

**MINISTERIO DE PLANIFICACIÓN FEDERAL, INVERSIÓN PÚBLICA Y SERVICIOS
SECRETARÍA DE OBRAS PÚBLICAS
SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS**

INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA LABORATORIO DE HIDRAULICA

PARQUE PÚBLICO CIUDAD UNIVERSITARIA

**DETERMINACIÓN DE CONDICIONES HIDRODINÁMICAS PARA EL
PROYECTO DE OBRAS**



INFORME FINAL

Informe LHA 234-01-04
Mayo, 2004

DETERMINACIÓN DE CONDICIONES HIDRODINÁMICAS PARA EL PROYECTO DE OBRAS

INFORME FINAL

RESUMEN: se presentan los resultados de un análisis de datos hidrográficos tendientes a caracterizar la condiciones hidrodinámicas para el proyecto de la defensa costera del Parque Ciudad Universitaria, Buenos Aires.

PALABRAS CLAVE: Olas – mareas - Río de la Plata – Buenos Aires



*Parque Público Ciudad Universitaria
Determinación de Condiciones Hidrodinámicas para
el Proyecto de Obras.*

LABORATORIO DE HIDRAULICA

DIRECTOR

Ing. J.C. De Lío

Informe producido por

*Ing. R. Castellano
Ing. N. Tomazin
Téc. C. Haspert*

INDICE DE MATERIAS

1	Objetivos y Alcances.....	1
2	Sitio de emplazamiento de las obras	2
2.1	Descripción.....	2
2.2	Condiciones físicas . Estudios y Antecedentes.....	2
2.2.1	Mareas	2
2.2.2	Régimen de vientos	4
2.2.3	Clima de olas	6
2.2.4	Síntesis.....	11
3	Análisis estadístico de valores extremos de mareas.....	12
3.1	Ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidades	12
3.2	Resultados del ajuste de valores máximos	13
3.3	Resultado del ajuste de valores mínimos.....	15
3.4	Frecuencia de excedencia de niveles	17
4	Olas en el sitio de emplazamiento	19
4.1	Cálculo.....	19
4.1.1	Metodología.....	19
4.1.2	Datos	21
4.1.3	Escenarios de cálculo.....	22
4.1.4	Ajustes a la velocidad del viento	22
4.1.5	Resultados.....	24
4.2	Consideraciones sobre la Ola de diseño	24

PARQUE DE LA MEMORIA

DETERMINACIÓN DE CONDICIONES HIDRODINÁMICAS PARA EL PROYECTO DE OBRAS

Mayo 2004

1 Objetivos y Alcances

El propósito de este análisis es la caracterización de las condiciones hidrodinámicas 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 la verificación del proyecto de estructuras de defensa costera que forman parte del proyecto Parque Público Ciudad Universitaria.

En primer lugar se realizó una búsqueda y evaluación de información hidrográfica disponible en el área a los efectos de generar un marco descriptivo que permita una más completa descripción e interpretación de los fenómenos físicos que se evalúan en el presente estudio.

Como parte de las tareas desarrolladas 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.

También se ha realizado una estimación de las olas que llegan al sitio de emplazamiento mediante la aplicación de un método de cálculo en función del viento registrado en el Aeroparque de la ciudad de Buenos Aires.

2 Sitio de emplazamiento de las obras

2.1 Descripción

El Parque Público Ciudad Universitaria es un desarrollo promovido por la Secretaría de Planeamiento Urbano del Gobierno de la Ciudad de Buenos Aires, en el marco del Programa Buenos Aires y el Río.

El mismo se halla ubicado en la ribera norte de la ciudad (**Figura 1**) y consta de dos áreas parquizadas de forma semicircular bien diferenciadas, ubicadas a ambos lados de la desembocadura del arroyo Vega. El frente costero que abarca el proyecto es de unos de 1500m.

El tramo Sur se halla a la altura de la Avenida Costanera Rafael Obligado e Intendente Giradles, y constituye el Parque de la Memoria. El área de ribera, con un desarrollo aproximado de unos 1000m, estará constituida por la Rambla de la Memoria, habiéndose previsto una obra de defensa costera de tipo muro vertical y una protección del pie.

El segundo tramo se halla ubicado detrás del complejo de Pabellones de la Universidad de Buenos Aires, denominándose Parque Natural. El borde costero de este tramo se desarrolla a lo largo de unos 1200 m, será construido sobre un área a rellenar. La defensa de la ribera estará constituida por un talud verde tratado, un talud protegido, y un camino bajo con borde de tablestacado.

