la construcción de la malla de cálculo que se utilizarán para la aplicación del modelo matemático.

3 METODOLOGIA

En primer lugar se realizó una búsqueda y evaluación de información hidrográfica y climatológica disponible en el área a los efectos de generar una base que permita una más completa descripción cualitativa y cuantitativa de los fenómenos físicos que se evalúan en el presente estudio.

Esto involucró la recolección y análisis de datos disponibles como lo son las series históricas de niveles del Río de la Plata frente a Buenos Aires y registros de viento de períodos prolongados. Dado su carácter aleatorio, estos datos fueron evaluados mediante técnicas estadísticas apropiadas de manera de estimar valores máximos probables. En particular se analizan niveles extremos del río para distintos períodos de retorno, y distribución frecuencial de niveles (anuales y estacionales) con el propósito de verificar cotas de diseño de las obras y dimensionamiento de las estructuras perimetrales de protección necesarias. A los efectos de la posterior modelación matemática de generación y propagación de olas, se digitalizaron Cartas Náuticas publicadas por el Servicio de Hidrografía Naval correspondientes al Río de la Plata, lo que permitió construir un mapa digital del lecho del río.

También se efectuó una búsqueda de publicaciones científico-técnicas relativas al Río de la Plata. En esta última categoría las fuentes de información más relevantes utilizadas han sido:

- Documentos técnicos del Proyecto Freplata. FREPLATA es el Proyecto Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Habitats. Es una iniciativa conjunta de la República Argentina y la República Oriental del Uruguay y se ejecuta por intermedio de la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP) y la Comisión Técnica Mixta del Frente Marítimo (CTMFM).
- The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project. Kalnay et al., Bulletin of the American Meteorological Society 77, 1996.
- Base de datos del Proyecto NCEP/NCAR.
- Registros de viento de Estación Aeroparque (Servicio Meteorológico Nacional)

- Antecedentes técnicos de proyectos específicos realizados en el área costera de la ciudad de Buenos Aires
- Otras publicaciones científicas (presentaciones a Congresos, Journals especializados, etc.)

Sobre esa base se plantearon escenarios probables (tanto frecuentes como extremos) de niveles del río y vientos, y se aplicó el modelo matemático SWAN (ver **Anexo I**) para el cómputo del desarrollo del oleaje por acción del viento y su propagación hasta el sitio de emplazamiento de las obras de relleno.

4 UBICACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL PROYECTO

El proyecto de relleno se halla sobre la margen derecha del Río de la Plata, en el área costera de la ciudad de Buenos Aires, en las coordenadas 34°37'25"S, 58°20'18" W.



Figura 5.1. Detalle del área del proyecto

La superficie del área de relleno en esta primera etapa será de 20 Ha y estará constituida por material extraído de diversas obras de infraestructura que se realizan en el área de la ciudad de Buenos Aires, particularmente los túneles aliviadores del Arroyo Maldonado.

El perímetro del área rellenada deberá estar adecuadamente protegido de la acción del oleaje. La cota del área rellenada deberá ser tal que permita minimizar los riesgos de inundación de las tierras ganadas al río.

5 DESCRIPCION FISICA DEL AREA

En el Informe de Avance 1 se ha presentado una descripción general del Río de la Plata con especial atención a las características hidrodinámicas. La **Figura 6.1.** muestra la ubicación del proyecto de relleno sobre la margen derecha del estuario. Previsiblemente, y habida cuenta de la proximidad de la costa uruguaya, la ubicación del proyecto en el Río de la Plata Superior ofrece un relativo resguardo al oleaje y una limitación a las direcciones desde donde procede.



5.1 Régimen de Vientos

El viento es una de las variables centrales en la determinación de las características hidrográficas del área, en tanto es la causa de la generación del oleaje presente en el área y de la alteración del nivel del río respecto de los valores originados por la marea astronómica.

5.1.1 Fuentes de información y características generales

Se consultaron diversas fuentes de información y estudios hidráulicos realizados en el área costera de la ciudad de Buenos Aires.

Estación AEROPARQUE

La estación Aeroparque se encuentra a unos 10 Km al NW del sitio del proyecto. En consecuencia, en la mayoría de los estudios consultados referentes a proyectos en el área, utilizan los registros de la estación 332 Aeroparque-Aero del Servicio Meteorológico Nacional, variando de uno a otro la extensión de la serie analizada.

Un análisis de la rosa de vientos de esa estación¹ muestra que los vientos más frecuentes son los del NNE, seguidos por los del cuadrante SE. Los vientos más intensos proceden de las direcciones NNE y SSE. La dirección SE resulta, además, alineada con la dirección de mayor fetch y puede, por esta razón, dar como *resultado la condición de oleaje más desfavorable en puntos ubicados en el centro del río si la intensidad del viento se mantiene el tiempo suficiente*. Estos vientos pueden adquirir velocidades de 10 a 15 m/s, aunque con poca frecuencia. Según un análisis presentado en la Ref. (2) para registros en Aeroparque entre octubre de 1967 y diciembre de 1980, las intensidades de viento (en m/s) y los períodos de retorno por dirección son como se indica en la **Tabla 6.1**:

Tabla 6.1 – Vientos en Estación Aeroparque

Recurrencia (años)	Dirección		
	<i>N</i>	<i>NE</i>	<i>E</i>
1	10,0	9,0	10,0
10	16,8	11,5	13,8
25	19,0	15,4	14,4
50	21,0	16,0	15,0

En Ref. ³ se presenta una buena descripción de esta variable realizada sobre una base de datos que se extiende de 1969 a 1978. Estos datos son el promedio de los últimos 10 minutos de un intervalo de 6 horas, y además de incluir la intensidad, la dirección es determinada sobre una rosa de 16 direcciones. Las mediciones fueron hechas por un anemómetro ubicado a 15 m de altura.

¹ “Estudio de la Costanera Sur de la Ciudad de Buenos Aires “. INCYTH LHA 059-03-90, 1990

De los resultados se desprende que las direcciones más frecuentes son la NNE, E, ESE, N, SSE, NE y SE. De ellas, la E, ESE, SE y SSE producen crecientes y las restantes producen bajantes (Ref.¹). El análisis de los datos demuestra que durante el período analizado los vientos que producen aumento de niveles líquidos sobre la marea astronómica se presentaron el 32.1 % del tiempo.

Las direcciones más frecuentes son además las que registran las mayores intensidades. En particular las direcciones NNE, SSE y ESE son las que acusan mayor cantidad de registros con velocidades superiores a los 30 km/h.

En los estudios citados aquí como Ref. ³ se ha determinado la distribución de valores extremos sobre una base de datos que abarca de octubre de 1967 a diciembre de 1980, *pero sobre una rosa de 8 direcciones*.

De estos análisis estadísticos se puede extraer la siguiente **Tabla 6.2**:

**Tabla 6.2: Valores extremos de la intensidad del viento en m/s
Estación Aeroparque**

Recurrencia [años]	Direcciones			
	E	NE	N	NW
10	13.8	14.5	16.8	15.2
25	14.4	15.4	19.0	16.7

Como puede observarse en ningún caso la velocidad del viento supera los 20 m/s (72 km/h) para recurrencias de 25 años; además de ello para la dirección E, que resulta ser en principio la más desfavorable por tener una mayor distancia de generación de olas (fetch) y la única que puede coexistir con la marea meteorológica positiva, la velocidad para esa recurrencia es de 14.4 m/s.

Se destaca que los valores indicados son vientos medios horarios.

Proyecto FREPLATA

En el marco de este proyecto se han realizado numerosos estudios relativos a aspectos físicos y biológicos en el área del Río de la Plata. A partir de publicaciones consultadas se presenta una breve descripción del régimen de vientos en la región, con vistas a complementar la información de base necesaria para el proyecto de relleno.

Los vientos sobre el Río de la Plata en general son leves y la intensidad promedio anual es muy uniforme, elevándose a cerca de 5 m/s en la costa; vientos de mayor velocidad se registran en los sectores expuestos del litoral atlántico uruguayo (Punta del Este). Los vientos más intensos en la región son del sector Sur (SE, S y SW) y los más débiles del NW. Durante eventos extremos se registran fuertes vientos del sudeste de más de 30 m/s y tormentas que afectan el área durante varios días. Este fenómeno es conocido como “sudestada” y es responsable de las grandes inundaciones que se producen en el litoral del Río de la Plata².

La influencia del continente hace que las estaciones de registro costeras no representen adecuadamente la influencia del viento sobre el cuerpo de agua. Una comparación entre registros de viento obtenidos cada tres horas en estaciones de medición cercanas (Punta Brava, sobre la costa uruguaya y Pontón Recalada en el Río de la Plata) durante los años 1997 a 2000 mostró considerables diferencias en la intensidad y dirección del viento.

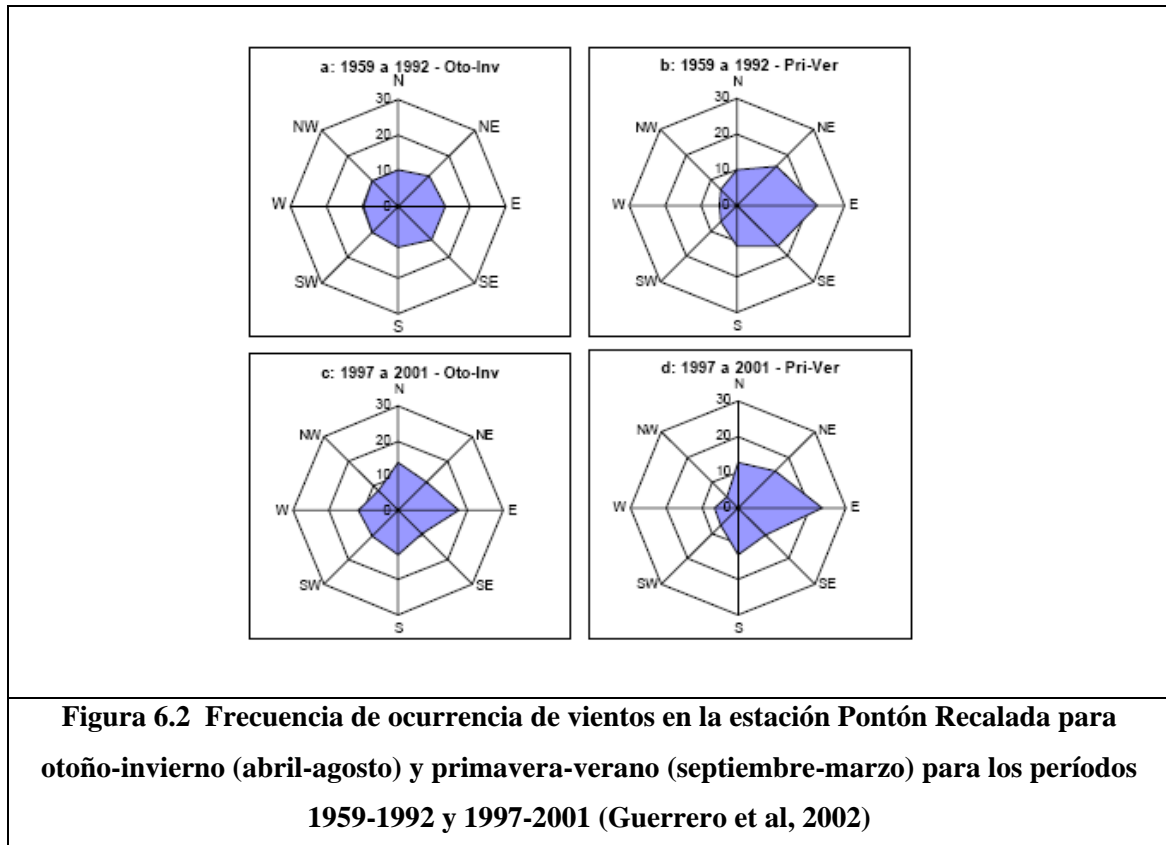
Se encontró que la intensidad de los vientos medidos en la Estación Pontón Recalada es mayor que la correspondiente a la Estación costera de Punta Brava. En tres de los cuatro años considerados observaron diferencias, entre ambas estaciones de medición, de más de 10 Km/h en la intensidad media para una dirección de viento determinada.

La climatología de vientos sobre la superficie del agua en la *Estación Pontón Recalada* (35° 10' S y 56° 15' W) para el período 1959-1992, efectuada por Guerrero et al (2002)³, muestra un predominio de vientos oceánicos (E, SE y NE) durante el período septiembre-marzo

² *Patrones de Circulación en el Río de la Plata y su Área de Influencia*. Silvana Giordano y Carlos Lasta *Unidad Ejecutora Proyecto Freplata*. Análisis de Diagnóstico Transfronterizo. Junio 2004

³ *Protección Ambiental del Río de la Plata y su Frente Marítimo: Prevención y Control de la Contaminación y Restauración de Habitats* Proyecto PNUD/gef/rla/99/g31 Datos Meteorológicos y Climatología - Informe Final, INIDEP, R. A. Guerrero, G.N. Molinari, S.I. Jáuregui. Junio de 2004.

