SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

XXIII CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

CARACTERIZACIÓN DE LAS MAREJADAS DEL VERANO 2015-16 Y SU RELACIÓN CON EL FENÓMENO "EL NIÑO"

DIEGO BECERRA¹ CATALINA AGUIRRE^{1,2}

RESUMEN

Las marejadas con dirección Noroeste (NW) en el verano 2015-16 fueron muy recurrentes con gran energía. El fenómeno tuvo alto impacto mediático, debido a los impactos en la infraestructura, el turismo, playas e incluso en la pérdida de vidas. Considerando que el 2015 se desarrolló un fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENOS), considerado "Extremo", se establece la hipótesis; "ENOS tuvo un impacto significativo en la intensidad de las marejadas NW del verano 2015-16 presentes en Chile". En base a datos de simulaciones numéricas de oleaje se cuantifican las anomalías de altura de ola, y se demuestra que existe una influencia directa del ENOS en la intensidad de las marejadas del NW. Además, se cuantifican las anomalías de energía espectral para los tres ENOS "Extremo" considerados (1982-83, 1997-98 y 2015-16), y se realiza una comparación frente la zona central de Chile. Finalmente, se realiza un análisis de propagación de energía espectral, desde la zona de generación hasta la costa de Chile. Los resultados muestran que, los mayores impactos en la costa se debieron a oleaje NW en ocurrencia conjunta con pleamares en sicigia. Las correlaciones de las anomalías de alturas de olas con el Índice de Oscilación del Sur (SOI), muestran que existe una relación significativa en el Pacifico Norte (PN). Además, mediante el análisis de compuestos se pudo establecer que existe una importante disminución de la presión atmosférica y una intensificación de la velocidad de los vientos superficiales en el PN cuando se presenta un ENOS "Extremo". La propagación de energía establece la zona de generación más susceptible de generar daños en las bahías abiertas al NW de la costa de Chile.

¹ Escuela Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile – diegobecerragodoy@gmail.com

² Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, Universidad de Chile, Santiago, Chile – catalina.aguirre@uv.cl

1. INTRODUCCIÓN

En Chile debido a su geografía, gran cantidad de bahías están protegidas naturalmente del oleaje Suroeste (SW), que llega la mayor parte del tiempo (J. Beyá, 2016). Pero existen bahías o tramos de bahías abiertas al NW, como son los casos de Valparaíso, Viña del mar, Mejillones, entre otros. Estas bahías son susceptibles de ser abatidas por frentes de olas de gran intensidad generando mayor daño en la costa, principalmente porque no existen obstáculos en su propagación. (Campos, 2016)

Las marejadas del verano 2015-16 impactaron en la infraestructura costera; produjeron socavones en el pavimento de la Avenida Perú en Viña del mar, daños en juegos infantiles en plaza Colombia, destrozos en edificios y locales comerciales, autos volcados, daños en mobiliario público y privado, entre otros. El perjuicio económico de los daños en infraestructura costera ha sido evaluado en 100 millones de pesos aproximadamente (www.diariodelaconstrucción.cl). También se vieron afectadas las actividades del turismo; cómo prohibición de baño en playas, las transitadas avenidas Perú y San Martin (Viña del mar) cerradas, playas altamente erosionadas que impedían la llegada de turistas, entre otros. Además, las recurrentes marejadas y avisos prohibitivos por parte de la armada de acercarse al mar generaron que los turistas comenzaran a preferir otros destinos para descansar y recrearse, por lo que hubo altas perdidas en el comercio porteño y viñamarino.

Cabe mencionar que, en el inicio del verano 2015-16, ya existían antecedentes científicos que indicaban la presencia del fenómeno El Niño, efecto océano-atmosférico global que, entre otros efectos, puede generar cambios en las trayectorias de las tormentas de invierno en el hemisferio Norte (Higgins, 2005).

En el presente estudio, se caracterizan las marejadas del verano 2015-16, las cuales han sido catalogadas como inusuales, debido a su alta energía proveniente del NW. Además, se busca establecer la relación entre este tipo de marejadas y la variabilidad interanual introducida por el ENOS. Finalmente, se realiza una propagación de energía espectral desde el Pacífico Norte hasta la costa de Chile durante eventos El Niño "Extremo".

