

Estudio del clima de olas en el Río de la Plata mediante el análisis de datos de olígrafo

Nicolás Tomazin¹, Raúl Cáceres²

1. Programa de Hidráulica Marítima LH-INA. 2. HDROVIA S.A.

E-mail: ntomazin@ina.gob.ar; racaceres@hidrovia-gba.com.ar

RESUMEN: Este trabajo presenta los resultados de un análisis estadístico realizado sobre la base de un registro extenso de datos de olas obtenidos por un olígrafo instalado por HIDROVIA S.A en la zona exterior del Río de la Plata. Los datos analizados cubren un período de tiempo comprendido entre 1996 y 2009, durante el cual el olígrafo se mantuvo operativo aunque con algunas interrupciones parciales. La caracterización del oleaje aquí desarrollada cubre aspectos referidos tanto a condiciones de oleaje frecuente, como así también información vinculada a eventos extremos, dentro los cuales se destacan los habitualmente denominados como sudestadas y pamperos. Durante estos 14 años se ha creado una base de datos de gran utilidad para su empleo en diferentes proyectos vinculados a aspectos de navegación e ingeniería costera. Hoy se cuenta con una serie temporal muy importante desde el punto de vista estadístico y continuar ampliando la misma es todavía necesario, fundamentalmente para ampliar el conocimiento y la fuente de información que permita mejorar la caracterización estadística de los eventos extremos.

INTRODUCCIÓN

Las olas son un fenómeno típico de la hidráulica marítima. Su conocimiento es esencial para el diseño de proyectos costeros ya que su incidencia determina la geometría de las playas, el planeamiento y diseño de las vías de navegación, y la necesidad de abrigo para puertos y protecciones costeras.

El oleaje constituyen un fenómeno tan complejo que no puede ser completamente descrito. Con el objeto de estimar parámetros necesarios para su caracterización es imprescindible introducir algunas simplificaciones que permitan abordar el problema y poder realizar comparaciones con mediciones de campo. Para estas mediciones, uno de los sistemas más utilizados consiste en una boya dotada de un acelerómetro.

La caracterización del clima de olas en el Río de la Plata resulta una tarea particularmente compleja debido a las características físicas y geográficas que presenta este estuario. Las condiciones mediante las cuales pueden generarse y propagarse las olas dentro de este cuerpo de agua varían de acuerdo con el sector que se considere.

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 del viento, la generación de olas por vientos locales es en la práctica el mecanismo dominante en cuanto al oleaje presente. Las olas oceánicas que llegan a la desembocadura del Río de la Plata se disipan rápidamente a medida que se propagan hacia el interior debido a las muy bajas profundidades del río. Los temporales típicos que con frecuencia se observan en el Río de la Plata, y que poseen características bien diferenciadas, son los de procedencia Sudoeste (Pamperos), y los del Sur y Sudeste (Sudestadas).

La presencia de un ológrafo instalado en la zona exterior del Río de la Plata permitió a HIDROVIA S.A. obtener un registro de mediciones del oleaje que, aunque con algunas interrupciones temporarias, abarca un período de 14 años y representa una fuente de información sumamente valiosa para la identificación y caracterización del fenómeno.

Este trabajo presenta una síntesis que describe la metodología para la adquisición y procesamiento de la información, al mismo tiempo que se desarrolla una evaluación de los datos mediante el análisis de espectros de densidad de energía derivados de las mediciones realizadas por el ológrafo.

La información analizada corresponde a un registro de datos de olas obtenido por un equipo Directional Waverider Mk II de Datawell bv. Se trata de una boya esférica de 0,9 m de diámetro que permite medir la altura y la dirección de las olas y que se encuentra posicionada en la zona exterior del Río de la Plata, donde la profundidad natural es del orden de 15 m.

Los resultados del análisis permitieron obtener datos estadísticos sobre la distribución de frecuencias para alturas, períodos y direcciones de incidencia. Se incluye, por otra parte, una clasificación de tipos de oleaje, presentándose gráficos de rosas para oleajes de tipo *swell*, *wind sea* y *combinado*.

Se presenta además el resultado un análisis estadístico de valores extremos para cual se consideró una serie de datos correspondientes a 73 temporales (pamperos y sudestadas) observados durante el período de mediciones en los que la altura del oleaje superó el valor de $H_s = 3$ m.

REPRESENTACIÓN ESPECTRAL DE LAS OLAS

Dado que el oleaje presenta un comportamiento aleatorio, posee ciertas características que permiten establecer criterios estadísticos a partir de los cuales obtener datos representativos. En efecto, en mares y océanos no resulta conveniente realizar mediciones continuas de las olas sino que es preferible contar con muestreos periódicos con intervalos de tiempo constante, los cuales suelen ser habitualmente del orden de 30 minutos o 1 hora.

Un método usual consiste en calcular parámetros característicos que identifiquen al conjunto de olas medidas en cada muestra. Por ejemplo, se pueden calcular alturas o períodos significativos. Esta forma de representar el

oleaje se complementa con un método más eficiente que se basa en el espectro de densidad de energía, el cual es determinado mediante la aplicación de la transformada de Fourier.

Para el procesamiento de datos de olas se distinguen básicamente dos tipos de análisis: el estadístico y el espectral.