El plano de referencia altimétrico del proyecto se halla a 4,75 m por encima del cero MOP.

2.2 Condiciones físicas . Estudios y Antecedentes

Se presenta una descripción general de las condiciones físicas en el área de emplazamiento de la obra orientado específicamente a caracterizar las condiciones hidrodinámicas (en particular olas y niveles líquidos). La misma se fundamenta en la recopilación de estudios realizados en la región y otros antecedentes disponibles.

2.2.1 Mareas

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 mareas astronómico presenta desigualdades diurnas, produciéndose en consecuencia dos pleamares de distinta amplitud y dos bajamares ordinarias. 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.

Las máximas pleamares astronómicas alcanzan 1,55 m sobre el plano de referencia y las medias 1.08 m. La bajamar media astronómica es de 0,47 m sobre el plano de referencia y la más baja de 0,12.

Los efectos meteorológicos son muy importantes (especialmente en el Río de la Plata superior y el sitio en análisis) 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 estimado¹ 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 (2) y (3), 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 %).

¹ “*El Río de la Plata Entre la Atmósfera y el Mar*”. Marciano Balay. Publicación SHN 621.

² “*Diseño Hidráulico de Obreas de Defensa y de Margen del Complejo Polideportivo La Quinta Key Point*” E.D. Reimer, para Telemetrix S.A., 1987.

³ “*Puerto Deportivo Frente al Club A.G.P. - Olivios*” 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.

2.2.2 Régimen de vientos

Los vientos son el agente generador de las olas en el área, ya que las olas oceánicas no alcanzan a penetrar hasta el Río de la Plata Superior debido a las escasas profundidades del estuario. La descripción del régimen de vientos es entonces de interés por su vinculación directa al clima de olas en el sitio de emplazamiento de las obras.

En la mayoría de los estudios consultados la fuente analizada fueron 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 característica de la región⁴ 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 1**:

Tabla 1 – Vientos en Estación Aeroparque

Recurrencia (años)	Dirección		
	N	NE	E
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

⁴ “Estudio de la Costanera Sur de la Ciudad de Buenos Aires “. INCYTH LHA 059-03-90, 1990

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.

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). Las crecientes y bajantes máximas son causadas por los vientos provenientes del SSE y N, respectivamente.

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 2**:

Tabla 2: Valores extremos de la intensidad del viento en m/s
 Estación Aeroparque

Recurrencia [años]	Direcciones			
	E	NE	N	NO
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 probable 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.

2.2.3 Clima de olas

No existen mediciones sistemáticas a largo plazo ni abarcativas de la gran extensión del Río de la Plata. Su obtención se ha derivado, en la mayoría de los casos, en la necesidad de disponer de información de base en proyectos específicos. Tampoco se tiene conocimiento, en los antecedentes consultados, de mediciones direccionales, de manera que la dirección de propagación de las olas debe inferirse a partir de la dirección del viento que las genera. Las estadísticas de largo plazo se basan en cálculos a partir de registros de viento, obtenidos mayormente en estaciones costeras.

En términos generales puede establecerse que el clima de olas resulta variable según se trate del Río de la Plata exterior, donde es notoria la influencia de olas oceánicas de considerable amplitud y períodos relativamente largos, o de los tramos medio y superior, donde el régimen de olas puede considerarse originado básicamente por el régimen local de vientos. En efecto, la escasa profundidad del río produce cambios sustanciales en las características de las olas oceánicas que penetran en él, a medida que éstas se propagan hacia su interior. Esto se refleja en la variación de las características espectrales, bajo la forma de 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.

En el Océano Atlántico, fuera del río, en un punto ubicado sobre la isobata de 50 m ($36^{\circ} 37' S$, $54^{\circ} 21' 39'' W$) las olas más altas pueden superar los 5 m, con períodos de 14 a 16 segundos. A medida que las olas penetran en el río, los efectos del fondo se hacen notables, en correspondencia con la reducción de las profundidades. Así, mientras que en la zona exterior, como las zonas de Alijo A (profundidad 10 m) y B (13 m), Pontón Recalada (8,50m) y (ya en el límite) Torre Oyarvide (5,60m), el clima de olas resulta con fuerte influencia oceánica, con olas anuales del orden de 1,50 m y períodos de 4 segundos. 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.*

Especialmente en el Río de la Plata medio y superior, por el hecho de tratarse de aguas confinadas para casi todas las direcciones de acción, la generación de olas por vientos locales resulta limitada por la distancia de generación (fetch), con excepción de la dirección SE, alineada con el eje del río.