2. REVISIÓN TEÓRICA

Zonas de generación en el Pacífico Norte

En las latitudes medias, entre los 30°N y 60°N, es la franja activa de generación tormentas en el hemisferio Norte. La depresión más importante es la Baja de las Aleutianas, que es más intensa (presión más baja) durante el invierno (Dic-Ene-Feb) y prácticamente desaparece durante el verano (Jun-Jul-Ago) (S.N. Rodionov, 2007). La Baja de las Aleutianas representa uno de los principales "centros de acción" en la circulación atmosférica en el hemisferio Norte (S.N. Rodionov, 2007).

Climatología sinóptica en el Pacífico Norte

En el Pacífico Norte, los ciclones extratropicales normalmente se originan al Este de Japón, sobre la corriente de Kuroshio (Gulev et al., 2001). Cuando el hemisferio Norte está en invierno, las bajas

presiones (ciclones) generan intensificación de los vientos superficiales dando origen a una expansión de su área de acción, produciéndose más frecuentemente hacia menores latitudes. Este desplazamiento de los vientos superficiales influye en las olas que se presentan en el hemisferio sur en época de verano (S.N. Rodionov, 2007).

Fenómeno El Niño

Se expresa con un aumento de la temperatura superficial del mar (TSM) y una disminución de los vientos alisios en el lado Este del Océano Pacífico Tropical. Al ocurrir esto, las aguas cálidas del Pacífico, desde Indonesia y Australia llegan a Sudamérica, desplazando las aguas frías de la corriente de Humboldt.

Las anomalías de TSM del índice región 3.4 de El Niño para el año 2015-16, indicaron que fue una de las fases cálidas más intensas desde 1950 (OMM, 2016), junto con los eventos de los años 1982-83 y 1997-98 (Figura 1). Esto debido a que las variaciones de la temperatura superficial del mar medidas muestran una importante alza alrededor de la zona ecuatorial del Océano Pacífico.



Figura 1: Anomalía de TSM en [°C] del índice 3.4. En color negro se muestran los eventos El Niño "Extremo" y en azul los eventos El Niño "Fuerte".

Índice de oscilación del Sur (SOI)

El SOI indica la presencia del fenómeno El Niño (índices negativos) o La Niña (índices positivos). Se calcula restando las anomalías de presión en el Pacífico Occidental de las anomalías de presión en el Pacífico Oriental.

Relación con patrones atmosféricos en hemisferio Norte

La existencia de teleconexión entre ENOS y la actividad sinóptica durante el invierno en el Pacífico Norte, han sido descritos por varios autores (Díaz et al., 2001; Higgins, 2005; Weng et al., 2009; Izaguirre et al., 2011; Eichler et al., 2015). Los resultados han demostrado que las tormentas viajan hacia el frente polar y hay un incremento en la frecuencia de las tormentas en las latitudes medias. Por lo tanto, la teleconexión podría introducir cambios interanuales en el clima de las olas en el verano austral en el Sudeste del Pacífico, que vienen viajando desde el hemisferio Norte.

3. METODOLOGÍA

Fuentes de información

Boya Watchkeeper

Se solicitó al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) información espectral y parámetros de resumen del oleaje registrados por una boya Watchkeeper en dos periodos de mediciones. El primer periodo corresponde al 1 enero 2010 a 10 octubre 2010, con la boya ubicada a 33°S y 71°49.8'W, y el segundo periodo desde el 1 de noviembre 2015 hasta el 12 enero 2016, con la boya localizada en 32° 59.217'S y 71° 49.433'W.

Los espectros de la boya tienen una resolución temporal de tres horas, contienen 129 frecuencias, con un espaciamiento constante de 0,005 [Hz], y 121 direcciones, con un espaciamiento constante de 3 [°]. La densidad espectral $S(f, \theta)$ está en unidades $[m^2/Hz*Deg]$.