El análisis estadístico requiere contar con un registro completo de las alturas de las olas. En un período de tiempo prolongado, necesario para este tipo de análisis, se genera una enorme cantidad de datos. En este caso debe contarse con los medios de almacenamiento y transmisión adecuados.

En el caso del análisis espectral, es de interés determinar el espectro de densidad de energía. Es decir, la representación de la densidad de energía para un estado de agitación dado en función de la frecuencia.

El equipo de medición con el que se tomaron los datos para la realización del presente estudio calcula el espectro de densidad de energía y algunos parámetros espectrales a medida que adquiere.

Estos parámetros son representativos del registro de alturas de olas en un dado período de tiempo y tienen un gran poder de síntesis. Por esta propiedad, el análisis espectral es útil también cuando el almacenamiento de datos es una limitación.

Parámetros fundamentales del oleaje

La interpretación de los espectros de densidad de energía se puede hacer a través de algunos parámetros fundamentales que resumen y caracterizan a los diferentes estados del oleaje.

El olígrafo al que se refiere este estudio utiliza el método espectral descrito y obtiene algunos de estos parámetros fundamentales a partir del espectro de densidad de energía que él mismo calcula.

La mayoría de los parámetros se estiman utilizando los momentos del espectro de densidad de energía. El momento de orden n se define como:

$$m_n = \int f^n E(f) df \quad (1)$$

Cuando se cuenta con datos discretizados, el cálculo de los momentos se puede hacer como:

$$m_n = \sum_i f_i^n E(f_i) \Delta f \quad (2)$$

donde Δf es el intervalo de frecuencias utilizado para la discretización. En mayor medida se utilizan los momentos de orden 0, 1, 2 y 4.

El momento de orden cero m_0 es conocido también como varianza y representa el área por debajo de la curva del espectro de densidad de energía $E(f)$. En otras palabras, es la cantidad total de energía entregada por el oleaje en el intervalo de tiempo considerado.

El momento de orden uno m_1 es el valor esperado o esperanza de la frecuencia f , al cual también se lo llama valor medio.

Así definidos, los momentos de orden 2 o 4 no representan directamente ninguna propiedad del espectro de densidad de energía. Sin embargo, a partir de ellos se pueden derivar otros parámetros útiles.

Usando el momento de orden cero se determina la altura significativa espectral H_{m0} como:

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad (3)$$

La altura significativa espectral refleja el centroide de la densidad de energía. Estrictamente, H_{m0} es un estimador de la altura significativa H_s del oleaje. Tradicionalmente existe otro estimador que puede obtenerse del análisis estadístico de un registro de olas representativo de un estado de agitación: $H_{1/3}$. Este se calcula promediando las alturas del tercio mayor del registro de olas, es decir:

$$H_s = H_{1/3} = \frac{1}{N/3} \sum_{i=1}^{N/3} H_i \quad (4)$$

donde N es el número de alturas de olas individuales H_i en un registro ordenado de mayor a menor en una curva de permanencia. La experiencia demuestra que ambos estimadores (H_{m0} y $H_{1/3}$) coinciden en aguas profundas y manifiestan una leve desviación relativa cerca de las costas. Actualmente, la mayoría de los equipos de medición reportan de forma estándar el valor H_{m0} .

Utilizando momentos de órdenes superiores, puede estimarse también el período medio de cruce por el cero T_z y

el período medio entre crestas T_c : $T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad (5) \quad ; \quad T_c = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}} \quad (6)$

El período medio de cruce por el cero es el promedio de las diferencias de tiempo entre dos mediciones sucesivas de alturas nulas con pendiente negativa (Figura 1). Y el período medio entre crestas es el promedio de los intervalos de tiempo entre dos crestas sucesivas.

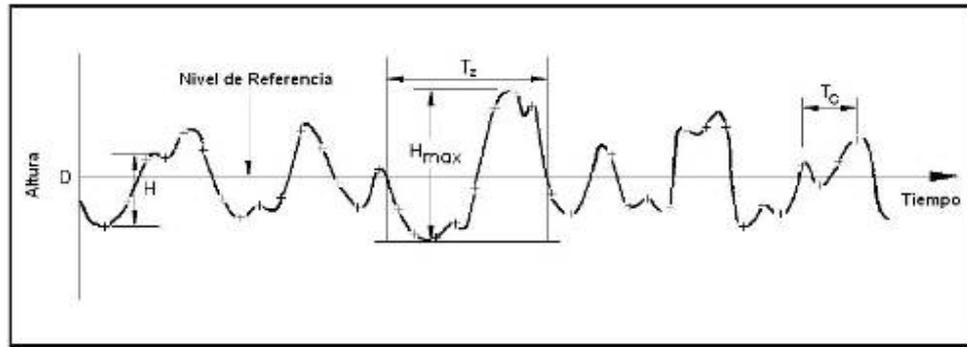


Figura 1. Parámetros de un registro temporal de alturas de olas

Otro parámetro de suma importancia para caracterizar la forma del espectro es el que se denomina ancho de banda espectral ε y se define como:

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}} \quad (7)$$

El ancho de banda espectral es un indicador de lo concentrada que se encuentra la energía en el rango de frecuencias correspondiente. Los espectros con alto ancho de banda espectral o narrow-band (ε cercano a uno) son típicos de estados de oleaje swell. En cambio, los que tienen un ε cercano a cero, llamados broad-band, están relacionados con estados sea.

