

# DESCRIPCIÓN DEL CLIMA DE OLEAJE EN CHILE

## MAR DE FONDO REINANTE

El clima del oleaje frente a las costas de Chile continental se encuentra dominado por las olas generadas sobre el cinturón de los vientos Oeste (40 °S - 60 °S), las cuales se propagan por el océano Pacífico. Los vientos superficiales intensos asociados a los ciclones extratropicales (núcleos de bajas presiones), son los principales generadores del oleaje incidente en las costas de Chile. A este oleaje, que al llegar a la costa se presenta como un mar de fondo casi permanente, se le llama mar de fondo reinante.

El mar de fondo reinante se propaga desde el océano Austral hacia el Ecuador. De este modo, debido a la gran extensión latitudinal de Chile (18 °S - 56 °S), el mar de fondo reinante presenta distintas características a lo largo del país. En la zona austral de Chile, por estar más cerca de la zona de generación principal, el oleaje se presenta típicamente desde la dirección oeste con mayores alturas medias ( $H_s \sim 4$  m) y periodos medios más cortos ( $T_m \sim 8.6$  s) que en el resto del país.

Las zonas norte grande, norte chico y central de Chile, se encuentran más alejadas de la zona de generación principal, lo que explica que el oleaje incida desde la dirección suroeste con escasa dispersión direccional, los periodos aumenten levemente ( $T_m \sim 9$  s) y las alturas disminuyan ( $H_s \sim 2$  m) en relación al extremo austral. Para los períodos pico la tendencia es también a disminuir hacia el sur con valores entre 13.7 s y 12 s. Estas diferencias entre los estadísticos principales del oleaje, ocurre producto del decaimiento y la dispersión angular y de frecuencias de la energía del oleaje, a medida que se propaga grandes distancias desde la zona de generación principal.

Otras diferencias latitudinales, que se explican por la mayor cercanía del extremo meridional a las zonas de generación, son el aumento hacia el sur de la dispersión direccional media (s promedio disminuye de 30 a 8), y de la correlación entre las alturas y los períodos.

En general, se presenta una baja variabilidad estacional, con variaciones de los promedios mensuales inferiores a los 0.7 m en la altura significativa, 1.6 s en el período medio y en 19 ° en la dirección media. Esto ocurre a pesar que, durante los meses de invierno el cinturón de los vientos Oeste se desplaza hacia el norte, permitiendo la formación de ciclones de mayor energía a menores latitudes, los cuales generan poderosas marejadas de invierno que afectan a toda la costa del país.

La evidencia de un oleaje de menor variabilidad en el tiempo en el extremo norte, en comparación con un oleaje de mayor variabilidad en el extremo sur, se presenta en los histogramas de alturas, períodos y direcciones que muestran un aumento en la dispersión a medida que se avanza hacia el sur. Los histogramas, además muestran una asimetría creciente hacia el sur, con una tendencia de la moda hacia valores más bajos que el promedio de la distribución. Esto, a excepción del histograma de direcciones en el extremo sur, que presenta una asimetría hacia el norte, lo que se explica porque esta zona se encuentra en el sector más meridional de la zona de generación principal.

## MAR DE FONDO DEL NOROESTE

En las latitudes medias del Pacífico Norte también se generan ciclones extratropicales a partir de los vientos Oeste. El oleaje generado por los fuertes vientos se propaga a través del océano Pacífico, incidiendo en las costas de Chile desde la dirección noroeste como un mar de fondo de período pico elevado (14 s - 24 s), aunque con alturas significativas menores (0.1 m-1.2 m).

La alta incidencia de esta dirección (sobre el 50%), es, en parte, responsable del oleaje multimodal característico de las costas chilenas durante los meses de primavera y verano (invierno en el hemisferio norte).

Sin embargo, el porcentaje de energía promedio proveniente de esta dirección, es cercano al 5%, lo que

explica que, al examinar solo los parámetros estadísticos generales ( $H_s$ ,  $T_m$  y  $D_m$ ), esta dirección muestre una incidencia mucho menor como oleaje principal.

En general, la incidencia del mar de fondo del noroeste disminuye hacia el sur, aunque se presenta un máximo en los 23 °S, debido a la sombra que produce la "protuberancia" occidental de Sudamérica en el extremo norte del país. El análisis de los espectros promedio muestra niveles de energía proveniente del norte y noroeste de relativa significancia para latitudes mayores a 36 °S, en especial durante los meses de primavera y verano.

Este oleaje es de particular importancia para puertos y sectores que se encuentran abrigados del oleaje del tercer cuadrante (entre sur y oeste), pero expuestos hacia el cuarto cuadrante (entre norte y oeste). Una situación diferente ocurre en el extremo sur, donde se evidencia una mayor incidencia del oleaje proveniente del noroeste, aunque éste es mayoritariamente generado en el hemisferio sur.