El área costera de la ciudad de Buenos Aires resulta expuesta principalmente a olas generadas por vientos del N, NE y E, resultando, por su orientación, protegida de las olas más intensas que se propagan desde el ESE y 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 Kreimer⁵ desarrolló un método espectral para la determinación de olas generadas por viento. El coeficiente de fricción que mejor ajustó los valores medidos fue $f_f = 0.005$. En el Puerto de Buenos Aires (**Tabla 3**), 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 3 – Olas en el Puerto de Buenos Aires

U (m/s)	Dirección					
	SE		ESE		E	
	H_s	T_z	H_s	T_z	H_s	T_z
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 3** indica que la dirección E resulta más desfavorable. Sin embargo, debe tenerse en cuenta la ubicación costera del punto de pronóstico. 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.⁽⁶⁾ se ha extraído la siguiente **Tabla 4** que sintetiza los resultados de un estudio realizado para la zona de la traza del Canal E. Mitre. Se utilizaron tres puntos de pronóstico siendo el más cercano a las obras de Parque Público Ciudad Universitaria el que se encuentra en el km 26.7 de la traza del canal, aproximadamente a la altura de la toma de agua de OSN.

⁵ “Informe Científico de la Carrera del Investigador” Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires. E.D. KREIMER. Junio 1992.

⁶ EIH “Estudio de antecedentes del Canal Ingeniero Emilio Mitre” Informe Final. CEDEPORMAR, Abril 1985

Tabla 4 : 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 [%], $H_s > 0.5$ m	35.1
Frecuencia [%], $H_s > 1$ m	2.9
Frecuencia [%], $H_s > 1.5$ m	0.01
Dirección más frecuente	N
Dirección de olas más altas	SE
Rango de H_s [m] más frecuente	0.2 – 0.6
Rango de T_s [s] más frecuente	2 – 3
Altura significativa media, $\overline{H_s}$ [m]	0.47
Periodo significativo medio, $\overline{T_s}$ [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 $H_s = 1,40$ 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.

Se analizaron olas de todas las direcciones y se utilizaron los siguientes períodos: 1.6, 2.7, 4, 5.7 y 10 seg. entre otros. Los resultados indican que *no existen olas provenientes de la desembocadura del Río de la Plata hacia la zona de interés para ninguno de los períodos estudiados, quedando restringida el área de generación de oleaje incidente a los cuadrantes NE y NO.*

Esto puede explicarse por el efecto de protección que las obras del Puerto de Buenos Aires ejercen sobre la zona de estudio, conclusión válida también para Parque Público Ciudad de Buenos Aires, que se halla unos 4500 m al NW.

Por medio de este modelo y teniendo en cuenta las direcciones relevantes que surgieron del análisis estadístico de los vientos, se realizaron determinaciones de la altura de ola para distintas direcciones.

La dependencia entre la intensidad de viento y la altura y período de las olas se indica en la **Tabla 5.**

TABLA 5 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 5**, 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**.

Tabla 6 – 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 canales 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 7**, 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 puede observarse que *para un período de recurrencia de 20 años, el nivel máximo de altura de ola a adoptar 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 7: Altura de olas significativas máximas excedentes a 3Km 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.*

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 5** para el área particular de Punta Carrasco, lo que es indicativo de la protección que ofrece el Puerto de Buenos Aires.

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.

2.2.4 Síntesis

De los antecedentes consultados referidos a sitios próximos al lugar de emplazamiento del Parque Ciudad de Buenos Aires, surge que los máximos niveles de marea están fuertemente influenciados por efectos meteorológicos, produciendo los vientos del E y SE incrementos sobre la marea astronómica y reducciones los del sector N. Son esperables valores del orden 4 m sobre el plano de referencia 1 vez en 50 años en promedio.

Las olas que arriban a la costa son generadas por vientos locales y aunque en el interior del río de la Plata pueden alcanzar valores en el entorno de los 3 m, en la región costera y especialmente al NW del puerto de Buenos Aires, las olas que arriban a la ribera no superan los 2 m de altura significativa en períodos de retorno de 50 años.