(identificado como primavera-verano) y un balance en los vientos de las distintas direcciones durante abril-agosto (identificado como otoño-invierno) (**Figura 6.2**).



Comparando las distribuciones de frecuencia del período 1959-1992 con las del período más reciente 1997- 2001, se observa en este último un aumento en la ocurrencia de vientos del Este. Asimismo parecen haber aumentado los vientos en el eje Norte-Sur y disminuido los del eje Sureste-Noroeste. Debe señalarse, sin embargo, que el período considerado no es suficientemente largo todavía como para hacer afirmaciones definitivas sobre la tendencia del viento.

Las máximas velocidades medias mensuales de viento reportadas para el Pontón Recalada corresponden al período cálido caracterizándose el período frío por vientos medios de poca intensidad. Las situaciones de calma meteorológica representaron sólo un 6,7% de las observaciones efectuadas en primavera-verano y un 7,7% de las de otoño-invierno.

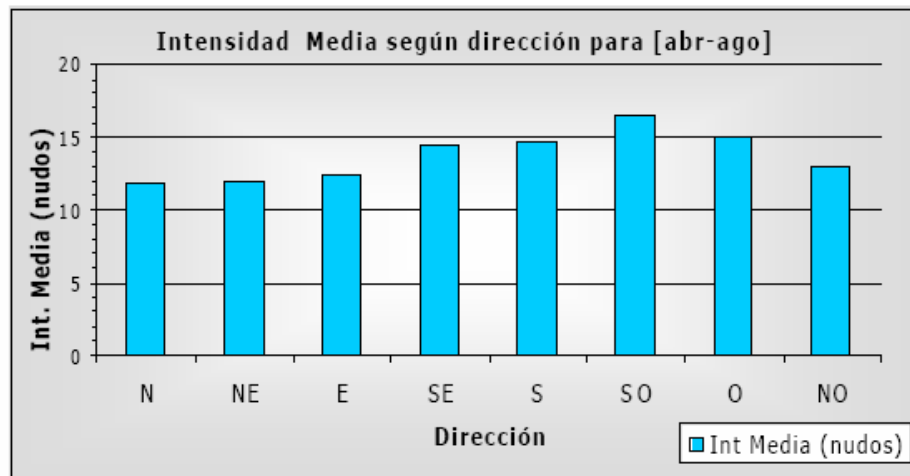


Figura 6.3. Pontón Recalada. Distribución de frecuencias de intensidad media de viento (período frío). 1967-2001. (Guerrero et al., 2002)



Figura 6.4. Pontón Recalada. Distribución de frecuencias de intensidad media del viento (período cálido). 1967-2001. Guerrero et al., 2002

Las **Figuras 6.3 y 6.4** muestran que las intensidades medias máximas corresponden al SW con valores que superan los 8 m/s (16 nudos). Para el período cálido los vientos que soplan hacia el Río de la Plata desde el área oceánica (E, SE, S) son de mayor intensidad (hasta 7,5 m/s) que en el período frío. Lo opuesto ocurre con los vientos medios desde los sectores SW y W, que son más intensos en el período frío.

BASE DE DATOS NCEP/NCAR

NCEP/NCAR⁴. NCEP es el National Centers for Environmental Prediction de la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA). NCAR es el National Center for Atmospheric Research. Se utilizaron datos de ese Proyecto para describir las propiedades del régimen de vientos. Los datos de la base no son observaciones directas sino el resultado de un análisis objetivo que combina distintas metodologías de observación y modelos numéricos. El resultado es un conjunto de datos distribuidos sobre una grilla global con resolución espacial 1,875° en longitud y 1,902° en latitud y una resolución temporal de 6 horas.

La base de datos NCEP/NCAR, aunque de baja resolución, tiene la ventaja de cubrir un prolongado periodo de tiempo (1948 en adelante). Para realizar el presente análisis se utilizó un registro de treinta años de información (período 1978-2007).

En el área del río de la Plata se encuentran 9 nodos que resultan potencialmente de interés para evaluar las características del régimen de vientos en el área del proyecto. La posición de los mismos se muestra en la **Figura 6.5** y las coordenadas geográficas en la **Tabla 6.3**

⁴ *The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis Project*. Kalnay et al., Bulletin of the American Meteorological Society 77, 1996

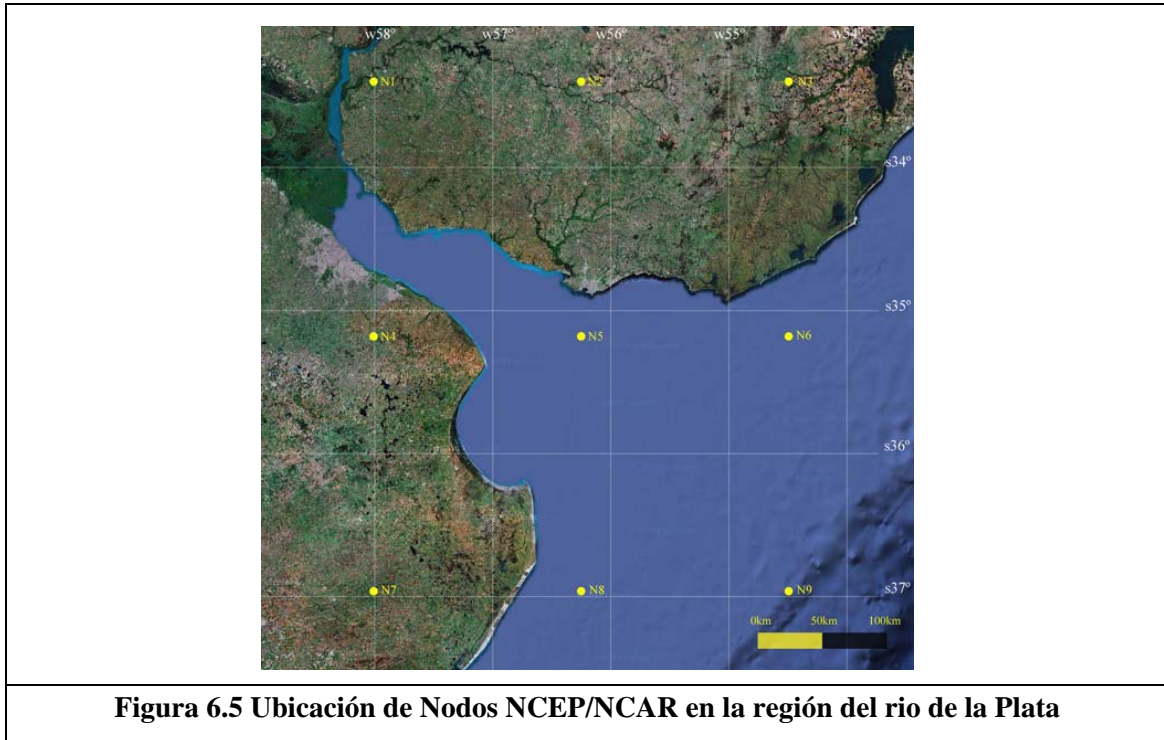


Tabla 6.3 Coordenadas geográficas de nodos NCEP/NCAR en la región del Río de la Plata

Nodo	Latitud	Longitud E
1	-33.3328	301.875
2	-33.3328	303.75
3	-33.3328	305.625
4	-35.2375	301.875
5	-35.2375	303.75
6	-35.2375	305.625
7	-37.1422	301.875
8	-37.1422	303.75
9	-37.1422	305.625

Tabla 6.4 Máximos anuales en cada nodo

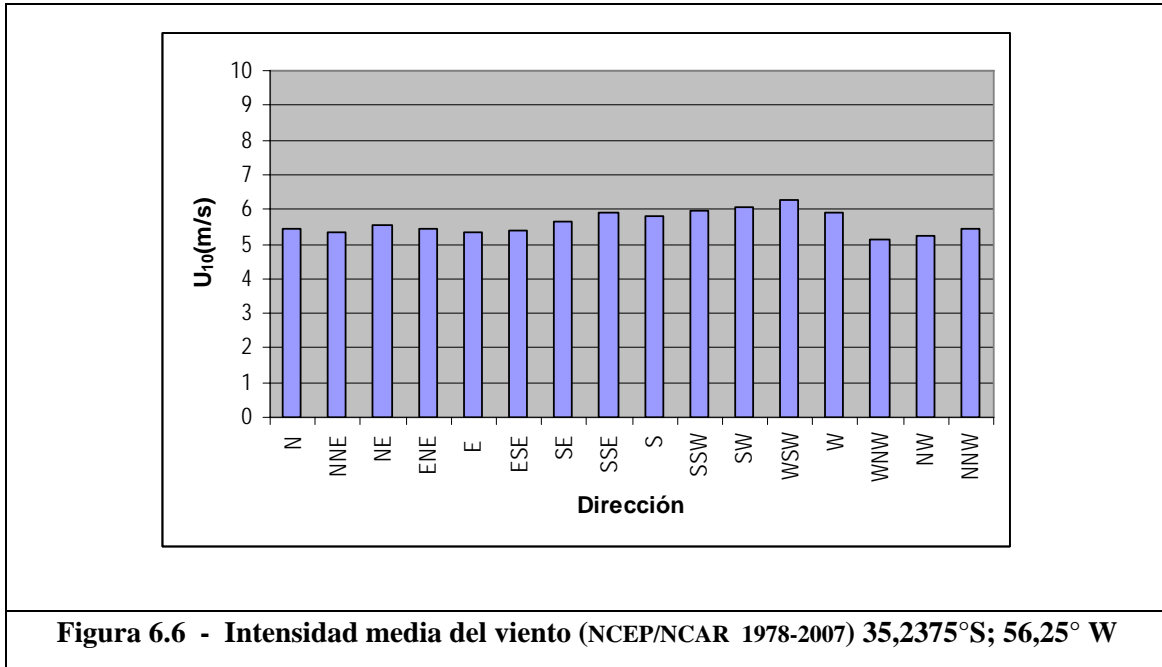
Año	Intensidades máximas anuales (m/s)								
	Nodo 1	Nodo 2	Nodo 3	Nodo 4	Nodo 5	Nodo 6	Nodo 7	Nodo 8	Nodo 9
1978	9,4	10,3	12,8	10,9	14,8	18,0	12,6	17,1	19,2
1979	8,3	11,4	12,0	10,3	15,9	18,0	11,8	17,6	18,3
1980	9,6	9,3	12,2	11,8	14,9	17,5	12,8	17,6	18,4
1981	7,9	9,7	12,4	11,7	15,7	18,8	14,1	18,1	20,1
1982	9,6	11,2	12,0	10,2	14,8	19,0	12,9	18,5	20,9
1983	7,9	10,1	11,3	10,3	15,1	17,1	12,4	15,4	18,9
1984	10,6	12,9	14,6	14,0	18,2	21,5	15,5	18,8	20,3
1985	7,9	8,9	10,7	9,3	13,2	16,4	10,8	15,4	18,1
1986	7,6	10,5	11,7	10,2	14,1	16,5	12,9	15,5	17,5
1987	7,9	9,8	12,4	10,9	16,2	18,9	12,5	17,1	19,2
1988	8,5	10,8	12,4	12,5	16,2	16,6	14,1	16,2	16,6
1989	9,7	11,2	12,3	11,0	16,5	18,1	13,1	18,1	19,7
1990	8,0	9,8	11,4	10,7	16,1	18,4	13,6	19,2	19,9
1991	9,2	12,2	14,7	12,4	16,9	19,8	14,6	19,2	22,6
1992	8,5	9,3	11,2	10,2	14,4	18,4	13,3	19,2	22,3
1993	10,5	11,9	13,4	14,7	18,0	20,4	18,0	20,0	20,9
1994	8,5	9,9	11,4	11,2	15,5	18,9	13,8	18,4	20,4
1995	10,8	10,2	11,2	11,0	14,1	17,3	11,6	16,1	19,5
1996	8,8	9,6	12,0	9,9	14,5	16,1	12,0	16,2	18,2
1997	9,9	10,6	11,5	12,1	15,8	18,2	13,3	18,3	19,6
1998	8,3	10,7	12,2	11,1	17,1	20,6	14,5	19,1	19,3
1999	9,5	10,8	12,1	12,4	15,8	19,1	14,8	17,5	18,3
2000	9,3	10,9	12,5	14,6	19,7	22,6	16,9	20,9	20,4
2001	8,6	11,3	14,8	11,7	17,6	22,5	15,7	20,2	23,1
2002	9,1	11,2	14,4	12,5	16,8	19,2	15,0	19,7	21,5
2003	8,4	9,8	12,7	11,3	15,4	17,7	14,0	18,2	18,7
2004	9,3	9,9	12,5	10,3	16,1	17,8	11,9	16,2	18,0
2005	9,0	9,3	10,9	12,8	14,8	17,2	16,5	18,9	20,3
2006	8,5	9,5	11,7	11,8	16,0	19,1	12,2	17,1	19,3
2007	8,0	10,6	11,8	9,6	15,7	17,5	13,3	16,3	18,2
Promedio=	8,9	10,5	12,3	11,4	15,9	18,6	13,7	17,9	19,6

El conjunto de valores máximos anuales correspondientes a los 9 nodos (**Tabla 6.4.**) constituye una buena indicación de las variaciones espaciales en el área, con vientos de intensidad creciente hacia el Este (área oceánica). Como se observa en la **Figura 6.5** el Nodo 5 es el único que se ubica sobre aguas del Río de la Plata. El mismo se encuentra en la desembocadura del estuario, a unos 210 Km al ESE del área del proyecto, razón por la cual se ha considerado que es adecuado para describir los vientos del cuadrante SE en el área del proyecto, que son generadores de las olas con mayor fetch. En esa posición los vientos del N y NE resulten probablemente afectados por la presencia de la masa continental en grado similar al que podría ocurrir frente a la obra de relleno.

