



**UNIVERSIDAD TECNICA FEDERICO SANTA MARIA**

**DEPARTAMENTO DE OBRAS CIVILES**

**COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE OLEAJE  
DE AGUAS PROFUNDAS PARA LA COSTA DE  
CHILE**

Memoria de Título presentada por

**Javier Antonio Valdivia Cisternas**

como requisito parcial para optar al título de

**Ingeniero Civil**

**Profesor Guía**

José Beyá Marshall

**Profesor Co-referente**

Patricio Catalán

Diciembre 2020

TITULO DE LA MEMORIA DE TÍTULO:

**COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE OLEAJE DE AGUAS  
PROFUNDAS PARA LA COSTA DE CHILE**

AUTOR:

**JAVIER ANTONIO VALDIVIA CISTERNAS**

Memoria de Título, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos para el título de **Ingeniería Civil** de la Universidad Técnica Federico Santa María.

José Beyá Marshall .....

Patricio Catalán Mondaca .....

Raul Pedro Flores Audibert .....

Valparaíso, Chile, Diciembre de 2020

## AGRADECIMIENTOS

A mis amigos de plan común, con quienes superé una etapa de estudios y carreras distintas, para terminar siendo amigos y hermanos para toda la vida: Gabriel Alvarez, Cami Araya, Seba Pesso, Nico Botón, Andrecito y Victor Vergara.

A mis compañeros de carrera, donde conocimos noches de estudio eterna y lo que nosotros creíamos era el estrés máximo, sin ustedes y los métodos de estudios que desarrollamos a través de los años jamás podría estar escribiendo estas líneas: Nacho Lopez, Vattuone, Camilo Efe, Seba Salinas, Chavarría y más.

A Dieguito Vergara y al Friedel, grandes amigos y personas de la vida, gracias por todos los momentos compartidos en el “2218”, fue un excelente hogar mientras estuve en la capital y le di los cimientos a este documento.

Al Hector y Ariel Gallardo por todas sus enseñanzas con respecto al oleaje y programación, sin dudas fue un equipo de trabajo que mucho me enseñó mucho para mi formación como ingeniero.

A mi madre, por haber sido un pilar fundamental en mis 26 años de formación como profesional, donde siempre pude contar con un apoyo en cuanto desafío académico me propuse en la vida. Disculpa haberme demorado tantos años, pero al final el árbol terminó dando frutos. Te amo mami.

A mi abuelo Orlando, a quien recuerdo de manera recurrente, con quien sin dudas hubiese alzado una copa para celebrar este suceso, pero lo aprovecho de celebrar con quien cementó el legado mi mami loly, estoy muy feliz de saber que festejarás este título conmigo.

A Claudio Cerda y Rosa Elena quienes me han dado herramientas, un lugar para desarrollar mis capacidades y la confianza en mi trabajo profesional, agradezco las oportunidades y la confianza que en mí han depositado.

A la Nikky, mi hilo rojo, quien estuvo conmigo desde que partí con esto y que luego de tantos años recién vengo a finalizar. Mucho de ese tiempo fue siendo compartido contigo, así que no me queda más que agradecer la excelente compañía en esta importante fracción de mi vida. Te quiero mucho.

## RESUMEN

Antes de la publicación del Atlas de Oleaje de Chile (2017) no existía en nuestro país una base de datos que permitiera definir de forma confiable el comportamiento del oleaje en nuestras costas. Hasta ahora, solo se contaba con modelos de oleaje creados y desarrollados por centros de estudios y entidades extranjeras con el objeto de predecir, estudiar, caracterizar y sistematizar la información del oleaje para las costas de países ubicados principalmente en el hemisferio norte del planeta. La única aproximación local a un proyecto de esta naturaleza tuvo lugar con la creación del Explorador de Energías Marinas (2014), el que si bien fue elaborado con fines de investigación energética, contiene parámetros que sirven al propósito de este trabajo. En estas circunstancias, la utilidad que pudieran reportar fuentes foráneas de información se encuentra condicionada por la mayor o menor incertidumbre que pueda generar su aplicación en una realidad tan apartada y distante como lo son las costas chilenas.

Esta memoria de título se ha propuesto desarrollar una metodología que haga posible comparar el desempeño que han tenido en el plano local los distintos modelos de oleaje existentes, permitiendo contrastar la información por éstos arrojada, con aquella proveniente tanto de las boyas ubicadas en nuestras costas, como de los satélites encargados de registrar estas mediciones. Entre los modelos globales que han servido para el desarrollo de este trabajo encontramos: 1.- ECMWF Interim Re-Analysis, 2.-FUGRO Oceanor, 3.-National Oceanic and Atmospheric Administration Wave Watch III, 4.-National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Forecast System Reanalysis, y 5.-Institut Français de Recherche pour l'Exploitation, de la MER. Mientras que en el plano nacional, el ya referido 6.-Explorador de Energías Marinas.

Las comparaciones de las bases de datos mencionadas se desarrollaron a través de los estadísticos escalares y circulares más utilizados para estos fines en la validación de modelos meteorológicos (RMSE, MAE, SS, SI y  $R^2$ ), mientras que la información contrastada corresponde a las características propias del oleaje en cada estado de mar (altura de oleaje, periodo y dirección) proveniente de los datos de 5 boyas y que se complementó con información de altimetría satelital en la cercanía de la costa chilena. Por último, se utilizó la información de altura de oleaje para desarrollar un estudio del clima extremo a lo largo de la costa chilena, y de esta manera cuantificar la incertidumbre existente en la representación de estos valores extremos.

El modelo que obtuvo mejor desempeño en la comparación de alturas significativas del clima medio de boya y satélites ( $H_{m0}$  y  $H_{m0 SAT}$ ) fue IFREMER, con un promedio de  $R^2 = 0.75$  y  $0.69$  respectivamente, FUGRO también logró buenos resultados (promedio de  $R^2 = 0.82$  para la comparación  $H_{m0 SAT}$ ) sin embargo, tiene limitaciones espaciales que impiden concluir que es el

mejor a lo largo de la costa. En tanto, otros parámetros de resumen muestran una calidad menor en la estimación de los valores picos del oleaje, obteniendo para el  $T_p$  y la  $\theta_p$  un valor máximo de  $R^2= 0.29$  y  $0.31$  en sus respectivas comparaciones, lo que es un indicativo que los modelos no tienen una validación adecuada para estos estadísticos de oleaje en la costa chilena.

Para el estudio del oleaje extremo satelital ( $H_{m0\ SAT}$ ), se tienen mejores ajustes en el norte que en el sur, a excepción del coeficiente de determinación. Las correlaciones encontradas son muy bajas, con valores de  $R^2$  cercanos a 0 para puntos en la zona norte y donde la mejor correlación la alcanza la base de datos IFREMER frente al Golfo Coronados con un máximo  $R^2= 0.66$ . Mientras tanto, los sesgos son en general negativos, indicando subestimaciones cercanas a mayores a un metro en algunos casos.

Por último, se obtuvo una importante variación en los valores de retorno para el estudio de clima extremo, alcanzándose diferencias del orden de cientos de años en la estimación del periodo de retorno de un evento determinado. La incertidumbre en la altura significativa espectral del periodo de retorno  $T_r= 50$  [años] tiende a aumentar de sobre manera al sur, con diferencia de valores que van desde 1.28[m] en Arica hasta los 3.95[m] en Faro Felix.

Parte de los resultados descubiertos en esta memoria de título fueron utilizados para la presentación en el IV Congreso de Oceanografía Física, Meteorología y Clima de la PUCV, exponiendo el tema “Incertidumbre en los valores extremos del oleaje en Chile”, posteriormente se envió y publicó en la revista Latin American Journal of Aquatic Research (LAJAR) el documento enviado bajo el mismo título y realizado en coautoría con Gallardo et al. (2017).

**Palabras clave:** oleaje, hindcast, clima extremo, boyas, modelos de reanálisis, incertidumbre de oleaje, altimetría satelital.

## ABSTRACT

Before the publication of the Chilean Wave Atlas (2017), there was no database in our country that allowed us to reliably define the behavior of the waves on our coasts. Until now, there were only wave models created and developed by study centers and foreign entities with the aim of predicting, studying, characterizing, and systematizing wave information for the coasts of countries located mainly in the northern hemisphere of the planet. The only local approach to a project of this nature took place with the creation of the Marine Energy Explorer (2014), which although it was developed for energy research purposes, contains parameters that serve the purpose of this work. In these circumstances, the usefulness that foreign sources of information could report is conditioned by the greater or lesser uncertainty that their application can generate in a reality as remote and distant as the Chilean coasts.

This title memory has set out to develop a methodology that makes it possible to compare the performance that the different existing wave models have had at the local level, allowing the information thrown by them to be compared with that coming from both the buoys located on our coasts, as well as the satellites in charge of recording these measurements. Among the global models that have served for the development of this work we find: 1.- ECMWF Interim Re-Analysis, 2.-FUGRO Oceanor, 3.-National Oceanic and Atmospheric Administration Wave Watch III, 4.-National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Forecast System Reanalysis, and 5.-Institut Français de Recherche pour l'Exploitation, de la MER. While at the national level, the aforementioned 6.-Explorer of Marine Energies.

The comparisons of the aforementioned databases were developed through the most widely used scalar and circular statistics for these purposes in the validation of meteorological models (RMSE, MAE, SS, SI y  $R^2$ ), while the contrasted information corresponds to the characteristics of the waves in each sea state (wave height, period and direction) from the data of 5 buoys and which was supplemented with information on satellite altimetry near the Chilean coast. Lastly, the wave height information was used to develop a study of extreme weather along the Chilean coast, and thus quantify the uncertainty in the representation of these extreme values.

The model that obtained the best performance in the comparison of significant heights of the average climate of buoy and satellites ( $H_{m0}$  y  $H_{m0 SAT}$ ) was IFREMER, with an average of  $R^2 = 0.75$  and  $0.69$  respectively, FUGRO also achieved good results (average of  $R^2 = 0.82$  for the comparison  $H_{m0 SAT}$ ) however, it has spatial limitations that prevent us from concluding that it is the best along the coast. Meanwhile, other summary parameters show a lower quality in the

estimation of peak wave values, obtaining for  $T_p$  and  $\theta_p$  a maximum value of  $R^2= 0.29$  and  $0.31$  in their respective comparisons, which is an indication that the models do not have adequate validation for these wave statistics on the Chilean coast.

For the study of extreme satellite waves ( $H_{m0 SAT}$ ), there are better adjustments in the north than in the south, except for the coefficient of determination. The correlations found are very low, with  $R^2$  values close to 0 for points in the northern zone and where the best correlation is reached by the IFREMER database against the Coronados Gulf with a maximum  $R^2= 0.66$ . Meanwhile, biases are generally negative, indicating underestimates close to greater than one meter in some cases.

Finally, an important variation was obtained in the return values for the study of extreme weather, reaching differences of the order of hundreds of years in the estimation of the return period of a given event. The uncertainty in the significant spectral height of the return period  $T_r= 50$  [years] tends to increase over the south, with a difference in values ranging from  $1.28$  [m] in Arica to  $3.95$  [m] in Faro Felix.

Part of the results discovered in this title memory were used for the presentation at the IV Congress of Physical Oceanography, Meteorology and Climate of the PUCV, exposing the topic "Uncertainty in the extreme values of the waves in Chile", later it was sent and published in the Latin American Journal of Aquatic Research (LAJAR) the document sent under the same title and co-authored with Gallardo et al. (2017).

## GLOSARIO

DOP	Dirección de Obras Portuarias.
EEM	Explorador de Energías Marinas.
ERA-I	ECMWF Interim Re-Analysis
FUGRO	Fugro Oceanor
$H_{m0}$	Altura significativa espectral, obtenida por boyas
$H_{m0 SAT}$	Alturas significativa satelital
$H_{m0 SAText}$	Alturas de oleaje extremo satelital.
$H_s$	Altura significativa de oleaje.
IFREMER	Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la MER.
$m_n$	Momento espectral n.
MAE	Error medio absoluto
NDBC	National Data Bouy Center.
NOAA CFSR	National Oceanic and Atmospheric Administration, The Climate Forecast System Reanalysis.
NOAA WWIII	National Oceanic and Atmospheric Administration, Wavewatch III.
P90%	Percentil 90%
POT	Pico Over Threshold.
$R^2$	Coefficiente de determinación.
RMSE	Error cuadrático medio.
SHOA	Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile.
SI	Índice de dispersión.
SS	<i>Skill Score</i> (habilidad de pronóstico).
$T_m$	Periodo medio de oleaje.
$T_p$	Periodo pico de oleaje.
WAM	WAve prediction Model.
WWIII	Wave Watch III
$\theta_m$	Dirección media de oleaje.
$\theta_p$	Dirección pico de oleaje.

# ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTOS .....	3
RESUMEN.....	4
ABSTRACT.....	6
GLOSARIO .....	6
ÍNDICE GENERAL .....	9
ÍNDICE DE TABLAS .....	11
ÍNDICE DE FIGURAS.....	12
INTRODUCCIÓN .....	17
OBJETIVOS GENERALES .....	19
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	19
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA .....	20
1.1. Introducción .....	20
1.2. Parámetros estadísticos del oleaje.....	21
1.2.1. Momento de orden n ( $mn$ ) .....	21
1.2.2. Altura significativa espectral ( $Hm0$ ) .....	22
1.2.3. Periodo medio ( $Tm$ ).....	22
1.2.4. Periodo pico ( $Tp$ ) .....	22
1.2.5. Dirección media del oleaje ( $Dm$ ) .....	22
1.2.6. Dirección pico de oleaje ( $Dp$ ) .....	22
1.3. Fuentes de Información.....	22
1.3.1. Boyas Oceanográficas.....	22
1.3.2. Satélites .....	24
1.3.3. Modelos de reanálisis de oleaje.....	26
2. METODOLOGÍA DE TRABAJO .....	32
2.1. Determinación del desempeño de los modelos de re análisis de oleaje .....	32
2.2.1. Fórmulas Estadísticas para la Comparación.....	32

2.2.2.	Nodos para la comparación con boyas.....	34
2.2.3.	Comparación Satelital.....	35
2.2.	Determinación del radio de influencia de los nodos.....	38
2.3.	Análisis Estadístico de Oleaje Extremo.....	39
2.3.1.	Preparación de la muestra.....	39
2.3.2.	Funciones de Distribución para Oleaje Extremo.....	40
2.3.3.	Periodo de Retorno y Valor de retorno.....	41
2.3.4.	Estimación del mejor ajuste de la función de distribución.....	42
3.	RESULTADOS.....	44
3.1.	Radio de influencia de los nodos de la costa.....	44
3.1.1.	Campos de promedio de la Altura Significativa ( <b><i>Hm0</i></b> ).....	44
3.1.2.	Resultados de la comparación intrínseca de los modelos.....	45
3.1.3.	Determinación de la zona de influencia de un nodo.....	50
3.2.	Comparación Estadística de las Boyas.....	51
3.2.1.	Comparación de la Altura Significativa de Oleaje ( <b><i>Hm0</i></b> ).....	52
3.2.2.	Comparación de la Dirección Media de Oleaje ( <b><i>Dm</i></b> ).....	56
3.2.3.	Comparación de la Dirección Pico de Oleaje ( <b><i>Dp</i></b> ).....	59
3.2.4.	Comparación del Periodo Medio de Oleaje ( <b><i>Tm</i></b> ).....	62
3.2.5.	Comparación del Periodo Pico de Oleaje ( <b><i>Tp</i></b> ).....	66
3.3.	Comparación Estadística Satelital.....	70
3.3.1.	Comparación de la Altimetría Satelital de Clima Medio.....	70
3.3.2.	Comparación de la Altimetría Satelital de Tormentas.....	75
3.4.	Clima Extremo.....	78
3.4.1.	Selección del número de Eventos Extremos.....	78
3.4.2.	Curvas de altura de tormenta en función del periodo de retorno.....	84
4.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	93
4.1.	Desempeño para la altura significativa ( <b><i>Hm0</i></b> ).....	93

4.1.1. Desempeño en la altura significativa medida por boyas .....	93
4.1.2. Desempeño en altimetría satelital para clima medio.....	93
4.1.3. Desempeño en la altimetría satelital de tormentas .....	94
4.1.4. Diferencias entre la altimetría satelital y la altura medida por boyas.....	95
4.1.5. Incertidumbre de resultados de la altura significativa ( $Hm0$ ) para el método Máximo Sobre el Umbral (POT) .....	96
4.2. Desempeño para la dirección media ( $Dm$ ).....	96
4.3. Desempeño para la dirección pico ( $Dp$ ).....	97
4.4. Desempeño para el periodo medio ( $Tm$ ).....	97
4.5. Desempeño para el periodo pico ( $Tp$ ) .....	98
4.6. Atlas de Oleaje de Chile.....	99
CONCLUSIONES .....	101
REFERENCIAS.....	103

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1-1: UBICACIÓN, PROFUNDIDAD, FECHA DE REGISTROS DISPONIBLES Y VARIABLES DE OLEAJE DISPONIBLES DE LA BOYA NDBC 32012, SHOA1, SHOA2, SHOA3, C-INN1 Y C-INN2.....	24
TABLA 1-2: INFORMACIÓN SATELITAL RECOPIADA, CON FECHA DE INICIO Y FIN DE LAS MEDICIONES, ALTURA DE UBICACIÓN, CICLO DE RECORRIDO Y ENTIDAD ENCARGADA. (AVISO, 2015). .....	25
TABLA 1-3: UBICACIÓN Y PROFUNDIDAD DE LA INFORMACIÓN DE OLEAJE RECOPIADA PARA FUGRO...	28
TABLA 2-1: UBICACIÓN Y PROFUNDIDAD DE LAS BOYAS RECOPIADAS PARA LA COMPARACIÓN CON MODELOS DE REANÁLISIS NUMÉRICOS DE OLEAJE.....	34
TABLA 2-2: COORDENADAS DE EXTRACCIÓN DE MODELOS PARA LA COMPARACIÓN DE BOYAS. ....	35
TABLA 2-3: UBICACIÓN DE LOS NODOS PARA LA COMPARACIÓN SATELITAL. ....	37
TABLA 2-4: NODOS DE COMPARACIÓN PARA LA REPRESENTATIVIDAD ESTADÍSTICA DE LA ALTURA SIGNIFICATIVA DE OLEAJE. ....	38
TABLA 2-5: CONSTANTES DE LA FÓRMULA DE TRAZADO SIN SESGO. (GODA, 2000). ....	42
TABLA 3-1: UBICACIÓN DE LOS NODOS $N1$ , $C2$ y $S3$ .....	50
TABLA 3-2: DISTANCIA (D) EN GRADOS DE LATITUD HASTA DONDE SE OBTIENEN VALORES DE $R2$ MAYORES A 0.9 ACOMPAÑADO POR LA PENDIENTE ASOCIADA. ....	50
TABLA 3-3: CANTIDAD DE ESTADOS DE MAR POR NODO EN CADA MODELO DE REANÁLISIS Y PARA CADA BOYA.....	51

TABLA 3-3: CANTIDAD DE DATOS PROCESADOS PARA LA COMPARACIÓN SATELITAL DE CLIMA MEDIO. ESTA CANTIDAD DE ALTURAS SATELITALES COINCIDENTES CON CADA MODELO SE OBTUVO CON LA EXTRACCIÓN SATELITAL.....	70
TABLA 3-4: PERIODO DE OCURRENCIA DE LOS ÚLTIMOS EVENTOS EXTREMOS REGISTRADOS EN LA COSTA CENTRAL <i>Tr</i> , EL 3-JUL-2013 Y 8-AGO-2015, PARA LAS 7 BASES DE DATOS DE OLEAJE .....	92
TABLA 4-1: RANKING PARA LA COMPARACIÓN DE MODELOS DE REANÁLISIS DE OLEAJE CON LA ALTURA SIGNIFICATIVA DE BOYAS ( <i>Hm0</i> ).....	93
TABLA 4-3: RANKING PARA LA COMPARACIÓN DE MODELOS DE REANÁLISIS DE OLEAJE CON ALTIMETRÍA SATELITAL DE CLIMA MEDIO. ....	94
TABLA 4-4: RANKING PARA LA COMPARACIÓN DE MODELOS DE REANÁLISIS DE OLEAJE CON ALTIMETRÍA SATELITAL DE CLIMA EXTREMO.....	94
TABLA 4-5: RANKING PARA LA COMPARACIÓN DE MODELOS DE REANÁLISIS DE OLEAJE CON LA DIRECCIÓN MEDIA DE BOYAS ( <i>Dm</i> ). ....	97
TABLA 4-6: RANKING PARA LA COMPARACIÓN DE MODELOS DE REANÁLISIS DE OLEAJE CON LA DIRECCIÓN PICO DE BOYAS ( <i>Dp</i> ). ....	97
TABLA 4-7: RANKING PARA LA COMPARACIÓN DE MODELOS DE REANÁLISIS DE OLEAJE CON EL PERIODO MEDIO ( <i>Tm</i> ) DE BOYAS.....	98
TABLA 4-8: RANKING PARA LA COMPARACIÓN DE MODELOS DE REANÁLISIS DE OLEAJE CON EL PERIODO PICO ( <i>Tp</i> ) DE BOYAS.....	98
TABLA 4-9: VALOR DE <i>R2</i> DE LOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS <i>Hm0</i> , <i>Tm</i> , <i>Dm</i> Y <i>Dp</i> DE LA BASE DE DATOS AOC1 DEL ATLAS DE OLEAJE (BEYÁ ET AL., 2017).....	100
TABLA 4-10: VALOR DE <i>R2</i> PROMEDIO ( <i>R2</i> ) POR BOYA DE CADA UNO DE LOS PARÁMETROS ESTADÍSTICOS <i>Hm0</i> , <i>Tm</i> , <i>Dm</i> Y <i>Dp</i> DE LOS MODELOS DE REANÁLISIS DE OLEAJE ANALIZADOS...	100

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1-1: ESPECTRO DE ENERGÍA BIDIMENSIONAL, FUNCIÓN DE LA DIRECCIÓN Y LA FRECUENCIA. (ELABORACIÓN PROPIA).....	21
FIGURA 1-2: CICLO SATELITAL JASON-2 ENTRE EL 07-08-2015 AL 09-08-2015 ACOTADO EN EL OCÉANO PACÍFICO SUR. ....	26
FIGURA 1-3: EXTENSIÓN TEMPORAL DE LA INFORMACIÓN PERTENECIENTE A CADA MODELO DE REANÁLISIS DE OLEAJE. ....	31
FIGURA 2-1: UBICACIÓN DE LAS BOYAS RECOPIADAS PARA EL ESTUDIO, DEFINIDAS EN LA TABLA 2-1. .	35

FIGURA 2-2: EXTRACCIÓN SATELITAL DE UN NODO DE REFERENCIA PARA LA EXTRACCIÓN DE ALTIMETRÍA DE OLEAJE. PUNTOS NEGROS CORRESPONDEN A MEDICIONES DE ALTIMETRÍA, COLOR ROJO NODO DE REFERENCIA Y CÍRCULO AZUL REPRESENTA LOS DATOS REPRESENTATIVOS DEL NODO. ....	36
FIGURA 2-3: UBICACIÓN DE LOS NODOS UTILIZADOS PARA LA COMPARACIÓN SATELITAL .....	37
FIGURA 3-1: GRÁFICOS DE CAMPO DE PROMEDIO DE ALTURA SIGNIFICATIVA (M) EN AGUAS PROFUNDAS FRENTE A LA COSTA DE CHILE DE LOS MODELOS DE REANÁLISIS DE OLEAJE: (A) ERA-I, (B) FUGRO, (C) NOAA CFSR Y (D) NOAA WWIII.....	44
FIGURA 3-2: GRÁFICOS DE VARIACIÓN DE ESTADÍSTICOS A) BIAS [M], B) MAE [M], C) $m$ , D) $R2$ , E) RMSE, F) SI, G) SS DEL NODO N10, EL CUAL SE UBICA EN 33.00[°S], 73.50[°O]. DE LA BASE DE DATOS ERA-I. ....	46
FIGURA 3-3: GRÁFICOS DE VARIACIÓN DE ESTADÍSTICOS A) BIAS [M], B) MAE [M], C) $m$ , D) $R2$ , E) RMSE, F) SI, G) SS DEL NODO N15, EL CUAL SE UBICA EN 33.00[°S], 74.00[°O]. DE LA BASE DE DATOS IFREMER. ....	47
FIGURA 3-4: GRÁFICOS DE VARIACIÓN DE ESTADÍSTICOS A) BIAS [M], B) MAE [M], C) $m$ , D) $R2$ , E) RMSE, F) SI, G) SS DEL NODO N15, EL CUAL SE UBICA EN 33.00[°S], 74.00[°O]. DE LA BASE DE DATOS NOAA CFSR. ....	48
FIGURA 3-5: GRÁFICOS DE VARIACIÓN DE ESTADÍSTICOS A) BIAS [M], B) MAE [M], C) $m$ , D) $R2$ , E) RMSE, F) SI, G) SS DEL NODO N15, EL CUAL SE UBICA EN 33.00[°S], 72.50[°O]. DE LA BASE DE DATOS NAA WWIII.....	49
FIGURA 3-6: VARIACIÓN DE A) RMSE [M] B) BIAS [M] C) SS POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES DE LA BOYA.....	53
FIGURA 3-7: VARIACIÓN DE A) MAE [M] B) SI C) $R2$ POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES DE LA BOYA. .	54
FIGURA 3-8: GRÁFICA DE DISPERSIÓN $Hm0$ PARA LA COMPARACIÓN DE LA BOYA A) NDBC 3012 VS ERA-I B) SHOA1 VS FUGRO C) SHOA2 VS NOAA CFSR D) C-INN1 VS IFREMER E) C-INN2 VS IFREMER .....	55
FIGURA 3-9: VARIACIÓN DE RMSEC POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES DE LA BOYA. .	56
FIGURA 3-10: VARIACIÓN DE A) MAEC (°) B) SS C) $Rc2$ POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES DE LA BOYA. ....	57

FIGURA 3-11: GRÁFICA DE DISPERSIÓN $Dm$ PARA LA COMPARACIÓN DE A) BOYA SHOA1 VS IFREMER. B) BOYA SHOA2 VS IFREMER. C) C-INN1 VS IFREMER.....	58
FIGURA 3-12: VARIACIÓN DE RMSEC (°) POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES DE LA BOYA. .	59
FIGURA 3-13: VARIACIÓN DE A) SS B) MAEC (°) C) R2C POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES DE LA BOYA. ....	60
FIGURA 3-14: GRÁFICA DE DISPERSIÓN $Dp$ PARA LA COMPARACIÓN DE A) BOYA NDBC 32012 VS NOAA WWIII. B) BOYA C-INN1 VS FUGRO C) C-INN2 VS FUGRO. ....	61
FIGURA 3-15: VARIACIÓN DE A) RMSE (S) B) BIAS (S) C) SS POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES DE LA BOYA.....	63
FIGURA 3-16: VARIACIÓN DE A) MAE (S) B) R2 POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES DE LA BOYA. .	64
FIGURA 3-17: GRÁFICA DE DISPERSIÓN $Tm$ PARA LA COMPARACIÓN DE A) BOYA NDBC 32012 VS ERA-I B) SHOA2 VS IFREMER C) C-INN1 VS FUGRO D) C-INN2 VS FUGRO.....	65
FIGURA 3-18: VARIACIÓN DE A) RMSE B) BIAS C) SS POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES DE LA BOYA. .	67
FIGURA 3-19: VARIACIÓN DE A) MAE (S) B) SI C) R2 POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES DE LA BOYA. .	68
FIGURA 3-20: GRÁFICA DE DISPERSIÓN $Tp$ PARA LA COMPARACIÓN DE A) NDBC 32012 VS NOAA WWIII. B) SHOA1 VS FUGRO C) SHOA2 VS NOAA WWIII D) C-INN1 VS FUGRO E) C-INN2 VS FUGRO .....	69
FIGURA 3-21: VARIACIÓN DE A) RMSE (M) B) BIAS (M) C) SS POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES SATELITALES. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES SATELITALES. ....	72
FIGURA 3-22: VARIACIÓN DE A) MAE (M) B) SI C) R2 POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES SATELITALES. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE	

DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES SATELITALES. .....	73
FIGURA 3-23: GRÁFICAS DE DISPERSIÓN <b>Hm0 SAT</b> VERSUS <b>Hm0</b> DE MODELOS DE OLEAJE EN VALPARAÍSO (A) ERA-I (B) NOAA CFSR (C) NOAA WWIII (D) FUGRO (E) IFREMER (F) EEM. ....	74
FIGURA 3-24: VARIACIÓN DE A) RMSE (M) B) BIAS (M) C) SS POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES SATELITALES. ....	76
FIGURA 3-25: VARIACIÓN DE A) MAE (M) B) SI C) $r^2$ POR BASE DE DATOS Y UBICACIÓN CON RESPECTO A LAS MEDICIONES POR BOYAS. LOS VALORES EN BLANCO INDICAN QUE NO SE CUENTA CON BASE DE DATOS EN ESA UBICACIÓN EN EL PERIODO DE COINCIDENTE CON LAS MEDICIONES SATELITALES. ....	77
FIGURA 3-26: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) CON UMBRAL DE <b>Hm0</b> = 2.5[M] EN ARICA PARA EL MODELO DE OLEAJE EEM. ....	78
FIGURA 3-27: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) CON UMBRAL DE <b>Hm0</b> = 3.0[M] EN ARICA PARA EL MODELO DE OLEAJE EEM. ....	79
FIGURA 3-28: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) CON UMBRAL DE <b>Hm0</b> = 3.5[M] EN ARICA PARA EL MODELO DE OLEAJE EEM. ....	80
FIGURA 3-29: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) CON UMBRAL DE <b>Hm0</b> = 4.0[M] EN ARICA PARA EL MODELO DE OLEAJE EEM. ....	80
FIGURA 3-30: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) CON UMBRAL DE <b>Hm0</b> = 4.5[M] EN ARICA PARA EL MODELO DE OLEAJE EEM. ....	81
FIGURA 3-31: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) CON UMBRAL DE <b>Hm0</b> = 3.5[M] EN ARICA PARA EL MODELO DE OLEAJE ERA-I. ....	82
FIGURA 3-32: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) CON UMBRAL DE <b>Hm0</b> = 3.5[M] EN ARICA PARA EL MODELO DE OLEAJE IFREMER. ....	83
FIGURA 3-33: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) CON UMBRAL DE <b>Hm0</b> = 3.5[M] EN ARICA PARA EL MODELO DE OLEAJE NOAA CFSR. ....	83
FIGURA 3-34: CURVA DE TORMENTA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) CON UMBRAL DE <b>Hm0</b> = 3.5[M] EN ARICA PARA EL MODELO DE OLEAJE NOAA WWIII. ....	84
FIGURA 3-35: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) EN ARICA. ....	86
FIGURA 3-36: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) EN IQUIQUE. ....	86
FIGURA 3-37: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) EN ANTOFAGASTA. ....	87
FIGURA 3-38: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) EN CALDERA. ....	87
FIGURA 3-39: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) EN COQUIMBO. ....	88
FIGURA 3-40: ALTURA SIGNIFICATIVA <b>Hm0</b> VERSUS PERIODO DE RETORNO ( <b>Tr</b> ) EN VALPARAÍSO. ....	88

FIGURA 3-41: ALTURA SIGNIFICATIVA $H_{m0}$ VERSUS PERIODO DE RETORNO ( $T_r$ ) EN CONSTITUCIÓN. ....	89
FIGURA 3-42: ALTURA SIGNIFICATIVA $H_{m0}$ VERSUS PERIODO DE RETORNO ( $T_r$ ) EN SAN VICENTE.....	89
FIGURA 3-43: ALTURA SIGNIFICATIVA $H_{m0}$ VERSUS PERIODO DE RETORNO ( $T_r$ ) EN GOLFO CORONADOS. ....	90
FIGURA 3-44: ALTURA SIGNIFICATIVA $H_{m0}$ VERSUS PERIODO DE RETORNO ( $T_r$ ) EN FARO FELIX.....	90
FIGURA 3-45: ALTURA DE TORMENTA CON UN PERIODO DE RETORNO $T_r=50$ [AÑOS] CON SUS RESPECTIVAS BANDAS DE CONFIANZA DEL 90%.....	91
FIGURA 3-46: ALTURA PROMEDIO DE TORMENTA ENTRE LOS MODELOS DE REANÁLISIS DE OLEAJE PARA UN PERIODO DE RETORNO $T_r=50$ [AÑOS] CON BANDAS QUE CORRESPONDEN AL MÍNIMO Y MÁXIMO VALOR ALCANZADO EN LAS BANDAS DE CONFIANZA. ....	91
FIGURA 4-2: COMPARACIÓN DE PERIODO PICO VERSUS DATOS DE BOYA, PARA UN MODELO IMPLEMENTADO ENTRE DICIEMBRE DE 1996 – 1999 (BIDLOT ET AL., 2002). ....	99

## INTRODUCCIÓN

Este trabajo fue parte del proyecto FONDEF-IDeA IT13I20006 “Un Atlas de Oleaje para Chile” cuyo resultado principal fue la elaboración de un atlas que describe cuantitativamente y cualitativamente el oleaje en Chile (Beyá et al., 2016). Antes de la publicación y estudios relacionados con el proyecto no existía un documento oficial que describiese cuantitativamente y en detalle el clima de oleaje frente a la costa de Chile. Algunos estudios anteriores mencionaban algunos aspectos generales (Scott et al., 2002; Monárdez et al., 2008) y otros contaban con descripciones globales (Cruz et al., 2009; Molina, 2011).

Por otro lado, en Chile, las mediciones de oleaje directas en aguas profundas son en su mayoría, elaboradas y administradas por el SHOA, que tiene registros de mediciones de oleaje con boya de corta duración y escalares, sin registros espectrales, salvo dos boyas en la localidad de Valparaíso. Existen otras mediciones realizadas en Valparaíso, Lebu y Corral (Ossandón, 2014) en el marco del Proyecto CORFO-INNOVA 09CN14-5718 “Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo a la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz”, donde participaron distintas universidades y empresas. Adicionalmente existen los registros de la boya NDBC 32012 que pertenece al organismo estadounidense National Data Buoy Center (NDBC, 2015) que corresponde al centro de monitoreo de boyas de la NOAA y que cuentan con información en un punto del océano Pacífico Sur.

Para los estudios de oleaje en Chile se exige según la normativa vigente (SHOA, 2005) estudios de oleaje a partir de una base de datos de oleaje espectral de largo plazo para caracterizar el clima de olas. Esta información puede ser obtenida a partir de mediciones directas o modelos de reanálisis. Es así que debido a la poca cantidad de boyas existentes en la costa y tras la inexistencia de bases de datos completa de mediciones de oleaje, que en la práctica, se utilizan bases de datos de oleaje espectral a partir de modelos de reanálisis de oleaje.

En Chile se utilizan bases de datos comercializadas por dos empresas: FUGRO-OCEANOR (2016) y Baird & Associates (2015). Mientras que las gratuitas están a cargo de centros de investigación internacionales, tales como: National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF), Institut de Recherche pour l'Exploitation de la MER (IFREMER), y una a nivel nacional desarrollada por el Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF). Las empresas a diferencia de los centros de investigación, proveen bases de uso restringido, validación limitada y alto costo. Mientras que los centros de investigación ponen a libre disposición solo algunos parámetros estadísticos del oleaje y no los espectros completos. La mayoría de los modelos de reanálisis de

oleaje mencionados son calibrados y validados con datos de oleaje satelital y boyas en sectores del océano alejados de la costa de Chile, en su mayoría en la zona del hemisferio norte del planeta (Spindler et al., 2011; Rascole et al., 2013; Bidlot, 2002) donde existe una mayor cantidad de instrumentos para evaluar la información modelada.