3 Análisis estadístico de valores extremos de mareas

El propósito de este análisis es la determinación de valores de niveles máximos y mínimos 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 y mínimos 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.⁷

3.1 Ajuste de los datos a una función de distribución de probabilidades

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:

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

⁷ “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.

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

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.

3.2 Resultados del ajuste de valores máximos

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° 8 y 9**.

Tabla N° 8. 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° 9. 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° 8**). Los valores estimados para las distintas recurrencias se encuentran en la **Tabla N° 10**.

Tabla N° 10. 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

La **Figura N° 2** ilustra el resultado del procedimiento de ajuste. Allí se puede apreciar el grado de aproximación entre la función empírica $S(x)$ y las tres funciones teóricas utilizadas: Gumbel, Lognormal III y Pearson III. El valor de una ordenada de la función de distribución ajustada representa la probabilidad de que el nivel mínimo del río sea menor o igual que el valor de la abcisa correspondiente.

3.3 Resultado del ajuste de valores mínimos

Para el análisis de niveles mínimos del Río de la Plata se utilizaron las series registradas en el puerto de Buenos Aires (86 datos) y en Olivos (30 datos). De las funciones seleccionadas para el ajuste, sólo la de Weibull permitió alcanzar niveles de aproximación aceptables de acuerdo con los datos registrados.

En la serie de datos registrada en el puerto de Buenos Aires se observó la presencia de valores extremadamente bajos: May84 (-3.67), Jul20 (-3.63) y Oct37 (-3.59). Por este motivo se realizó un análisis de datos dudosos basado en criterios físicos y matemáticos para estudiar la posibilidad de eliminar de la serie aquellos valores observados que se alejen significativamente de la tendencia del resto de la información.

En la **Tabla N° 11** se comparan valores de niveles mínimos anuales registrados en Buenos Aires y en Olivos en años para los cuales los datos de ambas series se encuentran disponibles.

Tabla N° 11. Niveles mínimos anuales registrados en el Río de la Plata

Mes/año	NM Bs. As. (m)	NM Olivos (m)	Diferencia (m)
May84	-3.67	-1.50	2.17
Feb45	-2.62	-2.17	1.45
Oct77	-2.22	-2.32	-0.10
Mar75	-1.04	-2.56	0.58
Ago74	-1.04	-0.51	0.53
May48	-0.99	-0.72	0.17

De los valores señalados anteriormente como extremadamente bajos, sólo May84 puede ser comparado con el registro de Olivos. Para este dato se observa una diferencia muy importante entre ambas series, mucho mayor que la diferencia observada en el resto de los casos que se muestran en la tabla, hecho que podría estar indicando la presencia de un valor dudoso.

En el método del Water Resources Council (1981) (Ref.⁸ se propone la siguiente expresión para la detección de datos dudosos dentro de una serie:

⁸ “Hidrología Aplicada “. Ven Te Chow, Maidmen, Mays. Mac Graw Hill, 1994

$$y_L = \bar{y} - K_n \times s_y$$

donde y_L es el umbral de dato dudoso en unidades logarítmicas, \bar{y} es el valor medio de los logaritmos de la serie, K_n es un coeficiente tabulado que depende del tamaño de la muestra n , y s_y es el desvío estándar de los logaritmos de la serie.

Aplicando este método al conjunto de valores registrados en el puerto de Buenos Aires se estimó como umbral de datos dudosos para los niveles mínimos el valor de -3.28 m. Este resultado permite realizar el ajuste de la serie eliminando del registro los tres valores señalados inicialmente como extremadamente bajos (May84, Jul20 y Oct37), ya que estos se encuentran debajo del umbral estimado.

En consecuencia, la serie de valores con 83 datos se ajustó con una función de Weibull con los siguientes parámetros: $\zeta=-5$; $\alpha=3.983$; $c=10.285$. El estadístico para el test de Kolmogorov-Smirnov en este caso vale $D_{max}=0.098$, lo que permite aceptar la hipótesis del ajuste con un nivel de significación de $\alpha=0.05$. La eliminación de los datos dudosos del registro permitió mejorar considerablemente el nivel del ajuste alcanzado con la serie de 86 datos, donde el el valor del estadístico de para el test de Kolmogorov-Smirnov vale $D_{max}=0.134$.