De acuerdo a ello se ha analizado en principio la distribución de frecuencia por dirección del viento y la velocidad media y máxima anuales por dirección (16 sectores de 22,5°) en esa posición (35,2375° S ; 56,25° W).

El sector N está centrado en la dirección 0°. De los 16 sectores que conforman la rosa, se consideraron para este análisis 7 direcciones que pueden tener influencia sobre el área del proyecto: N, NNE, NE, E, ESE, SE, SSE. Debe entenderse que las direcciones del viento se refieren al sector de procedencia del mismo.

La presentación de los resultados se efectúa por medio de tablas y gráficos circulares (rosa de los vientos. En la **Figura 6.6.** se presenta el histograma de intensidad media de viento por dirección.



El viento máximo en el período analizado resultó de 19,7 m/s. El viento medio ($W_{50\%}$) fue de 5,5 m/s. Sólo el 10% de los vientos superan los 8,8 m/s. Teniendo en cuenta que 1 nudo = 0,5 m/s, la velocidad media indicada (11 nudos) resulta algo menor que la correspondiente a Pontón Recalada (**Figuras 6.3 y 6.4**). Esto puede justificarse por el hecho de que, según algunos investigadores, el reanálisis de NCEP/NCAR puede subestimar los vientos débiles⁵. También puede contribuir el hecho de que la base de tiempo para la determinación de los vientos medios es diferente en ambos casos: en Pontón Recalada es 1 hora y en la base NCEP/NCAR es 6 horas. Desde el punto de vista cualitativo sin embargo, la distribución direccional de velocidades medias es semejante. Pontón Recalada se ubica a unos 8 Km al N del nodo analizado de la grilla global de NCEP/NCAR. Finalmente, los períodos analizados (1967-2001 para Pontón Recalada y 1978-2007 para NCEP/NCAR) pueden justificar también algunas discrepancias, como se ha mostrado en la **Figura 6.2.** para Pontón Recalada y dos períodos distintos: 1959-1992 y 1997-2001.

⁵ “On the use of the NCEP/NCAR surface winds for modelling barotropic circulation in the Rio de la Plata estuary”. Simionato et al. , Coastal and Shelf Sci. 70 (1-2), 195-206, 2006

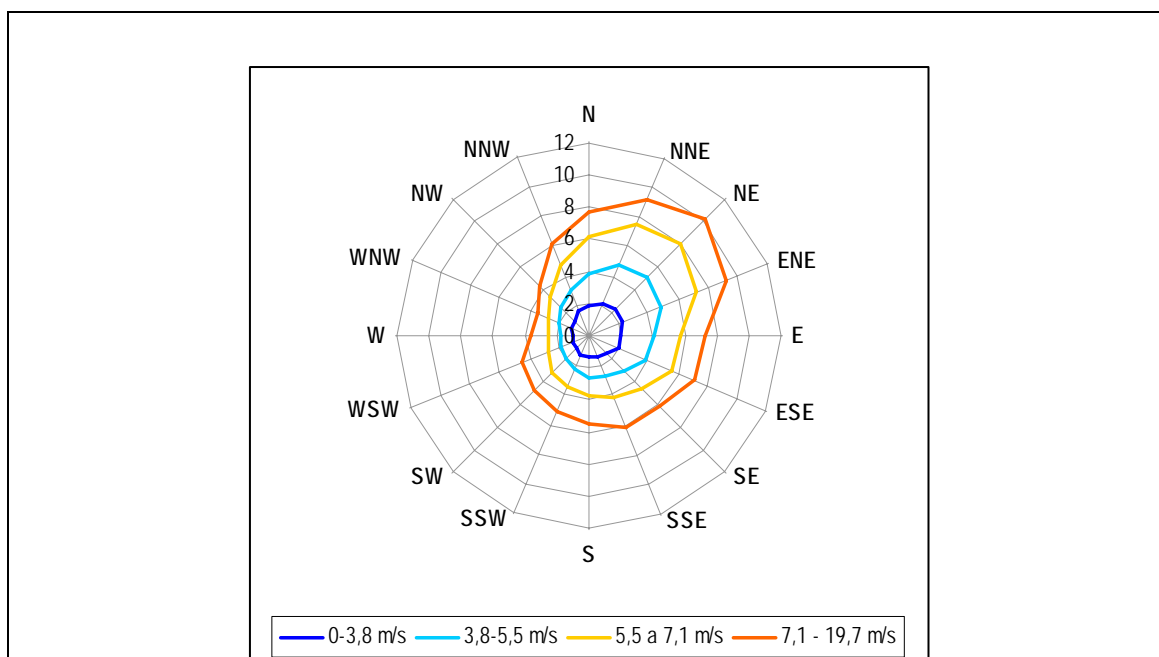
La **Tabla 6.5.** muestra la distribución direccional del viento. La Tabla indica número de casos correspondiente a cada intervalo de dirección de 22,5° (16 sectores) y en intervalos de 2,5 m/s de intensidad, para el período de 30 años comprendido entre el 1/1/78 y el 31/12 /07.

TABLA 6.5 - Distribución direccional del viento (NCEP/NCAR 1978-2007) 35,2375°S; 56,25°

W

W (m/s)	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW	TOTAL	TOTAL %
0 - 2,5	320	349	389	332	317	296	291	248	273	235	240	191	184	216	269	261	4411	10,1
2,5 - 5	1092	1252	1482	1325	1174	1066	887	713	750	561	561	480	468	532	650	802	13795	31,5
5 - 7,5	1458	1678	1946	1539	1189	1079	999	884	800	729	726	553	513	452	718	1022	16285	37,2
7,5 - 10	518	562	729	636	434	447	459	532	469	469	459	412	271	194	277	420	7288	16,6
10 - 12,5	74	61	76	78	91	89	115	159	159	146	162	195	122	47	46	65	1685	3,8
12,5 - 15	2	8	7	5	17	16	25	27	19	32	32	41	37	20	7	5	300	0,7
15 - 17,5	0	0	2	0	4	0	5	7	3	2	6	10	6	5	2	1	53	0,1
17,5 - 20	0	0	0	0	1	4	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	8	0,0
20 - 22,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
22,5 - 25	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,0
TOTAL	3464	3910	4631	3915	3227	2997	2781	2570	2473	2174	2186	1884	1601	1467	1969	2576	43825	100,0
% TOTAL	7,9	8,9	10,6	8,9	7,4	6,8	6,3	5,9	5,6	5,0	5,0	4,3	3,7	3,3	4,5	5,9	100,0	

El gráfico polar de la **Figura 6.7** se ha construido para los límites que definen los cuartiles de la totalidad de los datos. Los cuatro rangos de datos (cuartiles) contienen cada uno el 25% del total de datos y son: 0 a 3,8 m/s; 3,8 a 5,5 m/s; 5,5 a 7,1 m/s y 7,1 a 19,7 m/s.





Los valores presentados en la **Tabla 6.5** y en la **Figuras 6.7** muestran el predominio de vientos procedentes del cuadrante NE (36,05 %) en la distribución anual de la frecuencia del viento, siguiéndole en importancia los cuadrantes SE (25,5%), NW (19.5%) y SW (18.95%).

La **Tabla 6.6** muestra los valores máximos anuales en el período indicado, tanto por dirección como para todas las direcciones. Al pie de la **Tabla 6.6** se indican los promedios de máximos anuales y el máximo absoluto correspondiente a cada dirección.

TABLA 6.6 – Vientos máximos anuales (NCEP/NCAR, 1978-2007, 35,2375°S; 56,25° W)

AÑO	Wmax	Velocidad máxima (m/s)															
		N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
1978	14,8	11,8	11,4	13,4	14,8	10,0	12,1	11,7	12,4	10,8	12,1	11,1	13,2	13,7	9,7	11,6	12,5
1979	15,9	10,9	9,8	8,8	10,6	10,9	9,7	10,8	15,9	12,3	14,5	10,7	12,8	11,2	10,7	9,8	10,3
1980	14,9	12,1	9,0	12,3	13,6	11,4	12,3	12,7	11,1	10,4	14,9	13,9	14,0	13,6	13,3	13,8	11,3
1981	15,7	11,4	10,6	10,4	10,6	10,0	10,8	11,8	13,2	12,7	15,3	15,7	11,6	9,7	8,9	9,3	10,2
1982	14,8	11,9	9,5	9,7	10,7	9,1	9,8	10,5	12,5	11,6	14,1	12,5	14,8	12,5	11,9	12,3	10,1
1983	15,1	9,2	10,0	12,8	12,0	10,2	10,2	12,3	15,1	10,8	11,5	12,4	11,7	14,3	9,5	11,3	8,9
1984	18,2	8,9	9,1	10,1	11,0	14,5	13,3	14,3	10,3	10,3	9,5	17,2	17,5	13,8	18,2	14,5	10,3
1985	13,2	8,7	9,0	10,4	9,6	9,6	11,3	10,6	13,2	12,8	13,2	12,0	10,0	10,9	10,3	9,6	9,2
1986	14,1	9,9	9,8	11,0	11,8	8,9	14,1	10,7	11,7	11,0	12,4	11,6	12,5	12,7	9,9	10,0	9,6
1987	16,2	8,6	9,8	9,6	9,8	10,2	12,4	12,6	9,9	11,2	12,7	10,3	14,2	16,2	14,4	10,8	10,8
1988	16,2	10,4	10,7	10,9	11,8	16,2	11,4	11,9	12,1	10,7	11,4	11,2	13,1	11,6	11,5	11,8	10,7
1989	16,5	10,7	11,2	11,0	11,2	11,3	10,2	11,8	16,5	13,0	12,4	11,9	12,4	14,6	13,6	11,4	11,1
1990	16,1	10,9	10,8	11,4	10,6	12,5	12,2	10,8	12,2	9,6	14,1	13,8	16,1	12,0	11,9	12,4	11,1
1991	16,9	12,5	12,1	10,5	11,7	11,5	12,8	12,6	13,1	12,3	10,4	11,3	14,1	14,5	16,9	9,0	10,5
1992	14,4	10,4	10,2	12,5	10,3	12,8	10,9	10,2	10,5	14,2	12,4	12,7	12,9	14,4	13,0	10,5	12,7
1993	18,0	13,4	10,0	9,8	9,3	10,4	11,6	15,6	14,7	13,9	12,4	15,9	18,0	15,1	11,7	16,3	12,7
1994	15,5	10,7	10,2	9,9	11,6	12,5	11,6	9,9	12,9	15,5	13,4	13,3	15,0	14,7	13,3	12,2	13,5
1995	14,1	10,3	10,2	9,6	14,1	9,1	10,8	11,5	13,1	12,9	11,7	12,7	13,1	9,8	11,7	10,3	12,1
1996	14,5	12,0	10,6	9,7	10,7	14,5	12,1	12,8	12,2	12,5	14,1	13,6	12,0	12,0	9,5	7,4	11,4
1997	15,8	10,3	10,3	10,2	12,3	13,0	11,2	13,2	10,2	10,6	13,9	15,1	15,3	15,4	10,6	12,5	15,8
1998	17,1	10,4	9,8	11,3	14,0	12,0	13,0	15,9	17,1	13,9	13,8	13,3	15,9	15,0	15,3	14,3	9,0
1999	15,8	10,5	13,5	15,4	11,3	11,2	11,9	15,8	12,8	13,1	13,4	13,1	11,7	11,8	11,6	14,8	14,7
2000	19,7	10,6	12,3	10,8	10,9	14,5	19,7	15,1	15,4	14,3	11,9	12,2	12,9	11,6	10,0	10,4	9,3
2001	17,6	10,4	13,5	17,3	11,6	17,6	14,2	12,0	11,6	12,2	14,0	13,5	12,4	14,0	13,2	11,1	10,4
2002	16,8	10,7	11,6	11,3	10,8	11,9	11,4	11,6	13,7	13,3	13,6	14,0	16,8	16,0	15,5	9,3	10,1
2003	15,4	11,4	13,2	11,3	9,9	11,7	11,9	10,8	13,0	12,2	11,8	13,4	13,0	15,4	13,2	13,3	12,4
2004	16,1	11,3	12,4	12,5	11,7	10,8	13,0	11,4	15,0	14,5	16,1	12,6	12,6	11,7	12,5	11,2	11,4
2005	14,8	9,9	10,1	10,7	9,5	11,1	10,9	11,8	13,9	13,3	14,8	11,8	13,2	13,4	10,5	9,6	8,9
2006	16,0	10,5	13,3	12,3	10,8	12,0	12,5	14,0	12,0	12,7	13,1	13,9	11,8	13,6	16,0	9,8	11,3
2007	15,7	10,8	11,4	11,7	10,3	11,2	10,5	10,3	12,4	15,7	13,0	11,5	11,7	14,7	10,5	9,8	10,7
MEDIA	15,9	10,7	10,8	11,3	11,3	11,8	12,0	12,2	13,0	12,5	13,1	12,9	13,5	13,3	12,3	11,3	11,1
MAXIMA	19,7	13,4	13,5	17,3	14,8	17,6	19,7	15,9	17,1	15,7	16,1	17,2	18,0	16,2	18,2	16,3	15,8

5.1.2 Vientos extremos

Se utilizó la serie de 30 años de la base de datos NCEP/NCAR correspondiente al nodo de coordenadas 35,2375° S ; 56,25° W para realizar un ajuste de valores extremos y determinar intensidades probables para distintos períodos de retorno.