Debido a la incertidumbre que se genera al utilizar la información de oleaje ya mencionada en la costa del país, es que resulta de interés elaborar una comparación a través de herramientas estadísticas y los instrumentos de medición recopilados con motivo de este trabajo. Esta se puede dividir en el análisis de dos aspectos principales: el primero que corresponde al estudio de las variables de oleaje en los estados de mar más frecuentes, y el segundo que corresponde al análisis de datos extremos y que repercuten en los mayores daños a la infraestructura de obras civiles.

Las herramientas principales para esta evaluación corresponden a metodologías estadísticas para el tratamiento de datos meteorológicos. En la sección 1 se presenta un resumen de la bibliografía encontrada para los estudios de oleaje tanto a nivel nacional como mundial y afines con esta investigación, en la sección 2 se presenta la metodología de trabajo, en la sección 3 se presentan los resultados de las comparaciones realizadas y finalmente en la sección 4 se realiza un análisis y discusión de los hallazgos encontrados.

## **OBJETIVOS GENERALES**

Evaluar el desempeño de los modelos numéricos de reanálisis de oleaje disponibles para la costa de Chile continental, con el objetivo de determinar cuál es el de mejor ajuste para clima medio y clima extremo.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el radio de influencia que tiene un nodo, respecto al resto de la malla de cada uno de los modelos de reanálisis de oleaje.
- Evaluar el desempeño estadístico de los modelos de reanálisis de oleaje para la altura significativa, periodo medio, periodo pico, dirección media y dirección pico medidas por boyas ubicadas en la costa de Chile.
- Encontrar la base de datos de oleaje que mejor se ajuste a las condiciones de clima medio y clima extremo según las mediciones de altura significativa medida por distintos satélites que marcaron paso por el océano Pacífico sur.
- Determinar la diferencia entre los valores de los periodos de retorno obtenidos a partir de los distintos modelos de reanálisis de oleaje a lo largo de la costa de Chile, estimando la incertidumbre de los eventos más extremos registrados.

# 1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

## 1.1. INTRODUCCIÓN

Actualmente existen una gran variedad de modelos numéricos de propagación de oleaje. Estos se clasifican en dos grupos: modelos que promedian y otros que resuelven la fase. Los modelos promediados en fase se basan en la teoría espectral de oleaje, realizando propagaciones del espectro bidimensional obteniendo buenos resultados para modelaciones donde las mallas son del orden de la longitud de onda de la ola. Actualmente, este tipo de modelos se encuentran en tercera generación y son los más utilizados a nivel mundial para generar información de oleaje. Los modelos más utilizados son: Wave Watch III (Tolman, 2014) y WAve prediction Model (Hasselmann et al., 1998).

Los modelos que resuelven la fase se basan en ecuaciones no estacionarias de conservación de masa y la cantidad de movimiento, utilizando el espectro como condición de borde y con la evolución temporal de la variación de la lámina de agua. Tienen como ventaja respecto a los modelos espectrales que no se pierde información de la fase, pero a cambio un gasto computacional elevado, que hace complicada su implementación (García, 2013).

Los modelos que generan información de oleaje, utilizan como condición de borde la batimetría oceánica, los datos más utilizados corresponden a: GEBCO (Weatherall et al., 2015) y ETOPO2 (Smith et al., 1997), que tienen información en todos los océanos del mundo. Sin embargo, no cuentan con mayor precisión en las zonas costeras debido a su resolución, por lo que en estos sectores que se recomienda la utilización de cartas náuticas y batimetría local de detalle.

Las forzantes corresponden a datos de entrada para generar un modelo de reanálisis, siendo los datos de viento y campos de hielo necesarios para su desarrollo. Los campos de viento más utilizados corresponden a NCEP/NCAR (Kalnay et al., 1996), ECMWF (Dee et al., 2011) y de manera menos frecuente REMO (Jacob et al., 1997; von Storch et. al., 2000). Mientras que los campos de hielo más comunes son: ETOPO1 (Eakins et al., 2010) y ECMWF (Dee et al., 2011).

En base a las distintas condiciones de bordes y forzantes existentes, es que varios autores han desarrollado su propia base de datos de oleaje, con distintos motivos: ya sea para caracterizar el clima de oleaje, cuantificar el recurso energético o para generar un atlas de oleaje. Algunos estudios se han desarrollado a nivel global (Randi et al., 2011), regional para el Noreste Atlántico Europeo (Pilar et al., 2008), y local en los países de: México (Rivillas, 2008), Portugal (Pontes et al., 2003), Colombia (Thomas et al., 2012), Uruguay (Hauser, 2012) y España (Losada et al., 2011). En Chile también se han desarrollado estudios para generar datos de oleaje, es así como el Departamento de GeoFísica de la Universidad de Chile (DFG) (2013) generó el “Explorador de

Energía Marina, Recurso Undimotriz”. Y se cuenta con mediciones localizadas y de corta duración realizadas por universidades y otras instituciones con monitoreos puntuales para estudios del recurso energético en Chile, (Ossandón, 2014; Lucero, 2015; Gallardo, 2015).

Las bases de datos de reanálisis de oleaje son generadas para modelar los distintos parámetros estadísticos del oleaje, estos corresponden a a altura de oleaje, periodo y dirección, los cuales se definen a continuación.

## 1.2. PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DEL OLAJE

Los parámetros estadísticos corresponden a variables de oleaje que describen el estado de mar en un momento específico, estos se derivan a partir del espectro de energía bidimensional  $S(f, \theta)$ , el que corresponde a la representación matemática de la energía espectral en función de la frecuencia ( $f$ ) y la dirección ( $\theta$ ). En la Figura 1-1 se presenta un espectro en forma polar, asociado a un estado de mar, se aprecian según la escala de colores los valores de la energía que varían dependiendo de la dirección y la frecuencia. A través de este gráfico se pueden calcular varios parámetros, los cuales se presentan a continuación:

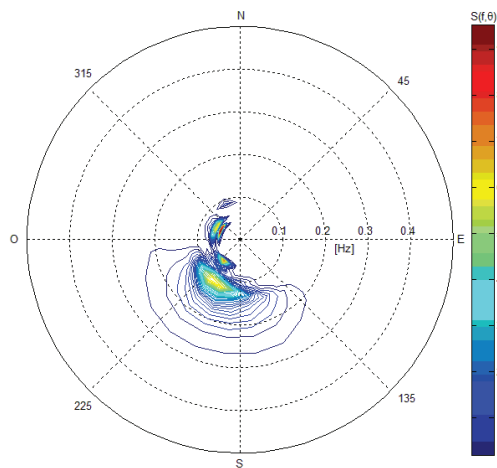


Figura 1-1: Espectro de energía bidimensional, función de la dirección y la frecuencia. (Elaboración Propia)

### 1.2.1. Momento de orden n ( $m_n$ )

Corresponde al parámetro obtenido a través de la integración del volumen bajo la superficie del espectro de energía multiplicado por la frecuencia elevado a n.

$$m_n = \int \int f^n * S(f, \theta) df d\theta \quad \text{Ec. 1-1}$$

### 1.2.2. Altura significativa espectral ( $H_{m0}$ )

Se obtiene en base a la integración del espectro direccional, asumiendo que la función de densidad espectral se asemeja a una distribución tipo Rayleigh (Holthuijsen, 2007).

$$H_{m0} = 4\sqrt{m_0} \quad \text{Ec. 1-2}$$

### 1.2.3. Periodo medio ( $T_m$ )

Periodo medio también conocido como  $T_{01}$  corresponde al cociente entre el momento de orden cero y momento de orden uno ( $T_m$ ).

$$T_m = T_{01} = \frac{m_0}{m_1} \quad \text{Ec. 1-3}$$

### 1.2.4. Periodo pico ( $T_p$ )

Corresponde al periodo asociado al valor pico de densidad de energía en el espectro de oleaje ( $T_p$ ).

### 1.2.5. Dirección media del oleaje ( $D_m$ )

Corresponde a la dirección promedio de las olas medidas en el periodo de registro. Se calcula a través del espectro de oleaje según la siguiente ecuación:

$$D_m = \text{atan} \left( \frac{\iint \sin(\theta) * S(f, \theta) df d\theta}{\iint \cos(\theta) * S(f, \theta) df d\theta} \right) \quad \text{Ec. 1-4}$$

### 1.2.6. Dirección pico de oleaje ( $D_p$ )

Corresponde a la dirección asociada al valor pico de densidad de energía en el espectro de oleaje ( $D_p$ ).

## 1.3. FUENTES DE INFORMACIÓN

### 1.3.1. Boyas Oceanográficas

#### 1.3.1.1. BOYA NATIONAL DATA BUOY CENTER 32012 (NDBC 32012)

Corresponde a una boya direccional del proyecto Stratus desarrollado como parte del programa climático Eastern Pacific Investigation of Climate en conjunto de National Data Buoy Center (NDBC, 2015) y Woods Hole Oceanographic Institution (WHOI, 2000) para la investigación del fenómeno de los vientos alisios que circulan entre los trópicos 30-35[°S], los que se generan a partir del gradiente entre las altas presiones subtropicales hasta las bajas presiones ecuatoriales. Este fenómeno ocurre entre el límite del norte de Chile y el sur de Perú, ubicándose la boya a 1470 Km hacia el mar adentro.

Existen registros disponibles desde el año 2007 hasta principios del 2018 de 14 variables, entre información de: viento, presión, temperatura, oleaje, etc. Sin embargo, para este estudio se utilizan solo los datos de altura de oleaje, periodo medio, periodo pico y dirección pico. Se define esta boya como **NDBC 32012**.

#### **1.3.1.2. BOYAS SERVICIO HIDROGRÁFICO Y OCEÁNOGRÁFICO DE LA ARMADA**

El Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile tiene como objetivo la proporción de elementos técnicos, informaciones y asistencia destinada a dar seguridad a la navegación en las vías fluviales y lacustres, aguas interiores, mar territorial y en alta mar contigua al litoral de Chile, además tiene como misión contribuir a la investigación y al desarrollo de información marítima (SHOA, 2018).

Por su labor es que el SHOA cuenta con información de oleaje de dos boyas en la Bahía de Valparaíso (región de Valparaíso). La primera se define como **SHOA1**, corresponde a una boya Watchkeeper que registró estados de mar cada 3 horas entre principios de septiembre de 2009 hasta octubre de 2010. La segunda boya corresponde a una Triaxys que registró estados de mar cada una hora entre Agosto de 2000 hasta Agosto de 2003, se define como **SHOA2**.

Adicionalmente se obtuvo la medición de la boya Watchkeeper ubicada a ~10[km] al oeste de la Punta de Ángeles, del día del 8 de agosto de 2015, donde se registró una marejada que dejó daños en costo de reparación de infraestructura de US\$7.2 MM según la Dirección de Obras Portuarias (diario el Mercurio de Valparaíso, 12 de agosto 2015), un muerto y más de 4.276 personas afectadas solo en la bahía de Valparaíso (ONEMI, 2015), estos datos puntuales se definen como SHOA3.

#### **1.3.1.3. BOYAS PROYECTO INNOVA-UNDIMOTRIZ**

Estos registros fueron adquiridos gracias al proyecto de investigación orientado a la evaluación del recurso energético asociado al oleaje (Corfo INNOVA 09CN14-5718), donde se adquirieron 2 unidades Triaxys. La primera se ubicó de manera permanente en la localidad de Curaumilla (región de Valparaíso) y se define **C-INN1**, la segunda realizó primero mediciones en Lebu (Región del Bío Bío) entre Agosto de 2011 hasta Mayo de 2012, sin embargo, estas mediciones fueron descartadas por presentar problemas en su registro, al estar influenciado por efectos de borde de la costa. A causa de lo anterior, se reubicó en Corral (Región de Los Ríos) entre noviembre de 2012 a mayo de 2013 (Ossandón, 2014) estos datos se definen como **C-INN2**. Los registros proveniente de estas boyas corresponde a espectros bidimensionales de oleaje cada una hora, los cuales fueron procesados para obtener los parámetros estadísticos de oleaje.

En la Tabla 1-1 se presentan las coordenadas de la ubicación, profundidad, fechas de medición y las variables de oleaje registradas en cada una de las boyas definidas.

Tabla 1-1: Ubicación, profundidad, fecha de registros disponibles y variables de oleaje disponibles de la boya NDBC 32012, SHOA1, SHOA2, SHOA3, C-INN1 y C-INN2.

Nombre	Latitud [°S]	Longitud [°O]	Profundidad [m]	Fecha		Variables
				Inicio	Final	
NDBC 32012	19.38	84.37	4500	29/10/2007	31/01/2018	$H_{m0}, T_m, T_p$ y $\theta_p$
SHOA1	33.00	71.83	480	30/08/2009	10/10/2010	$H_{m0}, T_p$ y $\theta_m$
SHOA2	32.92	71.68	150	1/08/2000	1/08/2003	$H_{m0}, T_m, T_p$ y $\theta_m$
SHOA3	32.99	71.82	480	08/08/2015	08/08/2015	$H_{m0}$
C-INN1	33.12	71.82	150	01/08/2011	12/12/2013	$S(f, \theta)$
C-INN2	39.55	73.40	150	15/11/2012	31/07/2013	$S(f, \theta)$

### 1.3.2. Satélites

#### 2.2.3.1. MISIONES SATELITALES

Se recopiló toda la información disponible de mediciones de altura de ola de las misiones satelitales, donde se obtuvo el registro de: ERS-1 (Attema & Francis, 1991), ERS-2 (Francis et al., 1995), ENVISAT (Louet, 2001), Jason-1 (Ménard et al., 2003), Jason-2 (Lambin et al., 2010), GFO (SPAWAR, 2010) y TOPEX/Poseidon (Ménard et al., 1991).

En la Tabla 1-2 se presenta la fecha de medición utilizada para extraer la altimetría satelital, como también la altitud desde donde se realizaron y las agencias encargadas del instrumento y el proyecto asociado.

Los satélites están a cargo de centros de investigación: Agencia Espacial Europea<sup>1</sup> (en inglés European Space Agency; ESA) organización internacional dedicada a la exploración espacial con 22 estados miembros, la Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos<sup>2</sup>

<sup>1</sup> <http://m.esa.int/ESA>

<sup>2</sup> <https://www.eumetsat.int/website/home/index.html>

(European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites; EUMETSAT) encargada de la operatividad y mantenimiento de los sistemas para interactuar con los satélites. En Francia se encuentra el Centro Nacional de Estudios Espaciales<sup>3</sup> (en francés Centre National d'Etudes Spatiales; CNES) que es un organismo gubernamental a cargo del desarrollo espacial, mientras que en Norte América se tienen datos administrados por la Armada de Estados Unidos (US Navy), Administración Nacional del Océano y la Atmósfera<sup>4</sup> (National Oceanic and Atmospheric Administration; NOAA) y la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio<sup>5</sup> (National Aeronautics and Space Administration; NASA).

Tabla 1-2: Información satelital recopilada, con fecha de inicio y fin de las mediciones, altura de ubicación, ciclo de recorrido y entidad encargada. (AVIS0, 2015).

Satélite	Comienzo	Final	Altitud [km]	Ciclo [días]	Agencia
ERS-1	17-07-1991	31-03-2000	785	3, 35 y 168	ESA
TOPEX/Poseidon	10-08-1992	18-01-2006	1336	9.92	NASA/CNES
GFO	10-02-1998	26-11-2008	800	17	US Navy / NOAA
ERS-2	21-04-1995	06-07-2011	785	35	ESA
Jason-1	07-12-2001	01-07-2013	1336	9.92	CNES
Jason-2	20-06-2008	Aún en órbita	1336	9.92	CNES, EUMETSAT, NASA, NOAA

### 2.2.3.2. FORMA DE MEDICIÓN DE ALTURA

Para determinar la altura del oleaje, el satélite estima la diferencia que existen entre él y la superficie marítima, estimando el tiempo que tarda una onda electromagnética en ir y volver consiguiendo una precisión de 2 [cm], sobre una diferencia de altura de centenas de kilómetros de distancia de separación. Posterior a la adquisición de las mediciones, se aplican correcciones por perturbaciones propias del clima que pudieron afectar el resultado y que a través de instrumentos anexos se pueden detectar y corregir (AVIS0, 2015).

El recorrido es propio del tipo de satélite y su frecuencia de paso. Como ejemplo se presenta en la Figura 1-2 el trayecto que describió el satélite Jason-2 entre los días 7 al 9 de agosto de 2015,

<sup>3</sup> <https://cnes.fr/en>

<sup>4</sup> <http://www.noaa.gov/>

<sup>5</sup> <https://www.nasa.gov/>

en el océano Pacífico Sur. La barra de colores muestra la altura significativa medidas durante la tormenta, donde se aprecian alturas de oleaje por sobre los 8 [m].

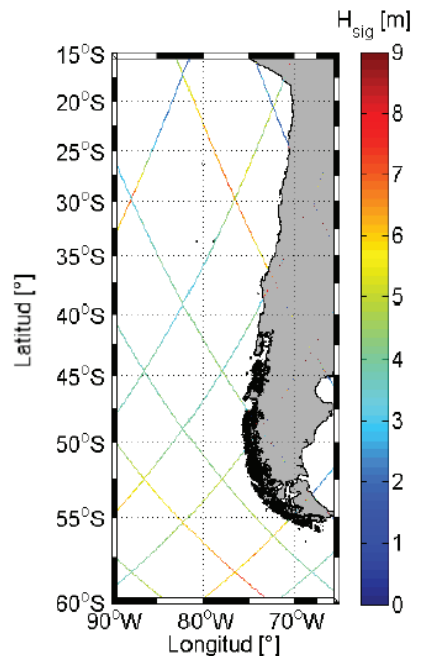


Figura 1-2: Ciclo satelital Jason-2 entre el 07-08-2015 al 09-08-2015 acotado en el océano Pacífico Sur.

### 1.3.3. Modelos de reanálisis de oleaje

Los aportes matemáticos y experimentales impulsaron el desarrollo de modelos de generación de oleaje a través del tiempo. Estos modelos de reanálisis de oleaje actualmente se encuentran en su tercera generación y resuelven la fase física del proceso de generación de oleaje por el viento a través de la ecuación de balance de acción de densidad espectral de oleaje (Gelci et al., 1957), incluyendo interacciones no lineales ola-ola (Chawla et al., 2011) y varias otros más.

Los modelos más utilizados en la actualidad para generar información de oleaje corresponden a WAVE prediction Model (WAM; Hasselmann et al., 1998) y Wave Watch III (WWIII; Tolman, 2014). Su evolución ha sido propiciada por centros de investigación que han desarrollado sus propias bases de datos de oleaje, que no solo son a nivel regional, sino que también a nivel global. Estos son implementados de distinta forma, pero con el mismo objetivo en común que es caracterizar el oleaje.

Empresas privadas proveen de bases de datos espectrales de uso restringido, validación limitada y a un alto costo. Mientras que los centros de investigación entregan a libre disposición de las bases de datos, aunque solamente para algunos parámetros estadísticos del oleaje y no los espectros completos.

Los modelos de reanálisis de oleaje utilizados para la comparación de este estudio se presentan a continuación:

#### **1.2.3.1. ECMWF INTERIM RE-ANALYSIS (ERA-I)**

El centro de investigaciones European Centre for Medium-Range Weather Forecast (ECMWF) fue el encargado de implementar el modelo atmosférico ERA Interim (Dee et al., 2011) que reemplazó al antiguo ERA-40 (Uppala et al., 2005), con una mejor asimilación de datos y resultados para variables climatológicas.

Esta base de datos se creó en base al modelo de generación de oleaje WAM, que para la batimetría utilizó General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) (Weatherall et al., 2015). Mientras que las forzantes de hielo y viento corresponden a sus propios campos de hielo ECMWF y de viento ECMWF.

Este modelo de re análisis de oleaje presenta las series de tiempo de:  $H_{m0}$ ,  $T_m$  y  $\theta_m$ , con salidas de información cada 6 horas, lo que implica cuatro mediciones diarias desde el año 1970 hasta la actualidad y tiene una resolución espacial que varía en mallas con nodos entre los 0.25 [°] hasta los 3 [°] de separación, tanto de manera latitudinal como longitudinal. Sin embargo, la resolución nativa de salida del modelo corresponde a 1 [°], siendo el resto una interpolación de datos con respecto a resolución mencionada.

Para la validación de este modelo, se estudiaron las alturas fueron contrastadas por boyas ubicadas entre los 20[°N] – 60 [°N], en el hemisferio norte (Bidlot et al., 2002; citado por Dee et al., 2011) de distintos océanos. El modelo muestra una mejora notable con los valores de sesgo (BIAS) e índice de dispersión con respecto al antiguo modelo ERA-40, sobre todo para los últimos años simulados.

El documento citado no realiza una validación por localidades, más bien corresponde a contrastes de información global, donde se obtuvieron resultados con BIAS negativos, indicativo de subestimación en las alturas de oleaje, con un valor de -0.17 m entre diciembre de 1996 al mismo mes de 1999, además de un valor de RMSE = 0.46 m y un valor de SI de 0.17.

#### **1.2.3.2. EXPLORADOR DE ENERGÍAS MARINAS (EEM)**

El Departamento de Geofísica de la Universidad de Chile (DGF, 2013) fue el encargado de implementar el Explorador de Energías Marinas (EEM) en base al modelo de generación y propagación de oleaje WWIII para toda la costa de Chile continental.

Para la batimetría se utilizó ETOPO2 (Smith et al., 1997) que cuenta con una resolución espacial de 4 [km], mientras que para los puntos más cercanos a la costa se generaron mallas anidadas con la información de GEBCO que cuenta con datos cada 1 [km]. Los campos de hielo

corresponden a ETOPO1 (Eakins et al., 2010), y los campos de vientos son NCEP/CFSR (National Centers for Environmental Prediction Climate Forecast System Reanalysis; Saha et al., 2010), con información cada 6 horas y resolución espacial de  $0.3^\circ \times 0.3^\circ$ .

La salida de información corresponde a estados de mar espaciados a menos de 1 km en toda la costa chilena continental, con datos estadísticos de oleaje  $H_{m0}$ ,  $T_m$  y  $\theta_m$  cada una hora.

Esta base de datos generada fue validada con altimetría satelital de AVISO para el año 2010 en 12 zonas de la costa chilena entre norte, alcanzando correlaciones ( $R^2$ ) que van entre 0.65 a 0.82 y una única boya direccional ubicada en Valparaíso donde obtuvo un  $R^2= 0.85$  para  $H_{m0}$  durante los meses de enero a octubre de 2010

### 1.2.3.3. FUGRO OCEANOR (FUGRO)

La información de oleaje generada por FUGRO-OCEANOR (2016) se implementó en base al modelo de generación y propagación de oleaje WAM, el cual utiliza la batimetría de GEBCO y los campos de viento corregidos de ECMWF, y los campos de hielo también de ECMWF.

Estos datos fueron adquiridos a través del proyecto Corfo-INNOVA 09CN14-5718 “Catastro del recurso energético asociado a oleaje para el apoyo de la evaluación de proyectos de generación de energía undimotriz”. Donde se tienen registros cada tres horas, lo que implica ocho salidas de espectros de energía diariamente entre 1989 al 2013, con una interrupción del registro entre los mediados de 1991 hasta 1993. Estas mediciones corresponden a tres zonas del país, cuyas ubicaciones y profundidad se presentan en la Tabla 1-3.

Tabla 1-3: Ubicación y profundidad de la información de oleaje recopilada para FUGRO.

Ubicación	Latitud [°S]	Longitud [°O]	Profundidad [m]
Valparaíso	33.00	73.50	3.600
San Vicente	39.00	75.00	4.420
Golfo Coronados	42.00	75.00	1.380

### 1.2.3.4. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION WAVEWATCH III (NOAA WWIII)

La base de datos de oleaje NOAA WWIII (NOAA, 2015) fue desarrollado por *National Oceanic and Atmospheric Administration*, a través de la implementación del modelo de generación y propagación de oleaje Wave Watch III. Se utilizó la batimetría de ETOPO2, campos de hielo ETOPO1 y campos de vientos operacionales de la misma institución (Spindler et al., 2011) que contiene magnitud y dirección de este a 10 metros de altura sobre el mar.

La extensión de estos datos abarca desde el año 1997 hasta el año 2010 con parámetros estadísticos correspondientes a:  $H_{m0}$ ,  $\theta_p$  y  $T_p$ . Mientras que su cobertura de datos se encuentra entre las latitudes 78 °S / 78 °N, con una resolución espacial de 1.00° para la latitud y 1.25° para la longitud y salidas de información cada 3 horas, generando 8 estados de mar diarios.

#### **1.2.3.5. NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION CLIMATE FORECAST SYSTEM REANLAYSIS (NOAA CFSR)**

La base de datos NOAA CFSR fue generada también por la NOAA, implementando el modelo de oleaje de generación y propagación de oleaje Wave Watch III. Para la batimetría se utilizó ETOPO2 con resolución cada 1 km. Mientras que las forzantes corresponden a campos de hielo y vientos reanalizados de la base de datos NCEP/CFSR (Saha et al., 2010).

Se cuentan con estados de mar cada 3 horas, lo que implica 8 salidas diarias entre el año 1979 hasta fines del 2010. La cobertura espacial abarca todo el océano, por lo que es posible extraer datos entre las latitudes 90 [°S] hasta 90 [°N], con una resolución espacial de 0.5 [°] x 0.5 [°], los parámetros estadísticos de oleaje corresponden a:  $H_{m0}$ ,  $T_p$  y  $\theta_p$ .

Su validación de datos se realizó para los 12 meses del año 2005 en la boya 41002 y la 51001 de NDBC, las que se ubican en el hemisferio norte del océano Pacífico en la región de Alaska. La primera boya los valores del coeficiente de determinación ( $R^2$ ) por sobre los 0.9 en la mayoría de meses, a excepción de agosto, mientras que para la segunda se tienen valores del mismo coeficiente por sobre los 0.8 en general y el valor más bajo cercano a los 0.7 para el mes de Junio. Se hace mención a que NOAA ha generado modelos de reanálisis de oleaje regional con alta resolución, con mallas que van entre 1/6° x 1/6° hasta 1/15° x 1/15° en varios sectores de la costa de Estados Unidos, Alaska, Australia, Mediterráneo, entre otros (Chawla et al., 2012).

Spindler et al. (2011) realizaron comparaciones estadísticas entre NOAA WWIII y NOAA CFSR, los cuales difieren principalmente en los campos de viento. Se observa que los datos reanalizados del segundo, tienen en general valores más altos en magnitud, lo que repercute en la diferencia final en el mayor tamaño de altura de oleaje entre ambas.

#### **1.2.3.6. INSTITUT FRANÇAIS DE RECHERCHE POUR L'EXPLOITATION DE LA MER (IFREMER)**

Fue desarrollado por el Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer (IFREMER; Arduin et al., 2011). Estos datos se generaron para el proyecto IOWAGA (2015), donde desarrollaron simulaciones numéricas de oleaje a través de la implementación del modelo de generación y propagación de oleaje WWIII.

La batimetría utilizada corresponde a la integración de GEBCO y ETOPO2. Los campos de viento reanalizados corresponden a NCEP/CFSR entre los años 1990 y 2012, mientras que para 2012-2014 corresponde a ECMWF. Finalmente, los campos de hielo corresponden a la base ECMWF.

La resolución temporal de esta base contempla estados de mar cada 3 horas, lo que representa ocho datos diarios, su resolución espacial es con mallas de  $0.5 [^\circ] \times 0.5 [^\circ]$ , con información desde 1990 hasta el 2014. Los parámetros estadísticos de oleaje corresponden a  $H_{m0}$ ,  $\theta_m$ ,  $\theta_p$ ,  $T_m$  y  $T_p$ .

Ardhuin et al. (2011) encontraron que las alturas de oleaje resultantes de los vientos ECMWF son menores a las de los campos de NCEP/CFSR y que para el clima extremo, las alturas de tormenta tienden a tener valores bajos, debido su la baja magnitud de los vientos, evidenciado por la tormenta del 14 de febrero de 2011 en océano Atlántico Norte, donde se tuvo alturas sobre los 20 metros (Hanafin et al., 2012). La validación de esta base de datos se hizo a través del parámetro RMSE normalizado, donde se agruparon las alturas por cada metro. Esta mejora su desempeño hacia los años más actuales, obteniendo los mejores resultados hacia el 2009 y para alturas menores a los 12 metros.

#### **1.2.3.7. DIRECCIÓN DE OBRAS PORTUARIAS (DOP)**

Se cuenta con información procesada de oleaje, utilizada en proyectos de obras marítimas de la Dirección de Obras Portuarias del Ministerio de Obras Públicas (DOP, 2015). A diferencia del resto de modelos de re análisis de oleaje, los datos ya venían procesados, en formas de tablas de incidencias y rosas de oleaje, sin series de tiempo, por lo que no se pueden establecer correlaciones con respecto a los instrumentos de medición. Sin embargo, tiene cuenta con información referida a las máximas tormentas de varias localidades de la costa chilena, la cual podrá ser utilizada para el estudio de clima extremo.

Varios estudios de la costa del país se han desarrollado en a través del modelo de reanálisis de oleaje “Olas del Pacífico” (Baird & Associates, 2015), por lo que se trataría de esta base de datos, pero se desconoce su versión. Esta se desarrolló en base al modelo WaveWatch III, con información de campos de hielo y vientos de ECWMF, y una batimetría desconocida.

Se presenta en la Figura 1-3 una línea de tiempo que incluye el periodo de información disponible para cada modelo de oleaje presentado en el punto 1.3.3

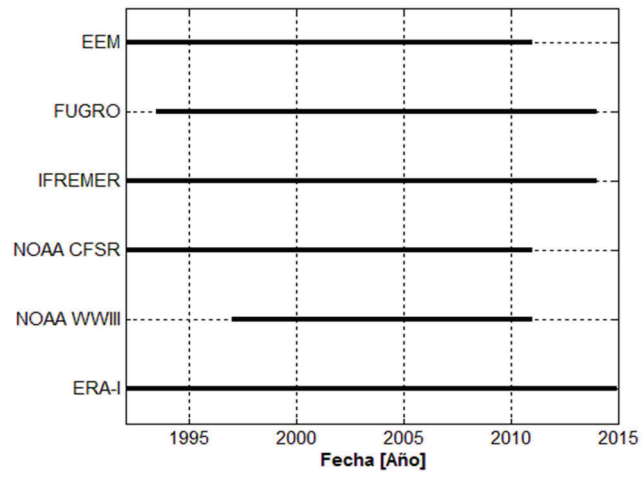


Figura 1-3: Extensión temporal de la información perteneciente a cada modelo de reanálisis de oleaje.

## 2. METODOLOGÍA DE TRABAJO

### 2.1. DETERMINACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MODELOS DE RE ANÁLISIS DE OLEAJE

#### 2.2.1. Fórmulas Estadísticas para la Comparación

Los estudios científicos optan por la evaluación de resultados de forma cuantitativa a través de estadísticos, buscando medir la precisión y desempeño de la simulación a través de sus resultados, que se entenderá como el grado de correspondencia entre pares individuales de valores modelados a través de los modelos de reanálisis de oleaje y valores observados por instrumentos.

##### 2.2.1.1. ESTADÍSTICA ESCALAR

Para medir el desempeño de las variables:  $H_{m0}$ ,  $T_m$ ,  $T_p$ , se utilizan los estadísticos escalares correspondientes a: sesgo (BIAS) que proporciona información sobre la tendencia del modelo a sobre o sub estimar una variable; el error cuadrático medio (RMSE) que estima las diferencias en promedio entre valores pronosticados y valores observados; el índice de dispersión (SI) que normaliza los resultados del RMSE; el MAE calcula también el error utilizando las diferencias de valor absoluto; el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) que calcula la correlación con respecto a la recta que pasa por el origen ( $m_{(0,0)}$ ); el coeficiente de correlación de Pearson al cuadrado  $r^2$  calcula la correlación en base a la recta que tiene intercepto en la ordenada ( $Y = mX + b$ ); por último, el parámetro Skill Score o Habilidad de Pronóstico (Gallagher et al., 1998) puede tomar valores que se encuentran entre  $-\infty$  hasta 1, dependiendo del valor que este tome se puede hacer el siguiente análisis:

- $SS = 1$ : Los errores entre lo generado y medido son cero.
- $SS = 0$ : La magnitud de los errores es comparable con los valores observados.
- $SS < 0$ : La magnitud de los errores es mucho mayor a los valores observados.

$$\bar{X} = \sum_{i=1}^n X_i \quad \text{Ec. 2-1}$$

$$\bar{Y} = \sum_{i=1}^n Y_i \quad \text{Ec. 2-2}$$

$$R^2 = \frac{(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}))^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad \text{Ec. 2-3}$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{(\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2)}} \quad \text{Ec. 2-4}$$

$$BIAS = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i - X_i = \bar{Y} - \bar{X} \quad \text{Ec. 2-5}$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n}} \quad \text{Ec. 2-6}$$

$$SI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{n\bar{X}^2}} = \frac{RMSE}{\bar{X}} \quad \text{Ec. 2-7}$$

$$SS = 1 - \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - X_i)^2}{\sum_{i=1}^n X_i^2}} \quad \text{Ec. 2-8}$$

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |X_i - Y_i| \quad \text{Ec. 2-9}$$

$$m = \frac{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2} \quad \text{Ec. 2-10}$$

$$m_{(0,0)} = \frac{\sum_{i=1}^N X_i * Y_i}{\sum_{i=1}^N X_i^2} \quad \text{Ec. 2-11}$$

Se define como  $X_i$  al  $i$ -ésimo de los valores modelados y como  $Y_i$  al  $i$ -ésimo los valores medidos en un tiempo correspondiente a  $i$ .

### 2.2.1.2. ESTADÍSTICA CIRCULAR

Para medir el desempeño de los modelos de reanálisis en la estimación dirección media ( $D_m$ ) y la dirección pico ( $D_p$ ), se utilizan fórmulas de estadística circular (Zar, 1984) que corresponden a: Error absoluto medio circular ( $MAE_c$ ) que se calcula utilizando la menor de las diferencias angulares; Raíz del error cuadrático medio circular ( $RMSE_c$ ) guarda cierta relación con el estadístico anterior y también utilizando la menor de las diferencias angulares; Coeficiente de determinación circular ( $R_c^2$ ) (Fisher et. al., 1983) para establecer el grado de correlación utilizando

las componentes ortogonales de la dirección; La habilidad de pronóstico (SS) no tiene un análogo para mediciones angulares por lo que se utiliza la misma definida en Ec. 2-8 para variables escalares.

$$MAE_c = \frac{1}{N} \sum_{i \in I} |X_i - Y_i| + \frac{1}{N} \sum_{i \in I^c} (360 - |X_i - Y_i|) \quad \text{Ec. 2-12}$$

Donde  $I = \{i \in \{1,2,3, \dots, N\} / |O_i - P_i| \leq 180\}$  e  $I^c = \{1, 2, 3, \dots, N\} \setminus I$

$$RMSE_c = \sqrt{\frac{1}{N} * \left( \sum_{i \in I} (X_i - Y_i)^2 + \sum_{i \in I^c} (360 - |X_i - Y_i|)^2 \right)} \quad \text{Ec. 2-13}$$

Donde  $I = \{i \in \{1,2,3, \dots, N\} / |O_i - P_i| \leq 180\}$  e  $I^c = \{1, 2, 3, \dots, N\} \setminus I$

$$R_c^2 = \left( \frac{4 \left[ \left( \sum_{i=1}^N \cos X_i \cos Y_i \right) \left( \sum_{i=1}^N \sin X_i \sin Y_i \right) - \left( \sum_{i=1}^N \cos X_i \sin Y_i \right) \left( \sum_{i=1}^N \sin X_i \cos Y_i \right) \right]}{\sqrt{\left[ N^2 - \left( \sum_{i=1}^N \cos (2X_i) \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^N \sin (2X_i) \right)^2 \right] \left[ N^2 - \left( \sum_{i=1}^N \cos (2Y_i) \right)^2 - \left( \sum_{i=1}^N \sin (2Y_i) \right)^2 \right]}} \right)^2 \quad \text{Ec. 2-14}$$

### 2.2.2. Nodos para la comparación con boyas

Los nodos se escogen como el punto más próximo a la ubicación real de la boya, estos dependen de la resolución de la malla de cada una de las bases de datos. En la Tabla 2-1 se presenta un resumen con la ubicación de todas las boyas recopiladas para este estudio, mientras que la Tabla 2-2 muestra la extracción de nodos por modelos de reanálisis de oleaje.