SIPROL®

Los datos *forecast* de *SIPROL*® son simulados utilizando el modelo de generación y propagación de oleaje WAVEWATCH III, el cual es forzado con viento superficial del Sistema de Pronóstico del Clima (CFS). La empresa INGMAT S.A (creadora de *SIPROL*®), facilitó información espectral para distintos nodos en el Océano Pacífico, y parámetros de resumen diarios simulados desde octubre 2015 a abril 2016. Se utilizaron parámetros de resumen del dominio Pacífico (resolución $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$), que abarca el Océano Pacífico completo.

Los espectros de *SIPROL*® tienen una resolución temporal de una hora, contienen 29 frecuencias, con un espaciamiento variable, y 24 direcciones, con un espaciamiento constante de 15 [°]. La densidad espectral $S(f, \theta)$ está en unidades $[m^2/Hz^*rad]$.

CAWRC CSIRO

La información del *hindcast* de oleaje realizado por CAWRC CSIRO abarca un periodo entre 1979 y 2010. Estas simulaciones del oleaje se realizaron utilizando el modelo WAVEWATCH III versión 4.08, forzado con viento superficial y concentración del hielo, obtenido de un reanálisis atmosférico denominado Reanálisis del Sistema de Pronóstico de Clima (CFSR).

Los espectros de CAWRC CSIRO tienen una resolución temporal de tres horas, constan de 24 direcciones con un espaciamiento constante de 15°, y 29 frecuencias con un espaciamiento variable. La densidad espectral $S(f,\theta)$ está en unidades $[m^2/Hz^*rad]$.

Procesamiento de los datos

Validación

Los parámetros estadísticos que fueron utilizados para validar las simulaciones numéricas son: Sesgo (BIAS), Correlación (R), Error cuadrático medio (RMSE), Índice de dispersión (SI).

Series de tiempo

Utilizando los espectros de la boya, se calcularon las series de tiempo de los parámetros del oleaje a través de las siguientes ecuaciones:

$$m_n = \iint f^n S(f,\theta) df d\theta \tag{1}$$

$$TM = TM_{01} = \frac{m_0}{m_1}$$
(2)

$$T_e = \frac{m_{-1}}{m_0}$$
(3)

$$H_{mo} = 4\sqrt{m_0} \tag{4}$$

$$P_o = \frac{\rho g^2}{64\pi} \cdot T_e \cdot H_{mo}^2 \tag{5}$$

Donde m_n corresponde al momento de orden n, Tm_{01} a periodo medio, H_{mo} a altura significativa espectral, T_e a periodo energético y P_o a la potencia del oleaje (calculado considerando todas las frecuencias y direcciones).

Tanto la base de datos *SIPROL*® como CAWRC CSIRO contienen los parámetros del oleaje calculados a partir del espectro de la boya. Por lo tanto, se utilizan estos parámetros de resumen para validar los modelos y caracterizar las marejadas provenientes del hemisferio Norte.

Análisis de correlación

Se realizó un análisis de correlación entre el SOI y las anomalías de altura de ola significativa, velocidad del viento superficial y presión atmosférica. Se calcularon las anomalías mensuales de cada variable para los 32 años de información, quedando un total de 384 meses de anomalías. Se realizaron correlaciones mensuales (384 meses) y estacionales para cada punto de grilla en el Océano Pacífico. Solo las correlaciones significativas con un 95% de confianza son presentadas.

Análisis de compuestos

La magnitud de ENOS se caracterizó utilizando las anomalías del índice de TSM de la región 3.4;

- El Niño débil $0.5^{\circ} < \text{Débil} < 1^{\circ}$
- El Niño moderado 1° < Moderado < 1.5°
- El Niño fuerte 1.5° < Fuerte < 2°
- El Niño extremo 2° < Extremo

Dada la caracterización del fenómeno El Niño se seleccionaron 3 eventos El Niño "Extremo" 1982-83, 1997-98 y 2015-16 (Figura 1).

Las anomalías del verano 2015-16 con los datos de *SIPROL*®, se calcularon a través de la climatología de CAWRC CSIRO.

Propagación de energía

Se seleccionaron algunas boyas ubicadas en el Océano Pacífico (Figura 2), de tal forma de seguir la energía generada en el Pacífico Norte hasta las costas de Chile.