Las series de datos (máximos anuales, **Tabla 6.6**) puede ser considerada como una muestra acotada de una población para la cual la probabilidad de ocurrencia de un evento específico (en este caso que la intensidad del viento alcance un cierto valor x_1) puede ser descrito por medio de una función de distribución de probabilidades $F(x)$.

De las distintas funciones existentes, utilizadas habitualmente para el análisis de valores extremos de viento, se seleccionaron para este estudio las siguientes:

Gumbel $F(x) = \exp(-\exp(-\alpha(x - \beta)))$ [6.1]

Weibull $F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x - \varepsilon}{\alpha}\right)^c\right)$ [6.2]

La estimación de los parámetros de la función $F(x)$ se realiza a partir de los datos que constituyen la serie, utilizando distintos algoritmos numéricos basados en el método de los momentos y el método de máxima verosimilitud. Una vez establecida la función de ajuste, es posible estimar el valor de la variable x que se encuentra asociado a distintos períodos de recurrencia T_r , teniendo en cuenta que el período de retorno es la inversa de la probabilidad.

La bondad del ajuste es evaluada con la prueba de Kolmogorov-Smirnov, que proporciona un indicador (divergencia) que permite establecer si el ajuste es aceptable o debe ser rechazado.

5.1.3 Métodos de ajuste y resultados

Con el fin de estimar los parámetros de ajuste de las funciones de Gumbel y de Weibull para las series de datos presentados en la **Tabla 6.6**, se aplicaron algoritmos numéricos basados en el método de máxima verosimilitud. En la **Tabla 6.7** se presentan los resultados de dicho procedimiento, mostrando para cada una de las series analizadas, el valor estimado para los parámetros de la función de ajuste y el resultado del test de Kolmogorov-Smirnov utilizado para evaluar la bondad del mismo. Aunque la evaluación se realizó para ambas funciones (Weibull, Gumbel) sólo se indican los resultados de la función adoptada.

No obstante se señala que las dos funciones propuestas pueden ajustarse a las series datos observados para las cinco direcciones analizadas, dado que en ninguno de los casos fue posible rechazar la hipótesis del ajuste H_0 para un nivel de significación de $\alpha=0.05$.

TABLA 6.7. Parámetros de ajuste para las funciones de valores extremos

SECTOR	FUNCION	PARAMETRO	Dmax
N	Weibull	c= 3.0202	0.1305
		α = 3.3224	
		ε = 7.7451	
NNE	Weibull	c= 1.4230	0.0873
		α = 2.1317	
		ε = 8.9003	
NE	Weibull	c= 1.1072	0.0646
		α = 2.0422	
		ε = 9.3203	
ENE	Gumbel	α = 0.9695 β = 10.69	0.0888
E	Gumbel	α = 0.6533 β = 10.846	0.0753
ESE	Gumbel	α = 0.8408 β = 11.272	0.0752
SE	Weibull	c= 1.4155	0.0848
		α = 2.6336	
		ε = 9.8327	

Los resultados obtenidos son presentados en la **Tabla 6.8**.

TABLA 6.8. Intensidades máximas del viento (m/s) para distintos períodos de retorno (Base NCEP/NCAR, 1978-2007)

Tr (años)	U ₁₀ (m/s)						
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE
2	10.7	10.5	10.8	11.1	11.4	11.7	11.9
5	11.6	11.9	12.5	12.2	13.1	13.1	13.5
10	12.1	12.7	13.7	13.0	14.3	13.9	14.6
20	12.5	13.5	14.8	13.8	15.4	14.8	15.5
50	13.0	14.5	16.3	14.7	16.8	15.9	16.7
100	13.3	15.1	17.4	15.4	17.9	16.7	17.6
500	13.8	16.6	20.0	17.1	20.4	18.7	19.4

Dado que este análisis fue realizado con series de datos constituidas por treinta valores (máximos anuales del período 1978-2007) es preciso señalar que los valores estimados para períodos de retorno prolongados se encuentran asociados a una incertidumbre natural manifestada por la relativamente escasa longitud de la serie. A pesar de ello, estos valores

resultan de interés práctico y fueron utilizados como datos de entrada para la simulación de las condiciones extremas del oleaje.

Surge de los datos presentados la existencia de algunas discrepancias en cuanto a valores medios y máximos y a la distribución direccional, según la fuente de información consultada. Las diferencias pueden ser atribuidas a la metodología aplicada en la determinación de la variable, a la técnica de registro, a la ubicación geográfica de la estación, al período de registro y a la variabilidad estacional entre las más importantes.

5.2 Nivel del río

5.2.1 Marea astronómica

En el Río de la Plata penetran las ondas de marea procedentes del Océano Atlántico. Durante su propagación se ven alteradas por diversos factores entre los que se señalan: la fricción del fondo, la forma y topografía del estuario y la descarga de los ríos Paraná y Uruguay.

El régimen de la marea astronómica en el río de la Plata es de tipo micromareal (pocas decenas de centímetros de amplitud) con desigualdades diurnas y grandes diferencias entre pleamares o bajamares consecutivas.⁶ La componente astronómica semidiurna lunar M_2 representa más del 65% de la energía presente en la marea. La onda de marea se propaga de Sur a Norte sobre la plataforma continental argentina con amplitudes que aumentan hacia la costa y disminuyen hacia el Río de la Plata Interior.

En el curso superior del río las amplitudes resultan de aproximadamente 0.8 m. Alcanzan a 1 m sobre la costa bonaerense pero solamente un tercio de este valor en la costa uruguaya. Las ondas de marea oceánicas llegan al Río de la Plata con una velocidad aproximada de 200 Km/h y se propagan en su interior con una velocidad media de 30 Km/h, tomándole aproximadamente 12 horas propagarse desde un extremo al otro del río.

⁶ *Patrones de Circulación en el Río de la Plata y su Área de Influencia* Silvana Giordano y Carlos Lasta. Unidad Ejecutora Proyecto Freplata, Junio 2004

La **Figura 6.7** muestra las características del régimen de las mareas indicado (Puerto de Buenos Aires , Dársena F, 34° 34' S; 58° 23' W).

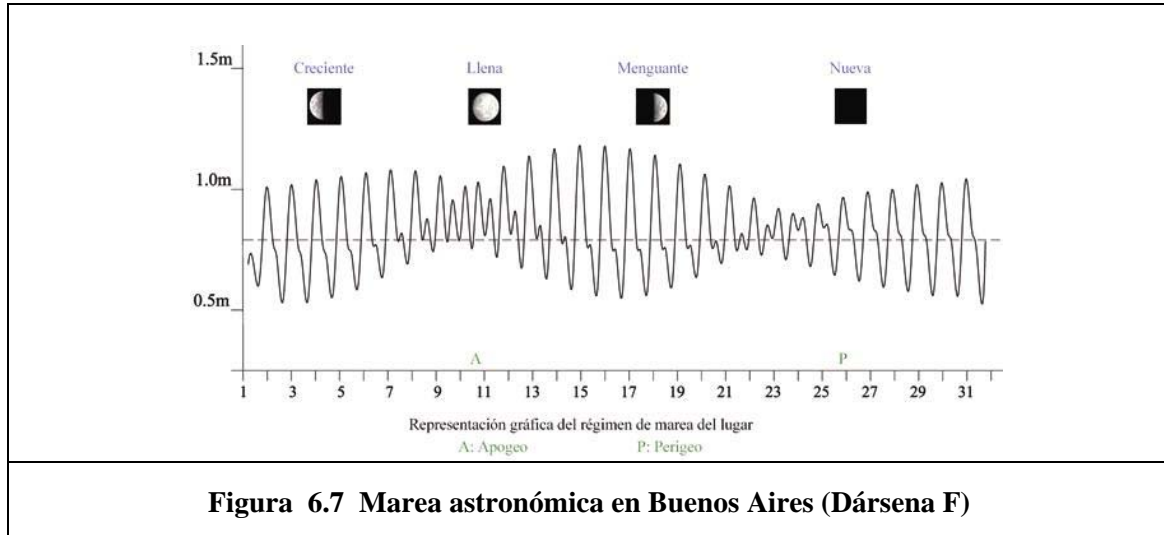


Figura 6.7 Marea astronómica en Buenos Aires (Dársena F)

El nivel medio es de 0,79 m sobre el plano de referencia, coincidente éste con el cero del Riachuelo, coincidente con el 0 MOP.

TABLA 6.9 Marea Astronómica en el Puerto de Buenos Aires

Alturas en metros sobre el plano de reducción				Amplitud	
Pleamar		Bajamar			
Máxima	Media	Más baja	Media	Máxima	Media
1,55	1,07	0,19	0,48	1,04	0,59

Las máximas pleamares astronómicas alcanzan 1,55 m sobre el plano de referencia y las medias 1.0 m. La bajamar media astronómica es de 0,48 m sobre el plano de referencia y la más baja de 0,19. (Tabla 6.9., Predicción 2009)

5.2.2 Marea meteorológica

Los efectos meteorológicos son muy importantes (especialmente en el Río de la Plata Superior) y se manifiestan a través de la acción del viento y de la variación de la presión atmosférica sobre los niveles líquidos.

En el estuario del Río de la Plata los vientos alineados con su eje principal aumentan notablemente el nivel de agua por sobre los valores de la marea astronómica cuando soplan hacia el interior. Se ha estimado⁷ una incidencia de 6.4 cm por cada m/s de velocidad del viento para la dirección SSE (válido para vientos de 5 a 24 m/s). Es decir un viento de 80 Km/h (22.2 m/s) de esa dirección incrementa en promedio 1.50 m el nivel normal del río. Contrariamente y según la misma referencia, los vientos del N reducen los niveles normales del río, y vientos de esa dirección de 80 Km/h inducen reducciones medias del orden del 1 m.

La “marea meteorológica” convierte el del río en un parámetro estocástico (en lugar de un parámetro determinístico, como sería el caso si la acción de la marea astronómica fuera claramente preponderante), para cuya caracterización es necesario recurrir, entonces, a estadísticas sobre los registros disponibles.

La importancia de los efectos meteorológicos es evidente si se considera que el nivel del río resulta afectado por efectos meteorológicos durante un 88% del tiempo, repartiéndose por partes iguales los períodos de sobreelevación y los de depresión respecto de la marea astronómica. Sólo el 12 % del tiempo (coincidente con los períodos de calma de vientos) los niveles del río se ajustan a los valores astronómicos.

En las Referencias (⁸) y (⁹), se han analizado los valores extremos de los niveles máximos anuales que se han registrado en el Puerto de Buenos Aires, según mediciones realizadas por la DNCPyVN en el mareógrafo del Riachuelo. Se han seleccionado de esa extensa base de datos los máximos anuales como eventos extremos. Los mismos presentan una cierta estacionalidad, pues las mareas máximas han concentrado su ocurrencia en el período septiembre – abril (75 %).

⁷ “*El Río de la Plata Entre la Atmósfera y el Mar*”. Marciano Balay. Publicación SHN 621.

⁸ “*Diseño Hidráulico de Obreas de Defensa y de Margen del Complejo Polideportivo La Quinta Key Point*” E.D. Reimer, para Telemetrix S.A., 1987.

⁹ “*Puerto Deportivo Frente al Club A.G.P. - Olivos*” G. Anschultz, para Anchor Inn S.A.

Cabe señalar que los niveles registrados incluyen tanto la acción de la marea astronómica como de la meteorológica y están referidos al cero del Riachuelo (0 MOP). El período de medición más extenso disponible corresponde al período comprendido entre 1905 y 1990. Sobre esa base se ha realizado un análisis de extremos que se presenta en la Sección 3 del presente Informe.