Para complementar, se presenta en la Figura 2-1 la ubicación de las boyas mencionadas. El nodo NDBC 32012 se ubica a 1470 kms desde la costa en la latitud de Iquique, por diferencias de resolución los nodos extraídos para cada base de datos de oleaje tienen distancias que varía entre  $0.17^\circ$  hasta  $0.74^\circ$ , con respecto a este punto. En Valparaíso se utiliza la información de las boyas: SHOA1, SHOA2 y C-INN1, la distancia entre ellas varía desde  $0.14^\circ$  hasta los  $0.28^\circ$ , mientras que la distancia entre estas y los modelos de oleaje van desde  $1.4^\circ$  a  $1.6^\circ$ . Por último, se ubicó la boya C-INN2 en Corral, la que tiene una distancia con los modelos que varía entre  $0.1^\circ$  a los  $1.6^\circ$ .

Tabla 2-1: Ubicación y profundidad de las boyas recopiladas para la comparación con modelos de reanálisis numéricos de oleaje.

Localidad	Boya	Lat [°]	Long [°]	Profundidad [m]
-	NDBC 32012	19.38	84.37	4.500
Valparaíso	SHOA1	33.00	71.83	480
	SHOA2	32.92	71.68	150
	C-INN1	33.12	71.82	150
Corral	C-INN2	39.55	73.40	150

Tabla 2-2: Coordenadas de extracción de modelos para la comparación de boyas.

	Ubicación					
	NDBC 32012		Valparaíso		Corral	
	Lat [°S]	Long [°O]	Lat [°S]	Long [°O]	Lat [°S]	Long [°O]
ERA-I	19.50	84.50	33.00	73.50	39.00	73.50
NOAA WWIII	19.50	84.50	33.00	73.75	40.00	75.00
NOAA CFSR	19.00	85.00	33.00	73.50	40.50	75.00
IFREMER	19.00	84.50	33.00	73.00	39.50	73.50
FUGRO-OCEANOR	*		33.00	73.50	39.00	75.00
EEM	*		33.00	73.50	40.50	75.00

\* Fuera del dominio de espacio del modelo de reanálisis.

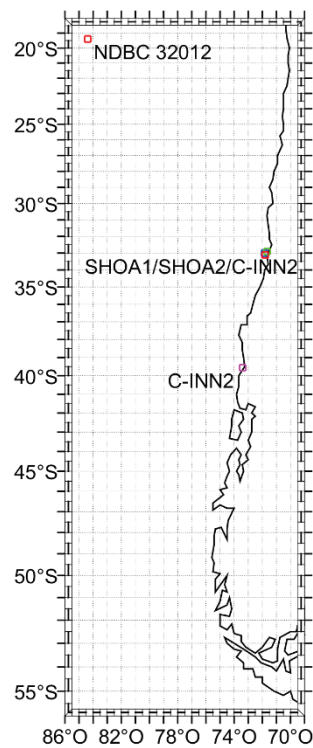


Figura 2-1: Ubicación de las boyas recopiladas para el estudio, definidas en la Tabla 2-1.

## 2.2.3. Comparación Satelital

### 2.2.3.1. EXTRACCIÓN DE DATOS SATELITALES

Para comparar los datos satelitales se define a continuación la forma de establecer los datos característicos de cada nodo en particular. Primero se establece un radio máximo para considerar como información útil. Segundo, se debe considerar una tolerancia temporal máxima, entre los datos obtenidos por el instrumento y los registros de cada una de las bases de datos de oleaje, que por lo general son cada 3 o 6 horas.

En el caso de este estudio, se definió un radio de 50 kms y una diferencia máxima de una hora para que los datos sean válidos en su comparación, siguiendo criterios de control de calidad de SatOC (Ash et al., 2010) para procesar los datos del océano: Atlántico, Pacífico Norte y Sur, Reino Unido y el Mar Mediterráneo. Donde las alturas satelitales registradas pasan por un proceso de chequeo y validación tomando un radio incluso mayor, de 100 kms de distancia máxima entre el satélite y la boya, además de una hora máxima de tiempo de diferencia.

Para ejemplificar gráficamente la extracción de datos, se presenta la Figura 2-2 donde los puntos negros corresponden a la información de altimetría satelital en distintos tiempos y el punto de color rojo es el nodo en donde se desea extraer alturas de oleaje, en este caso 33°S, 72.5°O, y por último, el círculo en color azul representa el radio de 50 kms con respecto al nodo. Es así, como todos los puntos negros que se encuentran dentro de esa área serán considerados para el nodo.

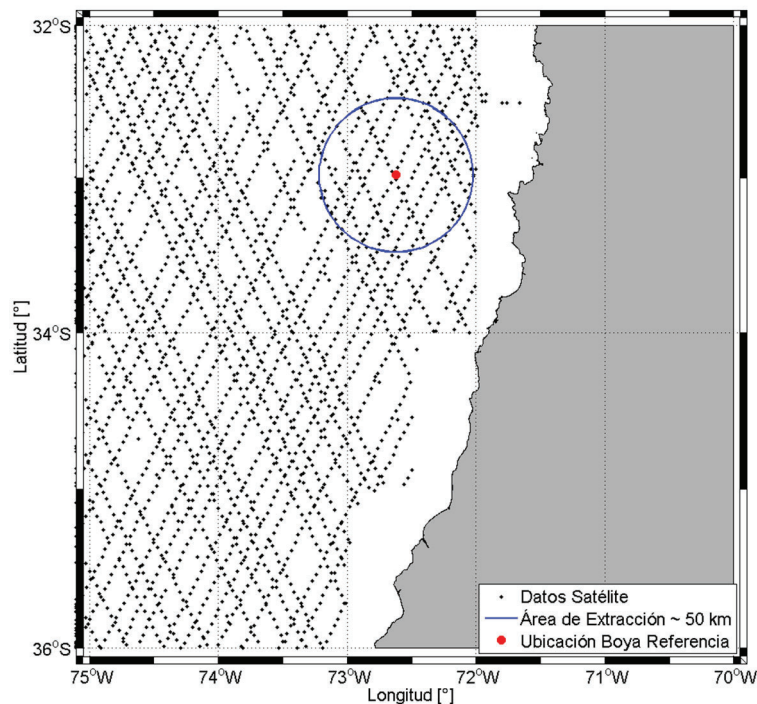


Figura 2-2: Extracción satelital de un nodo de referencia para la extracción de altimetría de oleaje. Puntos negros corresponden a mediciones de altimetría, color rojo nodo de referencia y círculo azul representa los datos representativos del nodo.

### 2.2.3.2. NODOS PARA LA COMPARACIÓN SATELITAL

Para la comparación de datos satelitales, se utilizan dos enfoques:

1. El primero corresponde a la comparación de datos de oleajes, utilizando la totalidad de datos extraídos por los satélites en los nodos.

2. El Segundo en cambio, utiliza solamente los datos de oleaje superiores al percentil 90 de la totalidad de datos, los cuales corresponden a las marejadas y eventos de mayor altura. Se optó por esta muestra al comprobar que en ese percentil las alturas obtenidas corresponden a eventos de marejadas independientes y se alcanza a tener un número robusto de datos para poder hacer contrastes, ya que al ir aumentando el valor del percentil la información para contrastar era cada vez menor.

La ubicación de los nodos utilizados para la comparación satelital en ambos casos es la misma, se presentan en la Tabla 2-3 y de manera gráfica en la Figura 2-3. Debido a las diferencias en las resoluciones de bases de datos, los puntos extraídos para cada localidad están en distintas ubicaciones a lo más a  $0.7071^\circ$  de distancia, dependiendo de la resolución del modelo.

Tabla 2-3: Ubicación de los nodos para la comparación satelital.

	Localización	Latitud [ $^\circ$ O]	Longitud [ $^\circ$ S]
1	Arica	18.00	72.50
2	Iquique	20.00	72.50
3	Antofagasta	24.00	72.50
4	Caldera	27.00	72.50
5	Coquimbo	30.00	72.50
6	Valparaíso	33.00	73.50
7	Constitución	35.00	74.00
8	San Vicente	37.50	75.00
9	Golfo Coronados	42.00	75.00
10	Faro Felix	53.00	76.00

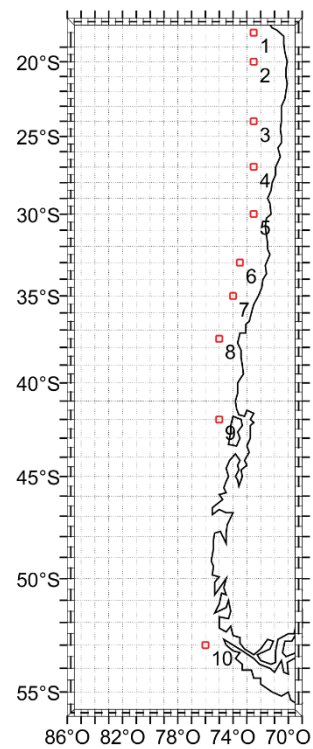


Figura 2-3: Ubicación de los nodos utilizados para la comparación satelital

## 2.2. DETERMINACIÓN DEL RADIO DE INFLUENCIA DE LOS NODOS

Se busca establecer el grado de correlación existente en el valor de  $H_{m0}$  que se tiene de manera intrínseca entre la línea de costa de cada modelo, con respecto al resto de nodos de la malla, en específico entre las latitudes 19[°S] – 55[°S] y las longitudes 82[°O] – 72 [°O], correspondiente a la ubicación de la costa chilena y sus aguas profundas.

La línea de costa es propia de cada base de datos de oleaje y se define en la Tabla 2-4, donde ERA-I tiene 25 nodos, mientras que IFREMER, NOAA CFSR y NOAA WWIII 37. Estos se utilizaron para comparar los estadísticos: BIAS, MAE,  $m$ ,  $r^2$ , RMSE, SI y SS. Donde la comparación de ERA-I se realizó con 163 puntos, IFREMER y NOAA CFSR con 322, finalmente NOAA WWIII con 285.

Tabla 2-4: Nodos de comparación para la representatividad estadística de la altura significativa de oleaje.

Nodo N°	ERA-I		IFREMER y NOAA CFSR		NOAA WWIII	
	[°S]	[°O]	[°S]	[°O]	[°S]	[°O]
1	19,50	72,00	19,00	72,00	19,00	71,25
2	21,00	72,00	20,00	72,00	20,00	71,25
3	22,50	72,00	21,00	72,00	21,00	71,25
4	24,00	72,00	22,00	72,00	22,00	71,25
5	25,50	72,00	23,00	72,00	23,00	71,25
6	27,00	72,00	24,00	72,00	24,00	71,25
7	28,50	73,50	25,00	72,00	25,00	71,25
8	30,00	73,50	26,00	72,00	26,00	71,25
9	31,50	73,50	27,00	72,00	27,00	71,25
10	33,00	73,50	28,00	74,00	28,00	72,50
11	34,50	73,50	29,00	74,00	29,00	72,50
12	36,00	75,00	30,00	74,00	30,00	72,50
13	37,50	75,00	31,00	74,00	31,00	72,50
14	39,00	75,00	32,00	74,00	32,00	72,50
15	40,50	75,00	33,00	74,00	33,00	72,50
16	42,00	75,00	34,00	74,00	34,00	72,50
17	43,50	75,00	35,00	74,00	35,00	72,50
18	45,00	75,00	36,00	75,00	36,00	75,00
19	46,50	76,50	37,00	75,00	37,00	75,00
20	48,00	76,50	38,00	75,00	38,00	75,00
21	49,50	76,50	39,00	75,00	39,00	75,00
22	51,00	76,50	40,00	75,00	40,00	75,00
23	52,50	76,50	41,00	75,00	41,00	75,00

24	54,00	75,00		42,00	76,00		42,00	76,25
25	55,50	73,50		43,00	76,00		43,00	76,25
26	-	-		44,00	76,00		44,00	76,25
27	-	-		45,00	76,00		45,00	76,25
28	-	-		46,00	77,00		46,00	77,50
29	-	-		47,00	77,00		47,00	77,50
30	-	-		48,00	77,00		48,00	77,50
31	-	-		49,00	77,00		49,00	77,50
32	-	-		50,00	77,00		50,00	77,50
33	-	-		51,00	77,00		51,00	77,50
34	-	-		52,00	77,00		52,00	77,50
35	-	-		53,00	76,00		53,00	76,25
36	-	-		54,00	75,00		54,00	75,00
37	-	-		55,00	74,00		55,00	72,50

Si bien se calcularon todos los estadísticos definidos en 2.2.1.1, para establecer el radio de representatividad los nodos se utilizó solo el valor de correlación  $r^2$  cuando sea mayor o igual a 0.9, y se analizará el valor de la pendiente obtenida  $m$ , sabiendo que para una buena correlación, estos valores deberían ser cercanos a uno.

### 2.3. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE OLEAJE EXTREMO

En Chile los estudios de clima extremo son estudiados de forma independiente para cada proyecto a través de la Dirección de Obras Portuarias (DOP, 2015). Mientras que la normativa vigente estipulada por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA, 2005) establece que los estudios de oleaje deben ser realizados a partir de una base de datos de oleaje espectral de largo plazo para caracterizar el clima de olas de un sector. Estas pueden ser obtenidas a partir de mediciones directas o modelos de reanálisis y con un periodo no inferior a los 20 años de información de manera de considerar al menos 1 evento por año y realizar un análisis estadístico de la ola con periodos de retorno de 5, 10, 25, 50 y 100 años. Para desarrollar este estudio se utilizará en este trabajo el método más utilizado por la academia denominado: *Peak Over Threshold*, el cual se describe a continuación:

#### 2.3.1. Preparación de la muestra

Para evaluar el clima extremo se utiliza sólo la parte de la estadística que correspondiente a las mayores alturas de oleaje, de aquí en adelante llamadas tormentas o eventos extremos. Si bien existen tres métodos de selección: Muestra total, Máximo Anual y Método Sobre el Umbral (en inglés *Peak Over Threshold (POT)*) (Goda, 2000), el más común es el último por las ventajas estadísticas que tiene por sobre los dos primeros y las cuales se presentan a continuación.

Se debe cumplir como requisito que la muestra sea estadísticamente independiente. Esto significa que un dato individual debe ser independiente de otros y su correlación es igual a cero, además se debe cumplir con la homogeneidad, esto quiere decir que los datos de una muestra deben tener una distribución parental en común, a lo cual definiremos como población. Esta condición se logra utilizando datos de eventos extremos que estén separados al menos en 4 días, para asegurar que los datos estudiados correspondan a marejadas distintas.

### 2.3.2. Funciones de Distribución para Oleaje Extremo

Se emplean varias distribuciones teóricas para ajustar las muestras. En la estadística teórica, un dato extremo se refiere al mínimo o máximo entre una muestra de datos independientes. Cuando se aplica un análisis extremo para una muestra cualquiera de datos, se sabe que tres tipos de funciones teóricas deberían ajustarse a dichas muestras dependiendo de la distribución de la población de datos iniciales. Sin embargo, el POT no obedece a la estadística teórica puesto que los datos seleccionados no son necesariamente el máximo de la muestra, pero si corresponden al valor peak de una tormenta en específico.

No existe un fundamento teórico para recomendar alguna de las funciones, el consenso actual es probar las distintas funciones de distribución y encontrar la que se ajuste de mejor manera. Las funciones candidatas utilizadas para este estudio se enumeran a continuación. La función de distribución acumulada se denota como  $F(x)$ , mientras que la función de densidad se denota como  $f(x)$ , donde  $x$  corresponde a la variable de datos extremo, en este caso la altura de oleaje.

- 1) Fisher-Tippett tipo I (FT-I) o Distribución de Gumbel:

$$F(x) = \exp \left[ - \exp \left( - \frac{x - B}{A} \right) \right] : \infty < x < \infty \quad \text{Ec. 2-15}$$

- 2) Fisher-Tippett tipo II (FT-II) o Distribución de Frechét:

$$F(x) = \exp \left[ - \left( 1 + \frac{x - B}{kA} \right)^{-k} \right] : B - kA \leq x < \infty \quad \text{Ec. 2-16}$$

- 3) Distribución de Weibull

$$F(x) = 1 - \exp \left[ - \left( \frac{x - B}{A} \right)^k \right] : B \leq x < \infty \quad \text{Ec. 2-17}$$

4) Distribución Lognormal:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}Ax} \exp \left[ -\frac{(\ln x - B)^2}{2A^2} \right] : 0 < x < \infty \quad \text{Ec. 2-18}$$

Estas funciones tienen 2 o 3 parámetros.  $A$  corresponde al parámetro de escala y gobierna en el eje  $x$ .  $B$  es el parámetro de ubicación pues hace un arreglo en la ubicación en el eje  $x$ . Mientras que el parámetro  $k$  es llamado parámetro de forma pues determina la forma de la función de distribución. El parámetro  $k$  es adimensional, mientras que  $A$  y  $B$  tienen unidad longitud, excepto en la distribución Log-normal.

### 2.3.3. Periodo de Retorno y Valor de retorno

Las estadísticas extremas tienen el objetivo de estimar el valor esperado de evento extremo que ocurriría una vez en un largo periodo de tiempo. El periodo de retorno se define como el promedio del tiempo de duración en el cual los eventos extremos exceden cierto umbral, mientras que el valor de retorno corresponde a la altura significativa umbral que define un periodo de retorno.

El periodo de retorno se denota como  $T_r$  y se deriva de la función de distribución de la siguiente manera. La función de distribución  $F(x)$  se asume conocida. La probabilidad que la variable extrema  $x$  no exceda cierto valor  $x_u$  en un año es  $F(x_u)$  por definición. Supongamos que el evento  $x \geq x_u$  ocurrió en un año, la variable  $x$  no excedió  $x_u$  durante los otros  $n - 1$  años, y excedió  $x_u$  en el año  $n$ . Porque la probabilidad de no excedencia para  $n - 1$  años está dado por  $F^{n-1}(x_u)$  y la excedencia en un año corresponde a  $1 - F(x_u)$ , la probabilidad del evento anterior se expresa como:

$$P_n = F^{n-1}(x_u)[1 - F(x_u)] \quad \text{Ec. 2-19}$$

El evento anterior puede ocurrir en el año  $n = 1$  pero no puede ocurrir hasta  $n = \infty$ . El valor esperado de  $n$  es el periodo de retorno por definición, y se calcula de la siguiente manera..

$$T_r = E[n] = \sum_{n=1}^{\infty} n * P_n = [1 - F(x_u)] \sum_{n=1}^{\infty} n * F^{n-1}(x_u) = \frac{1}{1 - F(x_u)} \quad \text{Ec. 2-20}$$

El valor de retorno correspondiente al periodo de retorno  $T_r$  se denota como  $x_R$ . Este se obtiene con la función inversa de la distribución acumulativa de la siguiente manera:

$$x_R = F^{-1} \left( 1 - \frac{1}{T_r} \right) \quad \text{Ec. 2-21}$$

### 2.3.4. Estimación del mejor ajuste de la función de distribución

#### 2.3.4.1. TRAZADO INICIAL

Una muestra de datos organizados en orden ascendente o descendente pertenece a la categoría de estadísticas ordenadas. Se toma el orden descendente y el número de orden se expresa con  $m$ . La variable y su probabilidad de no excedencia del orden  $m$  se indican con el subíndice ( $m$ ). La fórmula que asigna la probabilidad a la variable ordenada es la de posición de trazado, la más conocida es la de Weibull:

$$\hat{F}_{(m)} = 1 - \frac{m}{N + 1} \quad \text{Ec. 2-22}$$

La ecuación Ec. 2-22 se deriva como la probabilidad esperada de la variable ordenada  $m^{\circ}$  en la población; es decir  $E[F(x)]$ . Esta produce cierto sesgo dependiendo de la distribución candidata que se desee emplear, es por eso que debido a las recomendaciones de distintos autores se utiliza la función de trazado sin sesgo, que queda expresada de la siguiente manera:

$$\hat{F}_{(m)} = 1 - \frac{m - \alpha}{N_T + \beta} \quad \text{Ec. 2-23}$$

Tabla 2-5: Constantes de la fórmula de trazado sin sesgo. (Goda, 2000).

Distribución	$\alpha$	$\beta$	Autores
FT-II	$0.44 + 0.52/k$	$0.12 - 0.11/k$	Goda y Onozawa
FT-I	0.44	0.12	Gringorten
Weibull	$0.20 + 0.27/\sqrt{k}$	$0.20 + 0.23/\sqrt{k}$	Goda
Normal	0.375	0.25	Blom
Log-normal	0.375	0.25	Blom

Los valores de las constantes  $\alpha$  y  $\beta$  se presentan en la Tabla 2-5. La fórmula anterior utiliza el número total de datos ( $N_T$ ) en lugar del tamaño de muestra ( $N$ ) para que la fórmula se pueda aplicar a las muestras censuradas y no censuradas.

#### 2.3.4.2. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS POR EL MÉTODO DE LOS MÍNIMOS CUADRADOS

El primer paso para la estimación de los parámetros es la selección de la función de distribución candidata. Las distribuciones FT-I, FT-II y Weibull serán consideradas en este capítulo como las funciones candidatas para la distribución de la población de oleaje extremo; la distribución de la población se denomina distribución principal. Los parámetros de escala, ubicación y forma de cada función candidata se estiman para cada muestra dada, y se compara la bondad de ajuste de cada función para seleccionar la distribución con mejor ajuste.

El método de los mínimos cuadrados puede proporcionar la mejor estimación de los dos parámetros en una sola operación. Como la distribución FT-I tiene dos parámetros A y B, se puede analizar directamente mediante el método de mínimos cuadrados. Sin embargo, la distribución FT-II y Weibull tienen tres parámetros, y por lo tanto tienen que ser modificados en una forma de función de dos parámetros. La metodología de aplicación de este trabajo, fija el parámetro de forma ( $k$ ) en los siguientes valores:

- Distribución FT-II:  $k = 2.5, 3.33, 5.0$  y  $10.0$
- Distribución de Weibull:  $k = 0.75, 1.0, 1.4$  y  $2.0$

Una vez que el parámetro de forma es fijo, cada distribución se convierte en una función candidata independiente y compite con el resto de funciones para obtener el mejor ajuste, por lo que se propone emplear nueve funciones de distribución (una para FT-I, cuatro para FT-II y cuatro para Weibull) como candidatas.

La razón principal para fijar el parámetro de forma ( $k$ ) es la dificultad para predecir la verdadera distribución para una muestra de tamaño pequeño, entre unas cuantas docenas a cientos. Goda (1988) ha demostrado esta dificultad mediante el estudio de la simulación de Monte Carlo.

Finalmente, para escoger la curva de tormentas que representa la altura significativa vs el periodo de retorno se escoge como la que tiene el valor de  $r^2$  más alto. Luego, para cada caso se realizó un análisis de valores extremos donde se obtuvieron las bandas de confianza del 90%. De esta manera se incluyó el error de las bases de datos en la estimación de las bandas de confianza.

### 3. RESULTADOS

#### 3.1. RADIO DE INFLUENCIA DE LOS NODOS DE LA COSTA

##### 3.1.1. Campos de promedio de la Altura Significativa ( $H_{m0}$ )

Un análisis preliminar de la información reveló variaciones en el promedio de altura significativa a latitudes constante. Según se aprecia en la Figura 3-1 (a), (b), (c) y (d), donde se presentan los resultados del promedio de  $H_{m0}$ , para las bases ERA-I, FUGRO, NOAA CFSR y NOAA WWIII respectivamente.

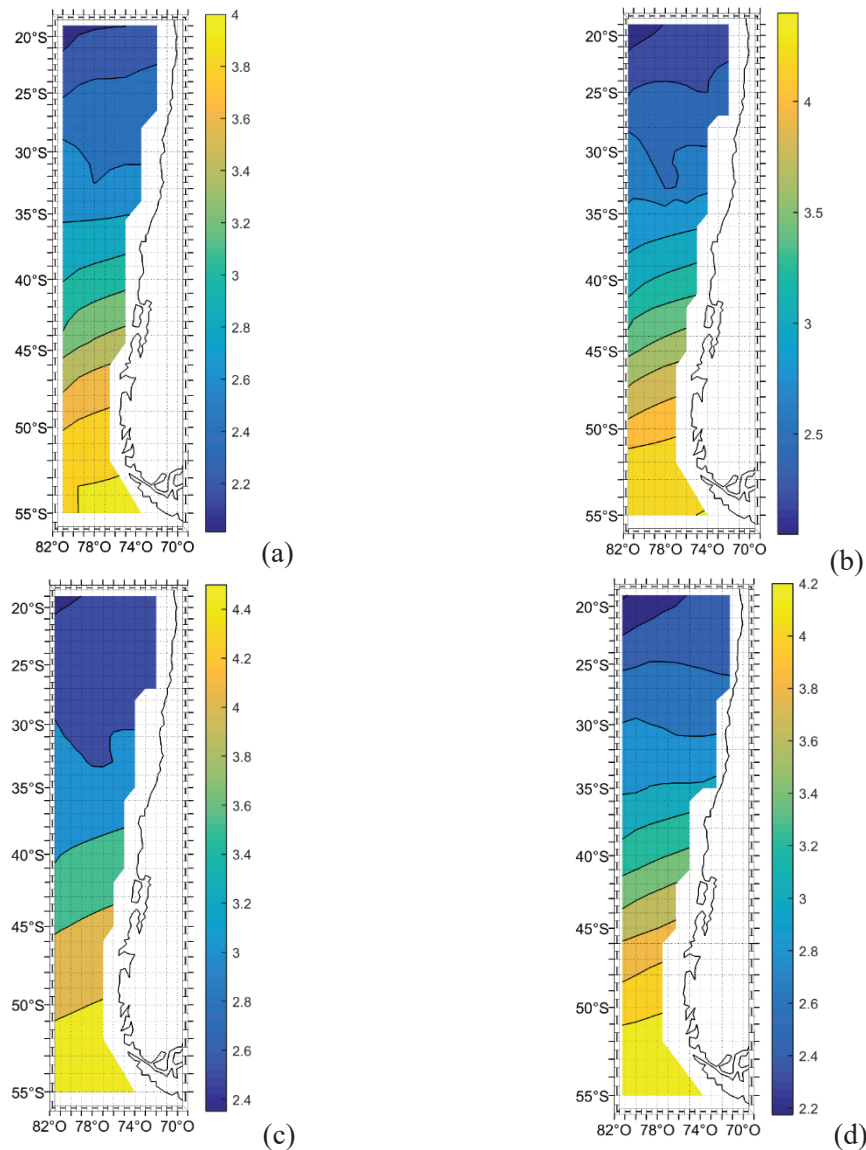


Figura 3-1: Gráficos de campo de promedio de altura significativa (m) en aguas profundas frente a la costa de Chile de los modelos de reanálisis de oleaje: (a) ERA-I, (b) FUGRO, (c) NOAA CFSR y (d) NOAA WWIII

### 3.1.2. Resultados de la comparación intrínseca de los modelos

Debido a la gran cantidad de nodos comparados, en este apartado solo se presentan los resultados para el nodo N°10 de ERA-I y N°15 de IFREMER, NOAA CFSR y NOAA WWIII, donde su ubicación simula la latitud correspondiente a Valparaíso, para consultar el resto de comparaciones se debe consultar el Anexo A.

Los campos de resultados de ERA-I se grafican en la en la Figura 3-2 para cada estadígrafo, como se mencionó anteriormente, la separación del nodo más próximo al norte y al sur es de 1.5[°]. Estos tienen valores de: RMSE de 0.16[m] y 0.17[m], BIAS de 0.04[m] y -0.07[m], SS de 0.94 y 0.93,  $m$  de 1.01 y 0.97, MAE de 0.12[m] y 0.13[m], SI de 0.06 y 0.07, mientras que  $R^2$  de 0.97 y 0.97 de manera respectiva.

Los campos de resultados de IFREMER se grafican en la Figura 3-3 para cada estadígrafo, la separación más próxima tanto al norte como al sur es de 1°. Obteniendo para estas comparaciones (hacia el norte y sur): RMSE de 0.14[m] en ambos casos, BIAS de -0.03[m] y 0.03[m] respectivamente, SS de 0.95 en ambos casos,  $m$  de 0.99 y 1.01, MAE de 0.1[m] en ambos casos y  $R^2$  con 0.98 en ambos casos.

Los campos de resultados de NOAA CFSR se presentan en la Figura 3-4, la separación más próxima según resolución al norte y sur es de 1°, donde se obtuvo valores de (hacia el norte y sur): RMSE 0.14[m] y 0.15[m], BIAS de -0.03[m] y 0.03[m], SS de 0.96 y 0.95,  $m$  de 0.99 y 1.01, MAE de 0.10[m] y 0.11[m], SI igual a 0.05 en ambos casos y  $R^2$  de 0.99 en los dos nodos.

Los últimos campos de resultados corresponden a NOAA WWIII cuyos gráficos se presentan en la Figura 3-5, en este caso la separación más próxima de nodos entre norte y sur también corresponde a 1°, donde se obtuvo valores (norte y sur) de: RMSE de 0.17[m] y 0.24[m], BIAS de 0.11[m] y -0.19[m], SS 0.93,  $m$  de 1.04 y 0.93, MAE de 0.14[m] y 0.21[m], SI de 0.07 y 0.10, finalmente  $R^2$  de 0.98 y 0.97 respectivamente.

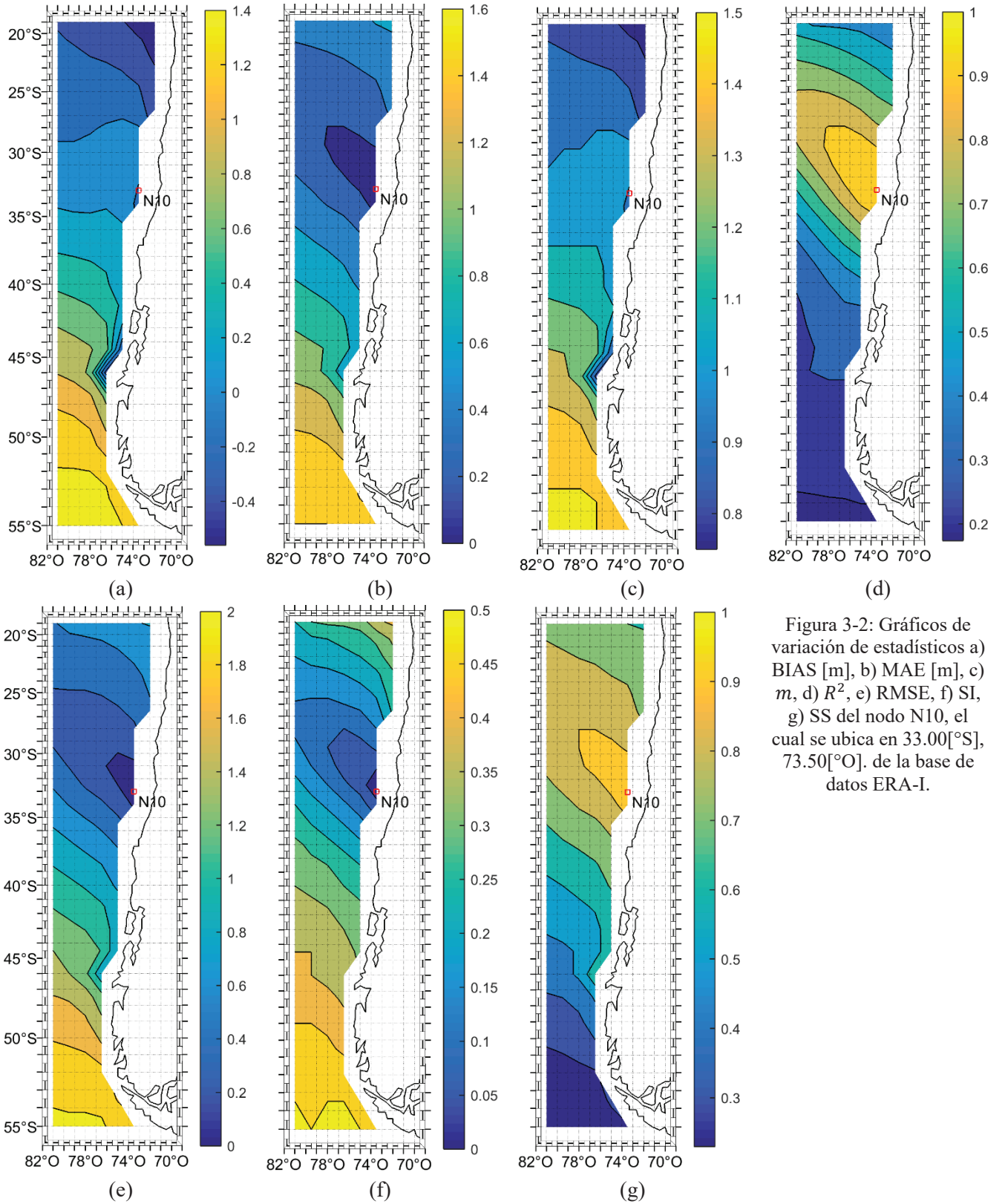


Figura 3-2: Gráficos de variación de estadísticos a) BIAS [m], b) MAE [m], c)  $m$ , d)  $R^2$ , e) RMSE, f) SI, g) SS del nodo N10, el cual se ubica en 33.00[°S], 73.50[°O]. de la base de datos ERA-I.