Hay parámetros representativos que no pueden estimarse con el uso de los momentos. Un ejemplo es el período de pico T_p , el cual se calcula hallando primero la frecuencia correspondiente al máximo del espectro de densidad de energía $E(f)_{max}$.

Otro parámetro indispensable, que no surge de los momentos, es la dirección principal. Este parámetro corresponde a la dirección (medida desde el norte magnético) correspondiente al máximo del espectro de densidad de energía.

Los estudios presentados en este trabajo se basan en cuatro parámetros fundamentales de los mencionados. Éstos son: altura significativa H_s , ancho de banda espectral ε , dirección principal y período de pico T_p .

DESCRIPCIÓN DEL OLÍGRAFO

El olígrafo utilizado para las mediciones en el Río de la Plata exterior es un equipo Directional Waverider Mk II de Datawell bv. Se trata de una boya esférica de 0,9 m de diámetro que permite medir la altura y la dirección de las olas. Además, tiene la capacidad de medir la temperatura de la superficie del agua.

La altura de las olas es medida mediante un acelerómetro colocado en dirección vertical (v). La señal proveniente de este sensor es filtrada e integrada dos veces en el tiempo para obtener el movimiento de la boya, y por lo tanto el de las olas.

El acelerómetro vertical está montado sobre una plataforma formada por un disco suspendido en un líquido de igual densidad. Además, el disco consta de una pieza de metal que lo hace sensible a la fuerza gravitatoria. La gran cantidad de líquido, combinada con la fuerza provista por la pieza de metal, hace que la plataforma permanezca en posición horizontal ante cualquier movimiento esperable producido por las olas.

La dirección de las olas es determinada mediante la medición del movimiento horizontal de la boya y su posterior correlación con el movimiento vertical.

Fijos al olígrafo se encuentran dos acelerómetros horizontales perpendiculares entre sí (en las direcciones x e y). Cuando la boya no está inclinada, las señales de estos acelerómetros se traducen directamente en el movimiento horizontal de las olas.

Por otro lado, se encuentran dos bobinas verticales aferradas a la boya y una horizontal montada en la plataforma. Si hay inclinación, se miden los ángulos de cabeceo y rolido mediante el acoplamiento magnético entre las bobinas. Con la ayuda de los sensores de cabeceo y rolido, la medición de los dos acelerómetros fijos mencionados es traducida en el movimiento horizontal real de la boya.

Finalmente, usando un compás magnético (fluxgate compass) la aceleración medida originalmente en el sistema de coordenadas de la boya es transformada al sistema de coordenadas Norte-Oeste. El compás mide el campo magnético de la Tierra en tres direcciones perpendiculares. Cabe aclarar que el olígrafo mide la dirección desde donde vienen las olas.

Los sensores de movimiento del olígrafo miden un total de ocho magnitudes: tres aceleraciones (A_x , A_y , A_z), tres intensidades de campo magnético (H_x , H_y , H_z) y los dos ángulos de cabeceo y rolido.

El olígrafo está ubicado en el Río de la Plata Exterior, según muestra la Figura 2. Dada esta ubicación se pueden definir un Área Costera y otra de Mar Abierto limitada por las diagonales extremas 57° N y 208° N, medidas desde el norte magnético.

Es de esperar que los frentes de olas tipo *sea* provengan mayormente desde el área costera, mientras que la generación del oleaje *swell* debería provenir desde mar abierto.

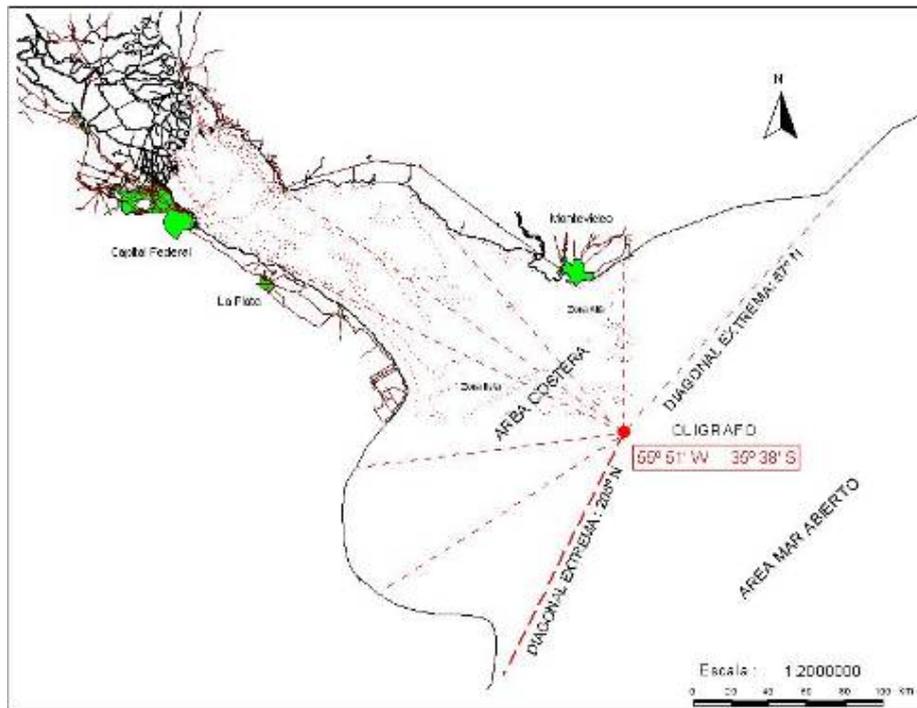


Figura 2. Esquema de ortogonales irradiadas desde el olígrafo hasta la costa.