En este trabajo, se analiza la propagación de energía para los meses de diciembre, enero y febrero (DEF) de los eventos El Niño "Extremo" 1982-83 y 1997-98. Se excluye El Niño 2015-16 debido que *SIPROL*® no cuenta con boyas virtuales en los trayectos seleccionados.



Figura 2: Distribución de boyas virtuales (puntos azules) y trayectos (líneas segmentadas) en el Océano Pacífico CAWRC CSIRO.

A cada espectro considerado en las trayectorias se extrajo la energía del cuarto cuadrante. Para visualizar la propagación de la energía desde el hemisferio Norte se realizaron diagramas Hovmoller, el cual presenta la energía del cuarto cuadrante en función del tiempo y la posición geográfica de cada nodo seleccionado para cada una de las trayectorias. Cabe mencionar que, en este documento solo se presentan los resultados del trayecto 2.

4. RESULTADOS

Validación

CAWRC CSIRO con boya 2010



Figura 3: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia para HS.

El 5% de las alturas de olas son menores que 1.5 [m], y el 95% de ellas son menores que 3.8 [m] (Figura 3 A). Existe una correlación R = 0.8 entre las bases de datos. El sesgo = 0.2 [m] de CAWRC

CSIRO por sobre los registros de la boya. El índice de dispersión (en porcentaje) es relativamente bajo y RMSE es cercano a cero, por lo que indica concordancia entre los valores observados y pronosticados (Figura 3 B).

SIPROL® con boya 2015-16



Figura 4: A) Gráfico de Cuantiles. B) Gráfico de dispersión más línea de tendencia para HS.

El 95% de las alturas de olas están entre los 3 y 3.2 [m] (Figura 4 A). Existe alta correlación R = 0.93 con un sesgo 0.39 [m] positivo del modelo por sobre la boya. El RMSE es cercano a cero, lo que indica un buen ajuste entre el estimador y la observación.

Caracterización de las marejadas del NW

Series de tiempo DEF para eventos El Niño "Extremo" 1982-83 y 1997-98



Figura 5: Series de tiempo de energía en [m²] cuarto cuadrante de CAWRC CSIRO y nivel del mar de Valparaíso. A) Energía 1982-83, B) Nivel del mar de Valparaíso 1982-83, C) Energía 1997-98 y D) Nivel del mar de Valparaíso 1997-98.

Las ventanas seleccionan los mayores peak de energía desde el noroeste (NW) y nivel del mar en que se presentaron. En diciembre 1982 la máxima energía ocurrió en cuadratura con un nivel del mar máximo de 0,2 [m], y en enero 1983 la mayor energía desde el NW alcanzó la costa a fines del mes, dando inicio a una serie de frentes de oleaje proveniente del NW hasta finales de febrero de 1983. En febrero 1983 (Figura 5 A), el peak de energía alcanzó 0,2384 [m²] y coincidió con la fase de sicigia, con un nivel del mar máximo de 1 [m]. Esta energía exhibida la primera semana de febrero, generó graves impactos en la costa norte de Chile, un ejemplo de ellos fue la destrucción del muelle La Herradura en Coquimbo (Campos, 2016).

Durante el evento El Niño 1997-98, nuevamente enero muestra las mayores energías a finales del mes. Las mayores energías se exhiben en febrero 1998 (Figura 5 C). Se infiere que hubo frecuentes olas muy energéticas en el Pacífico Norte que se propagaron con alta energía hasta la zona central de Chile. El peak de energía fue de 0.2208 [m²], menor al presentado en febrero 1983, y con un menor nivel del mar en fase de cuadratura (≈ 0.5 [m]), de modo que los impactos en la costa de Chile debieron ser menores al Niño "Extremo" 1982-83, ya que no se reportaron daños (Campos, 2016).

Series de tiempo para El Niño "Extremo" 2015-16



Figura 6: Comparación de series boya Watchkeeper 2015-16 vs *SIPROL*®. A) Altura de ola significativa, B) Periodo peak, C) Dirección peak. La línea azul indica límite de 270°.