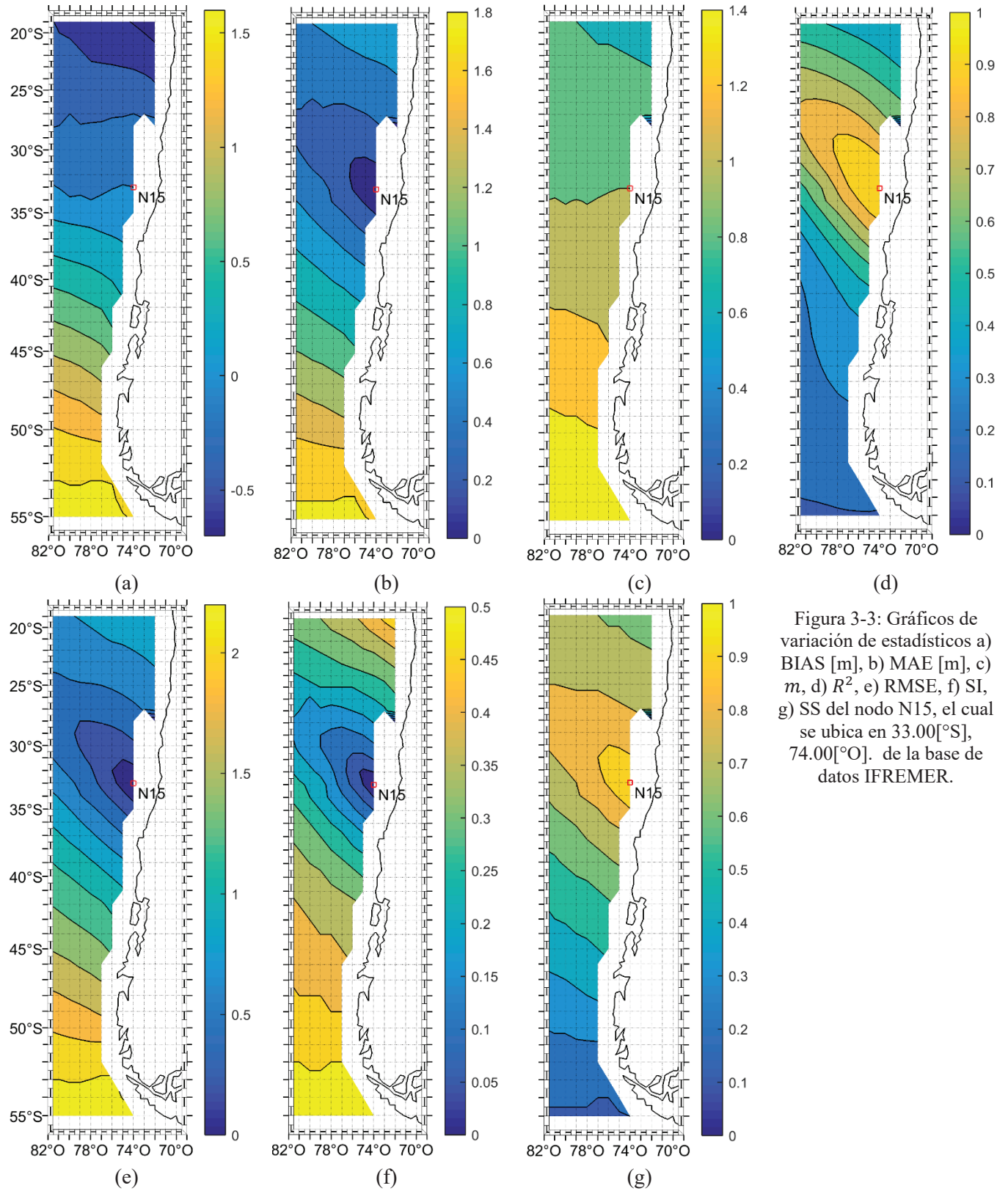


Figura 3-3: Gráficos de variación de estadísticos a) BIAS [m], b) MAE [m], c)  $m$ , d)  $R^2$ , e) RMSE, f) SI, g) SS del nodo N15, el cual se ubica en 33.00[°S], 74.00[°O]. de la base de datos IFREMER.

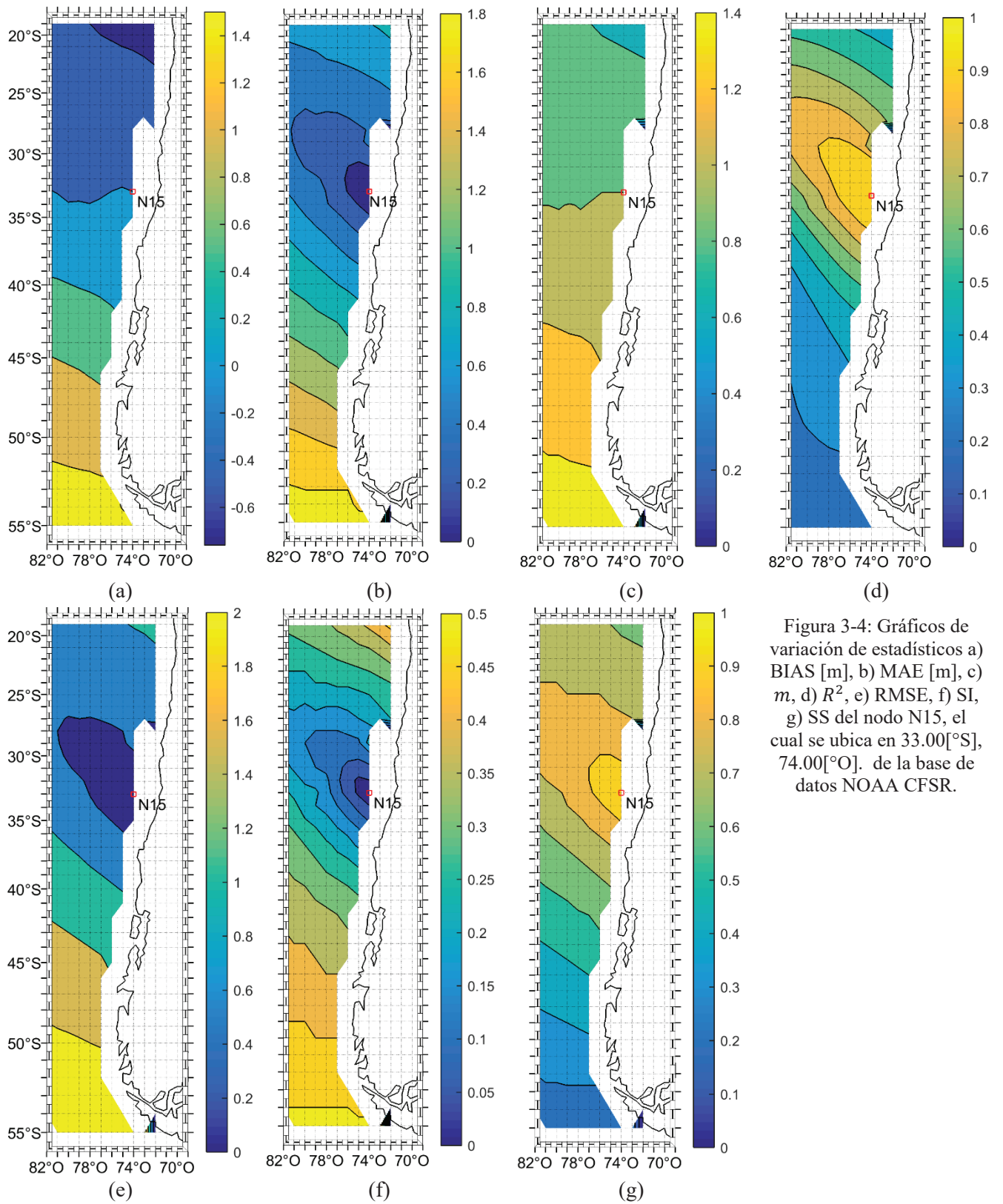


Figura 3-4: Gráficos de variación de estadísticos a) BIAS [m], b) MAE [m], c)  $m$ , d)  $R^2$ , e) RMSE, f) SI, g) SS del nodo N15, el cual se ubica en 33.00[°S], 74.00[°O]. de la base de datos NOAA CFSR.

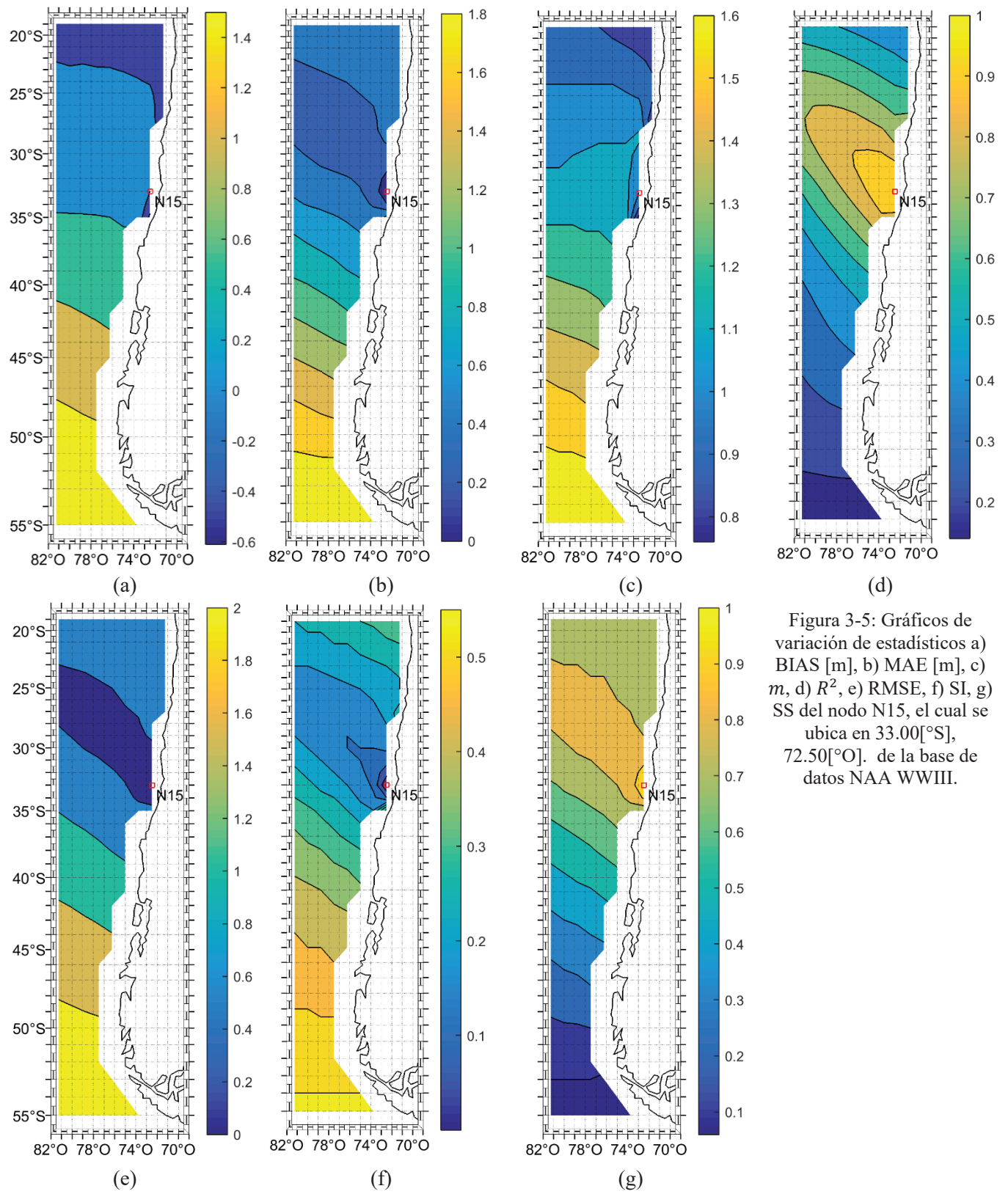


Figura 3-5: Gráficos de variación de estadísticos a) BIAS [m], b) MAE [m], c)  $m$ , d)  $R^2$ , e) RMSE, f) SI, g) SS del nodo N15, el cual se ubica en 33.00[°S], 72.50[°O]. de la base de datos NAA WWIII.

### 3.1.3. Determinación de la zona de influencia de un nodo

Se desea establecer la distancia mínima en grados de separación, donde el valor del estadístico  $r^2$  sea mayor o igual a 0.90 y analizar en estos casos el valor de la pendiente ( $m$ ) para establecer la semejanza intrínseca que exista entre cada uno de los modelos de reanálisis de datos de oleaje, considerando la distancia hacia el norte y sur de cada nodo analizado cuando se cumpla la condición.

Debido a lo extensa de la costa chilena, este análisis se realizará para 3 puntos, uno al norte  $N_1$ , centro  $C_2$  y sur  $S_3$ . Para este propósito se selecciona en ERA-I los nodos: 5, 10 y 22, mientras que en IFREMER, NOAA CFSR y NOAA WIII fueron los nodos 7, 15 y 33, la ubicación aproximada de estos nodos se presenta en la Tabla 3-1, sin embargo, su ubicación real depende de la resolución de la base de datos considerada.

Tabla 3-1: Ubicación de los nodos  $N_1$ ,  $C_2$  y  $S_3$

	Latitud [°S]	Longitud [°O]
$N_1$	25°S	72°O
$C_2$	33°S	74°O
$S_3$	51°S	77°O

Tabla 3-2: Distancia (D) en grados de latitud hasta donde se obtienen valores de  $R^2$  mayores a 0.9 acompañado por la pendiente asociada.

		ERA-I		IFREMER		NOAA CFSR		NOAA WIII		$\bar{D}$ [°]
		D [°]	a	D [°]	A	D [°]	a	D [°]	a	
$N_1$	Norte	5.0	0.95	4.0	0.96	4.5	0.95	4.5	0.96	4.5
	Sur	2.5	1.05	3.0	1.04	3.0	1.05	3.0	1.04	2.9
$C_2$	Norte	3.5	1.01	2.6	0.96	3.0	1.00	2.4	1.08	2.9
	Sur	1.5	0.97	2.3	1.03	2.5	1.06	2.6	0.98	2.2
$S_3$	Norte	3.0	0.85	2.5	0.82	2.7	0.82	2.8	0.82	2.8
	Sur	2.0	1.01	2.5	1.00	2.6	0.98	2.6	1.01	2.4

Según se aprecia en la Tabla 3-2 las bases de datos de oleaje no tienen una distancia equitativa entre el norte y sur para alcanzar la condición descrita, observando así que en general se tiene un radio de influencia de datos superior al norte que al sur. Esa situación se puede apreciar anteriormente en los gráficos de la Figura 3-2 (d), Figura 3-3 (d), Figura 3-4 (d) y Figura 3-5 (d), donde se observan anillos semejantes a la mitad de elipsoide con inclinación en la dirección noroeste, y no un semicírculo de radio constante.

El valor máximo de  $D$  de ERA-I corresponde a  $5.0^\circ$  para el nodo  $N_1$ , con dirección al norte, mientras que su menor valor se tuvo en  $C_2$ , con dirección al sur, igual a  $1.5^\circ$ . Para IFREMER se obtuvo el mayor valor de  $D = 4.0^\circ$  en  $N_1$  dirección norte, y su mínimo en  $C_2$  con  $D=2.3^\circ$ . En NOAA CFSR se tiene el mayor valor de  $D$  en  $N_1$  con  $4.5^\circ$  y su mínimo en  $C_2$  hacia el sur. Por último en NOAA WWIII se obtuvo el mayor valor de  $D$  en  $N_1$  hacia el norte con  $4.5^\circ$  y su mínimo en  $C_2$  hacia el norte de  $2.4^\circ$

Adicionalmente se establece a través de los promedios de  $D$  ( $\bar{D}$ ), muestran en la última columna de la tabla, que el menor valor es de  $2.2^\circ$  en dirección sur y el menor valor en dirección norte corresponde a  $2.8^\circ$ , siendo esta distancia la que asegura valores de  $r^2$  mayores a 0.9 en promedio.

En un análisis aparte, se observa que las pendientes ( $m$ ) de  $N_1$  y  $C_2$  tanto hacia el norte como el sur tienen valores cercanos a 1, distinto es el caso de  $S_3$ , donde se obtienen algunos valores cercanos a 0.8. Además en cada uno de los casos ( $N_1$ ,  $C_2$  y  $S_3$ ) se obtuvieron que las pendientes dirección norte son menores a la unidad, y en dirección sur la superan, esto se debe a que los valores de  $H_{m0}$  en cada una de las bases de datos tienden al aumento hacia las latitudes del sur, según se apreció anteriormente los promedios de altura de cada base de datos (Figura 3-1).

### 3.2. COMPARACIÓN ESTADÍSTICA DE LAS BOYAS

Las bases de reanálisis de oleaje se compararon con boyas instrumentales, la cantidad de estados de mar de las boyas y los datos de los modelos se presentan en la Tabla 3-3, sin embargo existieron algunas restricciones para la comparación, las cuales se describen a continuación:

1. SHOA1 y SHOA2 que no cuentan con mediciones de la dirección pico ( $\theta_p$ ).
2. SHOA1 no tiene registros del periodo medio ( $T_m$ ).
3. NDBC 32012 carece de dirección media ( $\theta_m$ ).
4. NOAA WWIII y NOAA CFSR no cuentan con información coincidente en el tiempo de las boyas C-INN1 y C-INN2.
5. EEM y FUGRO no contienen información en la ubicación de NDBC 32012.

Tabla 3-3: Cantidad de estados de mar por nodo en cada modelo de reanálisis y para cada boya.

Modelos de reanálisis de oleaje	ERA-I	52.596	Boyas direccionales	NDBC 32012	47.381
	EMM	277.799		SHOA1	3.208
	FUGRO	65.251		SHOA2	14.751
	NOAA CFSR	90.582		C-INN1	14.964
	NOAA WWIII	40.656		C-INN2	5.072
	IFREMER	70.128			

### 3.2.1. Comparación de la Altura Significativa de Oleaje ( $H_{m0}$ )

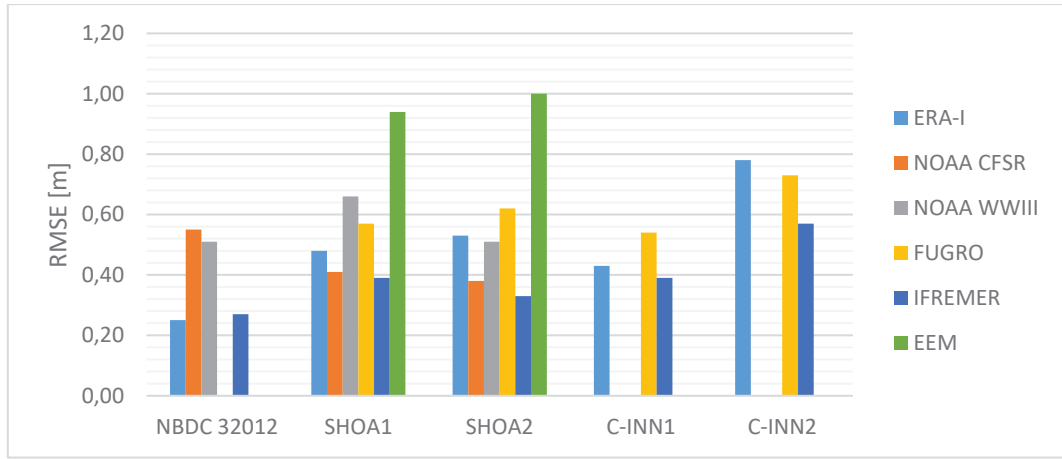
Desde la Figura 3-6 a la Figura 3-7 se presentan los estadígrafos para la comparación de las bases de datos de oleaje de reanálisis con mediciones por boyas para la altura significativa. Además, en la Figura 3-8 se presentan las gráficas de dispersión que tienen los valores más altos de  $R^2$  en cada una, el resto de gráficos se encuentran en el Anexo B. Estos tienen un mapa de colores, que representa la densidad de puntos por sector, la escala de colores azules representa una baja, mientras que hacia el amarillo se tiene una alta densidad. Esta barra y estos colores fueron definidos para esta y el resto de comparaciones de este trabajo.

El modelo IFREMER obtuvo el mejor valor de RMSE y MAE con promedio de 0.39 [m] y 0.30 [m] respectivamente, mientras que la base de datos con peor desempeño corresponde a EEM con un valor promedio de 0.97 m y 0.80 m para los mismos estadísticos. FUGRO también tuvo un bajo desempeño donde alcanzó en promedio 0.62 [m] y 0.49 [m] para los mismos estadísticos.

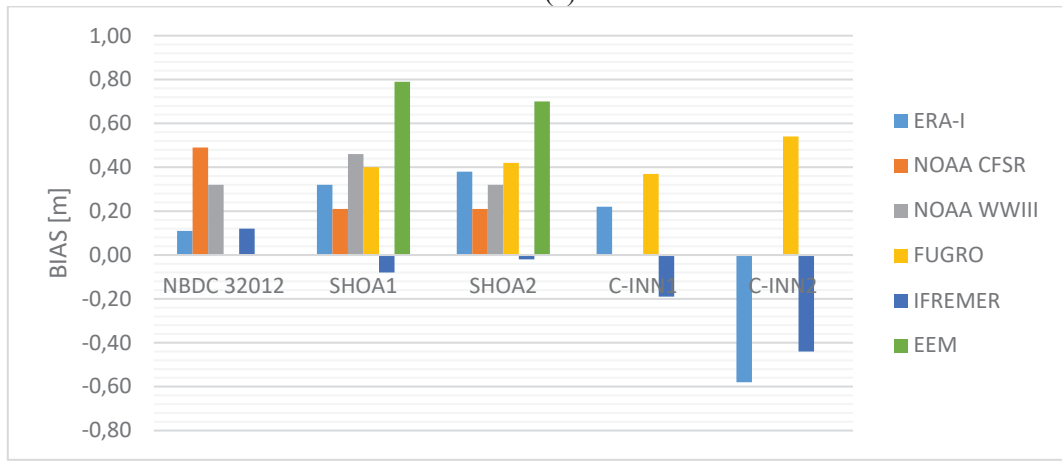
La mayoría de bases presentaron una sobreestimación en el valor de la altura significativa respecto a las mediciones de boyas, con un valor máximo del BIAS de 0.79 [m] para la base EEM. Las únicas subestimaciones se presentaron en ERA-I para la boya C-INN2 e IFREMER en SHOA1, SHOA2, C-INN1 y C-INN2 con valores de -0.08 [m], -0.02 [m], -0.19 [m], -0.44 [m].

Respecto a los estadísticos SS y SI la base de peor desempeño vuelve a ser EEM con valores promedio de 0.60 y 0.32 respectivamente, mientras que IFREMER obtuvo el mejor desempeño de SS y NOAA CFSR para el SI con un promedio de 0.85 y 0.17 respectivamente.

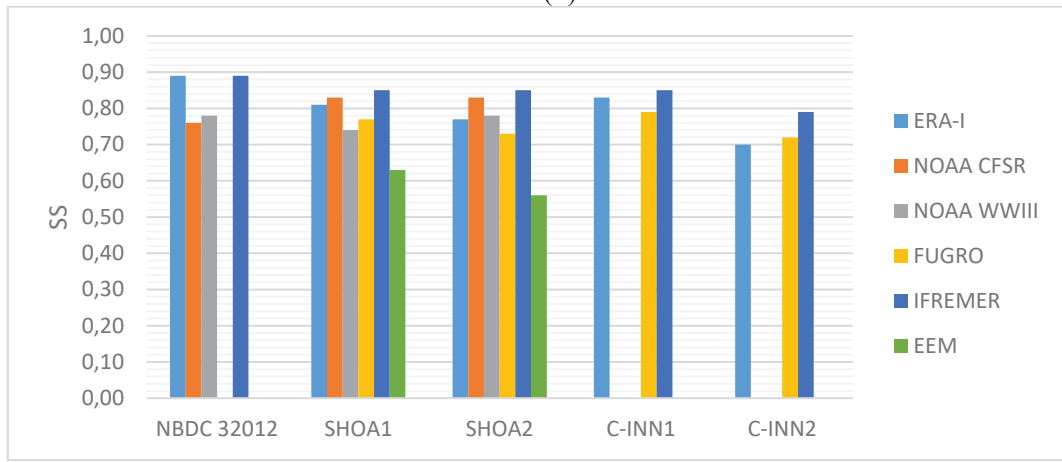
El mejor ajuste medido por  $R^2$  fue de IFREMER que obtuvo el valor máximo de 0.86 en C-INN2. Esta es la base también logró el mejor ajuste en promedio de  $R^2$  con un valor de 0.75. Le siguen en resultados NOAA CFSR y FUGRO con promedios 0.71 y 0.70 respectivamente, aunque a diferencias de IFREMER, estas bases no fueron comparadas en la totalidad de las boyas. Se repite nuevamente el peor desempeño en EEM donde obtuvo el valor mínimo de  $R^2=0.15$  y un promedio de 0.37.



(a)

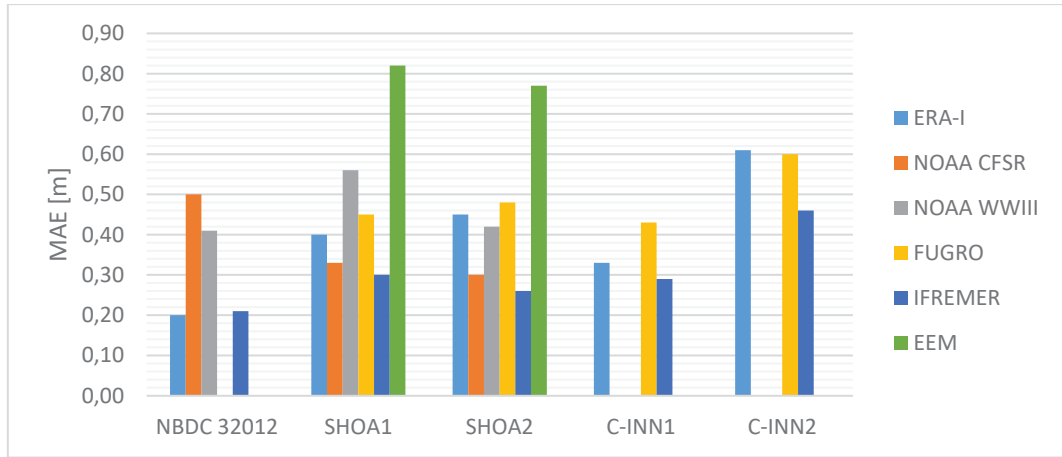


(b)

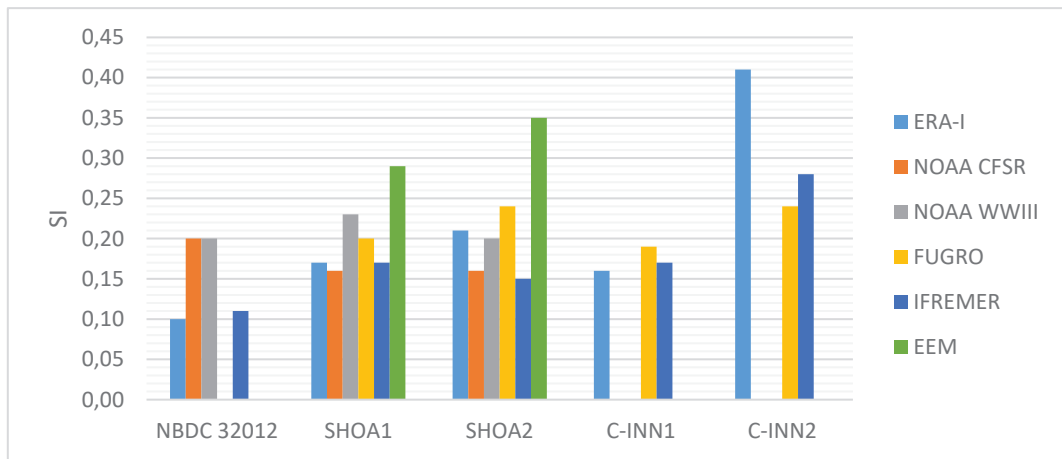


(c)

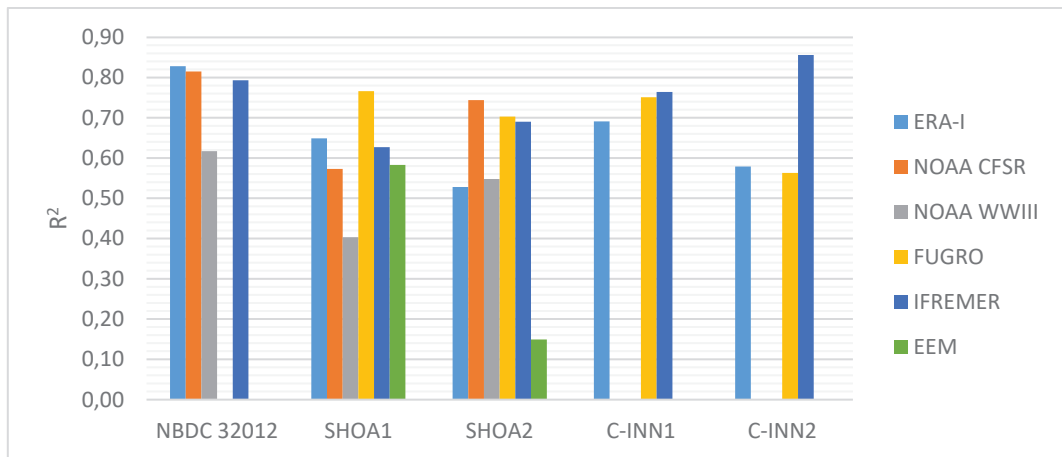
Figura 3-6: Variación de a) RMSE [m] b) BIAS [m] c) SS por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones de la boya.



(a)

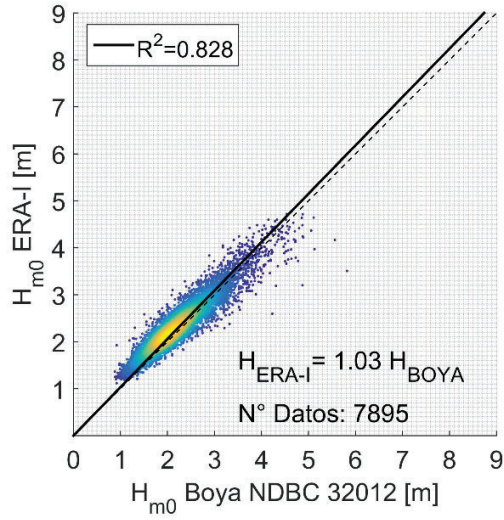


(b)

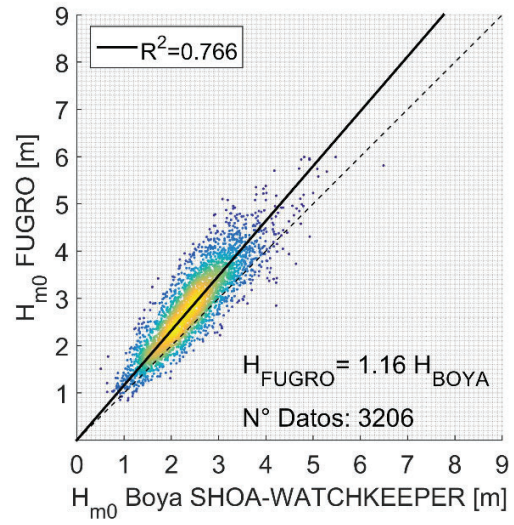


(c)

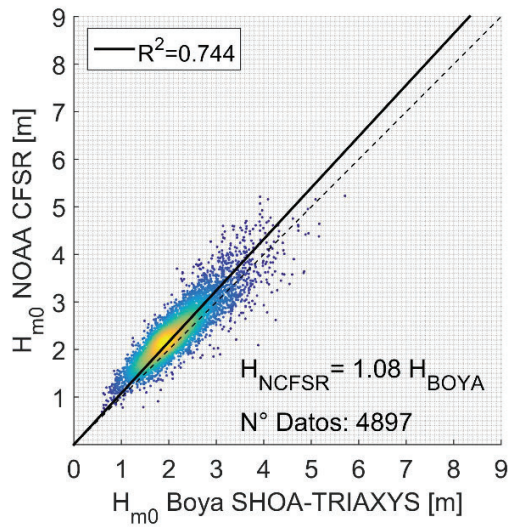
Figura 3-7: Variación de a) MAE [m] b) SI c)  $R^2$  por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones de la boya.



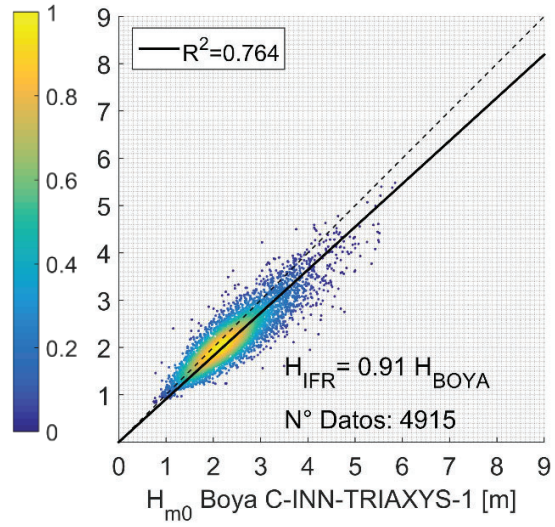
(a)



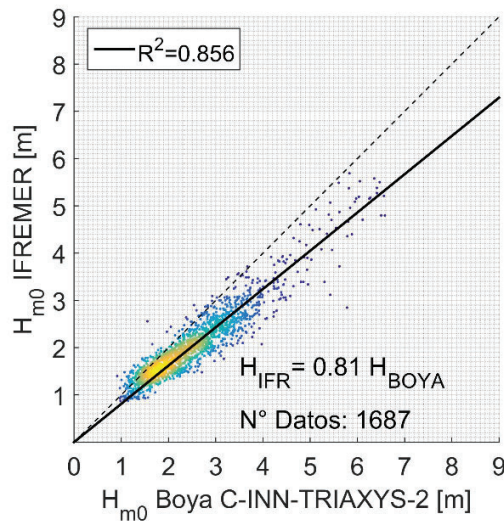
(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 3-8: Gráfica de dispersión  $H_{m0}$  para la comparación de la boya a) NDBC 3012 vs ERA-I b) SHOA1 vs FUGRO c) SHOA2 vs NOAA CFPSR d) C-INN1 vs IFREMER e) C-INN2 vs IFREMER

### 3.2.2. Comparación de la Dirección Media de Oleaje ( $D_m$ )

De la Figura 3-9 a la Figura 3-10 se presentan los estadígrafos para la comparación de las bases de datos de oleaje de reanálisis con mediciones por boyas para la dirección media. Además, en la Figura 3-11 se presentan las gráficas de dispersión que obtuvieron los valores más altos de  $R_c^2$  en cada una de las boyas, el resto de gráficos se encuentran en el Anexo C.

La base de datos IFREMER obtuvo el mejor ajuste de  $RMSE_c$  y  $MAE_c$  con un valor promedio de  $9.72^\circ$  y  $7.15^\circ$  respectivamente, mientras que EEM fue la de peor desempeño con promedios de  $49.97[^\circ]$ , y  $42.99[^\circ]$  para cada estadístico. Al descartar del análisis a EEM y al considerar solo las bases que fueron comparadas en las cuatro boyas posibles, se tuvo a FUGRO y ERA con los desempeños más bajos con valor promedio de  $RMSE_c$  y  $MAE_c$   $17.83^\circ$  y  $13.75^\circ$  en respectivamente.

Respecto al estadístico SS la base de peor desempeño es EEM con un valor promedio de 0.79, mientras que el mejor fue de IFREMER con el valor máximo de 0.97 en la boya SHOA1 y además un promedio de 0.96 para el estadístico.

El mejor ajuste medido por  $R_c^2$  fue de IFREMER que alcanzó el valor máximo de 0.84 en C-INN2 y además un promedio de 0.67. El peor desempeño fue de EEM alcanzando el valor mínimo de  $R_c^2=0.0$  y un promedio de 0.1. Al descartar la base anterior y considerando solo las que fueron comparadas en las cuatro boyas, se tuvo a ERA-I con el desempeño más bajo, con un promedio de 0.56 del estadístico.