ADQUISICIÓN DE DATOS

El olígrafo obtiene aceleraciones provocadas por las olas en direcciones norte, oeste y vertical en tiempo real. A partir de dichas aceleraciones, integrando dos veces en el tiempo, calcula los desplazamientos en las mismas direcciones.

La transmisión de todos los datos en tiempo real es costosa e ineficiente. Por esta razón, el olígrafo procesa los datos para obtener información espectral en un formato mucho más compacto y conveniente. Además, este formato es ideal para ser transmitido vía satélite, que es el único medio de comunicación disponible dada la ubicación del olígrafo.

En la boya, el procesamiento interno de los datos genera un espectro de densidad de energía de la siguiente manera. A una tasa de muestreo de 1,28 Hz, cada 3 minutos y 20 segundos, se colectan 256 mediciones de desplazamiento vertical. Una transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) es aplicada a este bloque de datos para obtener un espectro de densidad de energía en el rango de frecuencias de 0,025 a 0,635 Hz (períodos de 1,57 a 40 segundos) con una resolución de 0,005 Hz (0,1 segundo de resolución en período).

Finalmente, se promedian ocho espectros consecutivos fruto de 26 minutos y 40 segundos de mediciones para obtener el espectro que será transmitido al satélite. Con el tratamiento de datos que realiza el olígrafo, el proceso

total demanda 30 minutos. El mismo procedimiento se aplica también a los desplazamientos horizontales para obtener la dirección de las olas.

Dado que el espectro resultante es un promedio de ocho espectros consecutivos, se calcula la dirección principal de las olas junto a una dispersión direccional (spread). Es decir, que para cada intervalo de frecuencias se promedian las direcciones medidas y se calcula su desviación estándar.

Para el envío de los datos al satélite, el rango total de frecuencias del espectro medido es dividido en 15 bandas, cada una conteniendo una fracción predeterminada de la varianza total. El envío de datos empieza cuando un satélite “ve” al olígrafo. En ese momento comienza la transmisión del último espectro calculado.

Diariamente, entre los cinco satélites del sistema Argos, se cuentan alrededor de 24 pasadas. Por esta razón, si bien el olígrafo genera 48 espectros en el lapso de 24 horas, no todos son colectados. Una vez finalizada la comunicación, el satélite envía la información a una base de datos en tierra.

CLASIFICACIÓN DE LOS ESPECTROS DE DENSIDAD DE ENERGÍA

Para describir el clima de olas de la región estudiada se adoptaron criterios sugeridos por otros autores y utilizados frecuentemente para la clasificación de los espectros de densidad de energía obtenidos en distintos Estados Característicos. Los criterios de clasificación se basan en dos parámetros: el ancho de banda espectral ε (definido anteriormente) y la relación de energía R_{m0} .

La relación de energía se define como el cociente entre el área de la componente sea y el área del espectro total,

es decir:

$$R_{m0} = \frac{m_{0sea}}{m_{0total}} \quad (8)$$

En la Figura 3 se presenta un esquema descriptivo de los criterios de separación utilizados para obtener una primera clasificación del oleaje en estados swell aparente o sea aparente. A partir de esta clasificación, se toma en consideración también al ancho de banda espectral para derivar la clasificación final en cinco estados predominantes.

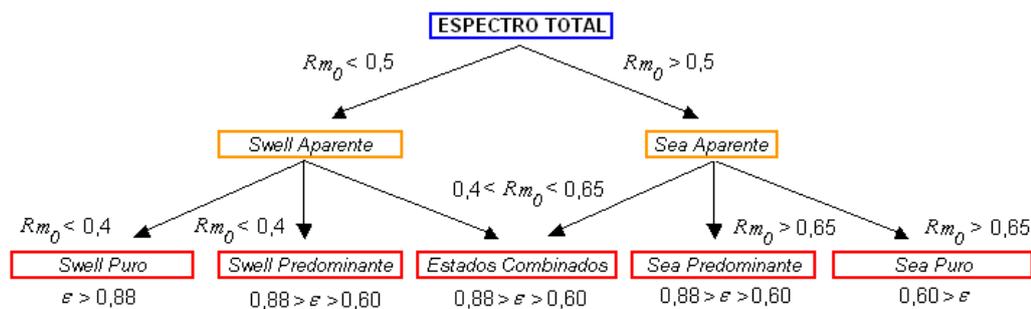


Figura 3. Esquema descriptivo del filtrado de datos.

De esta clasificación se obtienen estados *swell puro*, *swell predominante*, *estado combinado*, *sea predominante* y *sea puro*.