En la **Tabla N° 12** se presentan los niveles mínimos estimados para distintos períodos de retorno utilizando la función de distribución de Weibull ajustada a la serie de valores registrada en el puerto de Buenos Aires.

Tabla N° 12. Niveles mínimos en el Río de la Pata para distintos períodos de retorno

Período de retorno T_R (años)	Nivel máximo (m)
2	-1.16
5	-1.56
10	-1.80
20	-2.02
50	-2.27
100	-2.45

La **Figura N° 3** muestra el grado de aproximación entre la función Weibull utilizada para el ajuste y la función de distribución acumulada empírica construida a partir de los datos observados. El valor de una ordenada de la función de distribución ajustada representa la probabilidad de que el nivel mínimo del río sea menor o igual que el valor de la abcisa correspondiente.

3.4 Frecuencia de excedencia 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 4** 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 5** 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.

En la **Tabla 13** se indican las horas al mes en que un nivel de río es excedido, considerando en promedio una duración de 720 horas por mes. Los valores en cursiva han sido interpolados, ya que como se indicó precedentemente, el intervalo de clase para el análisis realizado es de 0,20m. En la Tabla los niveles se han expresado tanto respecto del plano de referencia del SHN (cero del Riachuelo), como en cotas del proyecto, teniendo en cuenta que el cero del Riachuelo se halla a 4,75 m debajo del plano de referencia de las obras proyectadas.

Tabla 13 - Excedencia de niveles de marea

Nivel (m)	Cota de Proyecto	Horas al mes en que se supera el nivel			
		verano	otoño	invierno	primavera
-1.5	-6.25	720	720	720	720
-0.5	-5.25	720	719	716	720
0.1	-4.65	714	715	706	714
0.5	-4.25	616	617	564	591
1.1	-3.65	307	290	290	269
1.5	-3.25	140	140	117	114
2.1	-2.65	33	21	16	22
2.3	-2.45	19	11	10	12
2.4	-2.35	14.5	8.5	7.5	9.0
2.5	-2.25	10.0	6.0	5.4	6.0
2.6	-2.15	7.5	4.5	4.3	4.5
2.7	-2.05	5.0	3.0	3.1	3.0
2.8	-1.95	3.5	2.0	2.5	2.0
2.9	-1.85	2.0	1.0	1.9	1.0
3	-1.75	1.5	1.0	1.5	0.6
3.1	-1.65	1.0	1.0	1.0	0.2
3.2	-1.55	0.7	0.8	0.7	0.1
3.3	-1.45	0.3	0.5	0.5	0.0
3.4	-1.35	0.3	0.4	0.3	0.0
3.5	-1.25	0.2	0.3	0.2	0.0
3.6	-1.15	0.2	0.2	0.1	0.0
3.7	-1.05	0.2	0.1	0.1	0.0
3.8	-0.95	0.2	0.1	0.0	0.0
3.9	-0.85	0.1	0.0	0.0	0.0

4 Olas en el sitio de emplazamiento

4.1 Cálculo

Para la determinación de las características del oleaje que puede llegar al área de emplazamiento de las obras del Parque Público Ciudad de Buenos Aires se utilizó un modelo paramétrico para aguas poco profundas formulado por Svedrup-Munk y Bretschneider (SMB), el que permite determinar la altura de ola H_s y el período T_s en función de la intensidad del viento. El subíndice s indica valores significativos, equivalentes al promedio del tercio más alto en la distribución espectral en el caso en que la profundidad no afecte la distribución en frecuencia de olas.

4.1.1 Metodología

La determinación se realiza en función de:

- La intensidad del viento
- la distancia sobre la cual sopla (Fetch)
- La profundidad local

Las expresiones paramétricas se expresan en función de las siguientes variables adimensionalizadas:

$$H^* = \frac{g \cdot H_s}{u^2} \quad F^* = \frac{g \cdot F}{u^2} \quad d^* = \frac{g \cdot d}{u^2} \quad T^* = \frac{g \cdot T_s}{2\pi \cdot u}$$

donde H es la altura de ola, T el período (ambos se refieren a valores significativos), d la profundidad, u la velocidad del viento y g la aceleración de la gravedad.