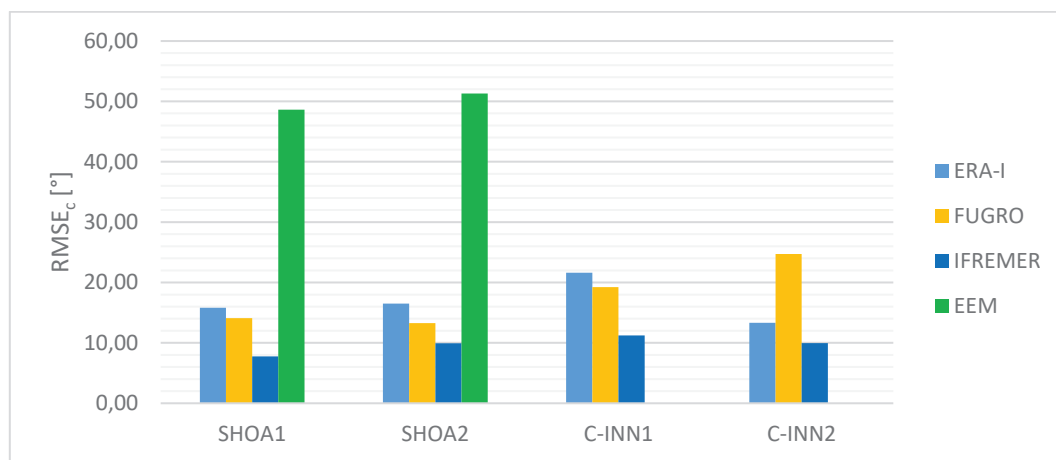
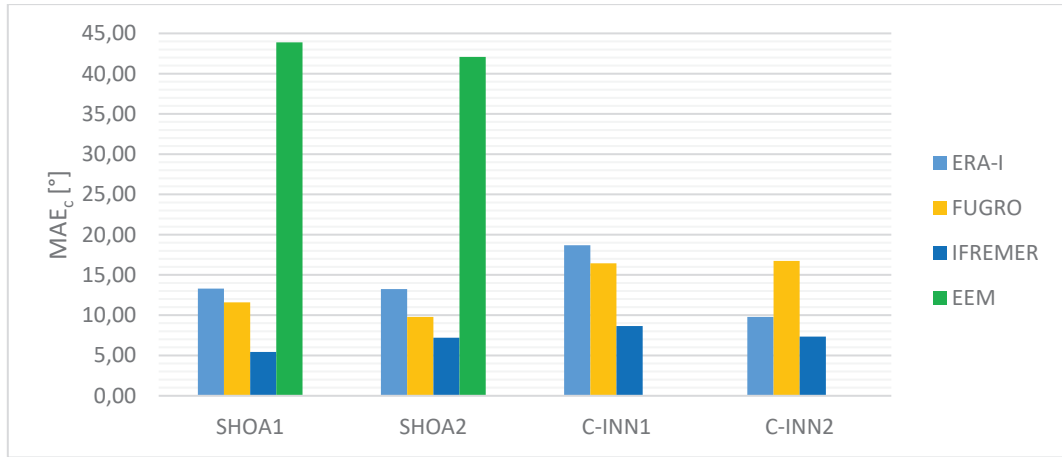
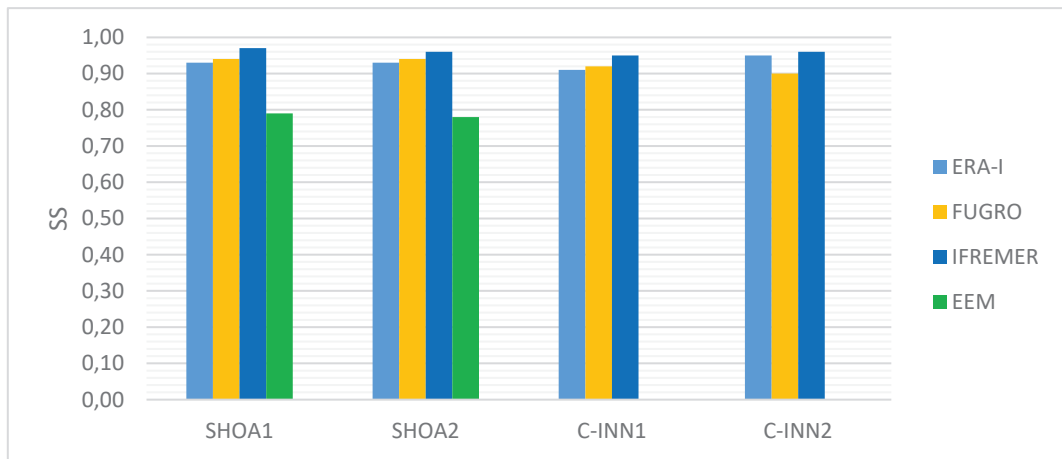


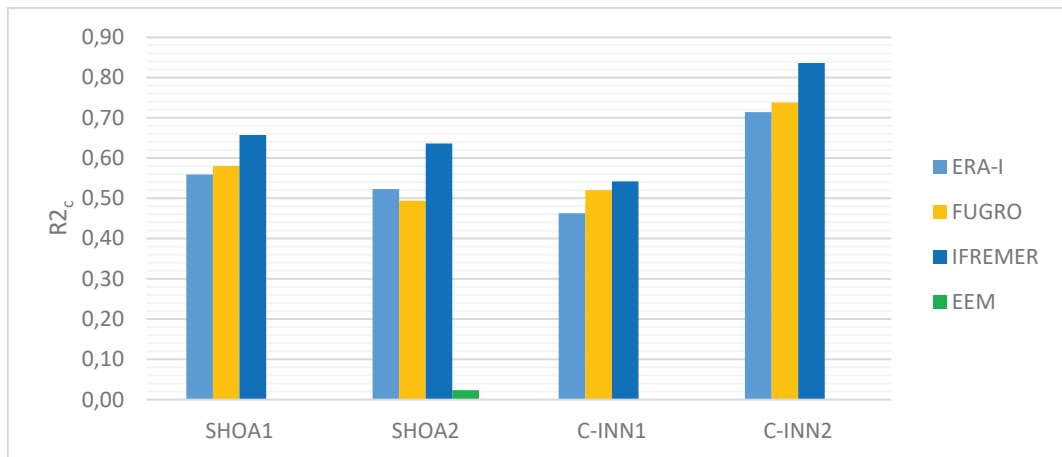
Figura 3-9: Variación de  $RMSE_c$  por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones de la boya.



(a)



(b)



(c)

Figura 3-10: Variación de a) MAE<sub>c</sub> (°) b) SS c) R<sub>c</sub><sup>2</sup> por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones de la boya.

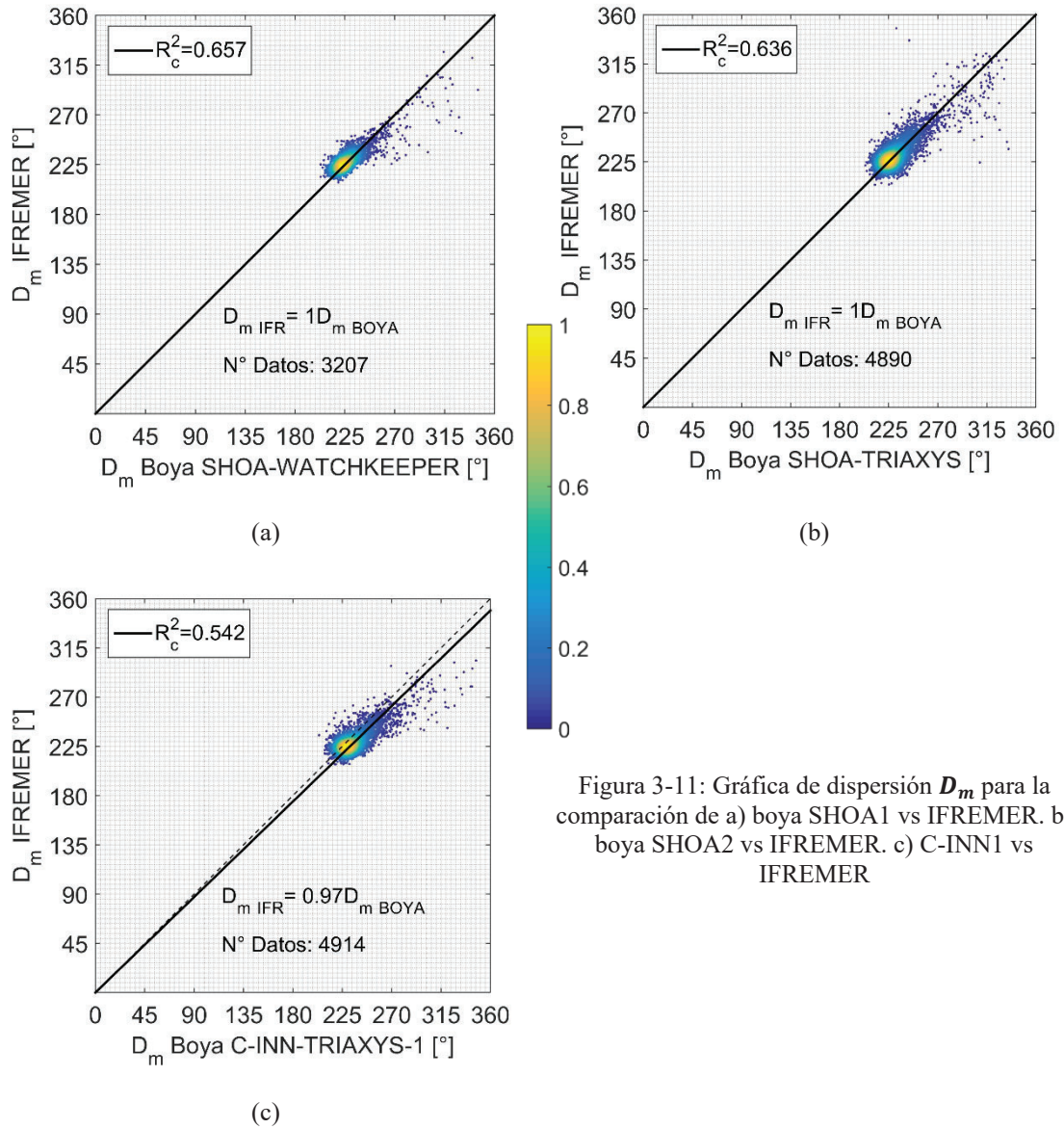


Figura 3-11: Gráfica de dispersión  $D_m$  para la comparación de a) boya SHOA1 vs IFREMER. b) boya SHOA2 vs IFREMER. c) C-INN1 vs IFREMER

### 3.2.3. Comparación de la Dirección Pico de Oleaje ( $D_p$ )

De la Figura 3-12 a la Figura 3-13 se presentan los estadígrafos para la comparación de las bases de datos de oleaje de reanálisis con mediciones por boyas para la dirección pico. Además, en la

Figura 3-14 se presentan las gráficas de dispersión que obtuvieron los valores más altos de  $R_c^2$  para cada una de las boyas, mientras que el resto se encuentran en el Anexo D.

Este parámetro estadístico a diferencia del resto, tuvo pocas coincidencias entre las bases de datos y las únicas tres boyas que contaban con la medición de esta variable de oleaje, es por eso, que se comentan solo los mínimos y máximos valores alcanzados por cada estadígrafo calculado, sin considerar promedios.

La base IFREMER obtuvo los mejores valores de  $RMSE_c$  y  $MAE_c$  en la comparación con la boya C-INN1, con un valor de  $18.13^\circ$  y  $12.01^\circ$  respectivamente. Mientras que los desempeños más bajos para los mismos estadígrafos también se tuvieron en la misma base de datos, esta vez en la boya NDBC 32012, con valores de  $41.46^\circ$  y  $26.41^\circ$  para el  $RMSE_c$  y  $MAE_c$ .

La base de datos IFREMER obtuvo el valor máximo de SS en C-INN1 y C-INN2 con un valor idéntico de 0.92, mientras que el peor ajuste lo tuvo también IFREMER en la boya NDBC 32012 con un valor de 0.79.

El mejor ajuste medido por  $R_c^2$  lo obtuvo FUGRO en la comparación con la boya C-INN2 con un valor de 0.31, mientras que el peor desempeño se tuvo en IFREMER en la comparación con la boya C-INN1.

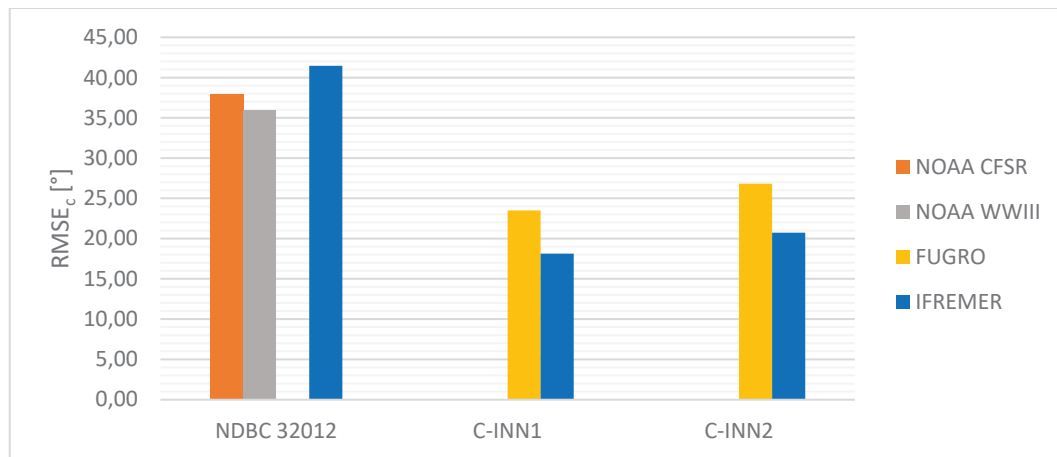
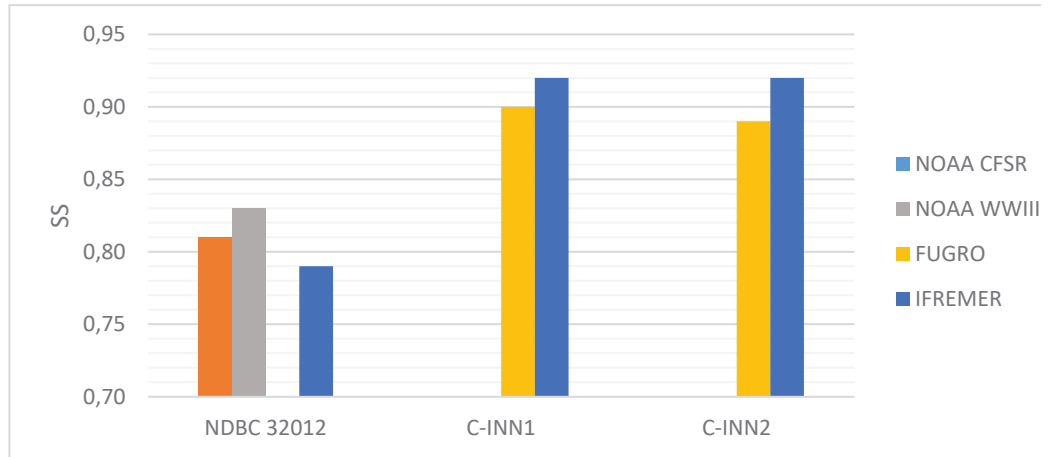
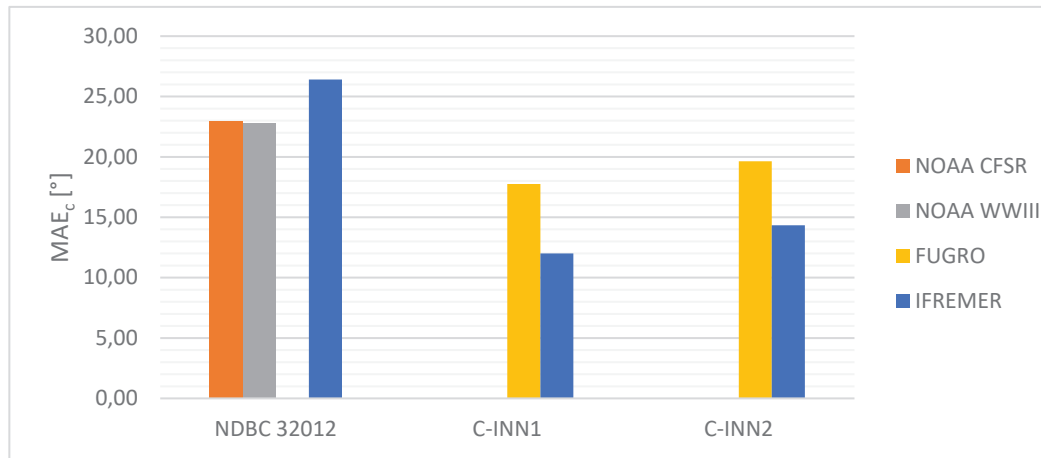


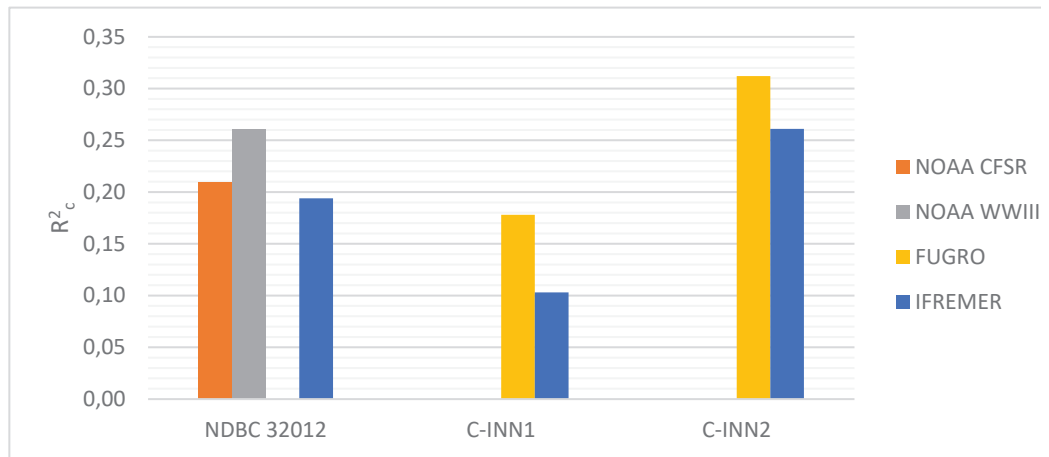
Figura 3-12: Variación de  $RMSE_c$  ( $^\circ$ ) por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones de la boya.



(a)



(b)



(c)

Figura 3-13: Variación de a) SS b) MAEc (°) c) R²c por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones de la boya.

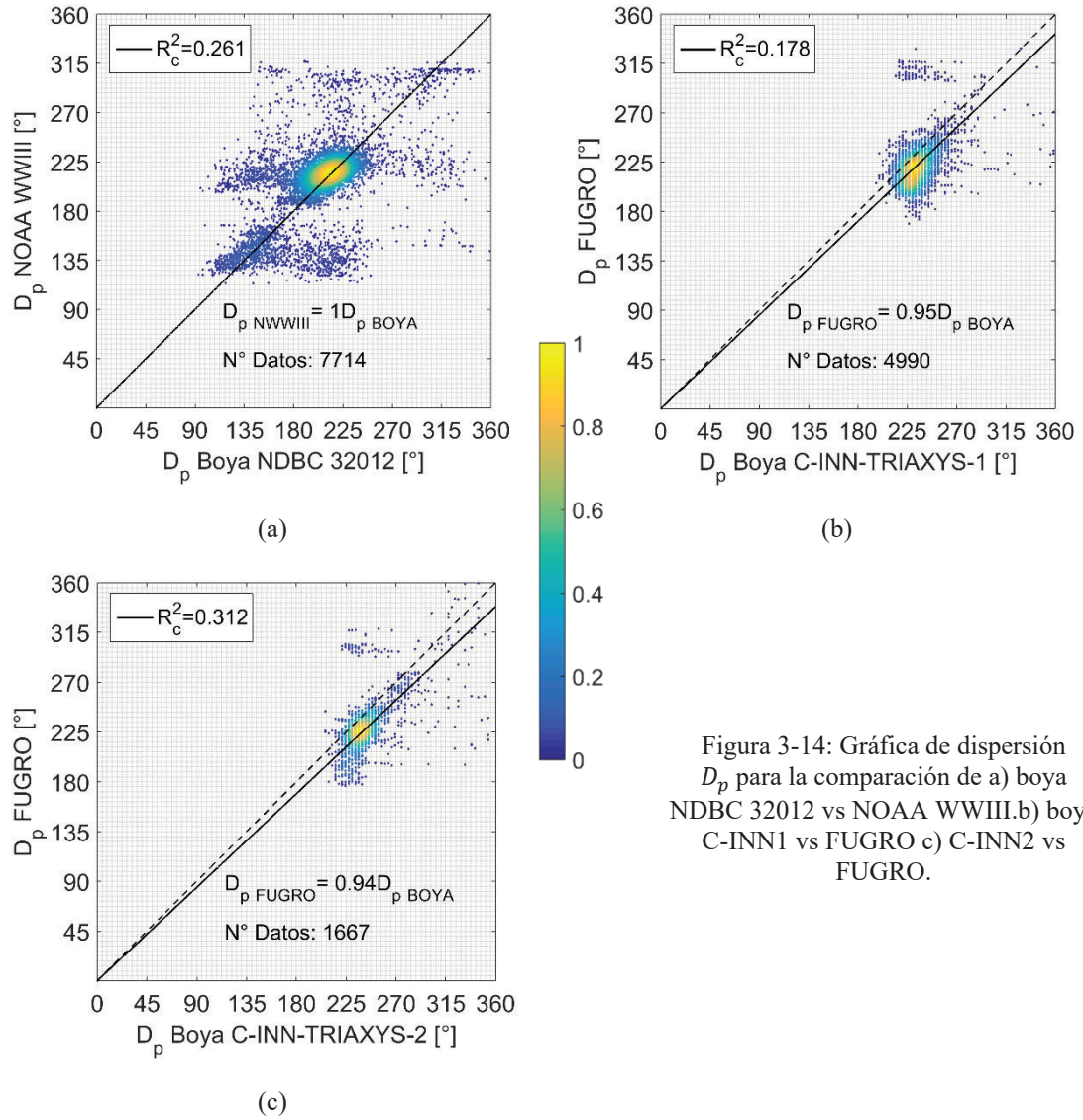


Figura 3-14: Gráfica de dispersión  $D_p$  para la comparación de a) boya NDBC 32012 vs NOAA WWIII. b) boya C-INN1 vs FUGRO c) C-INN2 vs FUGRO.

### 3.2.4. Comparación del Periodo Medio de Oleaje ( $T_m$ )

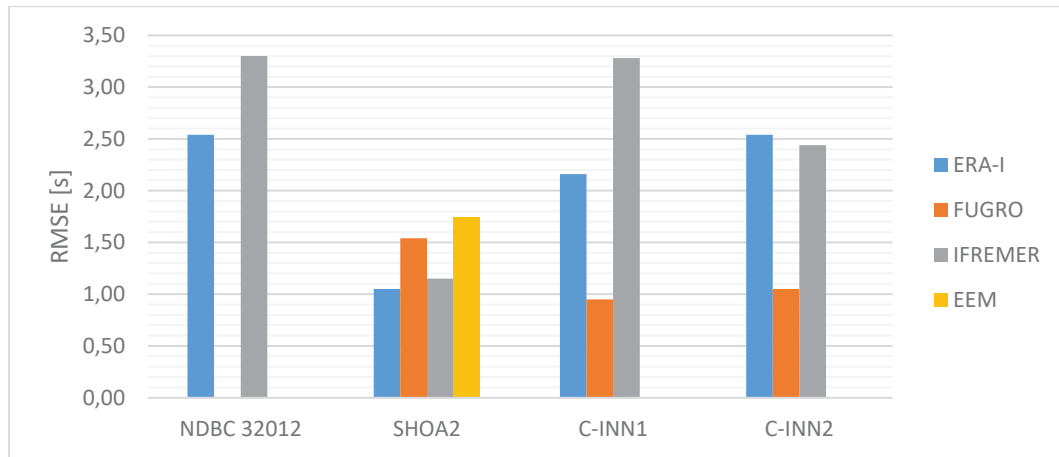
De la Figura 3-15 a la Figura 3-16 se presentan los estadígrafos para la comparación de las bases de datos de oleaje de reanálisis con mediciones por boyas para el periodo medio. Además, en la Figura 3-17 se presentan las gráficas de dispersión que tienen los valores más altos de  $R^2$  de cada una de las boyas, el resto de gráficos se encuentran en el Anexo E.

El modelo FUGRO obtuvo el mejor valor de RMSE y MAE para todas las boyas con un valor promedio de 1.18s y 0.95s respectivamente, mientras que la base IFREMER fue la de peor desempeño un valor promedio de 2.54[s] y 2.32[s] para cada estadístico.

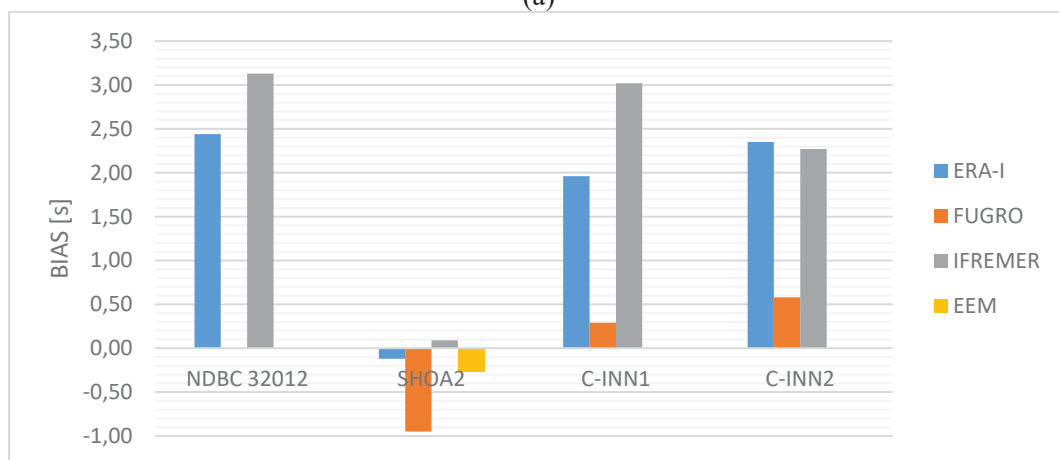
La mayoría de comparaciones presentaron una sobreestimación del periodo medio con respecto a las mediciones de boya, siendo IFREMER la base con promedio de BIAS más alto, alcanzando un valor promedio de 2.13[s]. En la mayoría de boyas, a excepción de SHOA2 se tuvieron BIAS con valores positivos. Por otra parte, la base de datos FUGRO es la que alcanzó un mejor desempeño, con un valor promedio de -0.03[s], influenciado por el valor negativo de -0.95[s], que al ser descartado quedó con promedio de 0.44[s], y aun así, fue el de menor sobreestimación.

Respecto a los estadísticos SS y SI la base de peor desempeño vuelve a ser IFREMER con valores promedio de 0.68 y 0.25 respectivamente, mientras que la de mejor ajuste sigue siendo FUGRO, con valores de 0.87 y 0.13 para los mismos promedios.

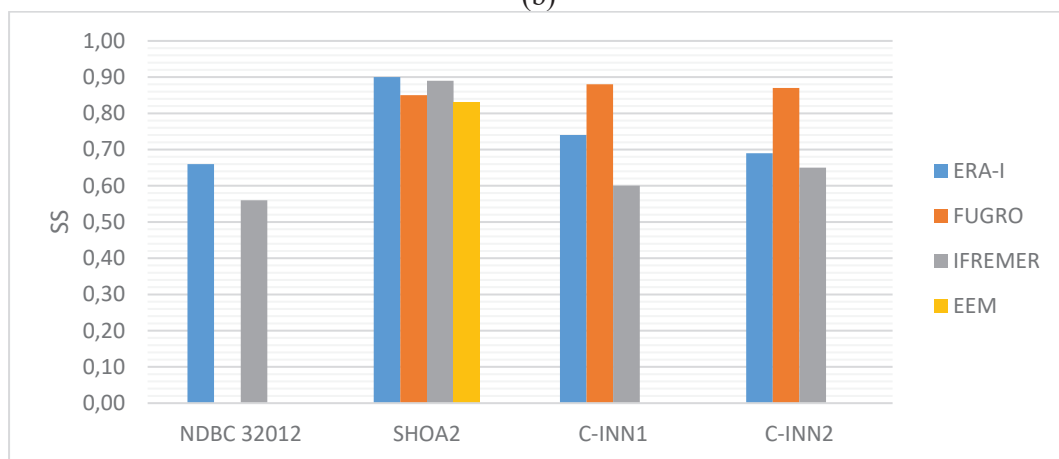
El mejor ajuste medido por  $R^2$  es para FUGRO que alcanza el valor máximo de 0.73 y un valor promedio de 0.62, mientras que IFREMER presentó el peor ajuste en el estadístico, logrando un valor promedio de 0.44. De todas formas se descartó el resultado más bajo de EEM con un valor negativo de -0.31, lo que es equivalente a considerar una nula correlación entre los datos medidos y modelados.



(a)

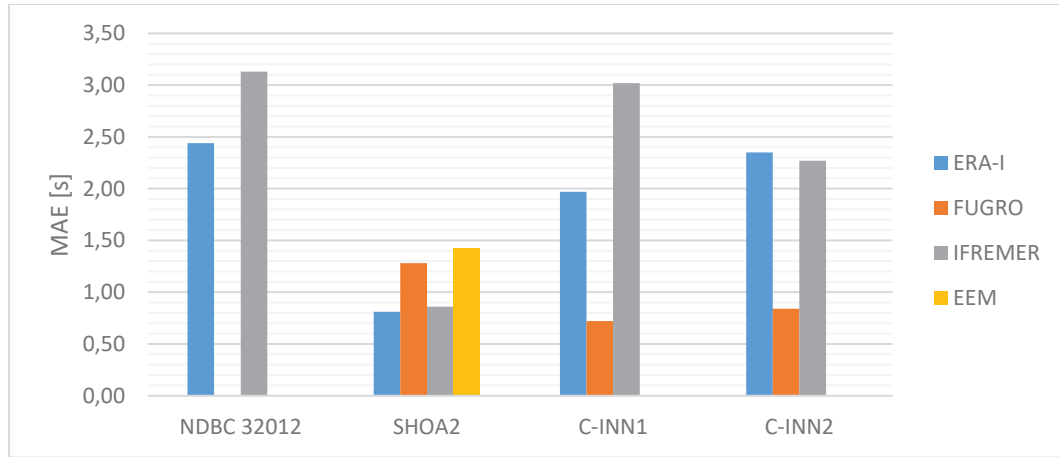


(b)

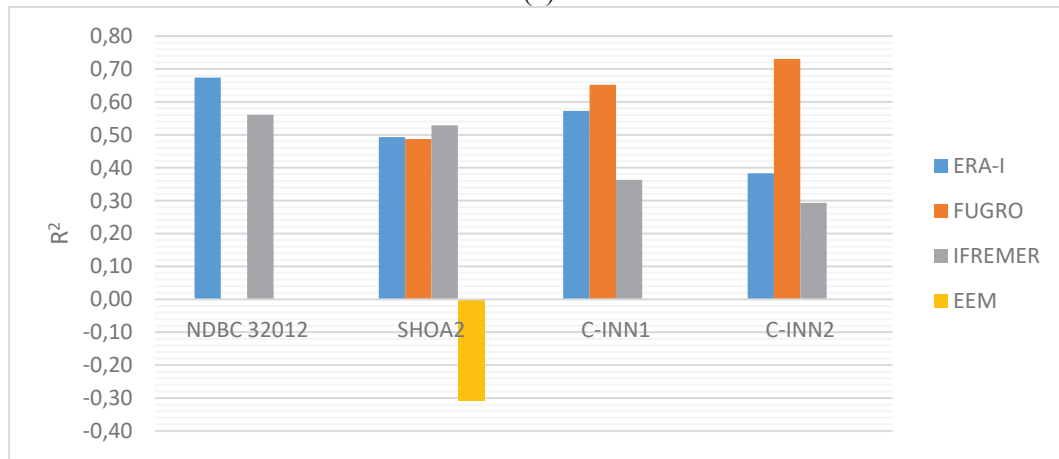


(c)

Figura 3-15: Variación de a) RMSE (s) b) BIAS (s) c) SS por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones de la boya.



(a)



(b)

Figura 3-16: Variación de a) MAE (s) b)  $R^2$  por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones de la boya.

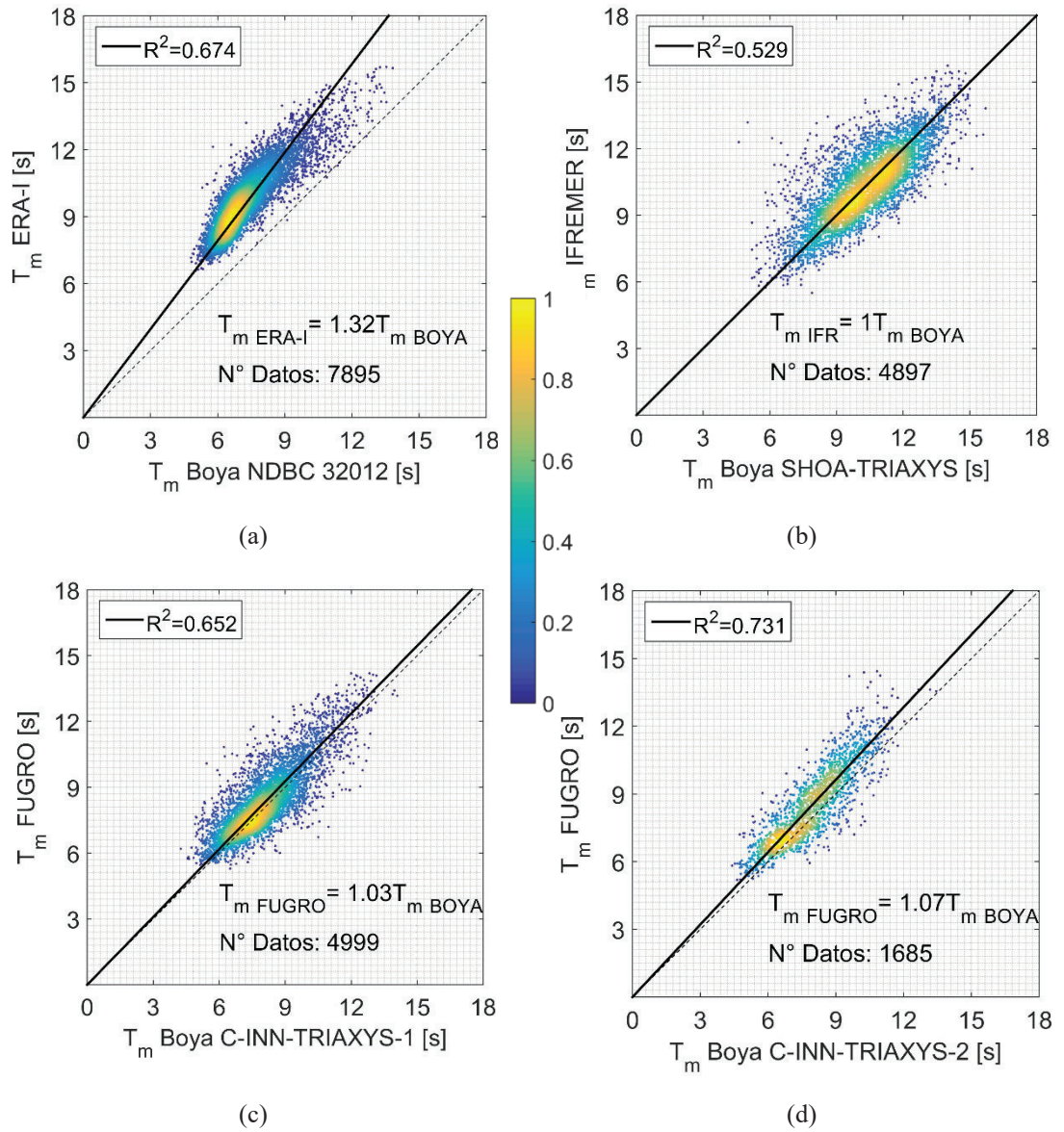


Figura 3-17: Gráfica de dispersión  $T_m$  para la comparación de a) boya NDBC 32012 vs ERA-I b) SHOA2 vs IFREMER c) C-INN1 vs FUGRO d) C-INN2 vs FUGRO

### 3.2.5. Comparación del Periodo Pico de Oleaje ( $T_p$ )

De la Figura 3-18 a la Figura 3-19 se presentan los estadígrafos para la comparación de las bases de datos de oleaje de reanálisis con mediciones de periodo pico por boyas. Además, en la

Figura 3-20 se presentan las gráficas de dispersión que obtuvieron los valores más altos de  $R^2$  en cada una de las boyas, mientras que el resto de gráficos se encuentran en el Anexo F. En las cuatro gráficas presentadas se observa el mismo comportamiento de dispersión, con nubes de datos que se asemejan a rectas paralelas a la ordenada y un crecimiento exponencial en el distanciamiento entre ellas.