5.2.3 Niveles extremos

El propósito de este análisis es la determinación de valores de niveles máximos del Río de la Plata asociados a distintos períodos de recurrencia. Dichos valores son necesarios para la estimación tanto de la ola de diseño (puesto que ésta depende de la profundidad del río en la zona de interés) como del caudal de sobrepaso por sobre las obras de defensa, inducido por el oleaje incidente.

Los datos utilizados en el análisis de extremos corresponden a niveles máximos anuales para el Río de la Plata registrados por la DNCPyVN en el puerto de Buenos Aires en el período 1905-1990 y en el puerto de Olivos en el período 1942-1985. El plano de referencia para estas series es el cero del Riachuelo (equivalente al 0 MOP).

Se utilizaron resultados de un análisis realizado sobre datos en la estación Palermo para evaluar frecuencia de superación de niveles de forma anual y estacional.¹⁰

La serie de datos obtenida de los registros es considerada como una muestra acotada de una población donde la probabilidad de ocurrencia de un evento, en este caso que el nivel del río alcance un cierto valor x_1 , se describe por medio de una función de distribución de probabilidades $F(x)$ determinada.

De las distintas funciones $F(x)$ existentes, utilizadas habitualmente para el análisis de valores extremos, se seleccionaron para este estudio las siguientes:

¹⁰ “*Efecto del Cambio Climático sobre las Crecidas del Río de la Plata. Informe de Avance N° 4*” Re, M., Menéndez A.N.. LHA – INA, Diciembre, 2003.

Gumbel

$$F(x) = \exp(-\exp(-\alpha(x-u)))$$

Lognormal III

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{1}{\sqrt{2\pi a}(x-m)} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\log(x-m)-b}{a}\right)^2\right) dx$$

Pearson III

$$F(x) = \int_{-\infty}^x \frac{\left(\frac{x-c}{a}\right)^{b-1}}{|a|\Gamma(b)} \exp\left(-\frac{x-c}{a}\right) dx$$

Weibull

$$F(x) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{x-\xi}{\alpha}\right)^c\right)$$

Para el ajuste de los datos a una $F(x)$ determinada se realiza la estimación de los parámetros de la función utilizando distintos algoritmos numéricos basados en el método de los momentos y el método de máxima verosimilitud.

La bondad del ajuste es evaluada con la prueba de Kolmogorov-Smirnov. Esta prueba se basa en la comparación entre la función teórica de ajuste $F(x)$ y la función de probabilidades acumuladas $S(x)$ construida con los datos de la muestra. El estadístico de la prueba es:

$$D = \max |S(x) - F(x)|$$

Si D supera un cierto el valor de la tabla del test correspondiente a un nivel de significación α escogido previamente, entonces la hipótesis de ajuste debe ser rechazada.

Las series de niveles máximos del Río de la Plata registrados en el puerto de Buenos Aires (86 datos) y en el puerto de Olivos (36 datos) fueron ajustadas por tres funciones de distribución diferentes: Gumbel, Lognormal III y Pearson III. El valor estimado para los parámetros de cada función, obtenidos como resultado del procedimiento de ajuste, junto con el resultado de la prueba de Kolmogorov-Smirnov que permite evaluar en cada caso la calidad del ajuste, son presentados en las **Tablas N° 6.10 y 6.11**.

Tabla N° 6.10. Resultados del ajuste para valores máximos en el puerto de Buenos Aires

Buenos Aires 1905-1990	Gumbel	Lognormal III	Pearson III
Parámetros estimados	$\alpha=3.8677$ $u=2.9223$	$a=-0.4485$ $b=0.4588$ $m=2.3657$	$a=0.1398$ $b=4.9712$ $c=2.3657$
Estadístico D_{max}	0.0928	<u>0.0756</u>	0.1042
Resultado del test $\alpha=0.05$	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0

Tabla N° 6.11. Resultados del ajuste para valores máximos en el puerto de Olivos

Olivos 1905-1990	Gumbel	Lognormal III	Pearson III
Parámetros estimados	$\alpha=4.2827$ $u=2.9236$	$a=-0.1682$ $b=0.3380$ $m=2.1712$	$a=0.1145$ $b=5.9304$ $c=2.3790$
Estadístico D_{max}	<u>0.0970</u>	0.1137	0.1034
Resultado del test $\alpha=0.05$	Acepta H_0	Acepta H_0	Acepta H_0

Estos resultados señalan que las tres funciones propuestas pueden ajustarse a los datos observados en ambas series para un nivel de significación de $\alpha=0.05$. Para la estimación de los valores de recurrencia de los niveles máximos se decidió utilizar la función Lognormal III debido a que ésta es la que mostró un mejor ajuste en la serie registrada en el puerto de Buenos Aires, la cual cuenta con un total de 86 datos (**Tabla N° 6.10**). Los valores estimados para las distintas recurrencias se encuentran en la **Tabla N° 6.12**.

Tabla N° 6.12. Estimación de valores de niveles máximos para distintos períodos de retorno

Período de retorno T_R (años)	Nivel máximo (m)
2	3.00
5	3.30
10	3.50
20	3.70
50	3.96
100	4.17

5.2.4 Persistencia de niveles

El análisis de la frecuencia de superación de determinados niveles del río se realizó a partir de datos horarios de 10 años correspondientes a la estación Palermo en el período 1990-1999. El análisis estadístico se realizó en rangos de clase de 0,20 m.

Para el análisis estacional se ha considerado como verano los meses de diciembre, enero y febrero, otoño el trimestre constituido por marzo, abril, y mayo; los meses de junio, julio y agosto se consideraron representativos del invierno, y septiembre, octubre y noviembre de la primavera.

En la **Figura 6.8** se presentan las curvas de probabilidad de niveles, por estación. Puede observarse que el valor más frecuente se halla en el entorno de 0,90 a 1,00 m, correspondiente al nivel medio. Los niveles altos del río (por encima del nivel medio) son menos frecuentes en invierno que en el resto de las estaciones, y particularmente que en el verano.

La **Figura 6.9** muestra la misma información pero indica frecuencia de excedencia del nivel del río indicada en la abcisa. Las diferencias estacionales vuelven a ser notables: particularmente los niveles de río entre 0,50m y 2,00 m son hasta 10% más frecuentes en verano que en invierno.

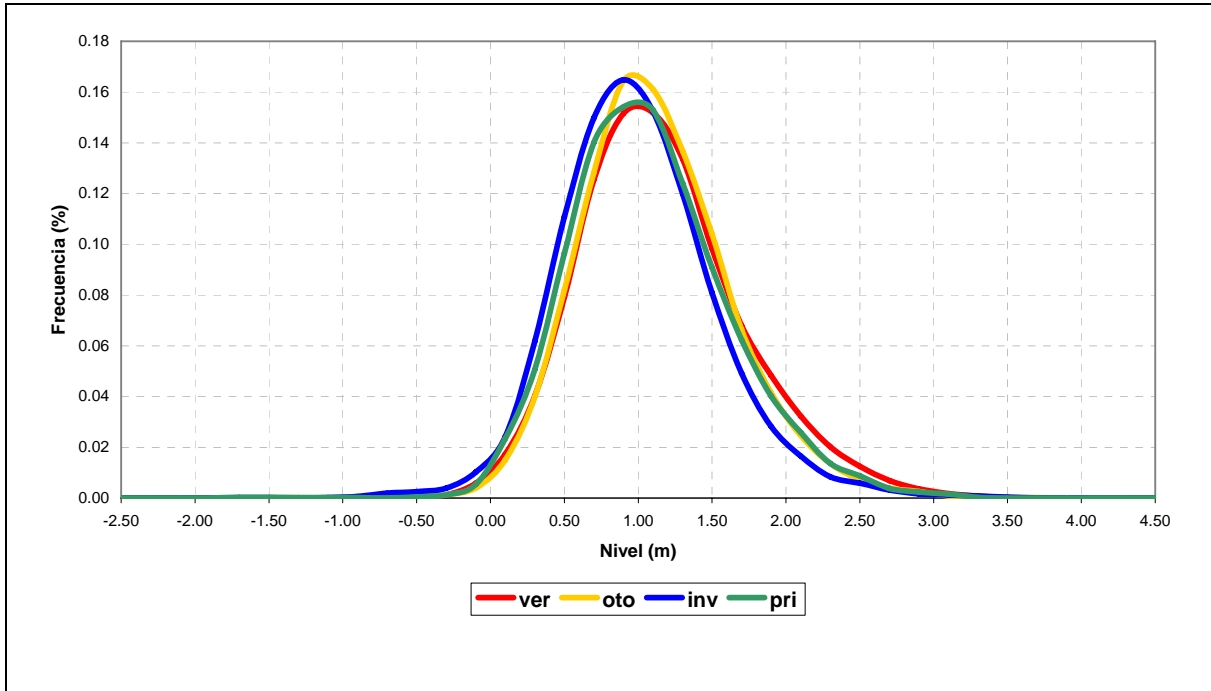


Figura 6.8 Frecuencia de Niveles Buenos Aires - 1990/1999 - SHN

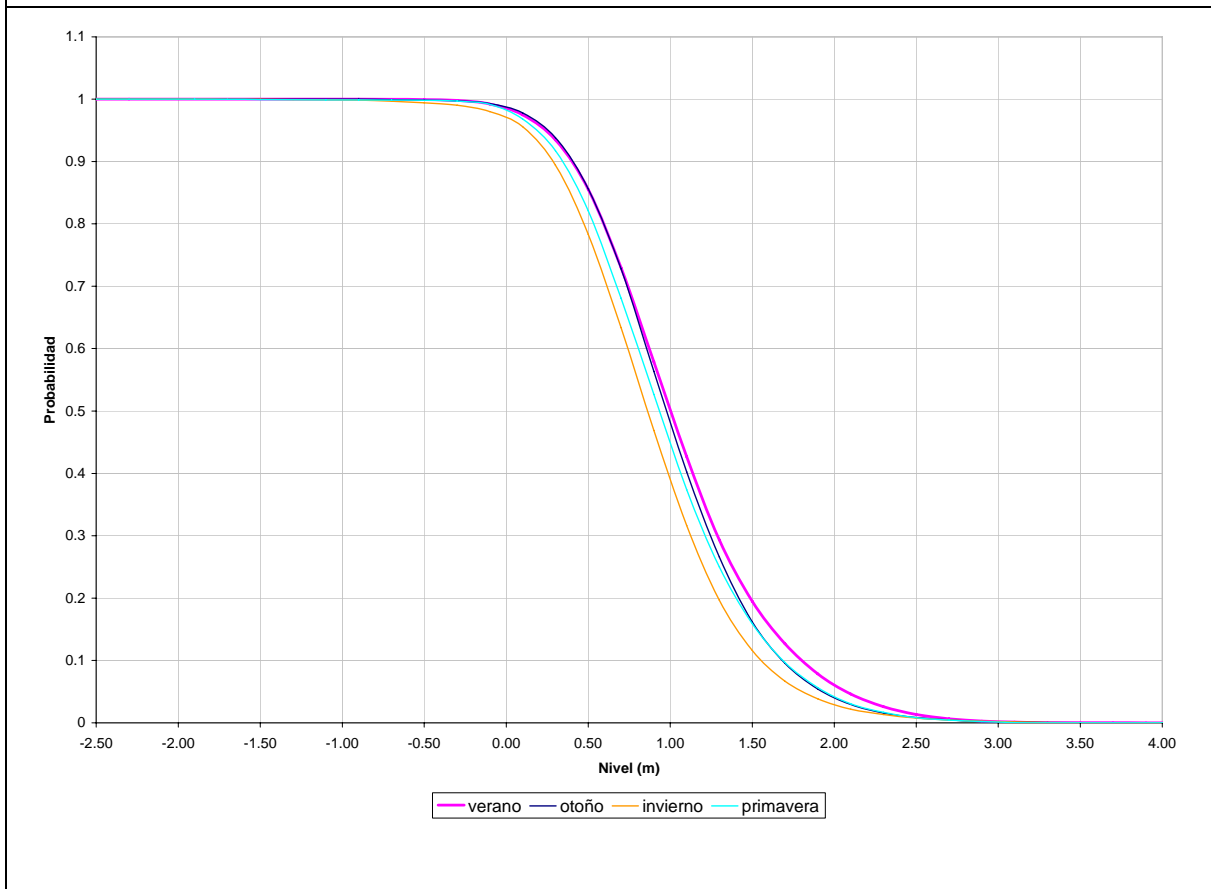


Figura 6.9 Puerto de Buenos Aires Probabilidad de excedencia de niveles

5.3 Clima de olas

El clima de olas ha sido mejor caracterizado en el Río de la Plata Exterior y el área oceánica próxima debido a la mayor importancia de esta variable en esta región, desde el punto de vista portuario y náutico. Aunque el área del proyecto de relleno se halla en el Río de la Plata Superior y en consecuencia resulta poco afectado por las características del oleaje en el Río de la Plata Exterior, se presenta la información recopilada entendiéndose que la misma puede contribuir a describir los procesos generales de generación y propagación del oleaje en el interior del estuario, y resultar además de interés para la implementación y validación del modelo matemático de generación de oleaje que se desarrollará en el marco del presente estudio.