Las relaciones funcionales son:

$$H^* = 0.283 \cdot \tanh\left[0.530 \cdot (d^*)^{\frac{3}{4}}\right] \cdot \tanh\left\{\frac{0.125 \cdot (F^*)^{0.42}}{\tanh\left(0.530 \cdot (d^*)^{\frac{3}{4}}\right)}\right\}$$

$$T^* = 1.2 \cdot \tanh\left[0.833 \cdot (d^*)^{\frac{3}{8}}\right] \cdot \tanh\left\{\frac{0.077 \cdot (F^*)^{\frac{1}{4}}}{\tanh\left(0.833 \cdot (d^*)^{\frac{3}{8}}\right)}\right\}$$

La intensidad del viento ha sido corregida para algunas direcciones, según los lineamientos propuestos en el Shore Protection Manual del U.S. Corps of Engineers de la Armada de los Estados Unidos⁹ (SPM).

Para una determinada intensidad de viento, fetch y profundidad, hay una **mínima duración** necesaria para alcanzar el completo desarrollo de las olas. Para duraciones menores que ésta, las olas se encuentran en crecimiento y resultan por lo tanto de menor altura, mientras que para duraciones mayores, habiendo alcanzado el máximo desarrollo posible (para el fetch y profundidad correspondientes), no se producirán incrementos en su altura.

Sin embargo, para el caso de olas en aguas poco profundas, no se ha desarrollado un método que permita estimar el crecimiento de la altura y período de las olas en función de la duración del viento. Por esta razón los cálculos realizados producen resultados conservativos, en el sentido de que constituyen los máximos valores.

Las expresiones paramétricas anteriormente indicadas han sido desarrolladas para un coeficiente de fricción $f = 0.01$, correspondiente aproximadamente a un fondo de arena. Los efectos de fricción de fondo generalizados, (las olas se propagan mayormente en áreas de escasa profundidad) se incorporan al cálculo a través de la reducción del fetch geográfico, según la metodología desarrollada por Camfield¹⁰.

Brevemente, el procedimiento de cálculo propuesto por Camfield consiste en:

1. Dividir el fetch en tramos de modo de asegurar que la variación de la profundidad y del coeficiente de fricción no superen el 25% de los valores en el inicio del tramo, y que la variación en altura de ola no supere el 50% del valor en el inicio del tramo.
2. Definir un coeficiente de fricción f_f según la composición del fondo.
3. Determinar un factor de decaimiento K_f en función del coeficiente de fricción, de la altura y período de la ola, la profundidad y la longitud Δx de tramo correspondiente. Se determinan dos valores de K_f : uno para $f = 0.01$ y otro para f verdadero.
4. Determinar el factor de ajuste α :

$$\alpha = \frac{1 - K_{f.01}}{1 - K_{fa}} \quad \text{ó} \quad \alpha_r = \frac{1 - K_{fa}}{1 - K_{f.01}}$$

⁹ "Shore Protection Manual". U.S. Army Corps of Engineers, 1984.

¹⁰ "A Method for Estimating Wind Wave Growth and Decay in Shallow Waters with High Values of Bottom Friction. E. Camfield. CERC, CETA 77-6, 1977

según se prevea crecimiento en el tramo o decrecimiento respectivamente.

5. Determinar el fetch ajustado según:

$$F_a = \alpha \cdot \Delta x \quad \text{ó} \quad F_a = \alpha_r \cdot \Delta x$$

6. Determinar el fetch equivalente F_e para la ola en el extremo de ingreso al tramo analizado, realizando el cómputo inverso de las relaciones paramétricas.
7. Determinar el Fetch total $F = F_e + F_a$ y calcular H y T en el extremo del tramo.
8. Repetir el procedimiento para el tramo siguiente.

4.1.2 Datos

Se utilizó la serie de vientos en Aeroparque correspondiente al período 1967-1980. Los valores registrados corresponden a los últimos 10 minutos cada 6 hs y han sido obtenidos a 15 m de altura. Un análisis de extremos realizados en la Ref. (2) permitió establecer las siguientes intensidades de viento para distintos períodos de retorno:

Tabla 14 . Intensidad de viento (en m/s) por dirección

Tr (años)	N	NE	E
10	16.8	14.5	13.8
50	21	16.0	15.0
100	24	16.8	15.5
500	28	18.0	16.2

La información batimétrica del Río de la Plata fue determinada a partir de las siguientes Cartas Náuticas publicadas por el Servicio de Hidrografía Naval

H-118 Río de la Plata Superior. Escala 1:100.000.