Otra zona de generación, aunque menos frecuente para el mar de fondo que incide desde el noroeste-oeste, corresponde a las latitudes tropicales del océano Pacífico donde se generan ciclones tropicales que producen oleaje que puede alcanzar las costas de Chile. Un ejemplo de esto son las marejadas de verano ocurridas a fines de enero del 2013 producto de la tormenta tropical Garry que afectó las islas de Samoa.

## OLEAJE OCEÁNICO DE GENERACIÓN LOCAL

Cuando vientos intensos se producen cerca de la costa, se genera el mar de viento que afecta al borde costero. Existen dos procesos principales mediante los cuales la costa central de Chile (30 °S - 40 °S) se ve afectada por fuertes vientos oceánicos locales. Uno de ellos es la llegada de los ciclones extratropicales a la costa, los cuales producen fuertes vientos desde el noroeste que están asociados a frentes de mal tiempo. Estos eventos son más frecuentes durante el invierno y pueden provocar marejadas con alturas significativas de ola mayores a 7 m (ej. temporal del 08/08/2015).

La otra fuente principal de oleaje local es el "surazo", el cual es un chorro atmosférico costero, de baja altura y de carácter sinóptico, más frecuente e intenso durante la primavera y el verano. Este chorro, se desarrolla durante el paso de núcleos de alta presión (anticiclones) migratorios, produciendo una fuerza del gradiente de presión hacia el norte a lo largo de la costa de Chile central.

Aunque hay una tendencia general con menores periodos hacia el sur, se presenta un mínimo local a los 29 °S que influye en las zonas norte grande, norte chico y central de Chile (27 °S y 35 °S), como señal de una fuerte componente del mar de viento generado por el surazo. Además, en esta zona, los espectros promedio revelan mayor energía de alta frecuencia durante los meses de primavera y verano.

En la zona sur se genera un máximo local en el período medio del oleaje (41 °S), que se atribuye a la mayor incidencia de mar de viento en la costa austral que se encuentra en la zona de generación principal (latitudes medias del Pacífico sur), cuando los núcleos de bajas presiones se acercan al continente.

## OLEAJE EXTREMO

El diseño de supervivencia de las estructuras del borde costero está muchas veces dominado por el oleaje proveniente de las direcciones oeste y norte, ya que, en general, las zonas con infraestructura portuaria, mayoritariamente ubicadas entre las zonas norte y centro, se encuentran abrigadas de la dirección reinante suroeste. En la zona central es común realizar diseños de estructuras para alturas de ola significativa entre 6 m a 7 m, valores que son generalmente obtenidos a partir de un análisis de frecuencias de bases de datos de oleaje comerciales.

El análisis de clima extremo y las trayectorias de las tormentas presentadas en este Atlas indican un aumento

de las alturas significativas máximas hacia el sur, con valores que varían desde 4 m a 17 m aproximadamente. Las alturas máximas provenientes del suroeste se presentan con mayor frecuencia en las zonas norte, centro e insular del país, con periodos entre 7 s y 16 s. Desde Chile central hacia el sur, la dirección de incidencia de las alturas máximas tiende al oeste.

La duración media de los eventos de marejadas extremas varía entre 4 y 6 días, presentándose las mayores duraciones medias en el sector insular, y las menores duraciones medias en el extremo sur. En Chile central la duración media es de 4.5 días.

En la costa de la zona centro del país, las marejadas del cuarto cuadrante (oeste a norte), afectan los sectores costeros que normalmente presentan condiciones calmas, ya que dichos sectores están abrigados del mar de fondo reinante de dirección suroeste. Estas marejadas pueden presentarse como mar de viento o de fondo y ser originadas tanto local como remotamente.

La mayor incidencia de los eventos extremos más significativos es durante los meses de invierno, con valores que varían entre 73% en el extremo norte y 33% en el extremo sur, donde se asemeja a la incidencia de marejadas en los meses de primavera.

## OLEAJE EN BAHÍAS CERRADAS, FIORDOS, CANALES Y LAGOS

En los mares interiores abundan senos, fiordos y canales que se encuentran protegidos del oleaje del océano abierto, y por lo tanto, de la penetración del oleaje oceánico. En estos sectores, el oleaje que se produce es mar de viento local, y sus características principales (dirección, altura y período) son gobernadas por el clima y la topografía del sector. Las marejadas en estas zonas pueden ser menos frecuentes, aunque de magnitudes importantes. Estos eventos, condicionan el diseño del borde costero y de instalaciones industriales, principalmente en sectores acuícolas y en zonas con asentamientos humanos. Las mediciones de oleaje en los mares interiores son escasas, por lo que generalmente se utilizan estadísticas de viento para estimar el clima de oleaje del sector.

## OLEAJE INSULAR

El oleaje en las islas oceánicas del archipiélago Juan Fernández, Isla de Pascua e Islas Desventuradas, es generado en las mismas zonas donde se genera el oleaje que afecta a la costa abierta de Chile. Las alturas significativas y períodos pico promedio en aguas profundas presentan una baja variabilidad espacial, con valores promedio entre 2.4 m y 2.8 m, y entre 13.1 s y 13.5 s respectivamente. El promedio de la dirección media, presenta una mayor variabilidad espacial con valores entre 206 ° y 226 °.