El procesamiento de la información requiere dividir el espectro total registrado por el instrumento en componentes *swell* y *sea*, con lo cual surge la necesidad de determinar una frecuencia de separación (o corte) $f_s = 1/T_s$, tal que:

$$\begin{cases} T < T_s \Rightarrow \text{Componente Sea} \\ T > T_s \Rightarrow \text{Componente Swell} \end{cases}$$

La identificación de la frecuencia de corte (o separación) se realizó a partir de la observación de los espectros totales y gráficos de dispersión, los que constituyen es un agrupamiento no cronológico de los datos para determinar tendencias o posibles dependencias funcionales. En particular, en este caso se graficaron los tres parámetros fundamentales (H_{m0} , ϕ y ε) en función del período de pico T_p , pudiéndose determinar que, en términos generales, la separación ocurre para períodos T del orden de los 6 segundos, tal como se aprecia en la Figura 4 para el caso de la altura significativa.

Con esto se define: $T_s = 6 \text{ s} \Rightarrow f_s = \frac{1}{T_s} = 0,167 \text{ Hz}$

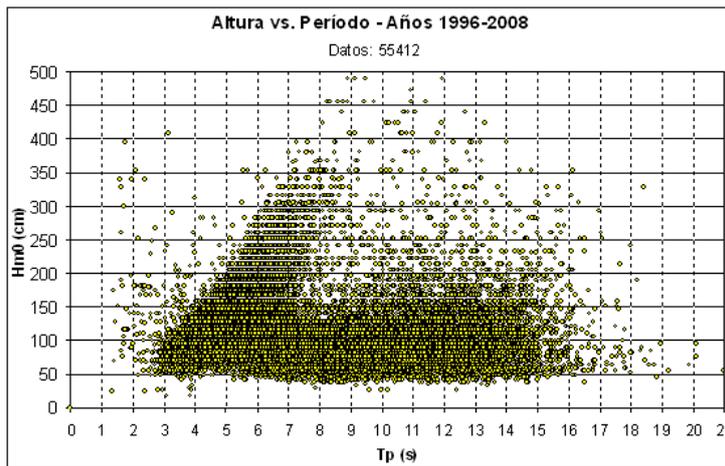


Figura 4. Dispersión de las Hs en función de los Tp para los espectros totales en el período 1996-2008.

Para confirmar el valor de separación surgido del análisis de espectros medidos, se realizó un filtrado en la dirección de propagación de las olas. Para ello se definió un Área Costera donde pueden desarrollarse olas tipo sea y un Área de Mar Abierto donde se generan los frentes tipo swell (Figura 2):

$$\begin{cases} \phi > 208^\circ \text{ N y } \phi < 57^\circ \text{ N} \Rightarrow \text{Área costera} \\ 57^\circ \text{ N} \leq \phi \leq 208^\circ \text{ N} \Rightarrow \text{Área de mar abierto} \end{cases}$$

Si se filtran los datos dejando únicamente las olas provenientes de la zona costera se ve que desaparecen casi totalmente los espectros con valores de T_p mayores a 6 segundos. Es decir que la elección de T_s está de acuerdo con la definición de que los frentes sea se generan localmente.

A partir de esto, las componentes *swell* y *sea* son construcciones matemáticas que fueron utilizadas posteriormente para clasificar a los espectros totales en diferentes grupos.

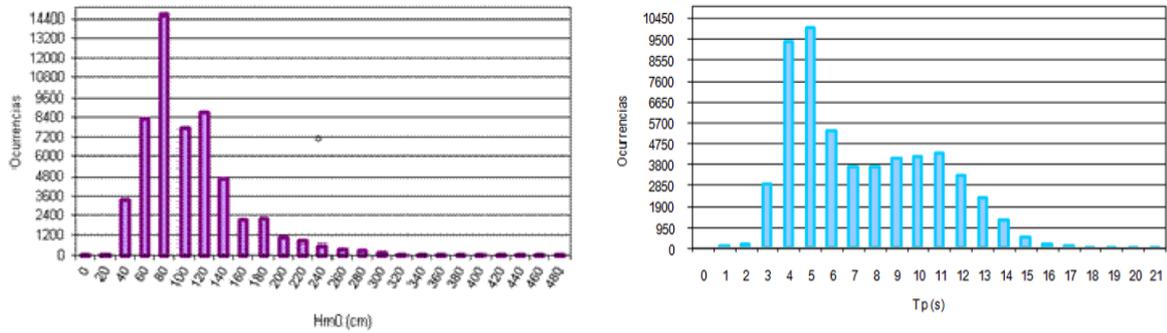
RESULTADO DEL ANALISIS PARA LA DETERMINACIÓN DEL CLIMA DE OLAS

El procesamiento de la totalidad de los espectros registrados en el período 1996-2009 permitió general la base de datos que se utilizó como fuente de información para el análisis estadístico orientado a la caracterización del clima de olas en la región del Río de la Plata Exterior. En primer lugar se presenta el análisis correspondiente a los espectros de olas totales y, posteriormente, el resultado del análisis realizado reagrupando la información en tres estados principales que representan claramente el clima de olas en la región de estudio: Estado de Swell, Estado de Sea, y Estado Combinado.