Se aprecia que desde mediados de diciembre 2015 y enero 2016 fue el periodo que más oleaje desde el NW se registró (Figura 6 B, C). En diciembre 2015 hubo frentes de olas que llegaron de manera sucesiva, durante varios días, como, por ejemplo, entre los días 6 y 12 (Figura 6 B, C), y luego desde el 24 al 28 de diciembre. Para los primeros días de enero 2016 también se registró energía proveniente del NW, pero no tan seguido como en diciembre, hasta que la boya corta amarre en sicigia el 12 de enero 2016 en el estado de mar 12:00 horas.

A continuación, se muestra las series de potencia total registrada, energía espectral y el nivel del mar en Valparaíso;



Figura 7: A) Potencia total, B) Energía espectral (270° a 360°) y C) Nivel del mar.

Los peak de potencia ocurridos el 15 y 27 de noviembre del año 2015 corresponden a frentes de olas provenientes del SW (Figura 9 A). *SIPROL*® pronosticó estas marejadas del SW, pero no generaron el impacto en la infraestructura, turismo y playas, dado que gran cantidad de las bahías de Chile se encuentran protegidas naturalmente desde esta dirección. En cambio, cuando llegaron frentes de olas del NW con menor potencia que las del SW, pero persistentes en su energía (Figura 7 B) entre el 7 de diciembre de 2015 y el 12 de enero 2016 y luego entre el 24 y 28 de enero 2016, fue cuando se generaron los mayores daños en la costa.

Correlación mensual y estacional (DEF)



Figura 8: Correlación mensual (superior) y estacional (inferior) para los 32 años. (A, D) Anomalías de presión atmosférica vs SOI. (B, E) Anomalías de velocidad de viento superficial vs SOI. (C, F) Anomalías de altura de ola significativa vs SOI.

Los resultados de la correlación mensual muestra que, la presión atmosférica disminuye con R = 0.5 desde el Golfo de Alaska hasta el Pacífico Sur, la velocidad del viento aumenta en latitudes medias con R = 0.3 y las alturas de olas aumentan en el Pacífico Norte con R = 0.4. En cambio, en DEF, existe fuerte disminución de la presión atmosférica (R = 0.7), la velocidad de los vientos superficiales aumenta con R = 0.7 (Figura 8 E). Y también se observa un aumento del coeficiente de correlación cercano a 0.7 de altura de ola (Figura 8 F).

Cabe mencionar que, se presentan las correlaciones para la estacionalidad DEF debido que en este periodo de tiempo se producen las correlaciones más altas en el Océano Pacífico, a diferencia de las demás estaciones.

Análisis de compuestos

Anomalías de presión atmosférica



Figura 9: Anomalías de presión atmosférica [hPa]. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998, F) febrero 1998, G) diciembre 2015, H) enero 2016 y I) febrero 2016.

Las anomalías negativas de presión atmosférica que se muestran en las Figuras 9 (A), (B) y (D), son relativamente bajas cercanas a los 5 [hPa], lo que no genera impactos significativos en la intensificación de la velocidad del viento (1 - 2 [m/s]). Caso contrario se observa, en febrero 1983 y 1998 (Figura 9 C, F), donde se presentan anomalías negativas de 20 [hPa], estas bajas presiones generan tormentas que provocan velocidades de vientos superficiales muy intensos, lo que implica alturas de olas muy energéticas generadas más al sur. Para el último Niño "Extremo" 2015-16, las presiones generadas no fueron muy bajas en comparación a la media, ya que existen bajas

anomalías negativas. Las mayores anomalías negativas se dan en enero 2016 (≈ 10 [hPa]) y en febrero la presión comienza a aumentar. Se evidencia que, en promedio, los núcleos de bajas presiones en enero 2016 fueron significativamente menores a los presentados en febrero 1983 y 1998.



Anomalías de velocidad de viento superficial

Figura 10: Anomalías de velocidad de viento superficial [m/s]. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998, F) febrero 1998, G) diciembre 2015, H) enero 2016 y I) febrero 2016.