H-155 Río de la Plata. Canal Costanero y Puerto de Olivos, San Isidro, San Fernando y Tigre. Escala 1:40.000.

H-116 Río de la Plata Medio y Superior. Escala 1:250.000.

Relevamiento frente al sitio de emplazamiento provisto por el Cliente.

4.1.3 Escenarios de cálculo

Teniendo en cuenta la ubicación del sitio, y los resultados obtenidos por otros autores en la región, se consideró que las direcciones ESE y SE, si bien importantes en lugares alejados de la costa por su distancia de generación no limitada por la costa uruguaya, no resultan dominantes en el área costera donde se halla la obra.

La dirección de viento N fue descartada por asociarse a niveles bajos del río y porque en esa dirección el lecho del Río de la Plata se halla fuertemente afectado por el frente de avance del delta de los ríos Paraná y Uruguay, formando una zona de bajíos (Playa Honda), en los que no resulta posible la generación de olas de consideración para el proyecto.

A los efectos del cálculo se consideraron entonces los vientos procedentes de las direcciones NE, E.

El nivel del río fue considerado con un nivel diferente para cada período de retorno asignado al viento, fundamentándose esto en la estrecha relación entre los vientos que soplan sobre el Río de la Plata y las mareas meteorológicas. Los valores adoptados para el cálculo se indican en la **Tabla 15**.

Tabla 15 - Nivel del Río para distintos períodos de retorno

Tr (años)	Nivel (m)
10	3.50
50	4.00
100	4.45
500	4.70

4.1.4 Ajustes a la velocidad del viento

Las velocidades determinadas a partir de los registros meteorológicos deben ser corregidos a los efectos de su utilización en el modelo paramétrico SMB. Las correcciones se realizaron de acuerdo a los lineamientos fijados por el SPM.

- Corrección por altura

Las curvas de pronóstico de olas utilizan vientos a 10 m de altura. Los registros de Aeroparque fueron obtenidos a 15 m de altura, por lo que, siguiendo los lineamientos del SPM se determinó la corrección por altura como sigue:

$$U_{10} = U_{15} \left(\frac{10}{15} \right)^{0.4} = 0.944$$

- Por duración

El dato de intensidad de viento disponible es la velocidad media en 10 minutos (600 s) cada 6 horas. Es necesario convertir este valor en una velocidad media en el tiempo necesario para desarrollar la ola, t. Para ello se determina en primer lugar la corrección necesaria para establecer la velocidad media en 1 hora (3600 s):

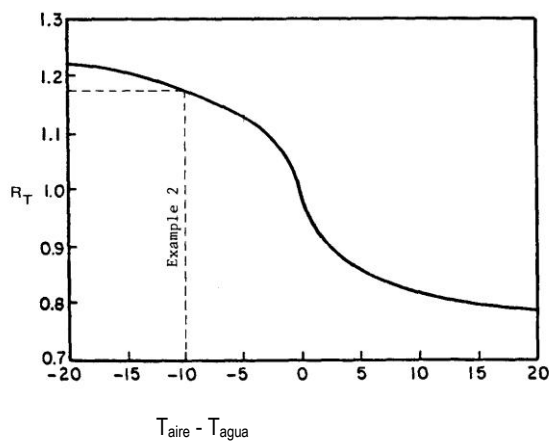
$$U_{3600} = \frac{U_{600}}{1.277 + 0.296 \cdot \tanh \left\{ 0.9 \cdot \log_{10} \frac{45}{600} \right\}}$$

En una segunda etapa se determina la corrección necesaria para determinar la velocidad media en el tiempo de desarrollo de la ola t:

$$U_t = U_{3600} \cdot \{-0.15 \cdot \log_{10} t + 1.5334\}$$

La corrección resultante por duración estuvo comprendida entre 1.04 y 1.10.

- Por diferencia térmica



Las diferencias térmicas entre la superficie del agua y el aire obliga a introducir una corrección que puede ser del orden de 10 a 15% para diferencias de temperaturas de 3 a 5°C. Se adoptó entonces una corrección de 1.10 para vientos del E. No se hicieron correcciones para N y NE, en la hipótesis de tratarse de masas de aire cálido.

- Velocidad friccional

Las ecuaciones paramétricas de pronóstico utilizan como valor de entrada la velocidad friccional inducida por el viento sobre la superficie del agua, dada por:

$$U_a = 0.71 U^{1.23}$$

en la que U es la velocidad corregida.