Olas totales

La Figura 5 muestra los histogramas de frecuencia obtenidos para la altura de ola y los períodos pico, señalando en el eje de las ordenadas la cantidad de eventos registrados (ocurrencias) correspondientes a un rango de valores dado. Cada rango está identificado por su valor mínimo, los cuales corresponden al eje de las abscisas.

Al observar estos gráficos de frecuencia se pueden determinar algunas características generales del oleaje. Se ve que los frentes de olas tienen predominantemente alturas significativas que van desde los 60 cm a los 140 cm (80% de ocurrencias) con un total de 491 casos (menos del 1%) que superaron el valor de $H_s=3$ m. Por otra parte, se aprecia una gran concentración de datos con períodos de pico menores a los 6 segundos. En efecto, los mismos representan alrededor de un 50% del total de los datos, mientras que el 50% restante se ubica en un rango más amplio que va desde los 6 a los 21 segundos.



a) Altura significativa del oleaje (Hs)

b) Período de pico (Tp)

Figura 5. Gráficos de frecuencia para el registro completo de datos (1996-2009)

Respecto de la distribución de las direcciones, los resultados arrojaron un claro predominio del oleaje proveniente desde el SE (31.6%), con una componente importante de la dirección E (18%), y en una menor medida aparecen porcentajes del ESE (12.1%) y SSE (10.7%). La Figura 6 muestra el gráfico correspondiente a la rosa de olas para el oleaje total, en el mismo se sintetiza el análisis de estos resultados.

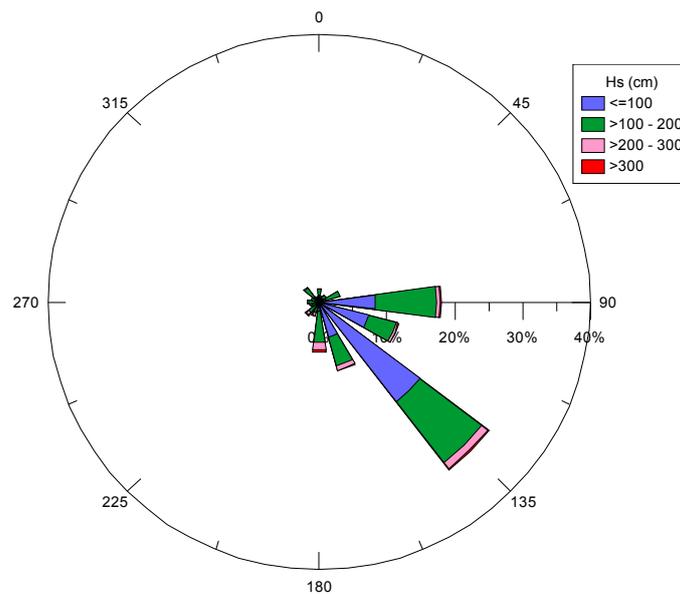


Figura 6. Gráficos de rosa de olas para los espectros de oleaje total correspondientes al período 1996-2009.

Estado de Swell

El estado de swell ocupa un 21,8% de la totalidad de datos registrados, componiéndose por un porcentaje mínimo de swell puro (0.8%, correspondiente a 438 casos en 13 años) y una mayoría de casos de swell predominante (21%), según los criterios de clasificación utilizados en este trabajo.

Este tipo de oleaje proviene mayoritariamente de la dirección SE (55%), con componentes menores, pero de cierta importancia, provenientes del ESE (8%) y el SSE (5%). Los datos obtenidos muestran que dichos frentes tienen mayormente alturas significativas que van desde los 40 cm a los 160 cm (80% de ocurrencias). El ancho de banda espectral que va de 0,70 a 0,90 (97%). Los períodos de pico presentan una importante dispersión y van desde los 6 hasta los 18 segundos (99%).

Estado de Sea

Para este estado se consideran la suma de la fracción denominada anteriormente como Sea predominante (33 %) con la fracción minoritaria definida como Sea Puro (1,4%), para la cual se observaron un total de 760 casos en todo el período de mediciones (13 años).

En este caso, a diferencia de los otros estados de oleaje, se obtuvo una distribución más amplia en cuanto a la cantidad de direcciones con porcentajes de ocurrencia considerables. De todos modos, se observa un claro predominio de la dirección E (25%). En menor medida se destacan el S (9.5%) y las direcciones SE (9.0%) y ENE (8.5%).

El estado *sea* tiene como características una altura significativa comprendida entre los 60 y 160 cm (89% de los datos), anchos de banda espectral entre 0,55 y 0,70 (99%). Los períodos de pico se encuentran concentrados en el rango de 3 a 6 segundos (90%).

Estados Combinados

Los Estados Combinados son el ejemplo más representativo de la coexistencia simultánea de los frentes de tipo *swell* y *sea*. Estos estados representan un 43,8% de los datos totales.

Los estados combinados muestran efectivamente características dispares sin predominio de frentes *swell* o *sea*. Para la dirección resultante de la combinación de espectros el predominio es del SE (37%), lo cual se encuentra asociado a la energía aportada por el *swell*. De todas formas, se observa también una clara influencia del *sea*, reflejada en el alto porcentaje que corresponde a la dirección E (18.5%). Con menores porcentajes aparecen ESE (15.5%) y SSE (13.7%).