Dada la exposición a todo el rango de direcciones, a diferencia del oleaje frente a la costa continental, aparecen componentes del primer y segundo cuadrante. La incidencia de oleaje multimodal es mucho mayor, presentando en Isla de Pascua un 42% del tiempo oleaje con más de tres componentes modales.

La alta multimodalidad insular, tanto en períodos como en direcciones, es también revelada por la energía del espectro promedio de direcciones, que presenta máximos en los cuatro cuadrantes de las direcciones, y una presencia relativamente importante de energía espectral de alta frecuencia.

## OLEAJE ANTÁRTICO

El oleaje en la región Antártica presenta características especiales debido al constante cambio estacional de las masas de hielo que rodean al continente. Durante el invierno, el oleaje no alcanza la costa terrestre, mientras que en primavera, el oleaje se propaga a través de campos de hielo que están en derretimiento.

El área afectada por las masas de hielos crecientes y decrecientes, tiene un perímetro que circunda el paralelo 61 °S aproximadamente, el cual coincide con la punta de la península Antártica. Sin embargo, al este de la península, la cobertura de hielo se extiende hacia latitudes menores, probablemente debido al

efecto del oleaje más intenso del lado occidental, que afecta la formación y derretimiento del hielo.

Otra característica importante es que el lado oriental de la península Antártica está expuesto al océano Atlántico y abrigado del océano Pacífico, por lo que las características del oleaje en ambos sectores son totalmente diferentes.

Hacia el oeste de la península Antártica y en el paso de Drake, en torno a los 61 °S, se presenta uno de los climas de olas más intensos del planeta, con alturas de olas significativas que pueden superar los 14 m. En cuanto a valores promedio, el paso de Drake presenta alturas significativas cercanas a los 4 m, períodos medios del orden de 10 s y una dirección media oeste. La incidencia del oleaje es fundamentalmente desde el cuarto cuadrante, con porcentajes de incidencia inferiores para las direcciones medias del primer y segundo cuadrante. La altura significativa promedio presenta variaciones cercanas a 1 m entre los meses de verano e invierno, con menores alturas en la temporada estival. Los períodos medios no presentan una estacionalidad marcada, sin embargo, las direcciones medias muestran una leve tendencia hacia el norte durante los meses de verano.

Producto del abrigo de la dirección oeste, el clima de oleaje al este de la península Antártica es menos intenso con promedios de alturas significativas en aguas profundas inferiores a 2 m, períodos medios entre 6 s y 7 s, y dirección norte. En este sector, la incidencia de las direcciones del primer y segundo cuadrante son mayores. Es importante indicar que la evaluación del clima de oleaje cerca de la península se dificulta debido a la alta presencia de hielo la mayor parte del año.

## MULTIMODALIDAD

Dado que la costa chilena se encuentra expuesta al océano Pacífico, es frecuente encontrar estados de mar que presentan oleajes provenientes de distintas direcciones. Para efectos de este Atlas, se definió que un estado de mar tiene más de un modo cuando se cumplen dos condiciones: 1) la presencia de energía de una partición espectral distinta a la principal es mayor al 1% del total, y 2) la altura de ola significativa asociada a esa partición es mayor a 10 cm.

El porcentaje del tiempo que el oleaje se presenta en dos o más modos, aumenta de 62% en el extremo norte, a 75% en la zona centro, y luego vuelve a disminuir hasta llegar a 47% en el extremo sur. En los meses de primavera y verano estos porcentajes pueden alcanzar valores de hasta 95%, debido a las mayores incidencias del mar de viento producido por el surazo y del mar de fondo del norte.

En el sector insular, entre 75% y 95% del tiempo existe oleaje de 2 o más direcciones, y entre 37% y 76% del tiempo de 3 o más direcciones.

La mayor parte de la energía del oleaje corresponde al generado en las latitudes medias del Pacífico sur, que llega como mar de fondo al norte del país desde la dirección suroeste y aportando cerca del 90% de la energía total, y al extremo sur, como mar de viento y de fondo desde las direcciones sur, suroeste, oeste y noroeste, aportando cerca del 100% de la energía total. En el sector insular, el oleaje reinante incide desde la dirección suroeste, aportando entre 56% y 67% de la energía total.

Las combinaciones más frecuentes de encontrar en las zona norte, centro y sur, son mar de fondo del suroeste con mar de fondo del noroeste, mientras que en la zona extremo sur, es mar de fondo del oeste con mar de fondo del noroeste.

Los bajos valores del parámetro de agudeza del pico espectral ( $\gamma$ ) mostrados en las fichas de nodo y de puertos, son indicativos de esta alta multimodalidad y no de la alta presencia de mar de viento como pudiese interpretarse.