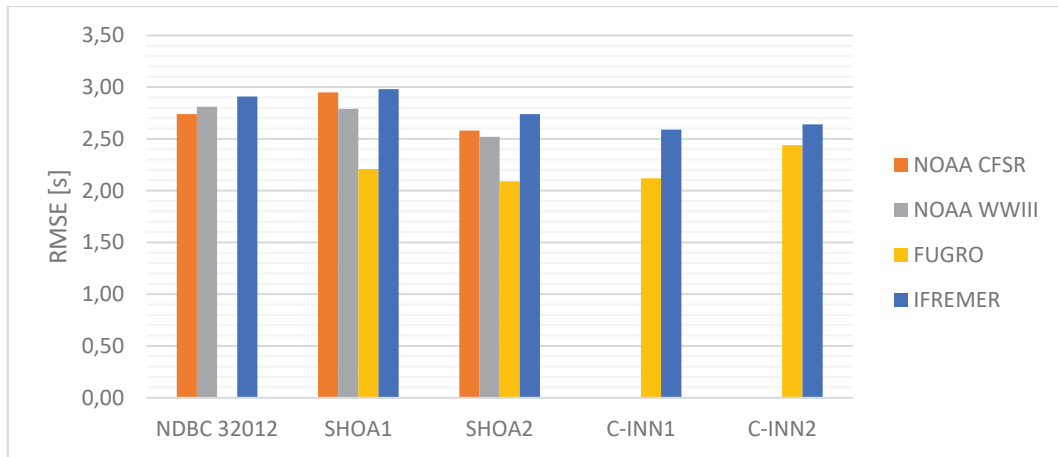
La base FUGRO obtuvo el mejor valor de RMSE y MAE para las boyas con promedio de 2.22[s] y 1.37[s] respectivamente, mientras que la base IFREMER fue la de peor desempeño para MAE con un promedio de 2.77 en RMSE y NOAA WWIII la de MAE, con un promedio de 1.75[s].

Casi todas las bases presentaron una sobreestimación en el valor del periodo pico respecto a las mediciones de boyas, donde FUGRO, NOAA CFSR e IFREMER obtuvieron un promedio del BIAS de menor a mayor sobreestimación: 0.34[s], 0.91[s] y 1.15[s] respectivamente. La única excepción fue la base NOAA WWIII que presentó subestimaciones en promedio de -0.46[s].

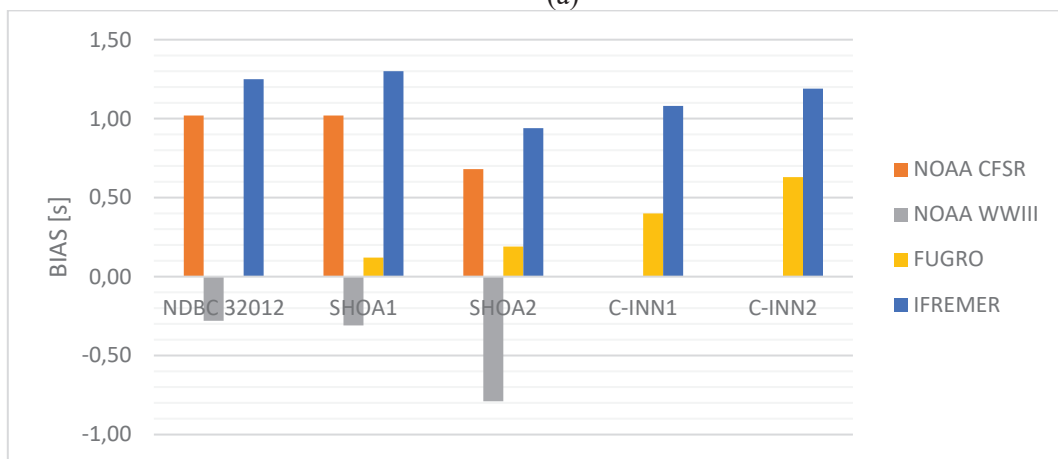
Respecto a los estadísticos SS y SI, la base con mejor desempeño fue FUGRO que obtuvo un promedio de 0.82 y 0.18 respectivamente, mientras que los ajustes más bajos se obtuvieron en las bases NOAA CFSR e IFREMER, en ambos casos se tiene un promedio idéntico de SS= 0.78 y SI= 0.21, sin embargo, esta última alcanzó a ser comparada en todas las boyas.

El mejor ajuste medido por  $R^2$  es para FUGRO que alcanza el valor máximo de 0.29 en la boya SHOA1 y un promedio de 0.17, mientras que la base de datos que alcanza el peor desempeño es NOAA CFSR con un promedio de -0.27. Este índice estadístico en general es bastante bajo, más aun al considerar que en varios modelos se obtuvieron valores negativos, el resultado de estos valores se ven reflejado en los gráficos ya mencionados en la

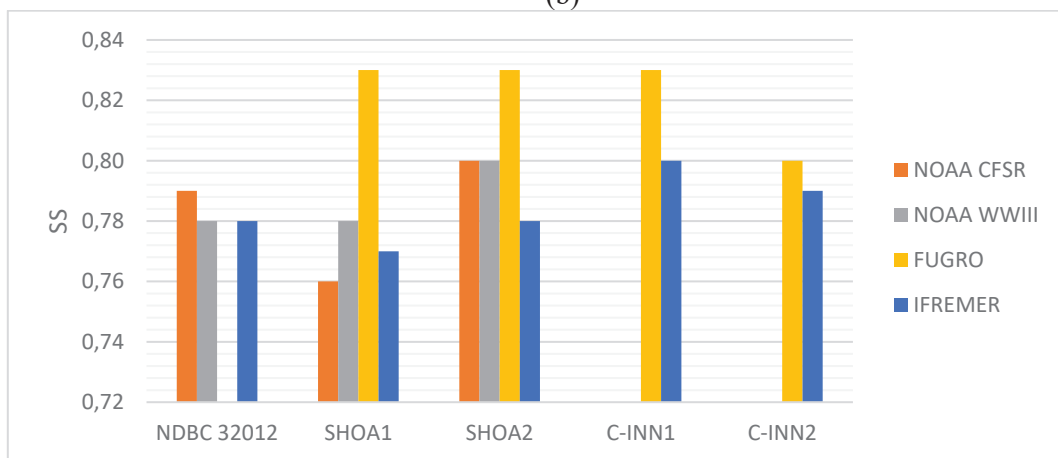
Figura 3-20, donde no se aprecia en ningún caso una similitud de la nube de datos a una recta.



(a)

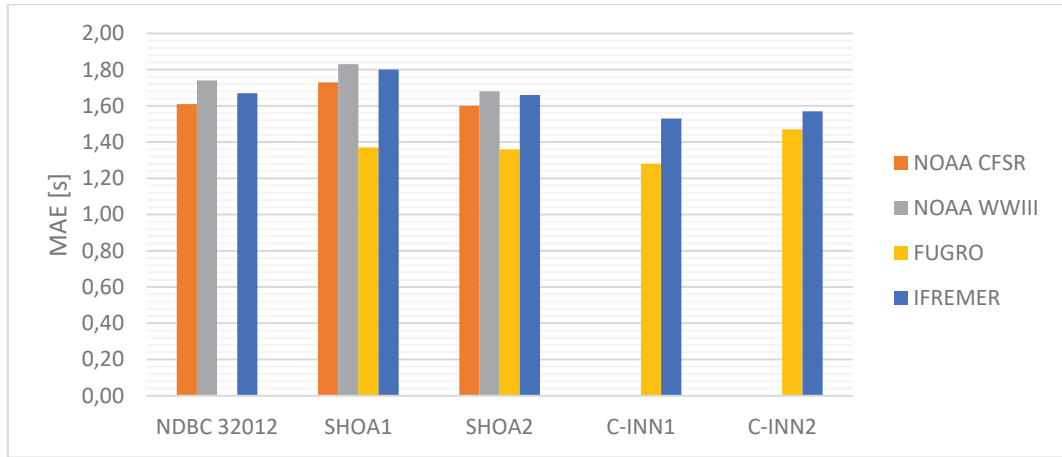


(b)

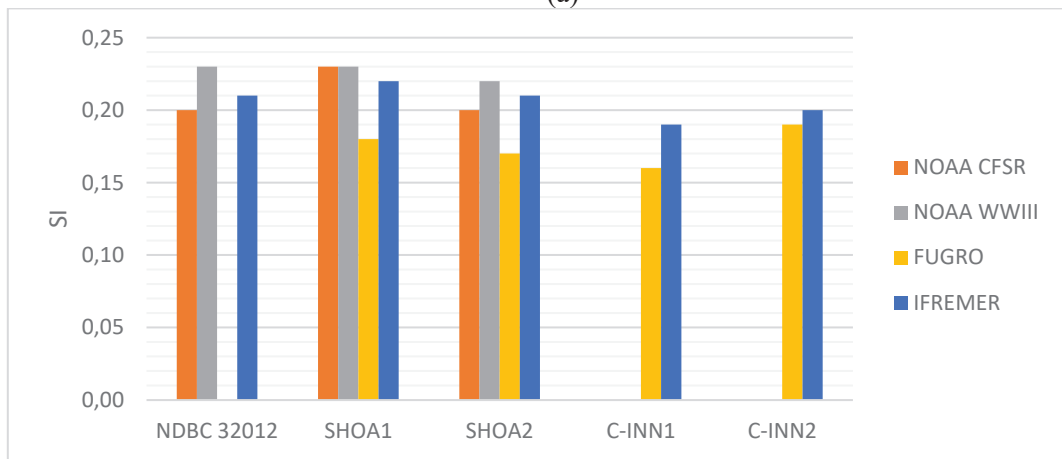


(c)

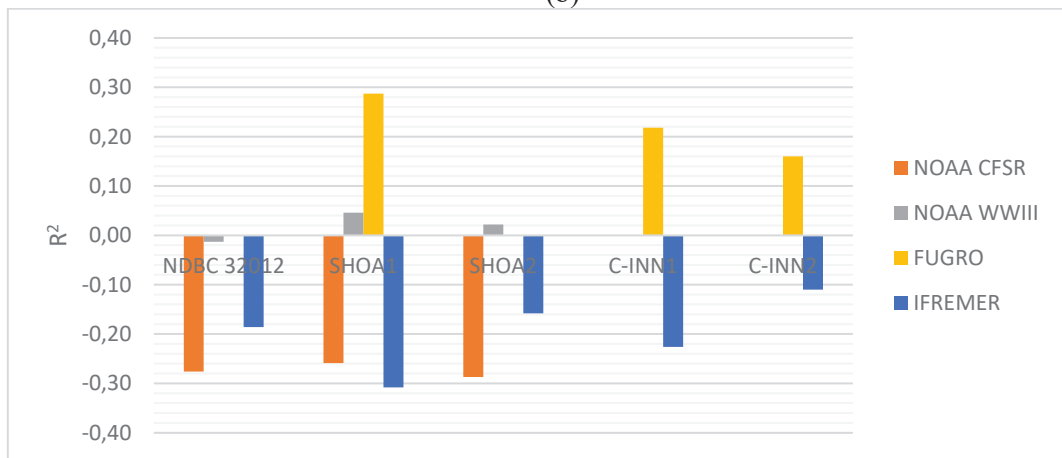
Figura 3-18: Variación de a) RMSE b) BIAS c) SS por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones de la boya.



(a)



(b)



(c)

Figura 3-19: Variación de a) MAE (s) b) SI c)  $R^2$  por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones de la boya.

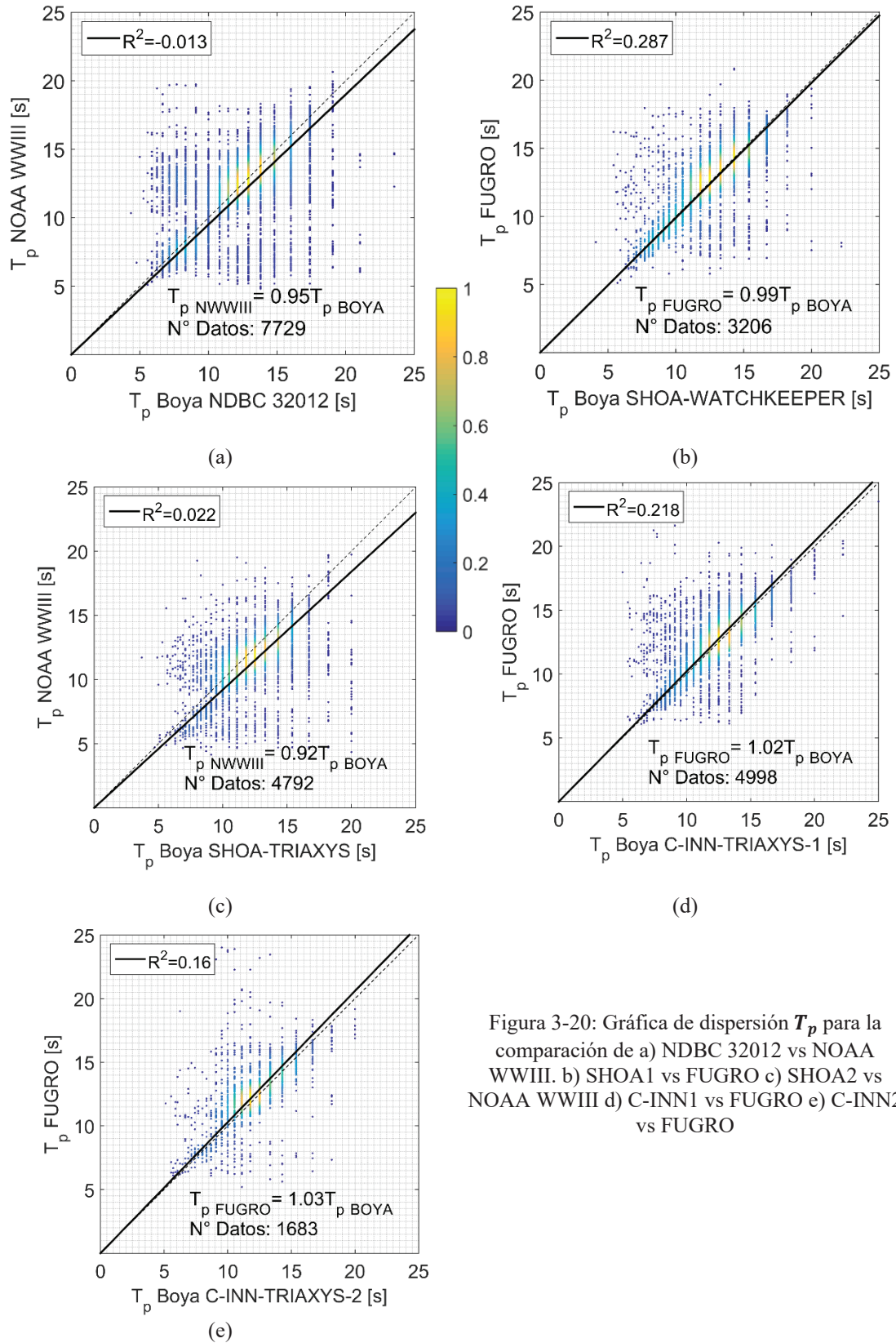


Figura 3-20: Gráfica de dispersión  $T_p$  para la comparación de a) NDBC 32012 vs NOAA WWIII. b) SHOA1 vs FUGRO c) SHOA2 vs NOAA WWIII d) C-INN1 vs FUGRO e) C-INN2 vs FUGRO

### 3.3. COMPARACIÓN ESTADÍSTICA SATELITAL

La cantidad de datos de altura de oleaje medido por los satélites que fueron coincidentes con cada una de las bases de datos de oleaje, tanto en el tiempo como en el espacio, se presenta en la Tabla 3-4. NOAA CFSR fue la que obtuvo una mayor coincidencia para realizar la comparación, con un promedio de 1.439 datos, mientras que ERA-I la de menor cantidad con un promedio de 387 datos. Se descartó la localidad de Caldera, debido a que los datos de altimetría satelital y modelos de re análisis obtuvieron pocas coincidencias.

Tabla 3-4: Cantidad de datos procesados para la comparación satelital de clima medio. Esta cantidad de alturas satelitales coincidentes con cada modelo se obtuvo con la extracción satelital.

Localidad	ERA-I	NOAA CFSR	NOAA WWIII	FUGRO	IFREMER	EEM	Promedio de datos por localidad
Arica	288	1.031	661	-	682	876	708
Iquique	538	2.037	1.152	-	1.066	1.681	1.295
Antofagasta	241	888	508	-	506	737	576
Coquimbo	367	1.651	970	-	858	1.367	1.043
Valparaíso	209	932	757	901	734	932	744
Constitución	558	1.525	1.086	-	962	1.525	1.131
San Vicente	500	1.792	1.261	1.662	1.186	1.792	1.366
G. Coronados	389	1.502	1.114	1.433	1.027	1.502	1.161
Faro Felix	394	1.593	1.115	-	1.052	1.593	1.149
Promedio de datos por base de datos	387	1.439	958	1.332	897	1.334	

#### 3.3.1. Comparación de la Altimetría Satelital de Clima Medio

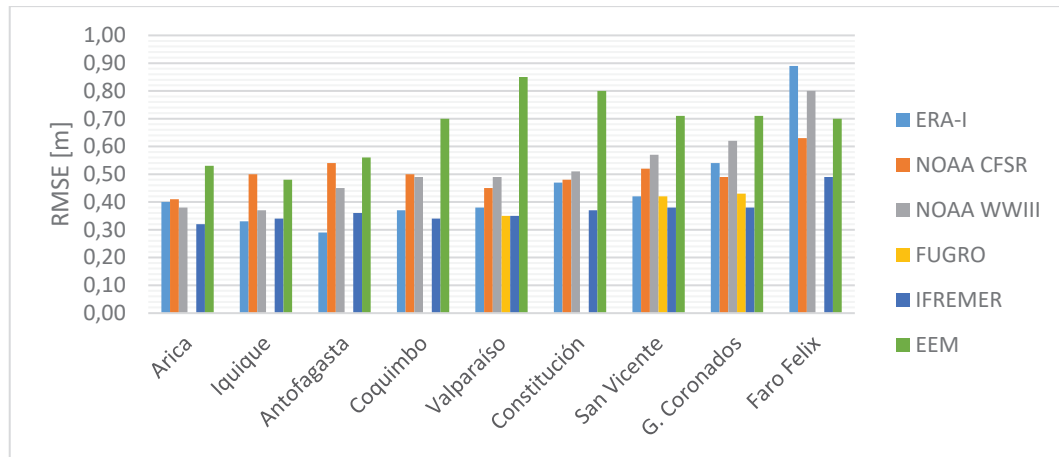
En la Figura 3-21 y Figura 3-22, se presentan los estadígrafos de las 9 localidades escogidas para la comparación de las bases de datos de reanálisis con la información satelital. Adicionalmente se presentan en la Figura 3-23 los gráficos de dispersión de altura significativa satelital solo de la localidad de Valparaíso, el resto de gráficos se encuentran en el Anexo G.

Los resultados obtenidos para el RMSE y MAE mostraron que en promedio la base de datos con mejor desempeño fue IFREMER con valores de 0.37[m] y 0.28[m] respectivamente, mientras que la de peor desempeño para los mismos estadísticos fue EEM con promedio de 0.67[m] y 0.51[m] respectivamente para los mismos estadísticos. El comportamiento por localidad evidenció que tanto el RMSE, como el MAE muestran una tendencia de aumento desde el norte hacia el sur, en mayor o menor medida dependiendo de la base de datos analizada.

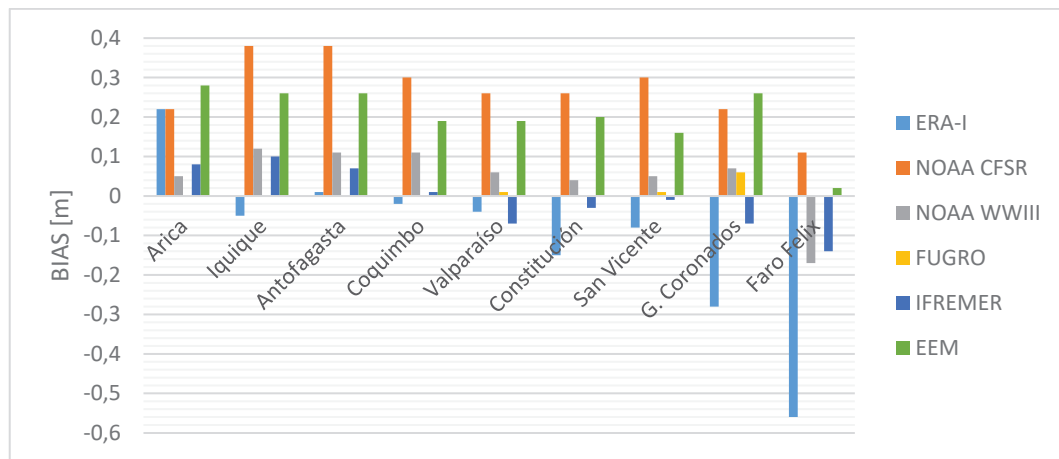
En general se obtuvo que la mayoría de bases de datos de oleaje de reanálisis en promedio sobreestiman el oleaje en la zona norte, centro y sur de Chile continental, donde NOAA CFSR es la que lo hizo con mayor medida, donde obtuvo un valor de BIAS de 0.27 [m] en promedio y NOAA WWIII con menor magnitud con un BIAS de 0.05 [m]. Por su parte, IFREMER mostró una sobreestimación en la zona norte y desde el centro al sur obtuvo subestimaciones en la altura de oleaje. Mientras que ERA-I subestimó la mayoría de localidades desde Iquique hacia el sur, cada vez con mayor intensidad, donde obtuvo un promedio de BIAS de -0.11 [m]

Respecto a los estadísticos SS y SI se obtuvo un empate en las bases de dato de oleaje con mejor desempeño, siendo IFREMER y FUGRO con un promedio de 0.87 y 0.14 respectivamente, de todas manera, cabe mencionar que el primero a diferencia del segundo pudo ser comparado en la totalidad de localidades, a diferencia del segundo que solo lo hizo en 3, mientras tanto, la base de datos EEM tuvo el peor desempeño, con valores promedio de 0.76 y 0.37 para los mismos estadísticos. Al revisar los resultados por localidad, se apreció que los valores de SS tienden a aumentar de norte a sur, mientras que los resultados del SI no mostraron un comportamiento que dependiera de la latitud.

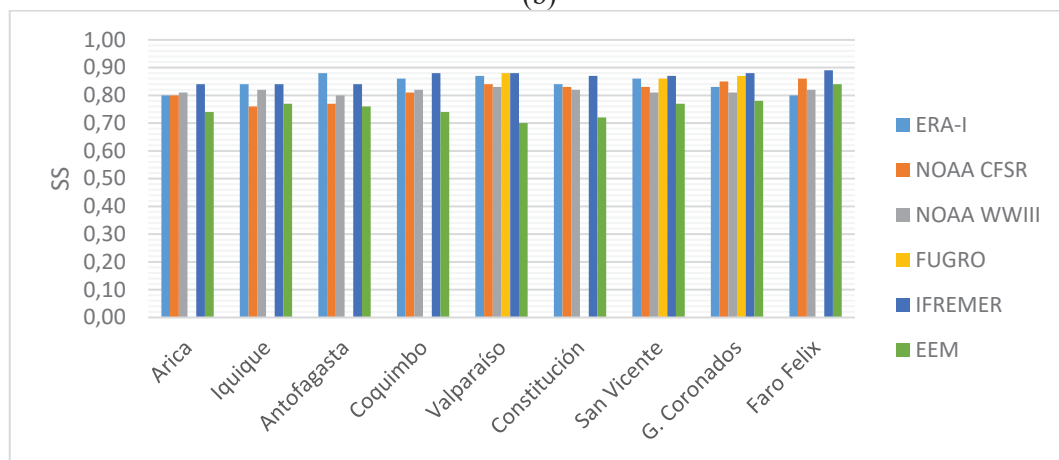
Los valores de  $R^2$  tendieron a aumentar de norte a sur hasta la latitud de Valparaíso, luego baja unas décimas y comienza a aumentar nuevamente hacia el sur. La base con el mejor promedio fue FUGRO con un valor de 0.82, pero se debe considerar que tiene datos para un número acotado de nodos, IFREMER que fue comparada en la totalidad de localidades obtuvo un promedio de  $R^2= 0.69$ , mientras que NOAA CFSR lo hizo con 0.68, adicionalmente se observó en ambos casos que el desempeño mejoró notoriamente desde Coquimbo a Faro Felix. Mientras tanto, la base de datos con peor desempeño fue EEM con un valor promedio de 0.37 y un comportamiento mostró valores más altos al norte y sur, y más bajos hacia el centro de Chile.



(a)

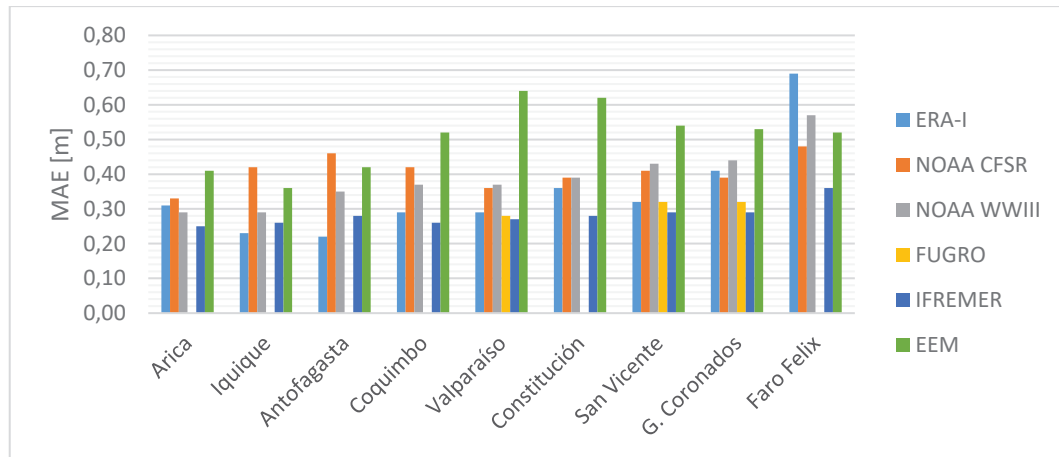


(b)

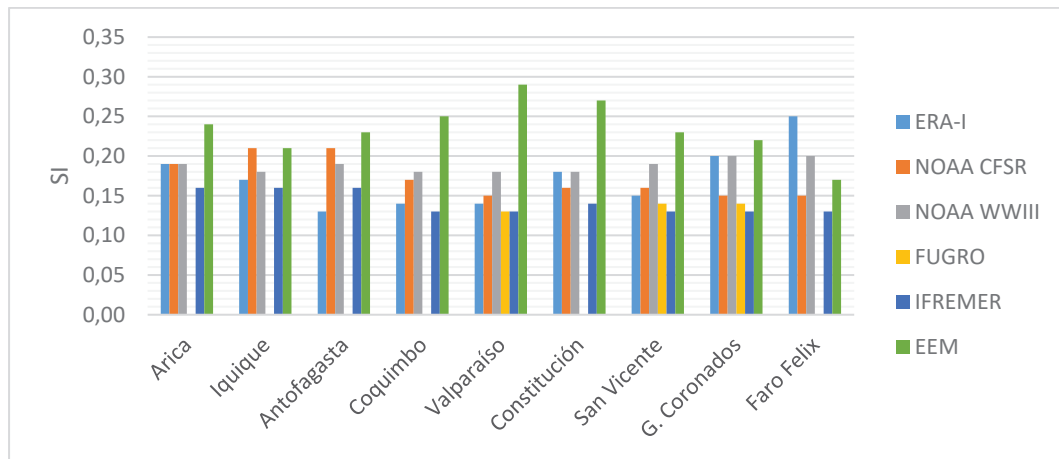


(c)

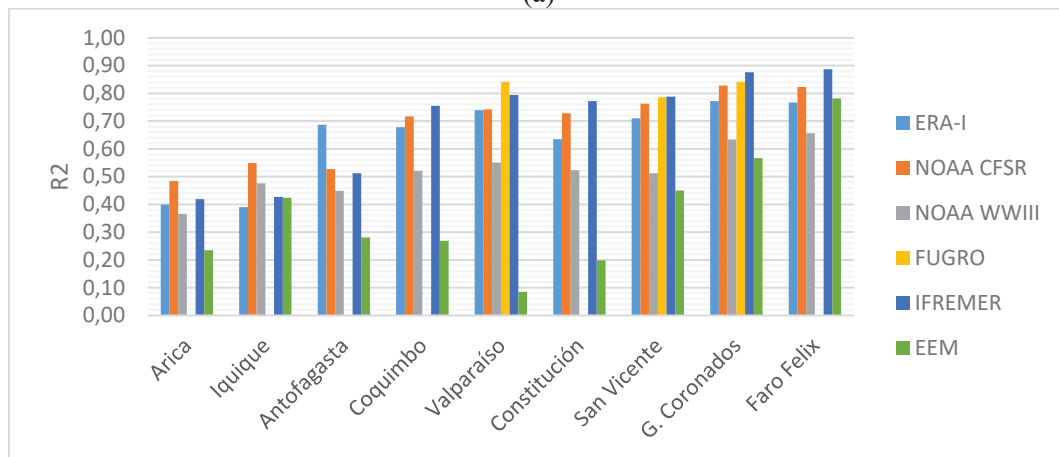
Figura 3-21: Variación de a) RMSE (m) b) BIAS (m) c) SS por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones satelitales. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones satelitales.



(a)



(a)



(b)

Figura 3-22: Variación de a) MAE (m) b) SI c) R2 por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones satelitales. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones satelitales.

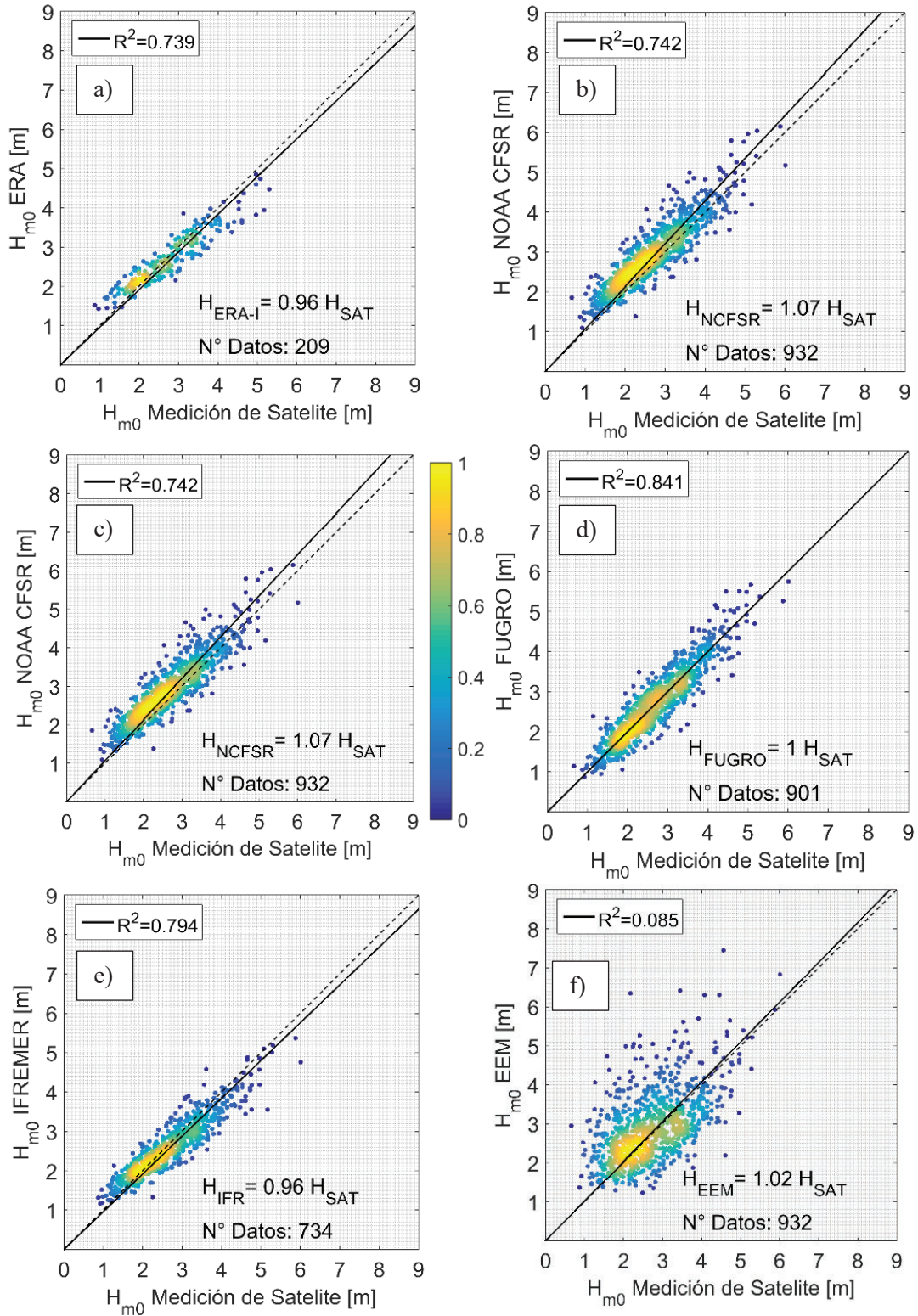


Figura 3-23: Gráficas de dispersión  $H_{m0 SAT}$  versus  $H_{m0}$  de modelos de oleaje en Valparaíso (a) ERA-I (b) NOAA CFSR (c) NOAA WWIII (d) FUGRO (e) IFREMER (f) EEM.

