

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

Nicolás TOMAZIN<sup>1,2</sup>, Raúl CÁCERES<sup>3,4</sup>

<sup>1)</sup> Programa de Hidráulica Marítima – INA, <sup>2)</sup> Universidad de Buenos Aires, <sup>3)</sup> HIDROVIA S.A, <sup>4)</sup> Universidad Nacional de La Plata

ntomazin@ina.gob.ar; rcaceres@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 ológrafo 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 ológrafo 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 olígrafo.

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.

### Espectro de densidad de energía

Para que el análisis espectral sea válido se parte de la hipótesis de que el oleaje es un proceso estocástico y estacionario, es decir que no se pueden predecir valores exactos mediante funciones, pero sí existe cierta regularidad en algunos parámetros característicos.

Este tipo de análisis supone además que las olas son ondas integradas por un número infinito de componentes sinusoidales (ondas planas) con diferente altura, período y dirección. Se asume también que estas componentes son de pequeña amplitud.

Siendo  $\eta(t)$  el registro de alturas de olas en un intervalo de tiempo  $T$ , si se cumplen las hipótesis anteriores, se puede desarrollar a la función del registro a través de una serie de Fourier, tal como:

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)$$

De forma equivalente, se puede escribir

$$\eta(t) = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \exp(i\omega n t)$$

donde  $A_n$  es un coeficiente complejo que cumple:

$$A_n^2 = a_n^2 + b_n^2$$

El valor medio elevado al cuadrado (la covarianza) del registro es:

$$\langle \eta(t) \rangle^2 = \frac{1}{T} \sum_{n=0}^{\infty} A_n^2 \Delta t$$

Se ve que la covarianza está relacionada directamente con la amplitud de las olas elevada al cuadrado. Pero precisamente, la energía de las olas es proporcional a su altura al cuadrado. Por lo tanto, la covarianza de  $\eta(t)$  está relacionada directamente con la energía.

De esta manera, se puede ver que el espectro de densidad de energía discretizado  $E(f)$  se obtiene como:

$$E(f) = \frac{1}{T} \left[ \sum_{n=0}^{\infty} \eta(n\Delta t) \exp(2\pi i f n \Delta t) \Delta t \right]^2$$

donde  $f$  es la frecuencia, definida como el inverso multiplicativo del período  $T$ .

Se tiene entonces que el espectro de densidad de energía es una representación de la energía del oleaje asociada a cada frecuencia. El espectro así definido permite un profundo análisis de las propiedades del registro de olas mediante el cálculo de sus momentos, en los cuales se encuentra contenida una gran cantidad de información.

### 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:

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

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

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

donde  $\Delta f$  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:

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0}$$

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:

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

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  $T_c$ :

$$T_z = \sqrt{\frac{m_0}{m_2}} \quad ; \quad T_c = \sqrt{\frac{m_4}{m_2}}$$

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.

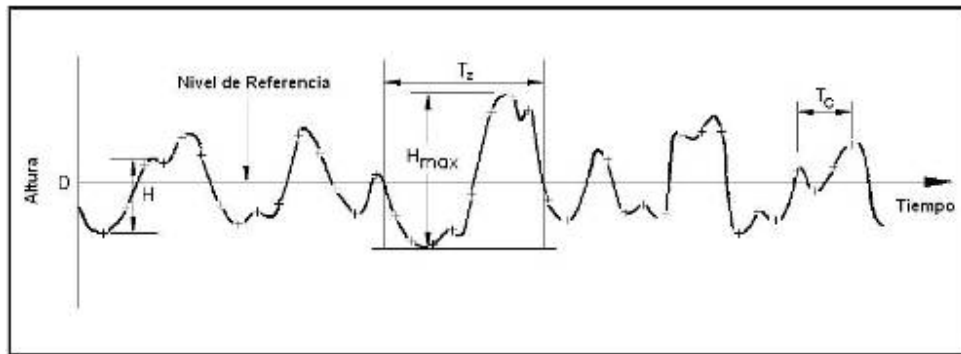


Figura N° 1. Parámetros de un registro temporal de alturas de olas

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

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \frac{m_2^2}{m_0 m_4}}$$

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 ( $\varepsilon$  cercano a uno) son típicos de estados de oleaje swell. En cambio, los que tienen un  $\varepsilon$  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  $\varepsilon$ , dirección principal y período de pico  $T_p$ .