Río de la Plata Exterior

Como parte del estudio Conservación y Mejora de Playas del Uruguay (Ref. 1), entre el 25 de junio de 1976 y el 4 de marzo de 1978 se efectuaron mediciones de olas mediante un olígrafo Datawell Waverider en la entrada al Río de la Plata, al S de Punta del Este, en una ubicación próxima a la Isla de Lobos (aproximadamente 35° 02' 45" S, 54° 56' 00" W), habiéndose obtenido en ese lapso 490 días de información en 1872 registros (una medición cada 6 horas). Los resultados se indican en la **Tabla 6.13**.

Tabla 6.13 Registros de olas en Isla de Lobos

H _{1/3} (m)		Tz (s)																	Σ	%				
		4.0-4.5	4.5-5.0	5.0-5.5	5.5-6.0	6.0-6.5	6.5-7.0	7.0-7.5	7.5-8.0	8.0-8.5	8.5-9.0	9.0-9.5	9.5-10.0	10.0-10.5	10.5-11.0	11.0-11.5	11.5-12.0	12.0-12.5			12.5-13.0	13.0-13.5	13.5-14.0	
3.4 - 3.6					1																		1	0.14
3.2 - 3.4																							0	0.00
3.0 - 3.2			1			1																	2	0.28
2.8 - 3.0			1	1	1	1																	6	0.83
2.6 - 2.8				1	1	2	1	1															6	0.83
2.4 - 2.6		1	1	1	1	1	1	1															7	0.97
2.2 - 2.4				3	5	3	4		1	2		1											19	2.64
2.0 - 2.2		1	1	7	4	2		3	1	2	1												22	3.05
1.8 - 2.0		2	4	4	2	7	2	1	3	2		1	1	1									30	4.16
1.6 - 1.8		2	11	8	7	10	5	2		1	1				1								48	6.66
1.4 - 1.6		3	12	11	11	8	6	5	5	1		2			1								65	9.02
1.2 - 1.4		6	13	12	13	14	10	6	7	3	1	2	1										88	12.21
1.0 - 1.2		5	20	18	23	14	14	12	11	5	4	3											129	17.89
0.8 - 1.0		4	21	15	25	11	16	17	15	5	5	1	4	1									140	19.42
0.6 - 0.8		4	7	13	12	14	12	8	13	8	5	7	4		2	1		1					111	15.40
0.4 - 0.6		1	1	1	1	1	9	3	1	5	5	2	6		1		2				1	1	41	5.69
0.2 - 0.4							2		1		1		1				1						6	0.83
0.0 - 0.2																							0	0.00
Σ		29	93	95	106	90	82	61	58	34	23	19	17	4	3	2	2	1	0	1	1		721	100
%		4.0	12.9	13.2	14.7	12.5	11.4	8.5	8.0	4.7	3.2	2.6	2.4	0.6	0.4	0.3	0.3	0.1	0.0	0.1	0.1		100	

A partir de esos registros se realizaron en el marco de ese estudio, evaluaciones de olas probables para períodos de retorno prolongados. Estas determinaciones se efectuaron aplicando la distribución de Gumbel a una serie de 20 valores máximos mensuales, considerados como eventos independientes.

Una segunda serie de valores máximos cada 10 días (49 valores) fue analizada de manera equivalente. Los resultados se presentan en la **Tabla 6.14**:

Tabla 6.14. Olas en Isla de Lobos. Boya Datawell, 1976-1978

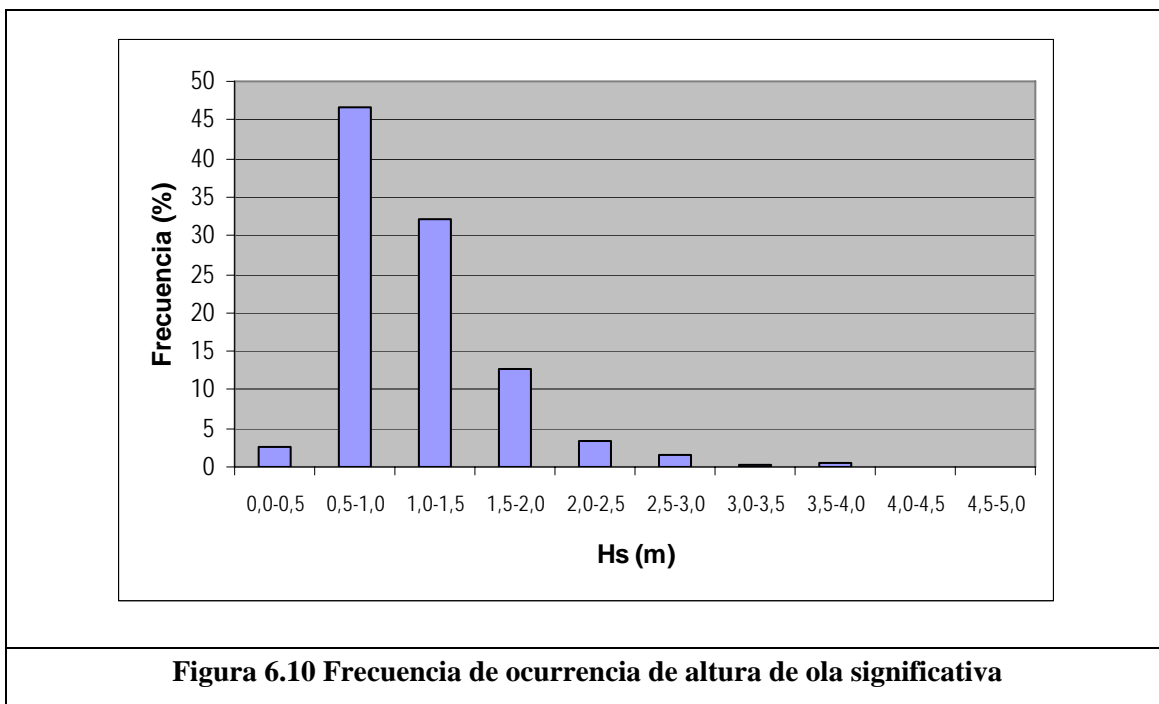
Tr (años)	H(m)	
	mensual	10 días
Media	4,34	3,54
1	5,33	5,75
10	6,58	7,45
100	7,80	9,15

También como parte del estudio indicado se recopiló información publicada por el Ministerio de Tecnología del Reino Unido (Ocean Wave Statistics, N. Hogben, F.E. Lumb, London, 1967), consistente en observaciones visuales desde buques navegando en el área del Río de la Plata y costa oceánica argentina y uruguaya (Área 44) entre 1953 y 1961. El Área 44 es una región que se extiende desde 30° a 40° de latitud S y de 50° a 60° de longitud W, es decir un área de considerable extensión, de aproximadamente 1000 Km de lado. Los valores resultantes de esas observaciones se indican en la **Tabla 6.15**.

Tabla 6.15 Observación visual de olas. Área 44. Ocean Wave Statistics. 1953-1961

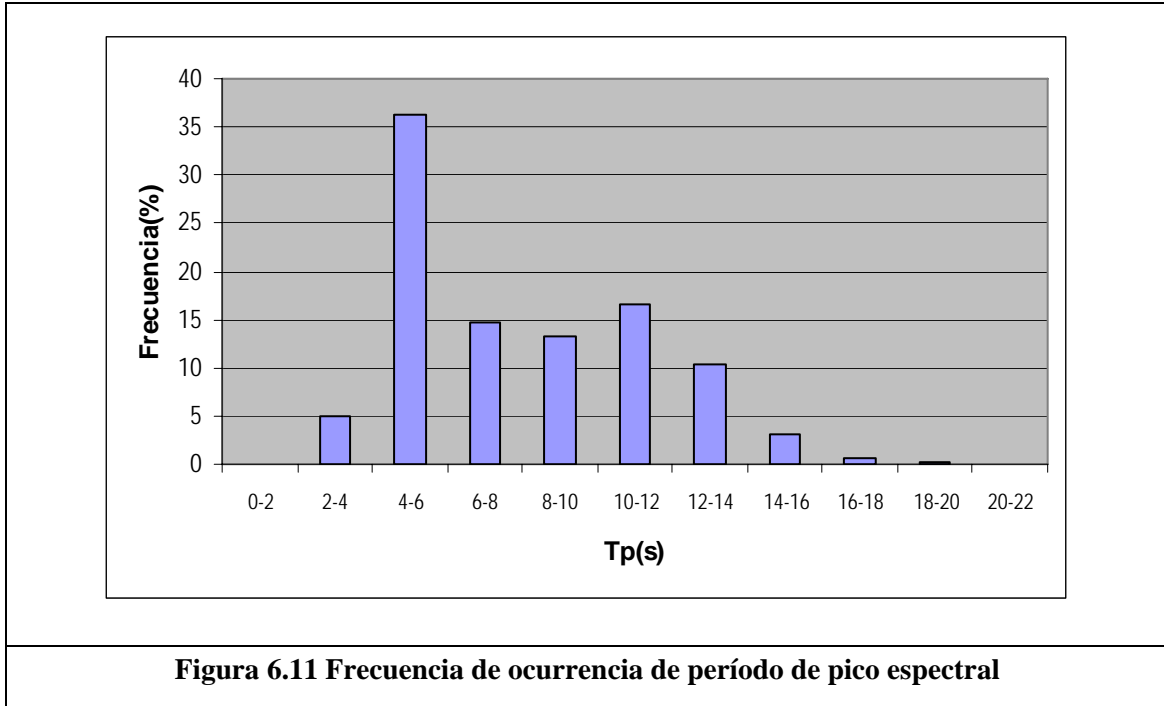
		Alturas (m)														Σ	%			
		0.25	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5			7	7.5	9.5
periodos (s)	>21	2	18	3	1	2													26	0.61
	20-21	3	1																4	0.09
	18-19								1					1					2	0.05
	16-17						1	2	3					1	1			2	10	0.24
	14-15			1	3	6	4	3	8	4	6		1					1	37	0.87
	12-13	3	1	4	10	15	8	8	8	7	1	2		3	2		3		75	1.77
	10-11		4	9	27	43	55	25	28	12	7	1	2	1	1				215	5.07
	8-9	8	8	69	137	184	116	81	29	17	16	1	2	4	2				674	15.9
	6-7	6	42	224	500	305	127	49	31	20	12	2	3	3	4	2			1330	31.3
	<5	150	334	710	384	90	41	16	2	3	3		1	1					1735	40.9
	calma	86	6	16	14	3	4	4		1	1								135	3.18
Σ	258	414	1036	1076	648	355	187	108	68	46	6	9	14	10	2	5	1	4243	100	
%	6.08	9.76	24.4	25.4	15.3	8.37	4.41	2.55	1.6	1.08	0.14	0.21	0.33	0.24	0.05	0.12	0.02	100		

Un ológrafo direccional colocado en la entrada al Río de la Plata¹¹ (35°40'S 55°50'W), al SSE de Montevideo proporcionó datos entre el 20/5/96 al 11/3/98. La altura significativa máxima registrada en el período fue de 4,55 m. La distribución se indica en las **Figuras 6.10** y **6.11**.



¹¹ Comparación entre Espectros de Oleaje Medidos in situ y con tecnología SAR en el Área del Río de la Plata Exterior. Gustavo Anshultz. AADIP, Primer Congreso Argentino de Ingeniería Portuaria, 1999.

Casi el 80% de las olas están comprendidas entre 0,5 y 1,5 m. Algo más del 0,5% supera los 3,50 m.