En diciembre para los eventos El Niño "Extremo" existen anomalías positivas de velocidad de viento superficial de 1 a 3 [m/s] en las Bajas Aleutianas y el Golfo de Alaska, respectivamente (Figura 10 A, D, G). En febrero 1983 y 1998 (Figura 10 C, F) se aprecian anomalías positivas de velocidades vientos superiores a 6 [m/s] en una gran área oceánica. Estos dos meses fueron los más intensos, y coinciden con las anomalías negativas de presión atmosféricas en la misma zona. Es importante destacar que las anomalías de velocidad de viento superficial durante los eventos El Niño "Extremo" alcanzan la latitud 25°N, esto explica que las olas son más grandes de lo normal, almacenando mayor energía antes de su propagación. Para El Niño extremo 2015-16, se observa que, en promedio, los meses más intensos que febrero 1983 y 1998.

Anomalías de altura significativa



Figura 11: Anomalías de alturas significativas [m]. A) diciembre 1982, B) enero 1983, C) febrero 1983, D) diciembre 1997, E) enero 1998, F) febrero 1998, G) diciembre 2015, H) enero 2016 y I) febrero 2016.

Para los tres eventos El Niño "Extremo" diciembre fue el mes más débil en términos de oleaje, y el mes más intenso para los eventos 1982-83 y 1997-98, fue febrero (Figura 11 C, F). En cambio, para El Niño "Extremo" 2015-16 el mes más intenso fue enero 2016 (Figura 11 H). Febrero 1983 y 1998 muestran una gran área del Océano donde hubo anomalías positivas igual o superior a 1.5 [m]. En contraste, en enero 2016 el área oceánica (latitud 25°N a 50°N y longitud 180°W a 120°W) con anomalías de 1.5 [m] es menor. En febrero 2016 (Figura 11 I), las anomalías positivas comienzan a disminuir.

Anomalías de densidad espectral





Figura 12: Anomalías de densidad de energía espectral [m²/Hz*Deg] para época de verano austral DEF. A) El Niño "Extremo" 1982-83, B) El Niño "Extremo" 1997-98, C) El Niño "Extremo" 2015-16, D) El Niño 1989-90 "Neutro".

La comparación espectral frente la ciudad de La Serena (30°S y 80°W) permite evidenciar que las energías del NW presentadas Chile durante El Niño "Extremo" 2015-16 fueron menores a los dos eventos anteriores.

Además, se comprueba que durante eventos El Niño "Extremo", las anomalías positivas generadas por ENOS en el Pacífico Norte alteran el patrón de oleaje distante que llega a Chile durante esta época del año. En cambio, cuando existe presencia de ENOS "Neutro", la media de DEF muestra energía del NW igual a cero. Por lo que, un ENOS "Extremo" influye significativamente en la energía de las alturas de olas del NW que se presentan en el verano austral.

Propagación de energía





Figura 13: Diagrama Hovmoller (trayectoria 2) de energía espectral en [m²] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1982, B) enero 1983 y C) febrero 1983.

En diciembre 1982 (Figura 13 A) se evidencia la baja actividad de energía del NW. Posteriormente, a mediados de enero 1983 (Figura 13 B), las olas aumentaron su intensidad alcanzando la zona central de Chile, pero sin generación de daños en la costa (Campos, 2016). En cambio, en febrero hubo un aumento en la frecuencia e intensidad de las olas, particularmente el 2 y 18 de febrero (Figura 13 C). El 2 febrero 1983 en Chile, las marejadas afectaron la cuarta región de Coquimbo. Sus efectos fueron; "Muelle la Herradura destruido por marejadas (muelle club de yates, 1 damnificado). Un lobo de mar muerto por marejada que lo azotó contra roquerío. Nave cortó amarras" (Campos, 2016). Para el 18 de febrero 1983 no existen reportes de daños. Cabe mencionar que, la energía llegó en cuadratura (Ver Figura 5 A).



El Niño "Extremo" 1997-98: Trayectoria 2

Figura 14: Diagrama Hovmoller (trayectoria 2) de energía espectral en [m²] del cuarto cuadrante. A) diciembre 1997, B) enero 1998 y C) febrero 1998. (Fuente: Elaboración propia).