## DESCRIPCIÓN DEL OLÍGRAFO

El ológrafo 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.

## UBICACIÓN DEL OLÍGRAFO

El olígrafo está ubicado en el Río de la Plata Exterior según muestra la Figura 2. Según dicha ubicación se pueden definir un Área Costera y otra de Mar Abierto dadas por las diagonales extremas  $57^\circ$  N y  $208^\circ$  N, medidas desde el norte magnético.

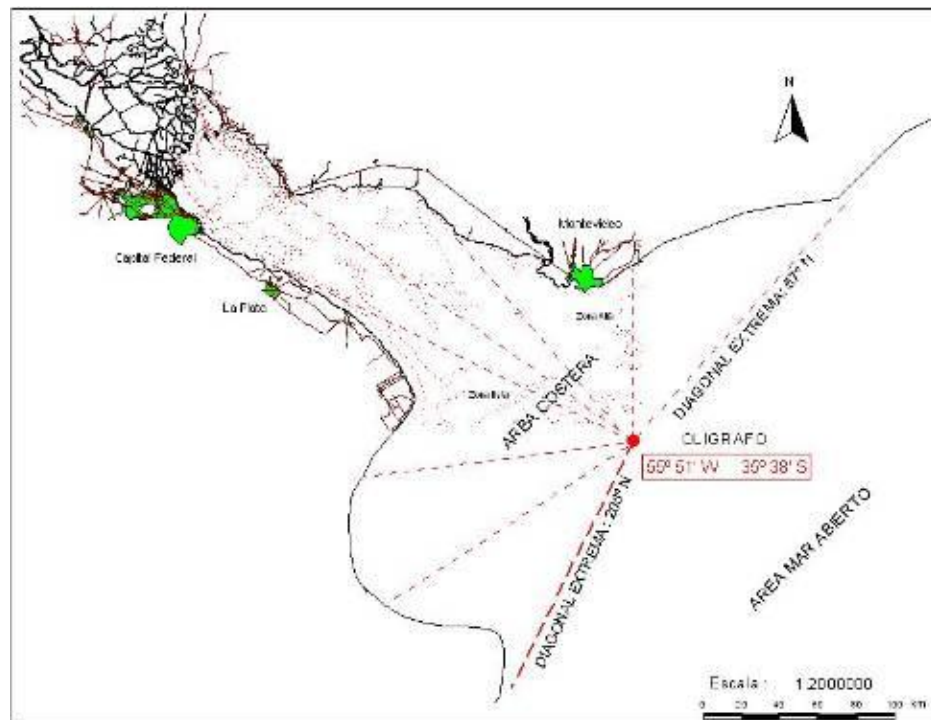


Figura 2. Esquema de ortogonales irradiadas desde el olígrafo hasta la costa.

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.

Los temporales típicos más frecuentes en el Río de la Plata son los de procedencia Sudoeste (Pamperos), y los del Sud y Sudeste (Sudestadas). Es importante describir estos fenómenos, pues tienen estrecha relación con los frentes de oleaje sea y swell que se encuentran en el lugar.

El Pampero es originado por masas de aire Polar del Pacífico que llegan al sur de la cordillera de los Andes donde descargan su humedad en forma de lluvia o de nieve. El aire desecado desborda la cordillera y se desplaza rápidamente por la Patagonia y luego por la Pampa para llegar a las costas procedente del Sudoeste.