### 3.3.2. Comparación de la Altimetría Satelital de Tormentas

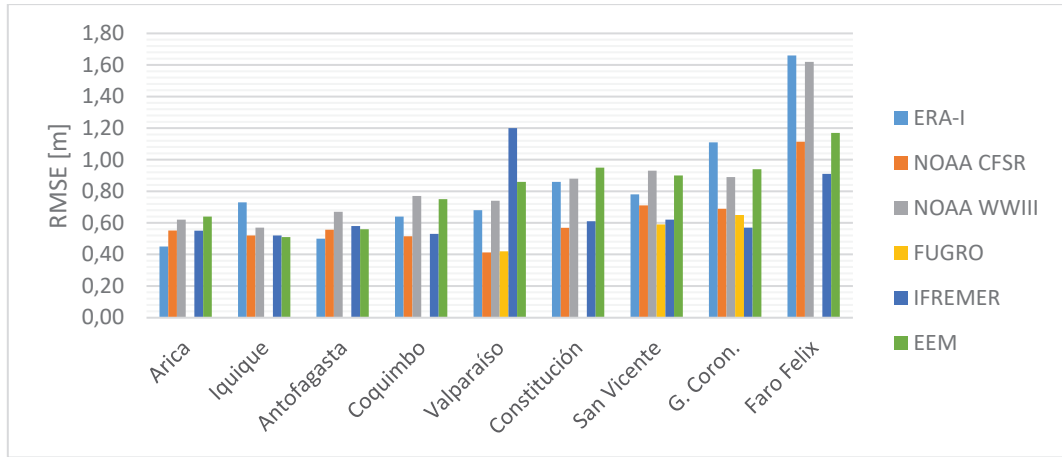
De la Figura 3-24 a la Figura 3-25 se presentan los estadígrafos de las localidades escogidas para la comparación de las bases de datos de reanálisis con los datos extremos de altura significativa satelital que corresponden a las alturas mayores al percentil 90 de la totalidad de la población.

Los resultados obtenidos para el RMSE y MAE con mejor desempeño fueron de FUGRO, con un promedio de 0.55 [m] y 0.42 [m] respectivamente, cabe mencionar, que esta base solo fue comparada en un número acotado de nodos; la base NOAA CFSR tiene nodos a lo largo de todo Chile y presenta el segundo mejor promedio de 0.63 [m] y 0.49 [m] respectivamente. Por otro lado, el desempeño más bajo para el RMSE fue NOAA WWIII y ERA-I para el MAE, con promedio de 0.85 [m] y 0.70 [m] de manera respectiva. Al revisar los resultados por localidad, se observó que para ambos estadígrafos se tuvo un comportamiento de tendencia al aumento desde el norte al sur.

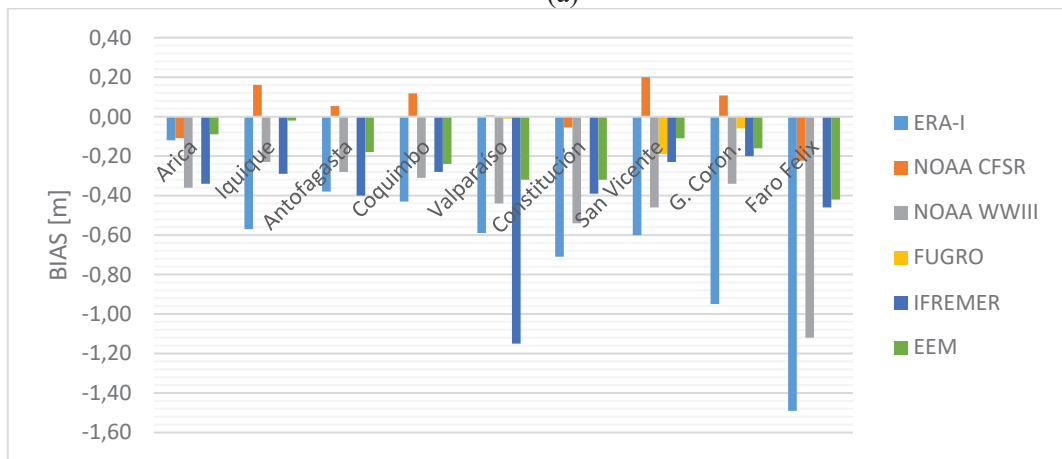
En general la mayoría de bases de datos de oleaje de reanálisis subestiman la altura de oleaje extremo, la que lo hace con mayor intensidad es ERA-I que obtuvo el BIAS promedio más bajo, con un valor de -0.65 [m], la única base que sobrestimó y que obtuvo promedio positivo fue NOAA CFSR con un valor de 0.03.

Respecto los estadígrafos SS y SI se obtuvo que el mejor desempeño fue de la base de datos FUGRO con promedio de 0.89 y 0.12 respectivamente, pero tal como fue mencionado anteriormente fue evaluada en una cantidad acotada de nodos; mientras que NOAA CFSR que fue evaluada en 9 localidades, tuvo valores de 0.86 y 0.14 para los mismos parámetros. El desempeño más bajo fue de NOAA WWIII, con promedio de SS= 0.81 y SI= 0.22.

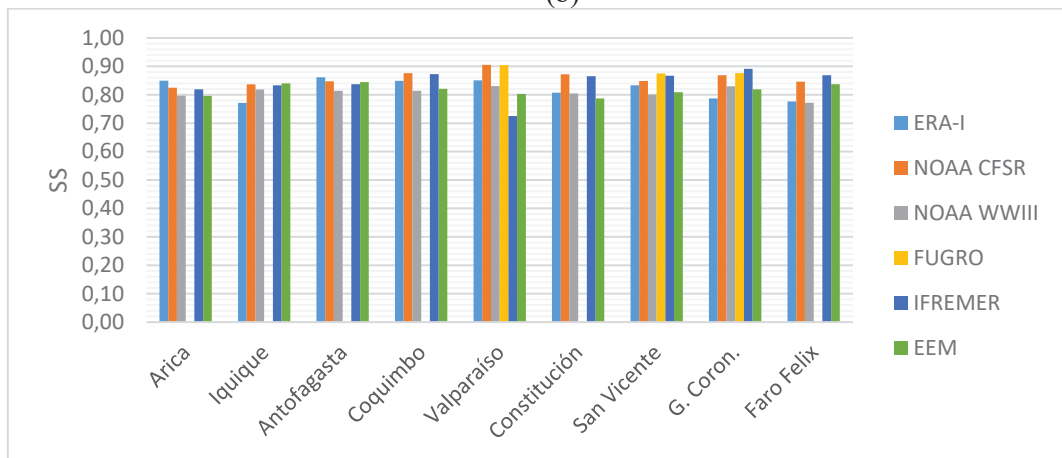
A diferencia del resto de comparaciones realizadas hasta acá en el trabajo se optó por utilizar el parámetro estadístico  $r^2$  en vez del  $R^2$ , debido a que este último mostró bajos desempeños bajos en magnitud, que no permiten compararse de manera adecuada, mientras que  $r^2$  entregó resultados más adecuados para este propósito. Aclarado lo anterior, se tuvo a FUGRO como el modelo de oleaje con el mejor desempeño con un valor promedio de 0.48; mientras que IFREMER que pudo ser comparado en más nodos, obtuvo el segundo valor con mejor desempeño con un promedio de 0.37, mientras que la base de datos con peor desempeño fue NOAA WWIII que alcanzó un promedio de 0.14.



(a)

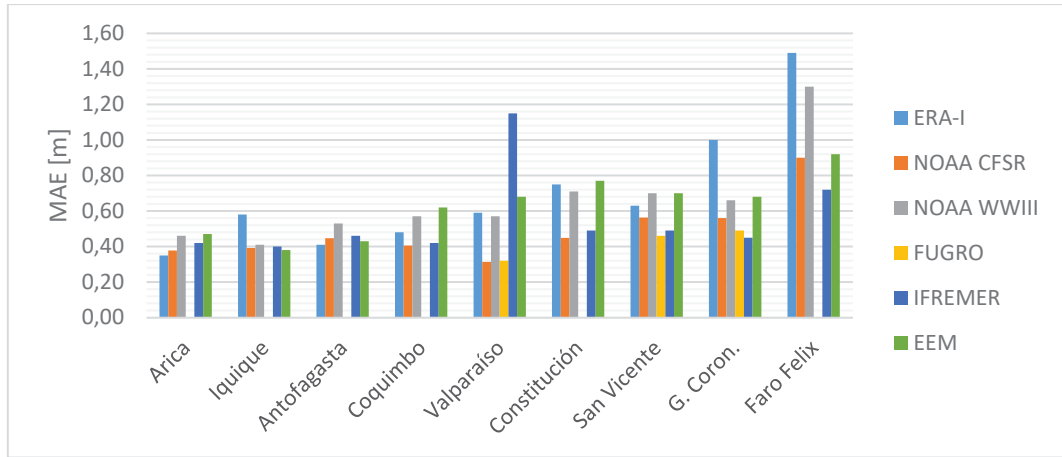


(b)

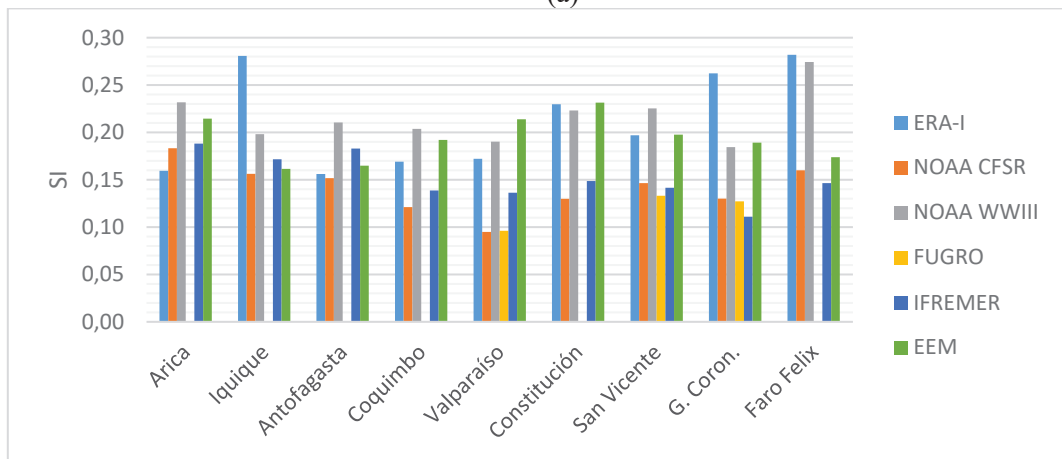


(c)

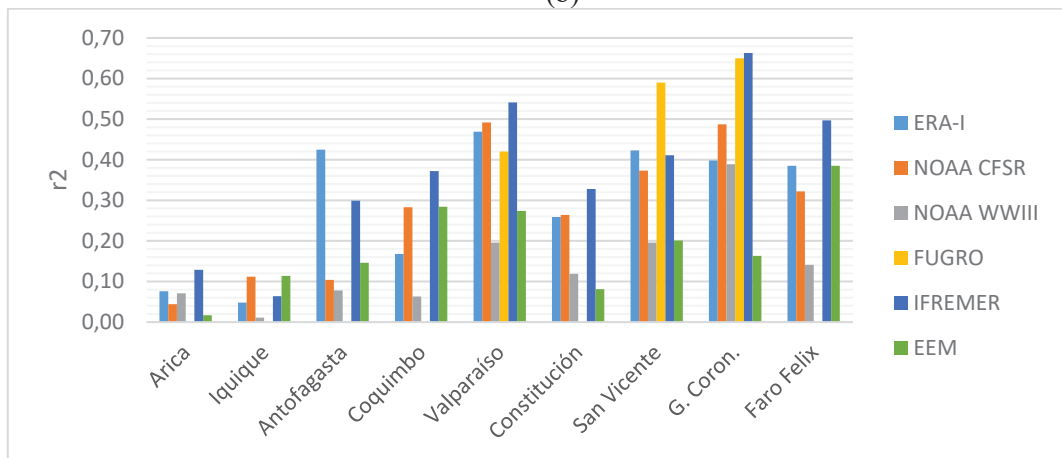
Figura 3-24: Variación de a) RMSE (m) b) BIAS (m) c) SS por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones satelitales.



(a)



(b)



(c)

Figura 3-25: Variación de a) MAE (m) b) SI c)  $r^2$  por base de datos y ubicación con respecto a las mediciones por boyas. Los valores en blanco indican que no se cuenta con base de datos en esa ubicación en el periodo de coincidente con las mediciones satelitales.

### 3.4. CLIMA EXTREMO

#### 3.4.1. Selección del número de Eventos Extremos

No existe un número específico, ni una forma estricta para seleccionar la cantidad de tormentas para generar la curva del Método Sobre el Umbral, es por eso que con motivo de este estudio se aplicó el siguiente procedimiento: dependiendo del sector y la base de datos seleccionada se establece un primer umbral que abarque una gran cantidad de tormentas, para luego ir incrementando su valor cada  $\Delta H_{m0} = 0.5[m]$ , repitiendo el procedimiento hasta el último umbral que sea posible. De esta manera, se logra analizar la variación de la curva dependiendo del umbral escogida, hasta lograr de manera iterativa la que mejor represente los eventos, enfocado principalmente en la mejor simulación de los datos más extremos de la estadística completa.

Para comprender la idea anterior, se presentan los gráficos elaborados para la localidad de Arica con el modelo de reanálisis de oleaje EEM. Primero se generó la curva de tormentas para un umbral de  $H_{m0} = 2.5[m]$  donde se obtuvieron 1.307 eventos, un valor de  $\alpha = 40.84$  [eventos/año] y una función de distribución de Weibull, la cual se observa en la Figura 3-26. Se aprecia una ausencia en las bandas de confianza, debido a que resultaron ser tan anchas que escapan al espacio del gráfico.

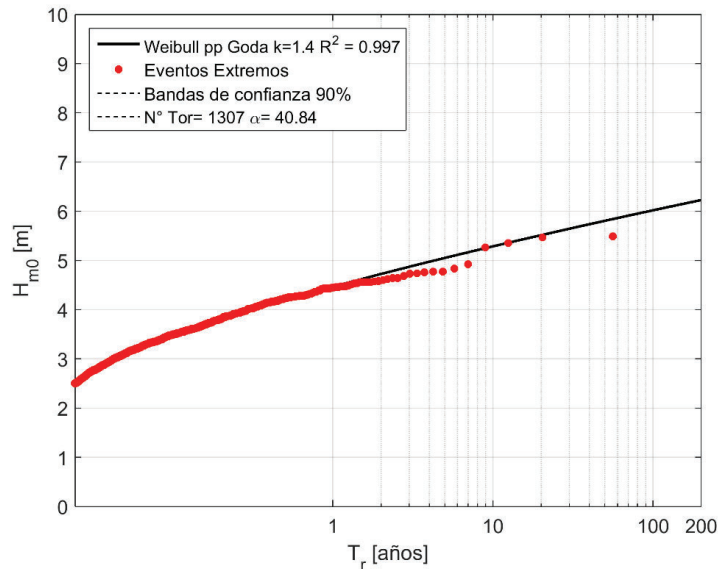


Figura 3-26: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) con umbral de  $H_{m0} = 2.5[m]$  en Arica para el modelo de oleaje EEM.

El segundo gráfico mostrado en la Figura 3-27 considera un umbral de  $H_{m0} = 3.0[m]$ , donde se obtuvieron 676 tormentas, un valor de  $\alpha = 21.13$  [eventos/año] y función de distribución de distribución Weibull. A diferencia del gráfico anterior, en esta figura si se alcanza a apreciar

las bandas de confianza, sin embargo, son anchas y no alcanzan a mostrarse en el espacio utilizado para periodos de retorno mayores a 10 [años].

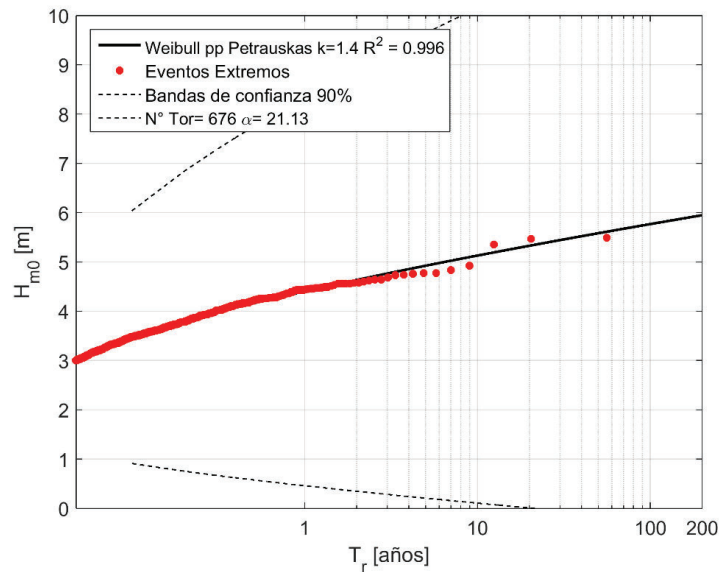


Figura 3-27: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) con umbral de  $H_{m0}= 3.0$ [m] en Arica para el modelo de oleaje EEM.

El tercer gráfico mostrado en Figura 3-31 se generó con un umbral de  $H_{m0} = 3.5$ [m], donde se contabilizaron 294 eventos, quedando un valor de  $\alpha= 9.19$  [eventos/año] con un ajuste tipo Weibull. En esta ocasión, y a diferencia de los dos primeros gráficos, se logran apreciar las bandas de confianza de manera más acotadas al trazado principal, siendo más ancha en los valores de  $T_r$  más altos.

El cuarto gráfico de la Figura 3-29 se elaboró considerando un umbral de  $H_{m0} = 4.0$ [m], que se elaboró en base a 100 eventos extremos, se obtuvo un valor de  $\alpha= 3.13$  [eventos/año] y un ajuste tipo FT-II, cada vez se obtienen bandas de confianza más acotadas. Se aprecia que existe una interpolación para los valores menores a 4.0[m] similar a una recta constante debido a la ausencia de datos, generando así un punto de inflexión que se asimila de mejor manera a los valores más altos del registro.

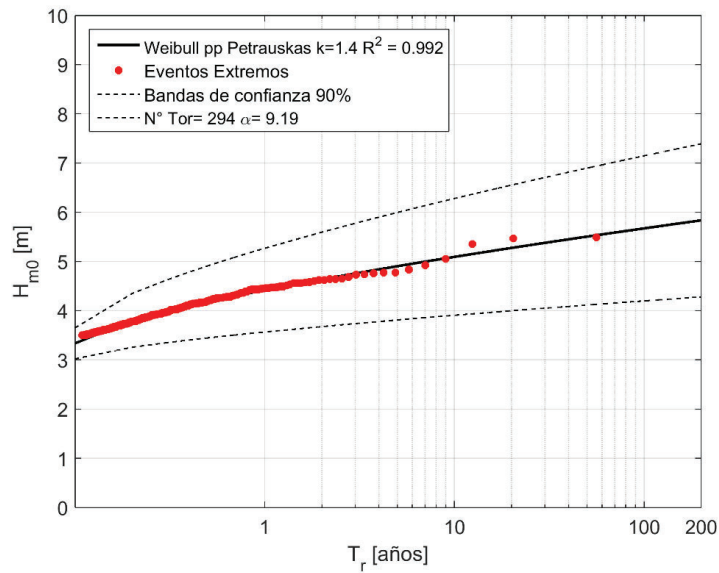


Figura 3-28: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) con umbral de  $H_{m0}=3.5$ [m] en Arica para el modelo de oleaje EEM.

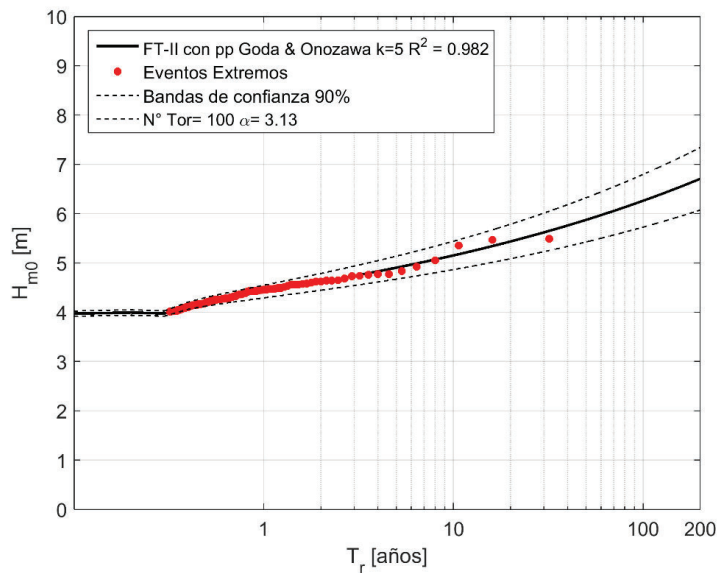


Figura 3-29: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) con umbral de  $H_{m0}=4.0$ [m] en Arica para el modelo de oleaje EEM.

El quinto y último gráfico presentado en la Figura 3-33 considera un umbral de  $H_{m0} = 4.5$ [m], donde solo 25 eventos que cumplieron con esta condición, quedando un valor de  $\alpha=0.78$ [eventos/año] y una distribución Weibull. Como se mencionó anteriormente, se aprecian bandas de confianza cada vez más acotadas en la zona del gráfico donde se encuentra la mayoría

de información y más amplia en zonas con menos datos, tal como se observa para alturas de eventos extremos menores a 4[m] y mayores a 5[m].

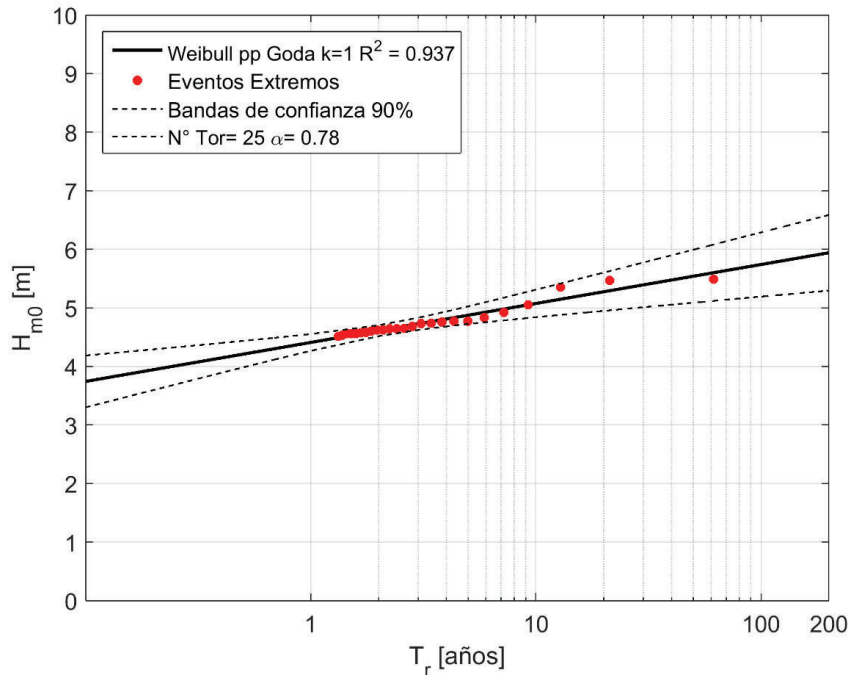


Figura 3-30: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) con umbral de  $H_{m0}=4.5$ [m] en Arica para el modelo de oleaje EEM.

Debido a que el objetivo de esta sección es la comparación de las bases de datos en condiciones de clima extremo, se debe escoger una curva que considere las mayores tormentas probables y que además cuente con una cantidad de datos adecuada, que asegure la representatividad de la información. En este caso se opta por el umbral  $H_{m0}=4.0$ [m] por cumplir con las condiciones anteriores al darle mayor peso a las tormentas probables y tener una mayor robustez de información que el umbral de 4.5 [m], que no alcanza un valor de  $\alpha$  mayor a 1 tormenta por año, por lo que su curva podría terminar sobredimensionando los tamaños reales de tormenta en el sector.

Este criterio es replicado al resto de bases de datos de reanálisis de oleaje, donde se realizó el mismo análisis de variación del umbral para la localidad de Arica. Es así como en el modelo de oleaje ERA-I de la Figura 3-31 se seleccionaron las 101 tormentas con alturas de  $H_{m0}$  mayores a 3.5[m], resultando un valor de  $\alpha=2.81$ [eventos/año] con una función de distribución Goda. IFREMER muestra en la Figura 3-32 un umbral también de  $H_{m0}=3.5$ [m], generado con los 57 mayores eventos extremos de su estadística, obteniendo así un valor de  $\alpha=2.38$ [eventos/año] con función de distribución Goda. NOAA CFSR, presenta en la Figura 3-33 el gráfico con un umbral

de  $H_{m0} = 4.0$ [m], obtenido con 90 eventos extremos de su estadística, alcanzando un valor de  $\alpha = 2.9$ [eventos/años] y una función de distribución Weibull. Por último, NOAA WWIII, presenta en la Figura 3-33 el gráfico de tormentas con un umbral de  $H_{m0} = 3.5$ [m], utilizando para su elaboración, 30 eventos extremos y obteniendo un valor de  $\alpha = 2.14$ [eventos/año] según una distribución FT-II. Las gráficas mencionadas se presentan a continuación.

El procedimiento para la selección de umbral es iterativo para las nueve localidades restantes, adoptándose el mismo criterio para la elección de la curva de tormenta. La totalidad de umbrales utilizados por base de datos y localidad deben ser consultados en el Anexo I.

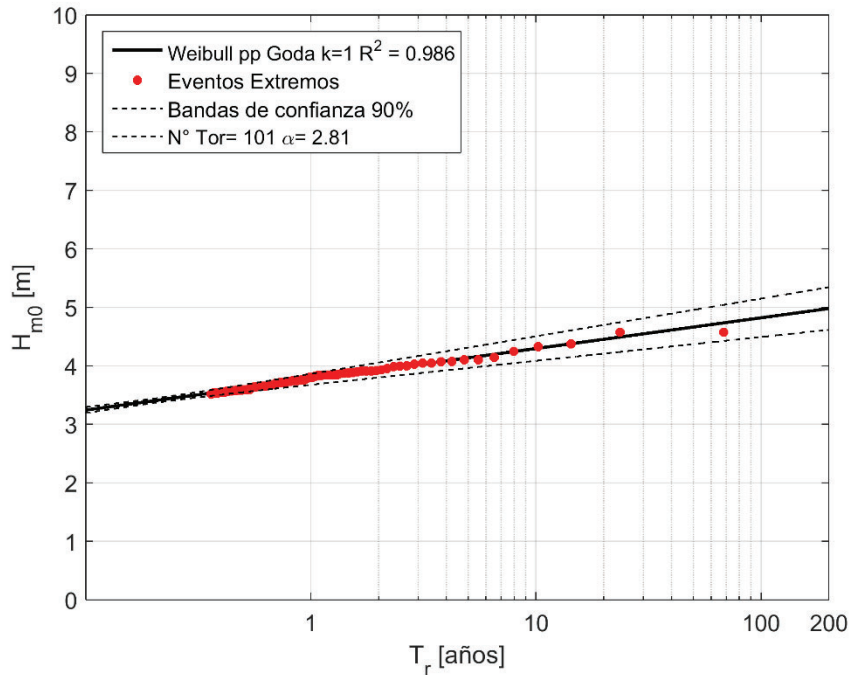


Figura 3-31: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) con umbral de  $H_{m0} = 3.5$ [m] en Arica para el modelo de oleaje ERA-I.

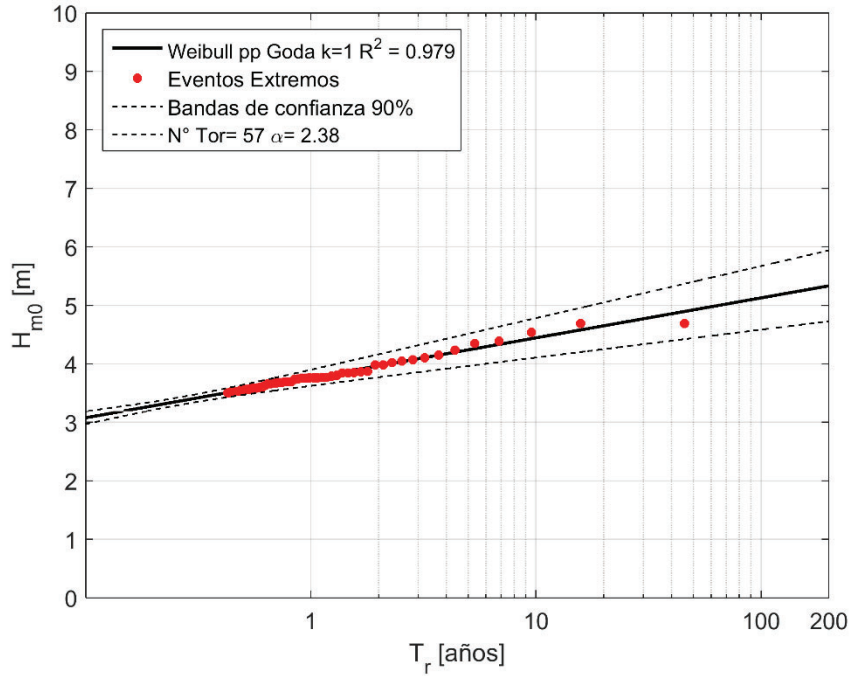


Figura 3-32: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) con umbral de  $H_{m0}=3.5$ [m] en Arica para el modelo de oleaje IFREMER.

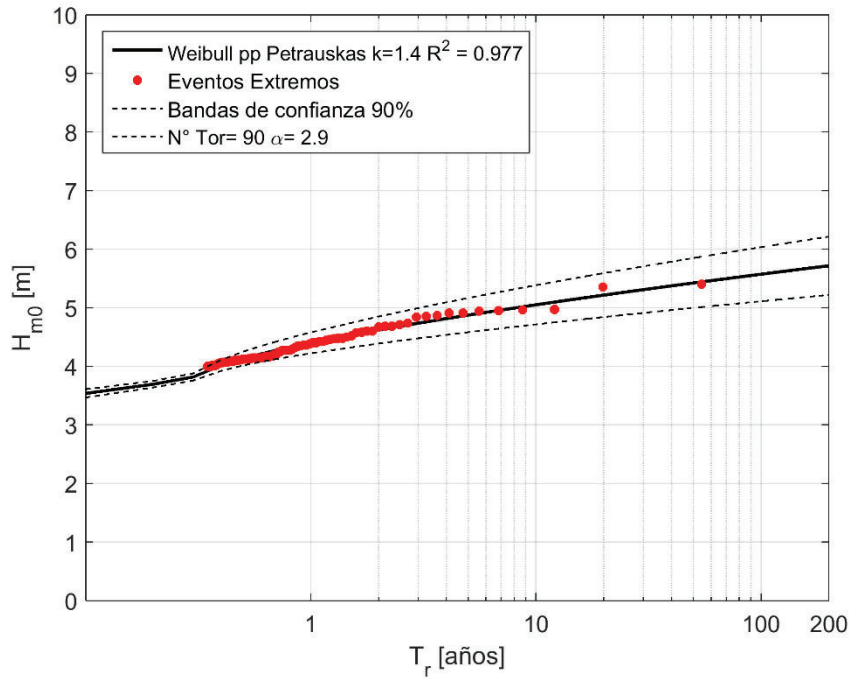


Figura 3-33: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) con umbral de  $H_{m0}=3.5$ [m] en Arica para el modelo de oleaje NOAA CFSR.

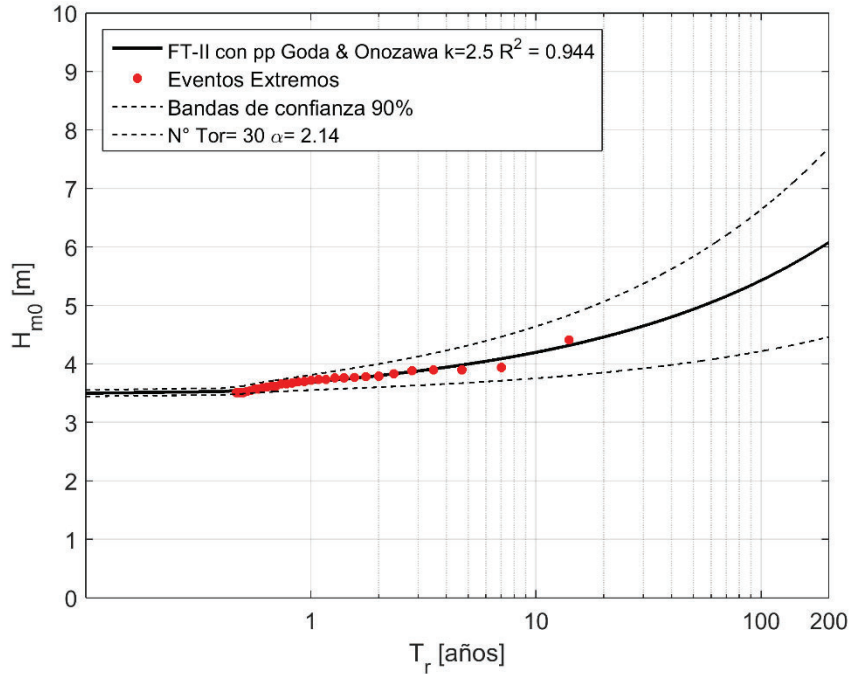


Figura 3-34: Curva de tormenta  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) con umbral de  $H_{m0}= 3.5$ [m] en Arica para el modelo de oleaje NOAA WWIII.

### 3.4.2. Curvas de altura de tormenta en función del periodo de retorno

Posterior al análisis realizado para establecer la cantidad de eventos extremos considerados para cada una de las zonas definidas y dependiendo del modelo de reanálisis de oleaje, se elaboró un gráfico único por localidad, donde se trazaron las curvas de tormentas de todas las bases. Estas se presentan desde norte a sur en el siguiente orden: Arica (Figura 3-35), Iquique (Figura 3-36), Antofagasta (Figura 3-37), Caldera (Figura 3-38), Coquimbo (Figura 3-39), Valparaíso (Figura 3-40), Constitución (Figura 3-41), San Vicente (Figura 3-42), Golfo Coronados (Figura 3-43) y por último Faro Felix (Figura 3-44).

Se observa en los gráficos que el modelo de reanálisis oleaje que tiene en general las curvas con mayor altura de tormentas fue EEM, que superó en 7 de las 10 localidades al resto de la familia de curvas, salvo en Iquique y Faro Felix donde NOAA CFSR obtuvo esa condición e IFREMER lo hizo en Golfo Coronados en la zona de mayores periodos de retorno. Aun así, EEM en estos últimos tres casos alcanzó tamaños de altura de tormenta considerables y de magnitud similares a los dos modelos mencionados.

Por el contrario, la base de datos de oleaje que mostró en general las curvas con tormentas de menor tamaño fue ERA-I que obtuvo esta condición en nueve de las diez localidades estudiadas, en Arica fue el único nodo donde NOAA WWIII alcanzó la curva de tormentas de menor tamaño.

Otra particularidad observada corresponde a la comparación entre ambas bases de datos NOAA, siendo en nueve de las diez localidades NOAA CFSR la que obtuvo mayores valores que NOAA WWIII, viéndose superada solamente en Valparaíso, para los periodos de retorno mayores a 82 [años].

IFREMER por su parte se muestra en la mayoría de localidades con valores más centrados entre los extremos, sin quitar que en algunos sectores como Valparaíso tiende a semejarse bastante a ERA-I con alturas de tormentas bajas y en otros lugares como Faro Felix y Golfo Coronados, asemejarse más a las curvas que muestran las tormentas de mayor tamaño.

La base de datos DOP que hasta este apartado no pudo ser incluida en los análisis estadísticos, muestra en seis de las localidades una curva que se encuentra entre los máximos y mínimos. A diferencia de Iquique que alcanza valores máximos para periodos de retorno superiores a los 50 años, en Valparaíso también alcanza valores altos, quedando cerca del máximo de EEM. Por el contrario, en Faro Felix alcanzó los valores más bajos de tamaño de tormentas extremas.

FUGRO solo pudo graficarse en tres localidades: Valparaíso, San Vicente y Faro Felix, obteniendo en cada una curvas de tormentas que se ubican entre los mínimos y máximos de manera centrada.