En diciembre 1997 y enero 1998 las olas que se propagaron desde el Pacífico Norte se disiparon en el Pacífico central, y las que llegaron a Chile son cercanas a 0.5 [m] (Figura 14 A, B). En cambio, para febrero hubo un incremento en la intensidad y frecuencia de energías del NW. Las marejadas que llegaron no generaron daños en la costa (Campos, 2016).

5. CONCLUSIONES

Las energías del NW exhibidas durante el verano austral de El Niño "Extremo" 2015-16 en la costa de Chile, fueron menores a los eventos El Niño "Extremo" 1982-83 y 1997-98. Pero mayores en los impactos en infraestructura, turismo y playas. Posibles explicaciones están dadas por el nivel del mar (0.5 a 1 m) en que llegaron las máximas energías (sicigia o cuadratura), la modificación de la pendiente del fondo en la costa y el deterioro costero (tramos abiertos al NW) producto de las marejadas extremas exhibidas durante agosto 2015 (Winckler, 2015), que generaron que las olas fueran más destructivas.

El análisis de correlación indica que existe una relación significativa entre el fenómeno El Niño y las anomalías negativas de presión atmosférica, anomalías positivas de velocidad de viento superficial y alturas de olas en el Pacifico Norte.

El análisis de compuestos muestra que existe una importante disminución de la presión atmosférica, intensificación de la velocidad de vientos superficiales y aumentos en las alturas de olas en el Pacífico Norte cuando se presenta un fenómeno El Niño "Extremo".

Las anomalías espectrales dejan evidencia que, la acción que genera ENOS "Extremo" sobre el oleaje en el Pacífico Norte influye significativamente en las condiciones de oleaje que se presentan en el verano austral de Chile.

El análisis de propagación de energía muestra que, durante verano austral, los frentes de olas que se propaguen desde el Pacífico central tienen susceptibilidad de generar daños en las bahías abiertas al NW en la costa de Chile, principalmente centro-norte.

AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la empresa ING.MAT S.A por facilitar los datos necesarios para el estudio a través de *SIPROL*® y al SHOA por conceder información espectral y parámetros de resumen de la boya Watchkeeper, y datos del nivel del mar de Valparaíso.

REFERENCIAS

- Campos, R. (2016). *Análisis de marejadas históricas y recientes en las costas de Chile*. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- Chang, E. K. (2002). Interdecadal variations in Northern Hemisphere winter storm track intensity. *Journal Climate*, 642-648.
- Cristina Izaguirre, F. J. (2011). Global extreme wave height variability based on satellite data. *Geophysical Research Letters*, 1-6.
- Hengyi Weng, S. K. (2008). Anomalous winter climate conditions in the Pacific rim during recent El Niño Modoki and El Niño events.
- Henry F. Díaz, M. P. (2001). ENSO variability, teleconnections and climate change. International Journal of Climatology, 1845-1862.
- Higgins, T. E. (2005). Climatology and ENSO-related variability of North American extratropical cyclone activity. *Journal of climate*.
- JIAN LU, G. C. (2008). Response of the Zonal Mean Atmospheric Circulation to El Niño versus Global Warming. *Journal of climate*, 5835-5851.
- J. Beyá, M. Á. (2016). Atlas de oleaje para Chile. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.
- OMM. (18 de Febrero de 2016). World Meteorological Organization. Obtenido de https://public.wmo.int/en
- S. K. Gulev, O. Z. (2001). Extratropical cyclone variability in the Northern Hemisphere winter from the NCEP/NCAR reanalysis data. *Climate Dynamics*, 795-809.

- S.N. Rodionov, N. B. (2007). The Aleutian Low, storm tracks, and winter climate variability. *Deep Sea Research*, 2563-2565.
- Timothy Paul Eichler, F. A. (2015). Northern Hemisphere Climatology and Interannual Variability of Storm Tracks in NCEP's CFS Model.
- Winckler, P. (2015). *El temporal del 8 de agosto de 2015 en la bahía de Valparaíso*. Valparaíso: Universidad de Valparaíso.