Se caracteriza por ser frío o fresco, según la estación, con fuertes rachas al principio y acompañado por chaparrones o granizo, si bien luego despeja y aclara el aire. La velocidad del viento oscila entre 50 y 60 km/h alcanzando muy raramente los 90 km/h. Su duración no suele exceder los 2 días. Al ingresar en el Río de la Plata, produce oleaje tipo sea, con un fetch promedio hasta el lugar del ológrafo de unos 120 km.

Las sudestadas se producen cuando una depresión se asienta sobre la zona del Río de la Plata y, al mismo tiempo, un anticiclón domina la región atlántica al Este de la provincia del Chubut. Un marcado gradiente barométrico en las costas de la provincia de Buenos Aires, da lugar a violentos vientos del sector Sudeste acompañados generalmente con lluvias. Estos vientos pueden durar unos días, por lo común no más de cuatro, con intensidades de temporal fuerte y muy fuerte. Si un centro ciclónico se establece sobre la línea sinuosa del frente de avance, la situación puede prolongarse unos días más.

Las distancias de generación medidas desde el ológrafo para estos casos, pueden ser de 400 a 4000 km, dependiendo donde se sitúe el frente de tormenta. Este es un temporal caracterizado por un predominio de oleaje tipo swell

## **ADQUISICIÓN DE DATOS**

El ológrafo 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 ológrafo 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 ológrafo.

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 ológrafo, 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  $\varepsilon$  (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:

$$R_{m0} = \frac{m_{0sea}}{m_{0total}}$$

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.

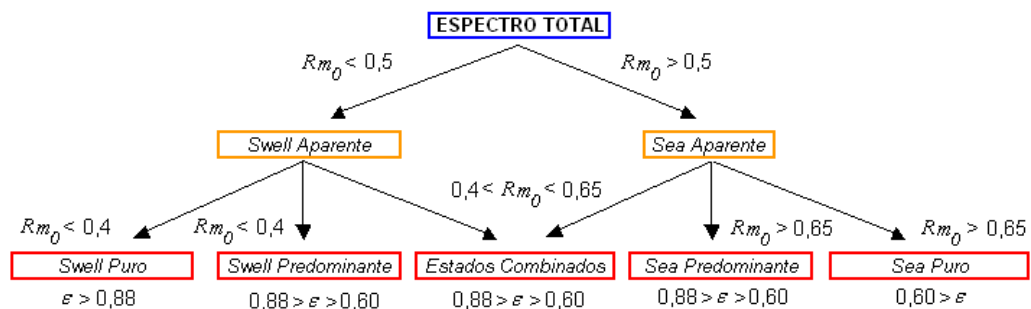


Figura 3. Esquema descriptivo del filtrado de datos.

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

Con el objetivo de llevar a cabo el análisis es necesario calcular los parámetros fundamentales de los espectros para poder diferenciar los distintos estados del oleaje. Para llevar a cabo esta tarea se utilizó una macro de Excel, la cual utilizando como información de base los energía discretizados en 15 bandas de frecuencia, permitió:

- Calcular parámetros fundamentales del oleaje: Obteniendo, mediante el cálculo de los momentos, los valores de  $H_{m0}$ ,  $T_z$  y  $\varepsilon$ . Además, se calcula el período de pico  $T_p$  y la dirección principal  $\phi$  (utilizando expresiones de cálculo presentadas en 2.2).

- Filtrar el espectro total y recalculer los parámetros: Separando al espectro total en sus componentes swell y sea. Para cada una de ellas calculan nuevamente los momentos y los parámetros fundamentales correspondientes.