El estado combinado tiene como características una altura significativa comprendida entre los 70 y 180 cm (80% de los datos) y anchos de banda espectral entre 0,60 y 0,80 (99%), Los períodos de pico se encuentran distribuidos en el rango de 3 a 17 segundos.

ANÁLISIS DE VALORES EXTREMOS

El propósito de este análisis es la determinación de la relación altura significativa-período de retorno correspondiente al oleaje. Para ello, se evalúa el ajuste de una serie de datos correspondientes a temporales severos con funciones de distribución de probabilidades teóricas utilizadas habitualmente para el análisis de valores extremos de altura de olas.

En el desarrollo de esta tarea pueden emplearse dos metodologías diferentes: por un lado, el ajuste de una serie de valores máximos anuales utilizando funciones del modelo de Valores Extremos Generalizados (GEV); por el otro, el ajuste de una serie de valores extremos definidos a partir de la superación de un determinado umbral, lo que se conoce como método POT (Peak Over Threshold) y para el cual se utiliza comúnmente la función de distribución de probabilidades de Pareto.

En virtud de las características del registro de datos disponibles para este estudio pueden realizarse una serie de observaciones que justifican la preferencia del método POT por sobre el de máximos anuales.

En primer lugar, el período de mediciones con el que se cuenta (julio 1996-agosto 2009) resulta escaso para un análisis de este tipo y, en consecuencia, las proyecciones de valores de Hs asociados a períodos de retorno elevados (superiores a $T_r=50$ años) que puedan obtenerse del análisis estarán sujetos a niveles de incertidumbre importantes. Esta dificultad se presenta de igual modo para ambos métodos.

Una dificultad importante para la aplicación del método de máximos anuales consiste en la gran cantidad de interrupciones y faltantes de datos observadas en el registro a lo largo de los 14 años de mediciones. Esto implica una alta posibilidad de pérdida del valor máximo real de Hs representativo de cada año. Por otra parte, el procedimiento para la estimación de los parámetros de la función de ajuste desarrollado solamente con 14 valores (uno por cada año de registro) introduce un grado adicional de incertidumbre (aumento de varianza) en el proceso de cálculo.

El método POT presenta la ventaja de no depender de la completitud de los años de registro. En efecto, siendo los datos estadísticamente independientes (en el caso de alturas de olas de temporal esto es perfectamente aceptable), la serie de eventos extremos se construye considerando los casos que superan el umbral previamente fijado, independientemente de la fecha de ocurrencia o de la cantidad de eventos que hubiere en cada año. Esto implica que pueda trabajarse con un registro que puede suponerse continuo conformado por la suma de todos los intervalos de medición. En este caso concreto, la suma de intervalos de medición obtenidos entre julio de 1996 y agosto de 2009 conforman un registro con una duración efectiva de 9.5 años.

Ajuste por método POT para el registro completo de los datos

En primer lugar fue necesario definir el valor de Hs que será utilizado como umbral u , a partir del cual se obtuvo la serie de eventos extremos. Esto implicó considerar un balance entre una adecuada representación de las

condiciones extremas y la incertidumbre que se pueda introducir en el proceso de cálculo. Es decir, un valor demasiado bajo de u permitiría incluir un número elevado de casos en la serie de eventos extremos y así reducir la varianza en las estimaciones, pero a la vez, eso implicaría el riesgo de alejarse de la representación de las características de temporal. Lo contrario se obtendría con valores de u demasiado elevados: buena representación de temporales pero elevada varianza.

Para esta aplicación se decidió la elección del valor de umbral u correspondiente a $H_s=3$ m. Dicho valor representa una probabilidad de ocurrencia del orden del 1%, lo cual garantiza la condición de evento extremo. Definido este umbral, se observaron 73 temporales a lo largo de todo el período de registro en los cuales la altura del oleaje superó dicho valor. El máximo valor registrado corresponde a $H_s=4.89$ m y se produjo en agosto de 2005.

Consecuentemente, la serie para el ajuste de valores extremos quedó conformada por 73 datos, representando cada uno de ellos el valor máximo de H_s registrado en el evento correspondiente. La estimación de los parámetros de la función Pareto (ξ y σ) necesarios para el ajuste con la serie de datos se realizó mediante el método de máxima verosimilitud.

Los resultados de este procedimiento junto con el de la prueba de Kolmogorov-Smirnoff, utilizada para evaluar la bondad del ajuste, son presentados en la Tabla 1. El valor límite para el estadístico del test, correspondiente en este caso a un nivel de significancia de $\alpha = 0.05$ se calculó, según las tablas correspondientes, como: $D_{\alpha=0.05} = 1.36 / n^{0.5}$ (siendo n el número de datos de la serie).