4.1.5 Resultados

Los resultados se presentan en las **Tablas 16** y **17** para las 2 direcciones analizadas y los distintos períodos de retorno.

Tabla 16 Dir E

Tr(años)	Velocidad del viento (m/s)	Hs (m)	T(s)
10	13.8	1.50	5.5
50	15.0	1.59	5.6
100	15.5	1.73	5.8
500	16.2	1.82	6.0

Tabla 17 Dir NE

Tr(años)	Velocidad del viento (m/s)	Hs (m)	T(s)
10	14.5	1.28	4.6
50	16.0	1.38	4.8
100	16.8	1.52	5.0
500	18.0	1.71	5.3

4.2 Consideraciones sobre la Ola de diseño

El parámetro de carga más importante para el diseño hidráulico de la defensa costera es la altura de ola incidente H. La determinación de la ola de diseño para una estructura se basa

usualmente en el análisis estadístico de mediciones de olas de largo plazo o de resultados de cómputos sobre la base de vientos.

El dimensionamiento de estructuras hidráulicas se basa en el concepto de que una carga de diseño determinada no debe sobrepasar la resistencia de la estructura. Esta selección es realizada sin considerar las incertidumbres involucradas en **la determinación de la carga**. En efecto, la carga de diseño es usualmente definida sobre una base probabilística como un valor característico, por ejemplo el valor esperado dentro de un período de retorno T_R de 100 años.

La única contribución al margen de seguridad es en ese caso la elección del período de retorno de la carga de diseño. Si se escoge un período de retorno de 100 años para caracterizar la ola de diseño H^{100} , esto significa que **en promedio H^{100} será excedida una vez cada 100 años**. La **probabilidad de ocurrencia**, es decir la probabilidad de que la ola de diseño sea superada **durante la vida útil L de la estructura** resulta una mejor aproximación en la determinación de la ola de diseño es utilizar.

Esta probabilidad de excedencia se expresa como (Ref.¹¹):

$$p = 1 - \exp\left(-\frac{L}{T}\right)$$

expresión que tiene en cuenta el carácter aleatorio de los eventos extremos posibles de ocurrir en la vida útil L de la estructura, y en la cual T_R es el período de retorno de la ola de diseño. Es conveniente entonces referir la probabilidad de falla de la estructura a un período L que en la práctica puede ser la vida útil de la misma. La **Tabla 18** muestra la probabilidad de excedencia para distintos períodos de retorno de la ola y vida útil de la estructura.

Tabla 18 Probabilidad de excedencia

L(años)	TR (años)		
	50	100	500
20	0.33	0.18	0.04
30	0.45	0.26	0.06
50	0.63	0.39	0.10

¹¹ “*Design of wave height related to structure lifetime*” Zhou Liu, Hans Burcharth.. ASCE, Coastal Engineering Conference, cap 198, 1996.

Para el caso de escogerse una ola con un período de retorno $T_R=100$ años y $L = 20$ años, la probabilidad de ser excedida esa ola (y en consecuencia de falla de la estructura) resulta $p = 18\%$, y se eleva a casi 40% si la vida útil considerada es de 50 años.

Es de destacar que este enfoque no permite la determinación del **grado de confianza** (o la probabilidad de falla) del proyecto; en consecuencia, no resulta posible sobre esa base optimizar el diseño o evitar el sobredimensionamiento.

Para abordar una solución a este problema pueden aplicarse **métodos probabilísticos** más avanzados en los que se consideren las **incertezas** tanto de las cargas involucradas como de las variables resistentes. Los métodos probabilísticos se fundamentan precisamente en el concepto de que las variables que intervienen en el desarrollo de un proceso de falla (estructural o funcional) de una estructura son de carácter aleatorio.

La incerteza depende de la calidad de los datos meteorológicos y de las técnicas utilizadas para transformar esta información en datos de ola. En la Ref. ¹² se presenta un panorama de la variación del coeficiente $C = \sigma/\mu$ de los errores de medición y de pronóstico, siendo σ el desvío standard de la muestra y μ su valor medio (en este caso la altura de ola) y asignando a C el valor $0,2$ para pronósticos de olas como los métodos propuestos por el SPM.

¹² “Analysis of Rubble Mound Breakwaters”. PIANC PTC II Report of working Group Supplement to Bulletin 78/79. 1992