Para dividir el espectro total en componentes *swell* y *sea* 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 ( $H_{m0}$ ,  $\phi$  y  $\varepsilon$ ) 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:  $T_s = 6 \text{ s} \Rightarrow f_s = \frac{1}{T_s} = 0,167 \text{ Hz}$

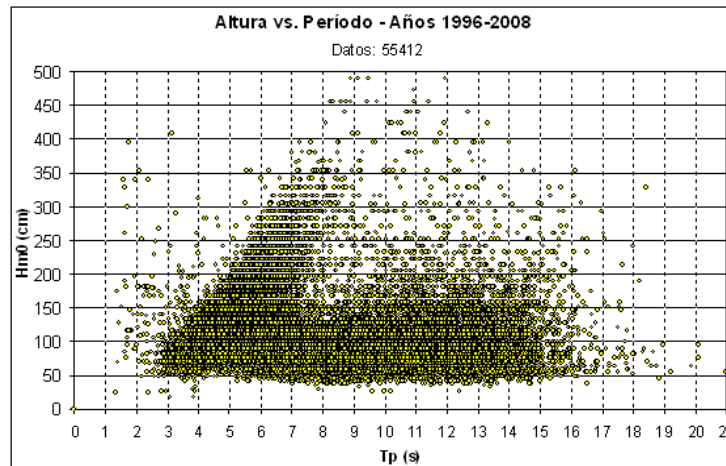


Figura 4. Dispersión de las Hs en función de los Tp para los espectros totales en el período 1996-2008.

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.

Se deja en claro que la identificación de una frecuencia de corte fija, utilizada para el análisis del registro completo de los dato, resulta una simplificación que puede ser útil a los fines del análisis del clima de olas en términos descriptivos. Para el caso de temporales, los que componen una fracción mínima del registro total, se recomienda la utilización de expresiones de cálculo para  $f_c$  que consideren la intensidad y dirección del viento como factores fundamentales, tal como sugiere el trabajo desarrollado por Hanson y Phillips (2001).

## 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.

### 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.

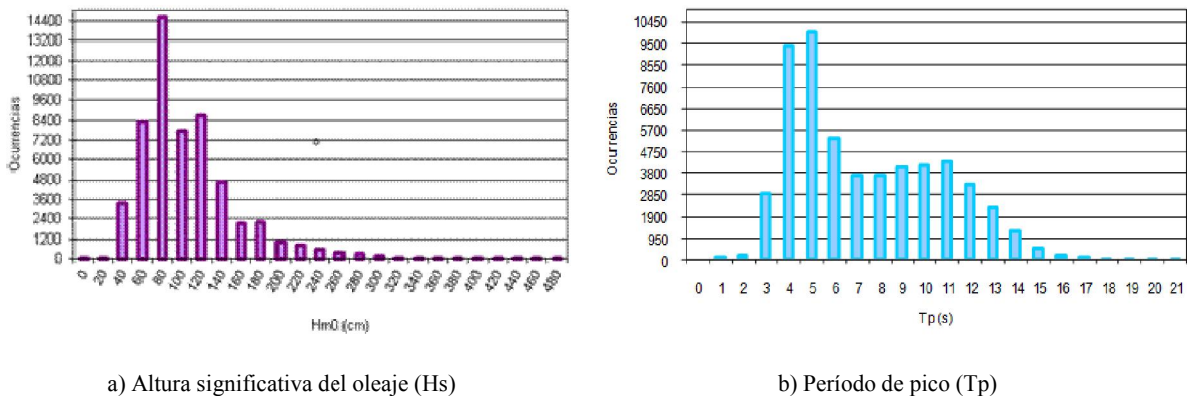


Figura 5. Gráficos de frecuencia para el registro completo de datos (1996-2009)

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.

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%).

Para este trabajo se consideró conveniente presentar el resultado del análisis de estados característicos reagrupando la información en tres estados principales que representan claramente, de acuerdo a sus características distintivas, el clima de olas en la región de estudio: Estado de Swell, Estado de Sea, y Estado Combinado.

### 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.

Tal como se aprecia en la rosa de olas (Figura 5), el swell proviene mayoritariamente de la dirección SE (55%), con componentes menores, pero de cierta importancia, provenientes del ESE (8%) y el SSE (5%). Los gráficos 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%).