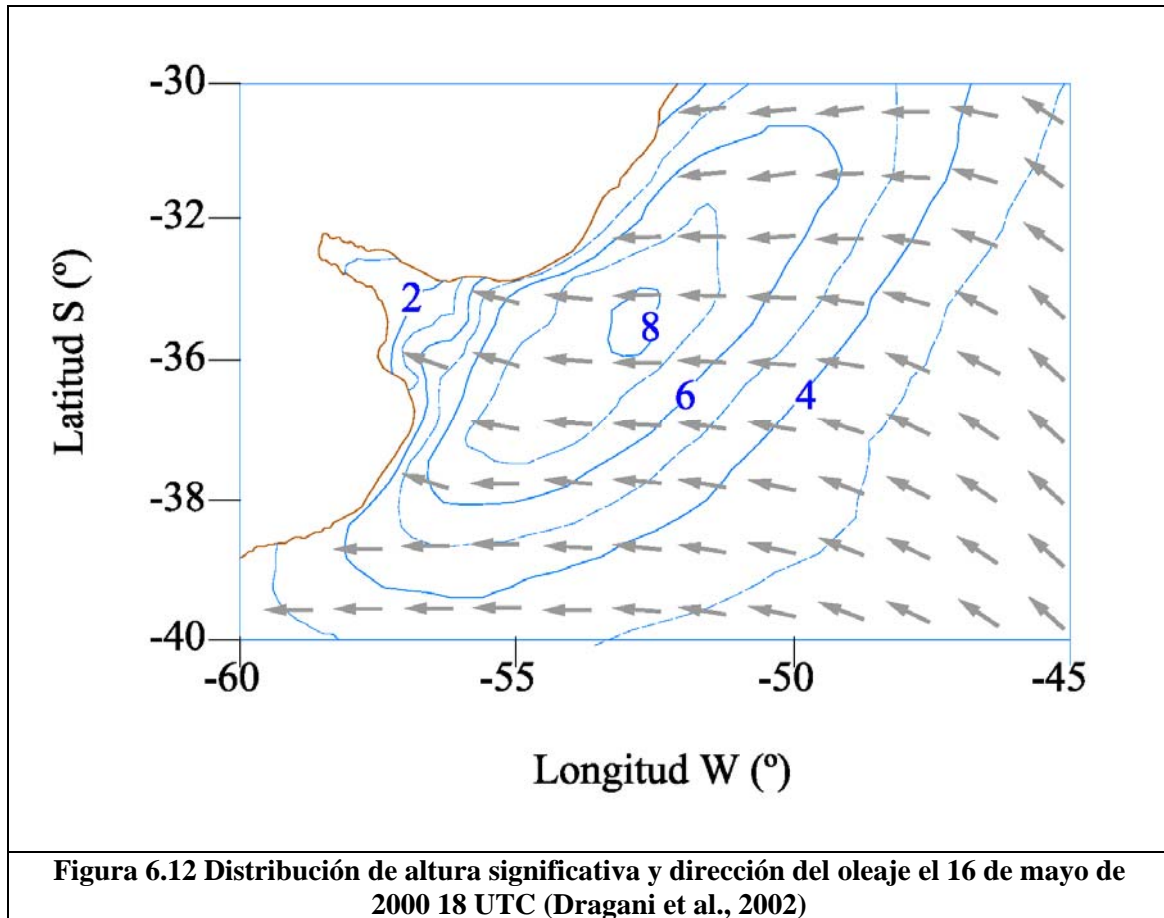
Los períodos de pico espectral muestran una preponderancia de olas de 4-6 segundos generadas localmente por vientos, y de olas de períodos largos (10 a 14 s) típicos de olas oceánicas. La **Tabla 6.16** muestra que las ondas de período largo proceden del SE y S. Debe recordarse que la resolución direccional del olígrafo es de 45° grados, mientras que las olas cuyo período se asocia al estado de mar local proceden básicamente del sector E y en menor proporción del S y SE.

TABLA 6.16 Distribución direccional del oleaje

Tp(s)	Dir									TOTAL
	N	NE	E	SE	S	SW	W	NW		
0 - 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2 - 4	1,38	0,55	0,77	0,24	0,41	0,24	0,3	1,02		4,91
4 - 6	1,3	1,06	13,63	5,18	5,91	3,47	3,07	2,66		36,28
6 - 8	0	0	6,24	3,72	3,58	0,98	0,24	0		14,76
8 - 10	0	0	3,29	8,82	1,14	0	0	0		13,25
10 - 12	0	0	1,12	12,92	2,46	0	0	0		16,5
12 - 14	0	0	0,1	8	2,32	0	0	0		10,42
14 - 16	0	0	0,06	2,19	0,81	0	0	0		3,06
16 - 18	0	0	0	0,51	0,1	0	0	0		0,61
18 - 20	0	0	0	0,1	0,02	0	0	0		0,12
20 - 22	0	0	0	0,04	0,04	0	0	0		0,08
> 22	0	0	0	0	0	0	0	0		0
TOTAL	2,68	1,61	25,21	41,72	16,79	4,69	3,61	3,68		100

Dragani et al.¹² aplicaron el modelo matemático SWAN forzado con vientos de la base NCEP/NCAR y modelaron una amplia región en la desembocadura del Río de la Plata. En particular se simuló una sudestada ocurrida en mayo de 2000, que produjo las olas más altas registradas por el olígrafo fondeado en las coordenadas 35°40' S; 55°50' W en el período junio 1996 - noviembre 2001 ($H_s = 4,55$ m). Los vientos superaron los 10 m/s durante 60 horas y soplaron desde el E al SE. Los vientos medios máximos alcanzaron los 19,7 m/s

¹² *Wave Simulation in the Outer Río de la Plata Estuary: Evaluation of SWAN Model* W. C. Dragani, I. E. Garavento, C. G. Simionato, M. N. Nuñez, P. Martin, and M. I. Campos. J. Wtrwy., Port, Coast, and Ocean Engineering. Volume 134, Issue 5, pp. 299-305 (September/October 2008)



La **Figura 6.12** muestra en particular la notable variación espacial de la altura de ola a medida que las olas ingresan al estuario del Río de la Plata (isolíneas de amplitud). Los vectores indican la dirección de propagación. Mientras que sobre la línea imaginaria que une Punta del Este con Cabo Raso se han determinado olas de 5 m, las olas decrecen rápidamente a medida que ingresan al Río de la Plata, donde las profundidades son considerablemente más reducidas. En el área oceánica, a suficiente distancia de la desembocadura del Río de la Plata, se han determinado olas de 7 a 8 m para la situación modelada.

Como conclusión sobre las fuentes de información consultadas, puede decirse que aunque los registros de olas en el área de la desembocadura del Río de la Plata son limitados, tanto los resultados observacionales como de simulación numérica coinciden en indicar la posibilidad de olas de 8 a 9 m en el área oceánica, y que decrecen rápidamente en amplitud al ingresar al estuario del Río de la Plata, debido a la restricción de profundidad.

En términos generales puede establecerse que en el Río de la Plata el clima de olas resulta fuertemente variable según se trate del tramo Exterior, donde se superponen las olas oceánicas de amplitud notable y períodos relativamente largos, y donde los vientos intensos soplando sobre aguas abiertas de relativa profundidad son causa de la presencia de olas de considerable amplitud.

Por el contrario, en los tramos Medio y Superior, el régimen de olas puede considerarse originado básicamente por el régimen local de vientos, con un desarrollo en general limitado tanto por la presencia de costas cercanas, como por la escasa profundidad. Es precisamente la escasa profundidad del río lo que produce cambios sustanciales en las características de las olas oceánicas que penetran en el estuario a medida que éstas se propagan hacia su interior, produciéndose una drástica disipación de la energía debido a la fricción del fondo, y el desplazamiento del pico espectral hacia las frecuencias más altas, debido a que las componentes de baja frecuencia son las que más rápidamente se disipan.

Río de la Plata Medio y Superior

Especialmente en el Río de la Plata Medio y Superior, por el hecho de tratarse de aguas poco profundas y confinadas para casi todas las direcciones de acción del viento, la generación de olas por vientos locales resulta limitada, con excepción de la dirección SE, por hallarse alineada con el eje del río.

En la zona interior del río de la Plata (Canal Mitre y Puerto de Buenos Aires), las olas más frecuentes son de 0,20 a 0,60 m, *la máxima altura anual del orden de 1 m y los períodos característicos de 2,5 a 3 segundos.*

El área costera de la ciudad de Buenos Aires resulta expuesta principalmente a olas generadas por vientos de los sectores N, NE y E, resultando, por su orientación, protegida de las olas más intensas que se propagan desde el SE. En las direcciones N y NE la distancia de generación es relativamente corta debido a la presencia cercana de la costa uruguaya. La dirección E es la que presenta no sólo la mayor distancia de generación con respecto al sitio de emplazamiento de las obras, sino las mayores profundidades, y es consecuentemente la dirección en que se espera que ocurran las olas más altas para la posición estudiada.

Para el Puerto de Buenos Aires Kreimer¹³ realizó una determinación de olas generadas por viento. El coeficiente de fricción que mejor ajustó los valores medidos fue $f_r = 0.005$. En el Puerto de Buenos Aires (**Tabla 6.17**), la dirección más desfavorable es el E, con olas de 1,76 m para vientos de 15 m/s, que corresponde a un período de retorno de 50 años.

Tabla 6.17 – Olas en el Puerto de Buenos Aires

<i>U</i> (m/s)	<i>Dirección</i>					
	<i>SE</i>		<i>ESE</i>		<i>E</i>	
	<i>H_s</i>	<i>T_z</i>	<i>H_s</i>	<i>T_z</i>	<i>H_s</i>	<i>T_z</i>
10	0,58	3,2	0,86	3,5	1,05	3,7
15	0,88	3,8	1,36	4,3	1,76	4,7

La **Tabla 6.17** indica que la dirección E resulta más desfavorable. La limitación por fetch es la causa de que la dirección NNE, con vientos intensos, no produzca olas de importancia. La intensidad de viento de 10 m/s tiene un período de retorno de aproximadamente un año.

La información disponible con referencia a la duración de los episodios de temporal es escasa. Algunos registros obtenidos en la entrada al Puerto de Buenos Aires muestran una duración del orden de las 24 horas para situaciones extraordinarias que pueden presentarse algunas veces al año. Necesariamente estas duraciones resultan asociadas a la de los eventos meteorológicos que les dieron origen.

De la Ref.⁽¹⁴⁾ se ha extraído la siguiente **Tabla 6.18** que sintetiza los resultados de un estudio realizado para la zona de la traza del Canal E. Mitre. El punto de pronóstico se encuentra en el Km 26.7 de la traza del canal, aproximadamente a la altura de la toma de agua de OSN.

¹³ “Informe Científico de la Carrera del Investigador” Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. E.D. KREIMER. Junio 1992.

¹⁴ EIH “Estudio de antecedentes del Canal Ingeniero Emilio Mitre” Informe Final. CEDEPORMAR, Abril 1985

Tabla 6.18 : Pronóstico de olas en el Canal E. Mitre, Km 26.7

Parámetro	Punto de pronóstico (Km 26.7 en la traza del Canal E. Mitre)
Frecuencia [%], Hs>0.5 m	35.1
Frecuencia [%], Hs>1 m	2.9
Frecuencia [%], Hs>1.5 m	0.01
Dirección más frecuente	N
Dirección de olas más altas	SE
Rango de Hs [m] más frecuente	0.2 – 0.6
Rango de Ts [s] más frecuente	2 – 3
Altura significativa media, \overline{Hs} [m]	0.47
Periodo significativo medio, \overline{Ts} [s]	2.7
Frecuencia % de calma	15.2

En los estudios citados como Ref.(³) y Ref. (⁵) la ola de diseño fue determinada a partir de la aplicación de métodos espectrales para la generación de olas por vientos. En la mencionada en primer término la dirección más desfavorable (E) arrojó una ola de Hs = 1,40 m para viento de período de retorno de 10 años para Punta Carrasco, un área costera próxima al Muelle del Club de Pescadores y a la cabecera Sur del Aeroparque de la ciudad de Buenos Aires.

Debe señalarse el efecto de protección que las obras del Puerto de Buenos Aires ejercen sobre ese emplazamiento. La situación es algo diferente para el área del relleno, que se halla próxima a la desembocadura del Riachuelo, al S del puerto, y donde la orientación de la costa hace que este sitio resulte más expuesto a olas del sector E y SE. No obstante se presentan los resultados para Punta Carrasco en la **Tabla 6.19**.

TABLA 6.19 Características del oleaje en el área de Punta Carrasco

Dirección del viento [grados]	E			NE			N			NO		
Intensidad del viento [km/h]	50.4	36	18	72	54	36	108	72	36	72	54	36
Altura de la ola [m]	1.38	1.07	0.58	0.55	0.49	0.69	1.03	0.70	0.63	0.44	0.39	0.40
Período del oleaje [seg]	4.9	4.5	3.2	3.2	3.0	3.2	4.2	3.3	3.2	3.6	3.2	3.0

De acuerdo a la **Tabla 6.19**, serían probables olas de 1,40 m para la dirección E una vez cada 25 años en promedio, generadas por vientos en el orden de los 50 Km/h.

En la Ref ⁽³⁾ se realizó un estudio de altura de ola en el Puerto de Olivos, a unos 3,5 Km al NW del Parque de la Ciudad. Los resultados se sintetizan en la siguiente **Tabla 6.20**

Tabla 6.20 – Olas en el Puerto de Olivos

Tr (años)	Dirección del viento			
	E		NE	
	H	T	H	T
10	1.54	5.1	1.15	4.3
50	1.62	5.3	1.24	4.4

En las proximidades del Puerto de Buenos Aires entre agosto de 1985 y febrero de 1986 el INCYTH (Ref. ⁴) instaló un olígrafo a 3 Km de la costa, en un punto ubicado entre los canal de acceso Norte y Sur. Se efectuaron cuatro registros diarios de aproximadamente 10 minutos de duración cada uno. Con estos datos se realizó una descripción estadística de las olas en esa zona. El histograma de la altura de ola significativa muestra que más del 60 % de los datos tiene alturas entre 0.2 m y 0.6 m. En el histograma del período de cruces de cero se observa que más del 90 % de los datos tiene valores entre 2 y 4 segundos. Del histograma del ancho espectral (indicador del desarrollo del oleaje) se concluye que el 91 % de los datos corresponden a oleaje medianamente desarrollado.