Tabla 1. Resultado del procedimiento de estimación de parámetros y evaluación del ajuste

Parámetros del ajuste	ξ	0.233
	σ	0.644
	L max (verosimilitud)	-23.910
Test K-S	D max	0.146
	$D_{\alpha=0.05}$	0.159
	Resultado Test	Acepta H_0

La Figura 9 permite apreciar el resultado del procedimiento de ajuste. En ella se grafica la Función de Pareto obtenida junto con los valores de la serie (73 temporales con H_s superior a 3 m), distinguiéndose entre casos correspondientes a eventos de pamperos (16 casos) y sudestadas (57 casos). Se incorporan además los límites de confianza de la función para un nivel de $\alpha = 95\%$ obtenidos por el método del perfil de verosimilitud. La figura muestra que la curva obtenida en procedimiento de ajuste junto con sus límites de confianza representan adecuadamente la distribución de los datos de la serie de valores extremos.

El resultado de esta comparación muestra una concordancia razonable, con diferencias que como máximo pueden llegar a ser del orden de 20 %, como es el caso entre Pareto y Gumbel para $Tr=100$ años. Por los motivos expuestos con anterioridad, queda claro que más allá del resultado de esta comparación se considera conveniente la utilización de los valores obtenidos por la función de Pareto para la caracterización de los valores extremos de los datos registrados por el ológrafo.

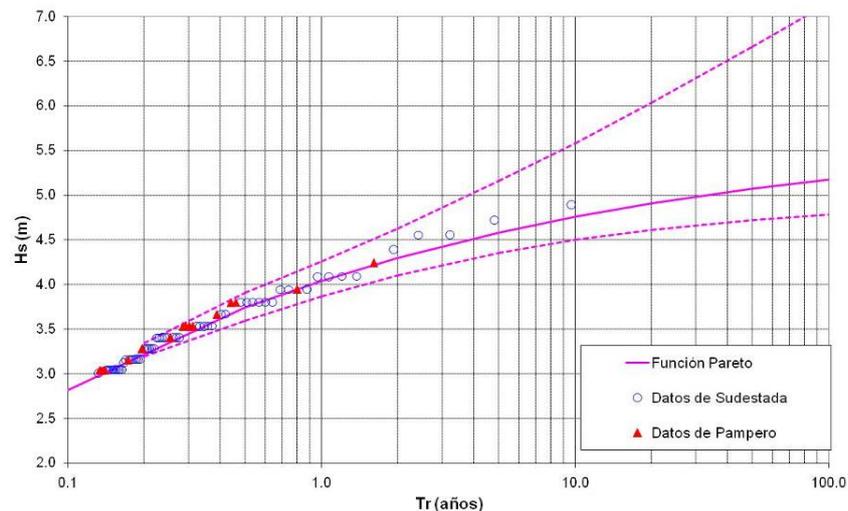


Figura 9. Resultado del análisis de valores extremos por método POT. Registro de datos 1996-2009

CONCLUSIONES

Se logró caracterizar el oleaje de la región, y aplicar distintos criterios para el análisis de sus componentes. La estadística marca tendencias que han sido utilizadas en este informe como parámetros de separación del oleaje. La principal de estas es la separación de componentes swell y sea, en el que se basa gran parte del estudio estadístico, por un período de corte de $T_p=6$ segundos.

Respecto al fenómeno en sí, el análisis espectral arrojó que el estado más general es una combinación de frentes swell y sea (43,8% de ocurrencias), observándose en la mayoría de los casos espectros de densidad de energía con dos picos. En el Área Costera, dada por las diagonales $57^\circ N$ y $208^\circ N$, se generan mayormente olas de tipo sea, quedando así bien definida la misma.

El estudio estadístico realizado mostró que las olas se propagan principalmente desde el S-SE (59% de ocurrencias). Los estados swell provienen en su mayoría de ese sector.

El análisis de valores extremos mostró la conveniencia de utilizar un método que considere la superación de un valor de umbral (definido en este caso como $H_s=3$ m) para la definición de una serie de eventos extremos. Aún teniendo en cuenta la escasa longitud del registro disponible en la actualidad, los resultados obtenidos mediante

una función de distribución de Pareto permitieron estimar con aceptable nivel de confianza valores de H_s asociados a diferentes períodos de retorno. Estos resultados señalan que para valores de $T_r = 50$ años son esperables olas con alturas de $H_s=5.07$ m, mientras que para $T_r=100$ el valor estimado asciende a $H_s=5.18$ m.

Durante 14 años se ha creado una base de datos de gran utilidad para su empleo en diferentes proyectos. Hoy se cuenta con una serie temporal muy importante desde el punto de vista estadístico. Aunque continuar extendiendo la misma resulta sumamente necesario, fundamentalmente para aumentar el conocimiento y la fuente de información que permita mejorar la caracterización estadística de los eventos extremos.

REFERENCIAS

ARGOS User's Manual. <https://www.argos-system.org/manual>.

Brodtkorb, P.A., Johannesson, P., Lindgren, G., Rychlik, I., Rydén, J. and Sjö, E. (2000). "*WAFO - a Matlab toolbox for analysis of random waves and loads*". Proceedings of the 10th International Offshore and Polar Engineering conference, Seattle, Vol III, pp. 343-350.

Coastal Engineering Manual, 2010 Engineering Manual, Vol. 1110-2-1100.

Coles, S. G. (2001). *An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values*. London: Springer.

Operation and service manual for Directional Waverider Mark II. Datawell bv.

Petroni, Ricardo V. *Hidráulica marítima y de estuarios*. Editorial Dunken. Buenos Aires. 2005.