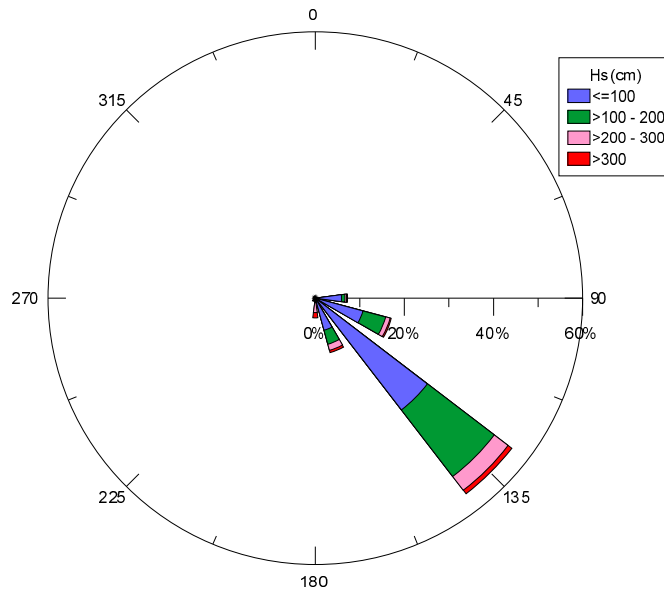


Figura 5. Gráficos de rosa de olas para los espectros Swell correspondientes al período 1996-2009.

### 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, la rosa de olas (Figura 6) muestra 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%).

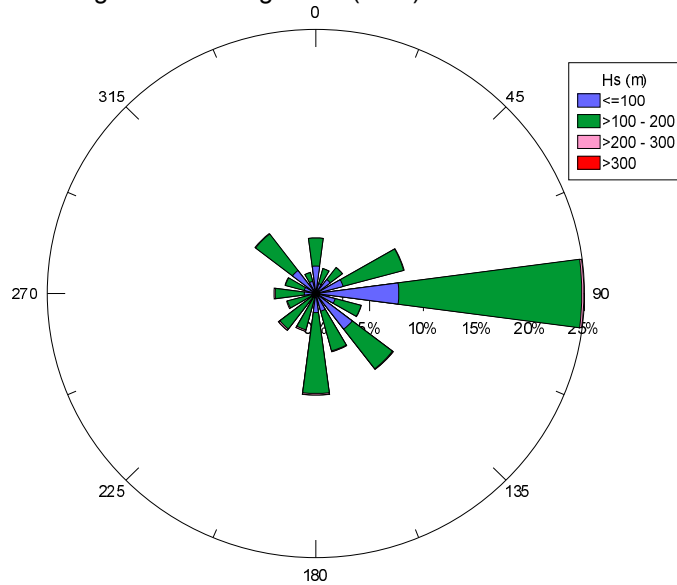


Figura 6. Gráficos de rosa de olas para los espectros de Sea correspondientes al período 1996-2009.

### 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. La rosa de olas (Figura 7) señala como dirección resultante de la combinación de espectros el predominio 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.

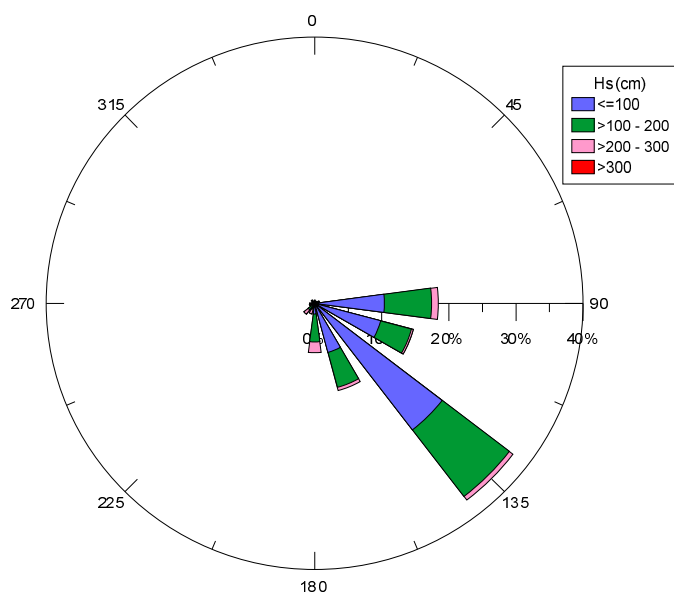


Figura 7. Gráfico de rosa de olas para los espectros de Estados Combinados en el período 1996-2008.