Como parte del mismo estudio se aplicó un modelo matemático de generación de olas para la descripción estadística del clima de olas. Se consideraron situaciones de viento de intensidad mayor a 35 km/h y de 5 hs de duración, ocurridos en el período 1969 – 1978 y provistos por el SMN. La marea adoptada para el cálculo fue la pleamar de sicigia media. Como resultados de este estudio se concluye que para una misma intensidad del viento la altura de ola significativa es mayor cuando el viento proviene desde las direcciones NE, E, ESE y SE.

Los resultados del análisis efectuado se muestran en la **Tabla 6.21**, en la que μ es el promedio aritmético y σ es el desvío standard de la muestra de valores extremos. Se seleccionaron los valores extremos excedentes totales y según cada dirección de propagación.

De la serie de excedencias (**Tabla 6.21**) puede observarse que para un período de recurrencia de 20 años, el nivel máximo de altura de ola es de 0.90 m en la dirección NE, 1.21 m en la dirección ENE, 2.51 m en la dirección E, 1.67 m en la dirección ESE, 2.52 m en la dirección SE, 2.52 m en la dirección SSE y 3.04 m considerando el total de las excedencias.

Tabla 6.21: Altura de olas significativas máximas excedentes a 3 Km frente al Puerto de Buenos Aires

T retorno (años)	Dirección de propagación							
	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE
2	0.78	0.75	0.75	0.97	1.29	1.27	1.36	1.36
5	0.83	0.83	1.02	1.08	1.82	1.44	1.85	1.86
10	0.86	0.89	1.19	1.15	2.18	1.56	2.2	2.2
15	0.88	0.92	1.29	1.18	2.37	1.62	2.39	2.39
20	0.90	0.94	1.36	1.21	2.51	1.67	2.52	2.52
25	0.91	0.96	1.41	1.23	2.62	1.71	2.62	2.62
30	0.92	0.97	1.46	1.25	2.71	1.73	2.71	2.71
35	0.92	0.98	1.5	1.26	2.78	1.75	2.78	2.78
50	0.94	1.01	1.58	1.30	2.95	1.81	2.94	2.94
100	0.97	1.06	1.74	1.36	3.28	1.92	3.25	3.25
μ	0.788	0.764	0.801	0.992	1.391	1.302	1.45	1.449
σ	0.058	0.094	0.108	0.117	0.601	0.196	0.574	0.573

Como conclusión, de la documentación consultada surge que *olas del orden de 1,30 m de dirección E al SSE pueden producirse frente al Puerto de Buenos Aires una vez cada 2 años en promedio.*

Desde el punto de vista de la persistencia de situaciones, a partir del análisis de los vientos puede establecerse que las olas procedentes de todo el cuadrante NE (es decir desde el N hasta el E) presentarán una persistencia dominante frente a otras direcciones.

Puede notarse que, para la dirección E y un período de retorno de 25 años, la altura de ola probable es del orden de 2,60 m en esta ubicación, es decir considerablemente mayor que la indicada en la **Tabla 6.19** para el área particular de Punta Carrasco. Aunque este resultado puede ser indicativo de la protección que ofrece el Puerto de Buenos Aires al tramo costero ubicado al NW del mismo, es importante señalar la escasa duración de las mediciones y los errores derivados de este hecho en la estimación de la ola probable a períodos de retorno prolongados.

6 MODELACION MATEMATICA

Para estimar las olas en el entorno del relleno se empleó el modelo matemático SWAN. Una descripción de las características del modelo y de su implementación para el presente estudio se da en el **Anexo I**.

Las olas que se presentan en el emplazamiento del proyecto están originadas en vientos locales que soplan particularmente desde las direcciones NE hasta SE. Las olas oceánicas (swell) que constituyen una situación frecuente en el área oceánica, se disipan rápidamente al propagarse por las aguas poco profundas del estuario, y desde el punto de vista práctico no tienen incidencia en el dimensionamiento del relleno, por lo que no serán consideradas.

Mediante la aplicación del modelo matemático SWAN fue posible determinar las propiedades del oleaje generado por el viento y alcanzan el área del relleno.

Se determinaron las propiedades del oleaje para el nivel del río NM= +4 m que es un nivel extraordinario, y que puede considerarse asociado a vientos intensos soplando desde el SE.

6.1 Mapa digital

La información batimétrica utilizada en este estudio procede de las siguientes publicaciones del Servicio de Hidrografía Naval de la Armada Argentina (SHN):

- Carta 50 Mar Argentino de Río de la Plata a Cabo de Hornos (1:3.000.000)
- Carta H-113 Río de la Plata Exterior (1:250.000).
- Carta H-116 Río de la Plata Medio y Superior (1:250.000).
- Carta H-118 : Río de la Plata Superior (1:100.000)
- Carta H-156 Puerto de Buenos Aires (1:20.000)

Las cartas indicadas fueron digitalizadas y expresadas en coordenadas del sistema Gauss Kruger WGS84.

6.2 Implementación del modelo

El modelo se implementó sobre tres grillas de cálculo anidadas de resolución creciente.

Malla 1: 78,5 Km x 113,0 Km; 158 nodos 227 nodos; $\Delta x = \Delta y = 500$ m. Varias cartas

Malla 2: 16600 x 10300 m ; 167 x 104 nodos; $\Delta x = \Delta y = 100$ m. (Carta H-156)

Malla 3: 2500 x 2500 m; 251 x 251 nodos; $\Delta x = \Delta y = 10$ m (Carta H-156)

La posición relativa de las tres mallas se muestra en la **Figura 6.13**.

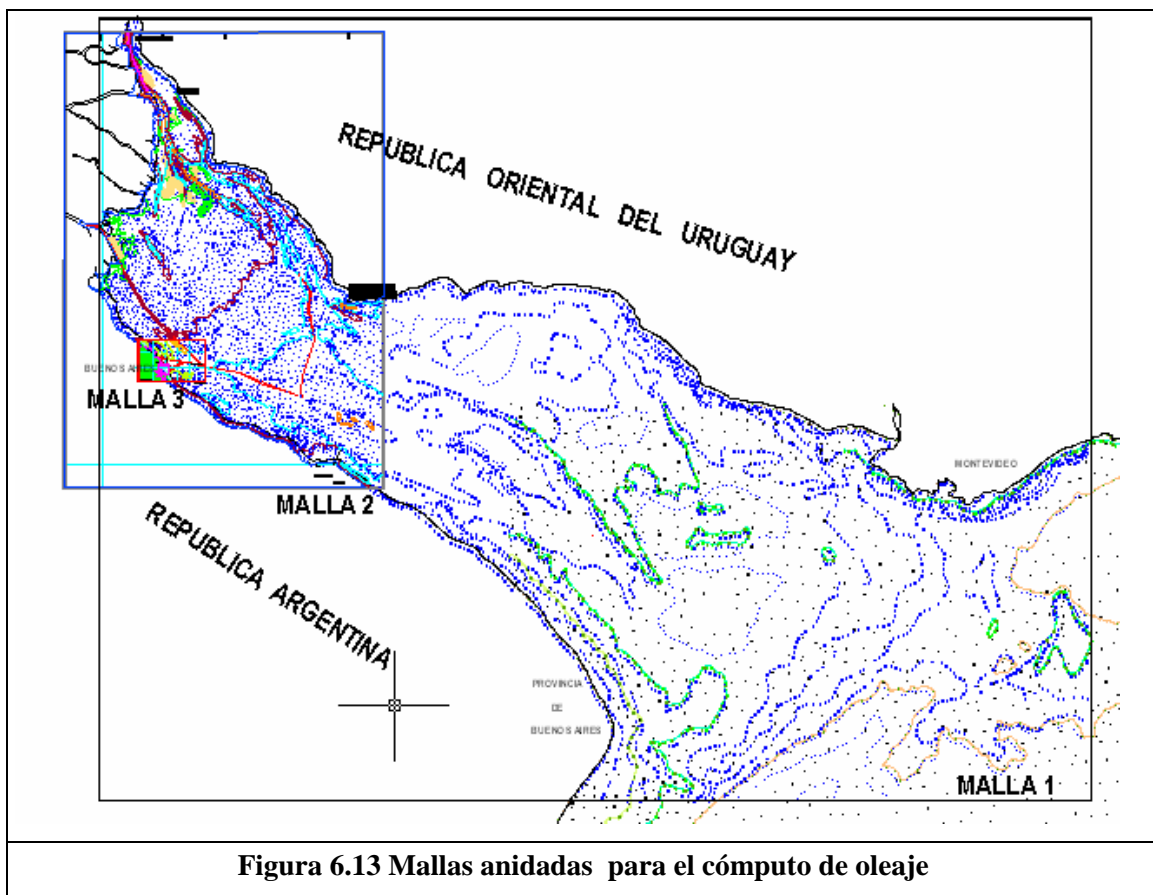


Figura 6.13 Mallas anidadas para el cómputo de oleaje

Los canales de navegación fueron incorporados en las mallas de cálculo 2 y 3. La profundidad del canal de acceso al puerto de Buenos Aires y el área de antepuerto es de 10 m bajo el plano de referencia. El ancho del canal es de 140 m.

El acoplamiento de las grillas permite escribir el resultado de las simulaciones realizadas para la Grilla 1 sobre el contorno de la Grilla 2, sirviendo como dato de entrada para la segunda simulación. El proceso se repite de igual manera entre las Mallas 2 y 3.

6.3 Escenarios

El crecimiento de las olas generadas por el viento está determinado por la intensidad del mismo, la duración y la distancia sobre la cual sopla (fetch).

Se estudiará la generación de oleaje para los vientos que soplan hacia la costa, lo que abarca los sectores N a SSE. Para la intensidad del viento se adoptarán en primera instancia los valores extremos indicados en la **Tabla 6.8**. determinados a partir de la base NCEP/NCAR.

Como período de retorno T_r se escogió aquél correspondiente a una probabilidad de excedencia de la condición de diseño de 20% ($p=0,2$) en la vida útil de la obra (probabilidad de encuentro), adoptada para este cálculo como $L=50$ años. Esa probabilidad puede ser estimada según Burcharth (1996) como sigue:

$$p = 1 - \exp\left(-\frac{L}{T_R}\right) \quad [7.1]$$

Esta expresión tiene en cuenta el carácter aleatorio de los eventos extremos en la vida útil de la estructura. Si el período de retorno T_r del evento de diseño es el doble que la vida útil de la obra, la probabilidad de encuentro resulta próxima al 40%. Según [7.1] la probabilidad de encuentro puede reducirse a 28 % si el período de retorno T_r escogido para la ola de diseño triplicara a la vida útil.

Aplicando el criterio indicado (es decir $p = 0.20$, $L = 50$ años), a partir de la aplicación de la ec.[7.1] se determinó un valor de T_r dado por:

$$T_r = -\frac{L}{\ln(1-p)} = -\frac{50}{\ln(1-0.2)} = 225 \text{ años} \quad [7.2]$$

En todos los casos se considerará que el viento tiene un valor constante en intensidad y dirección sobre toda el área de cálculo y una duración tal que permite el completo desarrollo del oleaje.

Como nivel del río se adoptará $NM = +4,0$ m, nivel extremo probable correspondiente a un período de retorno de 50 a 100 años.

ANEXO I MODELO MATEMATICO DE GENERACIÓN Y PROPAGACIÓN DE OLAS

El estudio de las características del oleaje imperante en la zona del proyecto tiene como objetivo proveer datos de altura, período y dirección de olas necesarios para la verificación de la estabilidad de las estructuras de abrigo y para el análisis de la agitación dentro del recinto portuario.

Dadas las características geográficas de la región, resultó necesario analizar la propagación de olas oceánicas y la generación y propagación de olas producida por la acción de vientos locales. Para la ejecución de ambas tareas se aplicó el modelo **SWAN** (Simulating WAVes Nearshore, L.H. Holthuijsen, N. Booij y otros) desarrollado en Delft University of Technology.

Características principales del modelo matemático

El modelo SWAN es una herramienta utilizada ampliamente en la actualidad dentro del campo de la ingeniería de costas. En la bibliografía internacional se presentan numerosas aplicaciones de SWAN para la modelación del oleaje en zonas de costa marítima, lagos y estuarios.

Este modelo se basa en una representación espectral de la ecuación de balance de acción de olas (o balance de energía en ausencia de corrientes) con todos los procesos físicos modelados explícitamente.

El modelo permite la simulación de los siguientes procesos:

- Propagación rectilínea a través del espacio físico.
- Refracción debida a la variación de la profundidad y corriente.
- Bajío debido a la variación de la profundidad y la corriente.
- Propagación de ola con corrientes opuestas.

Los siguientes procesos de generación y disipación de olas son representados por SWAN:

- Generación de olas por viento

- Disipación por descrestamiento (whitecapping)
- Disipación por rotura de ola inducida por la profundidad
- Disipación inducida por la fricción del fondo
- Interacción no lineal entre frecuencias del espectro en aguas profundas y someras.

Los resultados de cada aplicación se expresan sobre una malla de cálculo, permitiendo de esta manera conocer un campo de olas distribuido en forma espacial dentro de un área de interés determinada.