## 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  $Tr=50$  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  $H_s$  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 ( $\xi$  y  $\sigma$ ) 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 2. 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).

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

Tabla 2. Resultado del procedimiento de estimación de parámetros y evaluación del ajuste

La Figura 8 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.

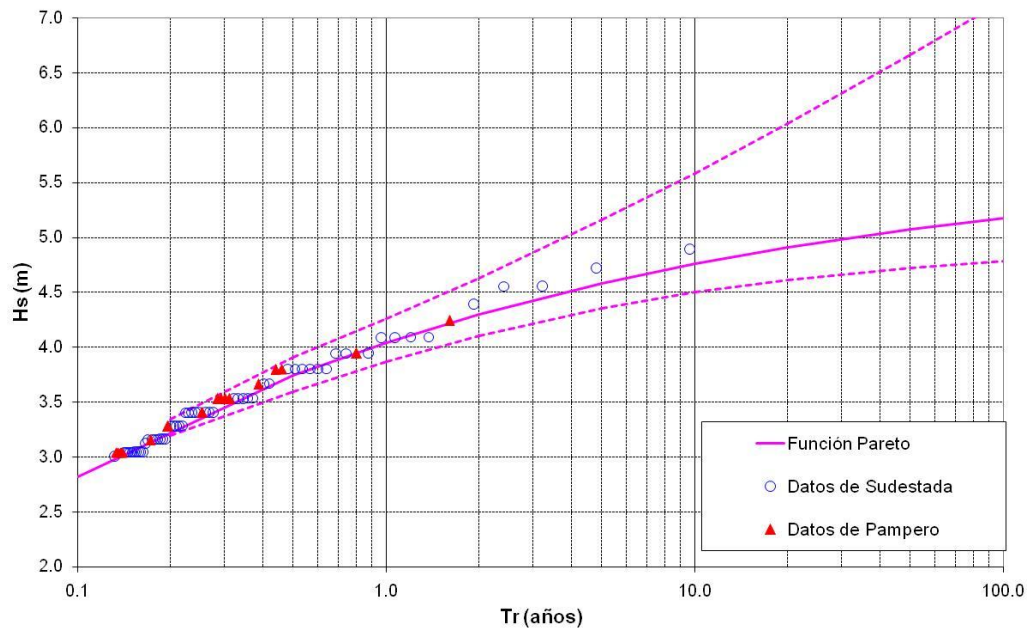


Figura 8. Resultado del análisis de valores extremos por método POT. Registro de datos 1996-2009

De un modo similar se realizó el procedimiento para el ajuste de los datos mediante funciones Gumbel y Weibull considerando valores máximos anuales. El resultados de estos ajustes permitió establecer la comparación presentada en la Tabla 3, donde se señalan las estimaciones de alturas de olas para distintos períodos de retorno correspondientes a las tres funciones utilizadas en este trabajo.

Tr	Pareto	Gumbel	Weibull
(años)	Hs (m)	Hs (m)	Hs (m)
2	4.30	3.95	4.05
5	4.58	4.53	4.45
10	4.76	4.92	4.63
20	4.91	5.29	4.76
50	5.07	5.76	4.87
100	5.18	6.12	4.94

Tabla 3. Comparación de valores de Hs (m) considerando diferentes funciones para el ajuste 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 olígrafo.

## 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

1. Coastal Engineering Manual (EM 1110-2-1100). Part II. Chapter 1. US Army Corps of Engineers.
2. ARGOS User's Manual. <https://www.argos-system.org/manual>.
3. Operation and service manual for Directional Waverider Mark II. Datawell bv.
4. Coles, S. G. (2001). An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. London:Springer.
5. 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.