En cada gráfico se trazó una línea punteada en color negro en la abscisa que corresponde al periodo de retorno  $T_r = 50$  [años] con la finalidad de marcar la vida útil de las estructuras y construcciones públicas que se definen como Clase 3 según MOP (2013), que utiliza como referencia las la normativa japonesa (ISO 2394, 1998), para resumir los resultados en un único gráfico en la Figura 3-45, que muestra los valores de  $H_{m0}(Tr = 50[\text{años}])$  y sus respectivas bandas de confianza del 90%. Se observó que la base de datos con mayores alturas de eventos extremos fue EEM en al menos 9 de los 10 nodos, al contrario, ERA-I fue el modelo de reanálisis de oleaje con menores alturas en 9 de los 10 sectores estudiados.

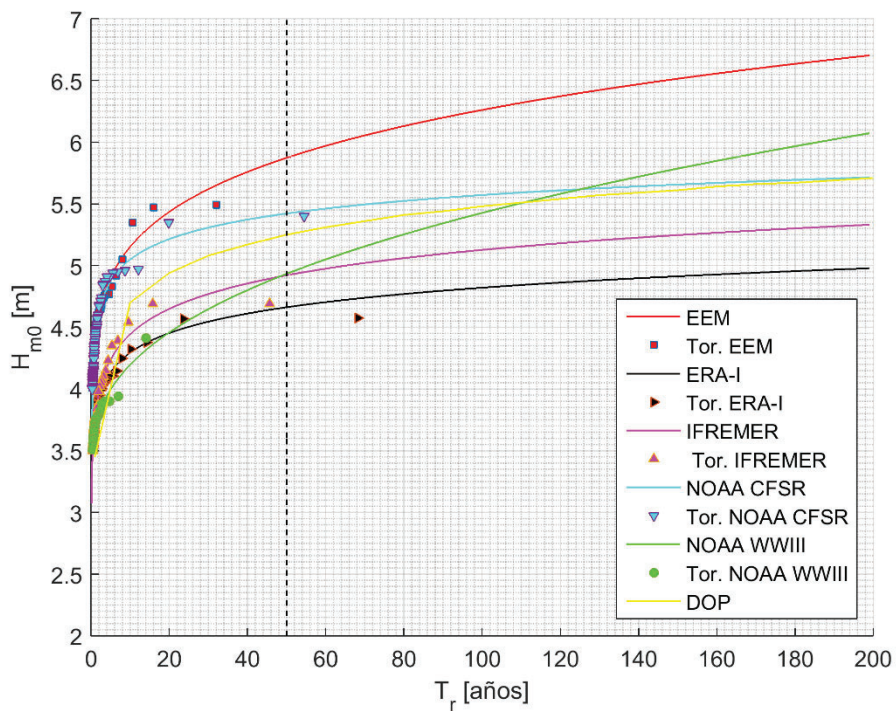


Figura 3-35: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) en Arica.

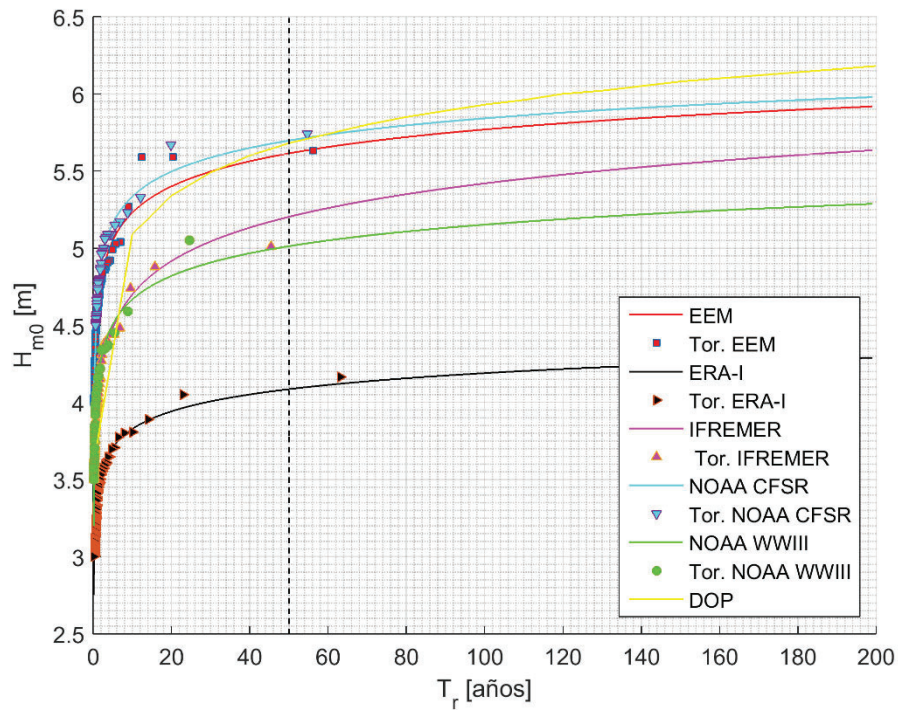


Figura 3-36: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) en Iquique.

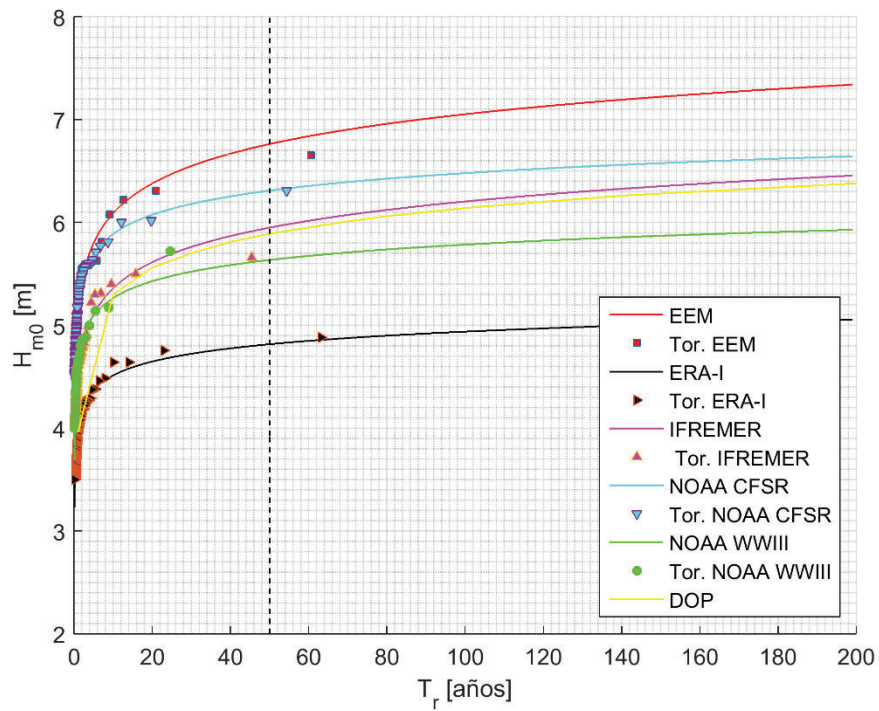


Figura 3-37: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) en Antofagasta.

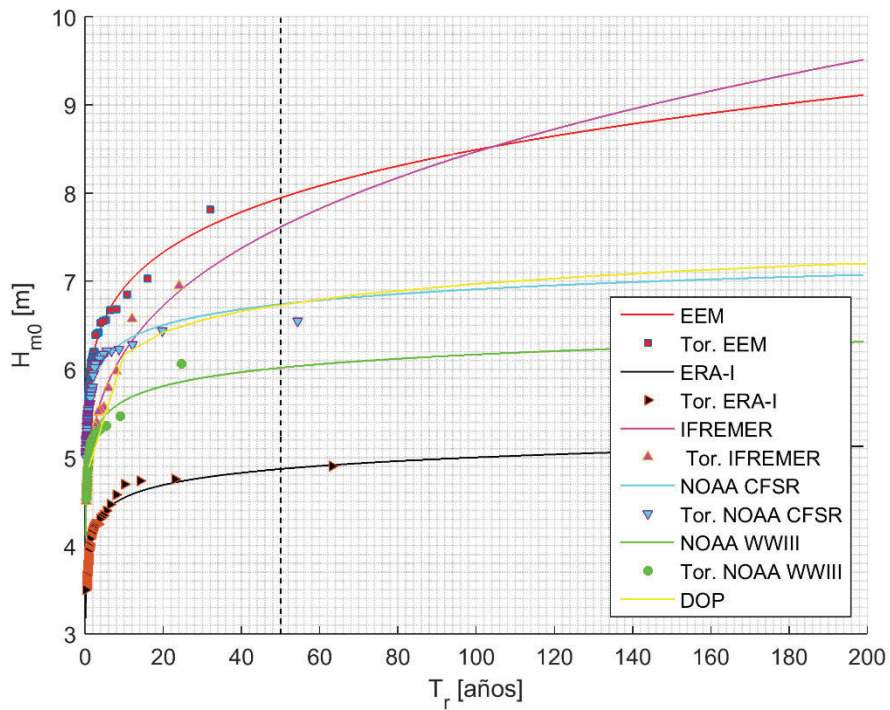


Figura 3-38: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) en Caldera.

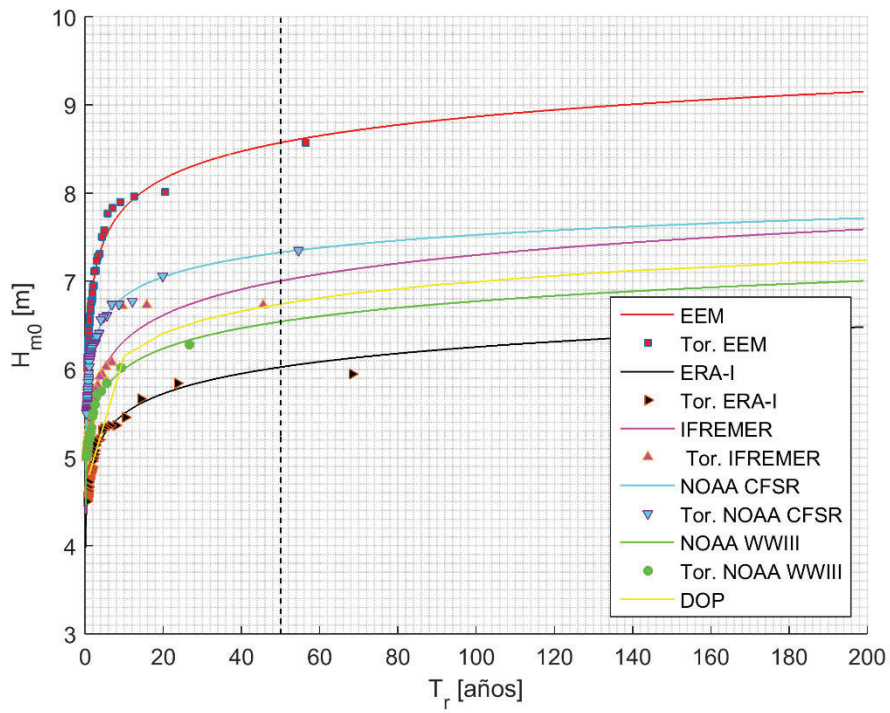


Figura 3-39: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) en Coquimbo.

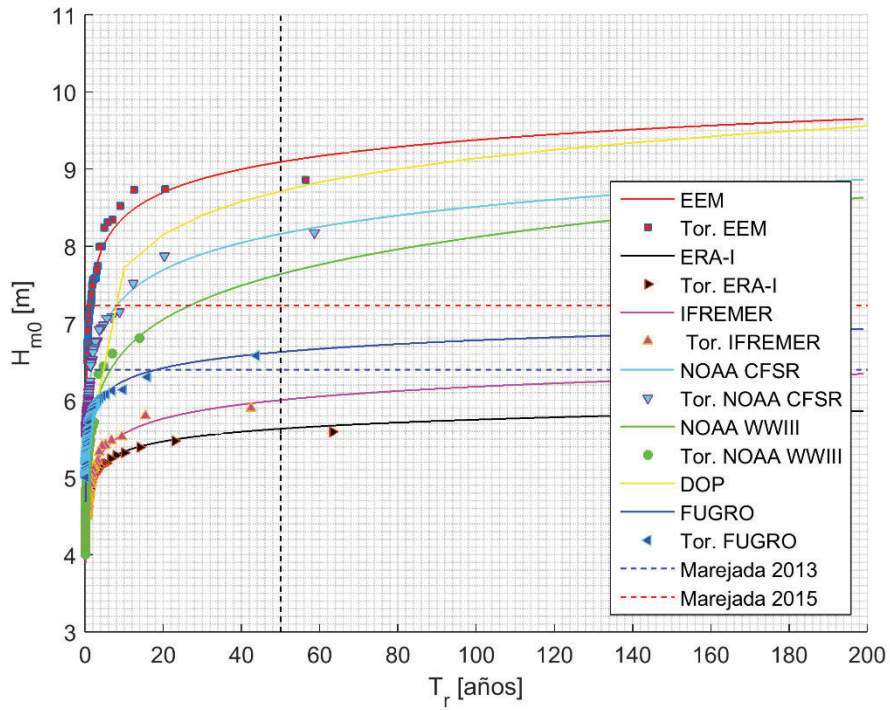


Figura 3-40: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) en Valparaíso.

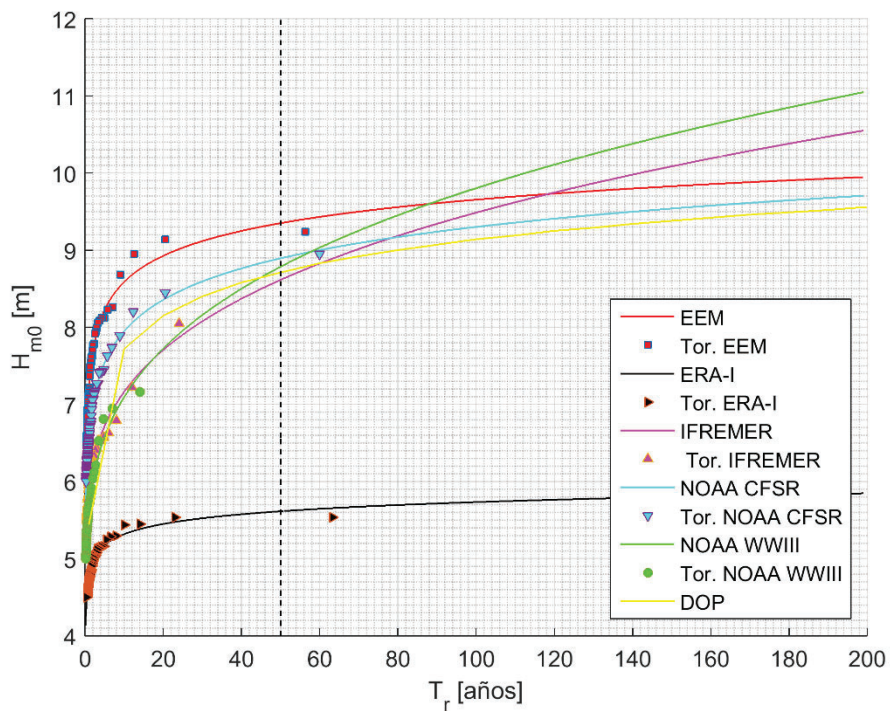


Figura 3-41: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) en Constitución.

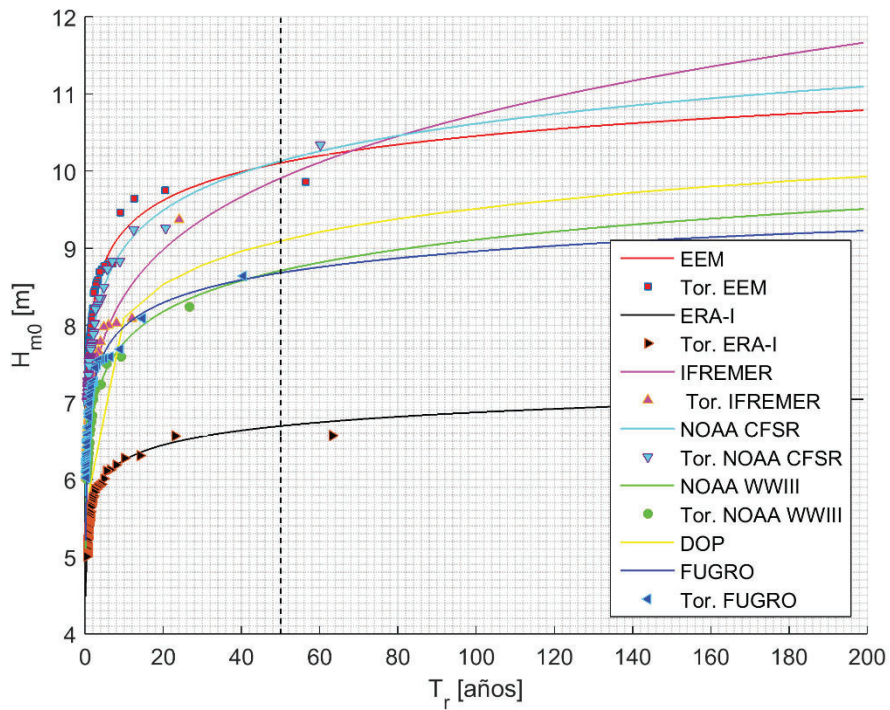


Figura 3-42: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) en San Vicente.

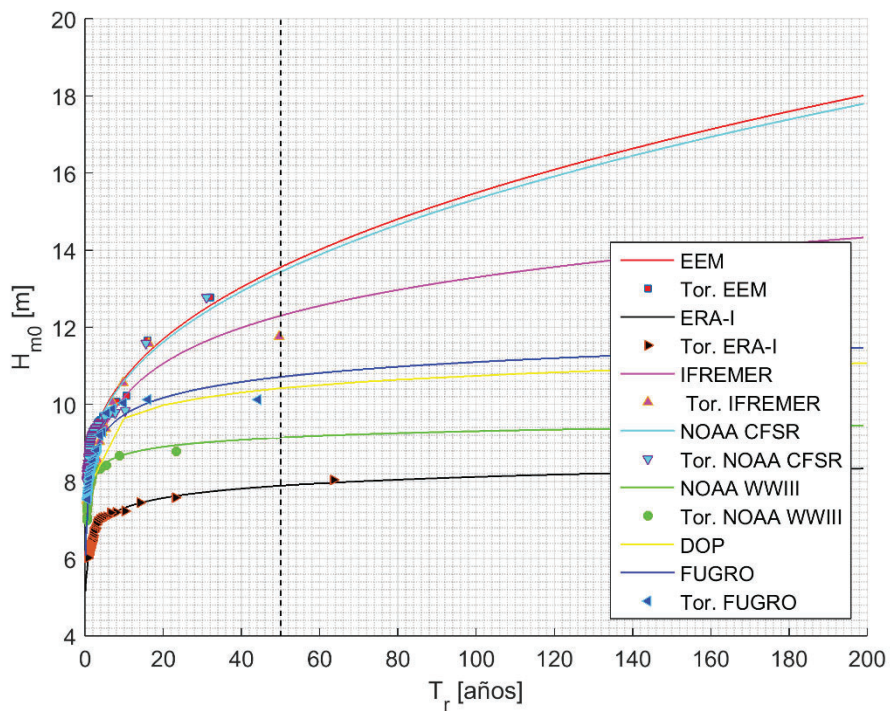


Figura 3-43: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) en Golfo Coronados.

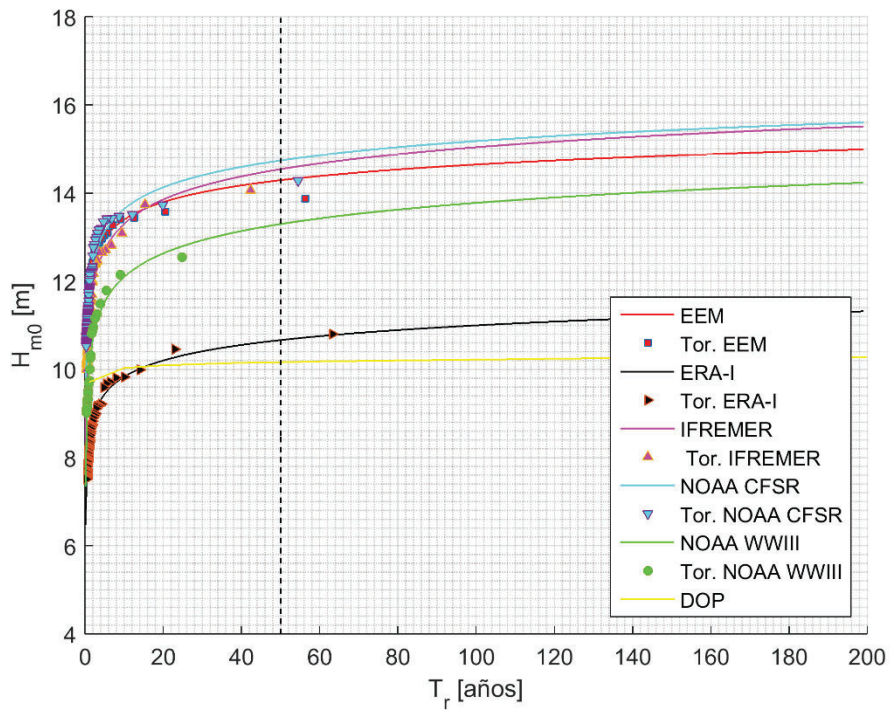


Figura 3-44: Altura significativa  $H_{m0}$  versus Periodo de retorno ( $T_r$ ) en Faro Felix.

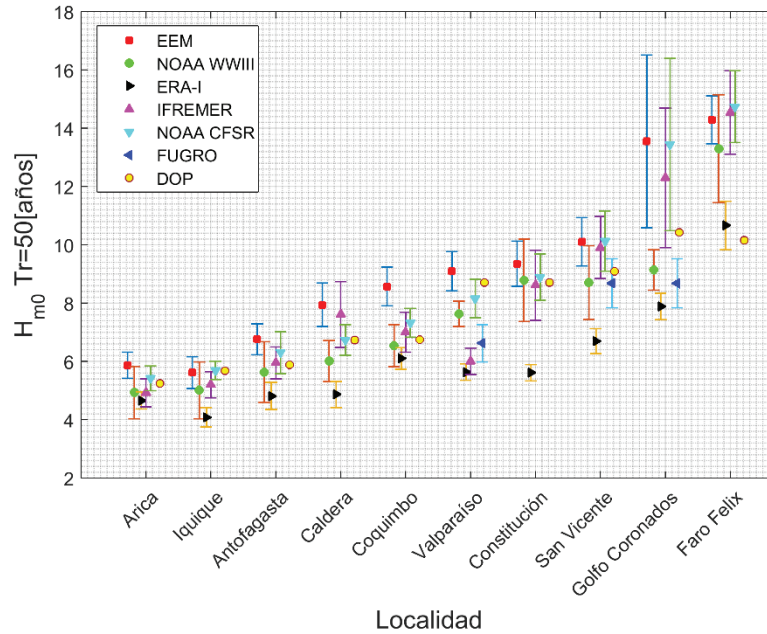


Figura 3-45: Altura de tormenta con un periodo de retorno  $T_r=50$  [años] con sus respectivas bandas de confianza del 90%.

Por último, para graficar la incertidumbre se elaboró un gráfico (Figura 3-46) que muestra en con círculo rojo el promedio de los valores de  $H_{m0}(Tr = 50[\text{años}])$  entre todos los modelos de reanálisis de oleaje y las bandas de color azul que caracteriza el valor mínimo y máximo alcanzado por las bandas de menor y mayor valor en el punto respectivamente. Se confirma el aumento del tamaño de eventos extremos de norte a sur, donde los valores promedio de  $H_{m0}$  van desde los 5.2 hasta los 12.9 metros.

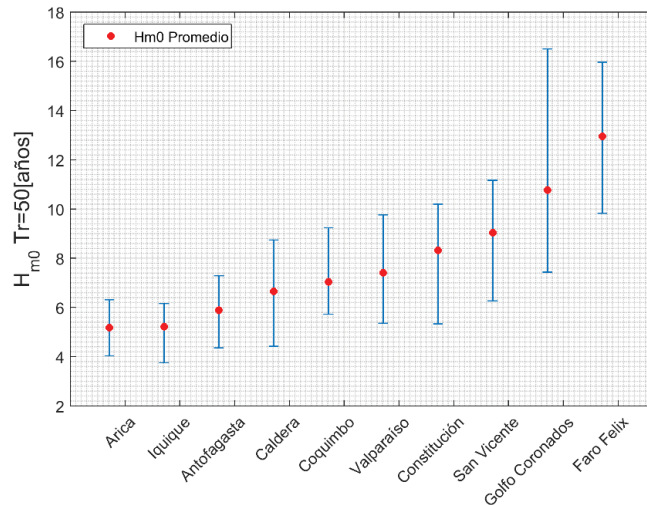


Figura 3-46: Altura promedio de tormenta entre los modelos de reanálisis de oleaje para un periodo de retorno  $T_r=50$  [años] con bandas que corresponden al mínimo y máximo valor alcanzado en las bandas de confianza.

Adicionalmente, en Valparaíso se cuenta con mayor información de boyas instrumentales recopiladas, es por ello que pudo graficarse en la Figura 3-40 la información de altura significativa proveniente de las marejadas de mayor tamaño de los últimos años correspondiente a la del 03-07-2013 y del 08-08-2015 con un  $H_{m0}$  de 6.40 [m] y 7.23 [m] respectivamente. Por lo que se puede comprobar que existe un grado de incertidumbre entre los distintos modelos para establecer la ocurrencia de cada uno de estos eventos, tal como se aprecia en la Tabla 3-5, donde por ejemplo el modelo ERA-I para una ventana de tiempo de 200 años, no lo considera un evento probable, mientras que para la primera marejada tanto los datos de la DOP como NOAA CFSR lo estiman con un retorno de 2 años, mientras que EEM con menos de un año.

Tabla 3-5: Periodo de ocurrencia de los últimos eventos extremos registrados en la costa central  $T_r$ , el 3-jul-2013 y 8-ago-2015, para las 7 bases de datos de oleaje

Modelo Numérico	Tormenta del 3-julio-2013 $Tr(H_{m0}=6.78[m])$ [años]	Tormenta del 8-agosto-2015 $Tr(H_{m0}=7.23[m])$ [años]
DOP	2	8
ERA-I	> 200	> 200
EEM	0.6	1
FUGRO	40	> 200
IFREMER	185	> 200
NOAA CFSR	2	5
NOAA WWIII	4	6

## 4. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se analizan y discuten los resultados obtenidos, comenzando por la comparación de datos medidos por boyas y satélites, donde se analiza el desempeño obtenido por cada uno de los modelos de oleaje de reanálisis para sus parámetros estadísticos y curvas de clima extremo.

### 4.1. DESEMPEÑO PARA LA ALTURA SIGNIFICATIVA ( $H_{m0}$ )

#### 4.1.1. Desempeño en la altura significativa medida por boyas

De acuerdo a los resultados obtenidos para la comparación de la altura significativa ( $H_{m0}$ ) presentada en el apartado 3.2.1 y con los valores de cada estadígrafo expuestos en los gráficos de la Figura 3-6 y Figura 3-7, se elaboró en la Tabla 4-1 una tabla comparativa del desempeño desde el mejor al peor resultado de cada estadígrafo. Se observa que la base de datos IFREMER muestra sistemáticamente un mejor ajuste en la mayoría de los parámetros estadísticos estudiado, adicionalmente se destacan los buenos desempeños del modelo de reanálisis NOAA CFSR que se encuentra en los primeros lugares. En contraste, se tiene a EEM como la base con el peor desempeño en la totalidad de los estadígrafos utilizados para la comparación.

Tabla 4-1: Ranking para la comparación de modelos de reanálisis de oleaje con la altura significativa de boyas ( $H_{m0}$ ).

	RMSE	BIAS	SS	MAE	SI	$R^2$
1°	IFREMER	ERA-I	IFREMER	IFREMER	NOAA CFSR	IFREMER
2°	NOAA CFSR	IFREMER	NOAA CFSR	NOAA CFSR	IFREMER	NOAA CFSR
3°	ERA-I	NOAA CFSR	ERA-I	ERA-I	ERA-I	FUGRO
4°	NOAA WWIII	NOAA WWIII	NOAA WWIII	NOAA WWIII	NOAA WWIII	ERA-I
5°	FUGRO	FUGRO	FUGRO	FUGRO	FUGRO	NOAA WWIII
6°	EEM	EEM	EEM	EEM	EEM	EEM

#### 4.1.2. Desempeño en altimetría satelital para clima medio

Utilizando los resultados expuestos para el desempeño la altura significativa satelital en clima medio presentado en el apartado 3.3.1 a través de las gráfica de la Figura 3-21 y Figura 3-22, se generó en la Tabla 4-2 un listado desde el mejor al peor desempeño de todas las bases de datos. Se tiene que el modelo de reanálisis de oleaje IFREMER alcanza el mejor desempeño en la mayoría de estadísticos empleados, se destacan de manera adicional los resultados de FUGRO, pero como ya se ha mencionado con anterioridad esta última solo pudo ser comparada en una

cantidad restringida de nodos. Por el contrario, el peor desempeño corresponde a EEM para la mayoría de estadígrafos.

Tabla 4-2: Ranking para la comparación de modelos de reanálisis de oleaje con altimetría satelital de clima medio.

	RMSE	BIAS	SS	MAE	SI	$R^2$
1°	IFREMER	IFREMER	IFREMER	IFREMER	IFREMER	FUGRO
2°	FUGRO	FUGRO	FUGRO	FUGRO	FUGRO	IFREMER
3°	ERA-I	NOAA WWIII	ERA-I	ERA-I	ERA-I	NOAA CFSR
4°	NOAA CFSR	ERA-I	NOAA WWIII	NOAA CFSR	NOAA CFSR	ERA-I
5°	NOAA WWIII	EEM	NOAA CFSR	NOAA WWIII	NOAA WWIII	NOAA WWIII
6°	EEM	NOAA CFSR	EEM	EEM	EEM	EEM

#### 4.1.3. Desempeño en la altimetría satelital de tormentas

Mediante los resultados expuestos en el punto 3.3.2 para la altura satelital de clima extremo con los valores expuestos en las gráficas de la Figura 3-24 y Figura 3-25, se generó la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** que ordena el desempeño de cada uno de los modelos de reanálisis de oleaje desde el mejor al peor. Se obtuvo que la base de datos de oleaje FUGRO es la de mejor desempeño, sin embargo, esta base solo pudo ser evaluada en una cantidad limitada de nodos, siendo NOAA CFSR el modelo que pudo ser evaluado en más nodos y que obtiene el segundo lugar de desempeño. Por el contrario, los desempeños más bajos para estimar las alturas extremas satelitales fueron de NOAA WWIII y ERA-I, una de las razones de esta situación es la subestimación recurrente de estas bases de datos, que se evidencia de mayor manera al analizar datos de clima extremo.

Tabla 4-3: Ranking para la comparación de modelos de reanálisis de oleaje con altimetría satelital de clima extremo.

	RMSE	BIAS	SS	MAE	SI	$r^2$
1°	FUGRO	NOAA CFSR	FUGRO	FUGRO	FUGRO	FUGRO
2°	NOAA CFSR	FUGRO	NOAA CFSR	NOAA CFSR	NOAA CFSR	IFREMER
3°	IFREMER	EEM	IFREMER	IFREMER	IFREMER	ERA-I
4°	EEM	IFREMER	EEM	EEM	EEM	NOAA CFSR
5°	ERA-I	NOAA WWIII	ERA-I	NOAA WWIII	ERA-I	EEM
6°	NOAA WWIII	ERA-I	NOAA WWIII	ERA-I	NOAA WWIII	NOAA WWIII

En general existe una subestimación por parte de la mayoría de bases de datos para el clima extremo satelital, salvo por NOAA CFSR. El resto de bases tiene BIAS con valores negativos. Además se encontraron importantes diferencias en la estimación de datos con respecto a la ubicación, donde la subestimación aumenta en magnitud desde el norte al sur.

Es esperable el buen desempeño de FUGRO pues realizan un proceso de eliminación de errores sistemáticos de la base de datos original (Barstow et al., 2009), esta es una de las razones por las que alcanza desempeños tan altos tanto en la comparación de  $H_{m0}$  de boyas como de satélites.

Varios modelos de reanálisis de oleaje son validados para la estadística completa no así en específico para el clima extremo. Mientras que otras como IFREMER desarrollaron una calibración y validación específica para cada metro de ola Rasche et al. (2013), siendo esta la razón del buen desempeño alcanzado por esta base tanto en clima medio como para el clima extremo.

Por lo tanto, se puede inferir que una buena calibración de altura significativa para clima medio, no implica necesariamente un buen desempeño para clima extremo, más aun considerando que siempre será una pequeña muestra de la población de datos.

#### **4.1.4. Diferencias entre la altimetría satelital y la altura medida por boyas**

Distintos autores han realizado estudios de la comparación de la altura significativa entre las mediciones de boyas y las mediciones satelitales, registrando diferencias importantes entre ambas mediciones.

Beyá et al. (2017) utilizó las mismas boyas de este estudio y para evaluar la calidad del ajuste se calcularon distintos estadísticos. Se detectaron diferencias importantes entre las alturas significativas satelitales y las mediciones de boya, donde identificó una tendencia a la sobrestimación de las alturas medidas por los satélites, que mostraron sesgos que se incrementan de norte a sur.

Otros autores también han utilizado metodologías similares a este estudio para la comparación entre boyas y satélites. Caballero et al. (2014) utilizó mediciones del satélite ENVISAT RA-2 (COASTALT) y las comparó con información de boya de varios nodos de la costa suroeste de la Península Ibérica, obtuvo BIAS positivos y menores a 1 [m] para puntos ubicados a más de 50 km de la costa suroeste de la Península Ibérica. Mientras que Melo dos Passos et al. (2013) contrapuso datos de los satélites Jason-2 y ENVISAT con una boya de la NDBC en el océano Pacífico norte, dando como resultados BIAS negativos y positivos,  $R^2$  superior a 0.9 para ambos satélites y RMSE de 0.16 [m].

Si bien no es objetivo de este estudio encontrar la razón de esta diferencia, se debe tener en consideración ya que puede terminar afectando la evaluación de los modelos de reanálisis, dependiendo del instrumento utilizado.

#### **4.1.5. Incertidumbre de resultados de la altura significativa ( $H_{m0}$ ) para el método Máximo Sobre el Umbral (POT)**

Existe una tendencia en todas las bases de datos de ir aumentando el tamaño de tormentas calculado desde Arica hasta el Faro Felix. Esto tiene relación con la cercanía de la zona de generación de oleaje hacia las latitudes mayores.

EEM es la base de datos de oleaje que tiene tormentas de mayor altura en todo el país, salvo en algunos casos que es superada por NOAA CFSR o IFREMER. Se observó también que hacia las zonas más australes, como en Golfo Coronados y Faro Felix, varios modelos aumentan en gran medida el tamaño de sus tormentas extremas. Por otra parte, ERA-I obtuvo los valores más bajos de en la mayoría de la costa.

La base de datos DOP obtuvo resultados más cercanos al promedio, alejándose de los extremos superiores o inferiores, como ventaja mostró también estimar al menos como evento probable las marejadas más grandes de los últimos años de donde se tiene registro, a diferencia de otros modelos de reanálisis que ni siquiera lo consideran, según se observó en la Tabla 3-5.

Debido a que las curvas de clima extremo no pudieron ser comparadas con mediciones reales al carecer de la información instrumental de largo periodos de medición en tiempo y en el espacio, no se pudo establecer qué modelo de reanálisis de oleaje muestra un mejor ajuste a la realidad, sin embargo, como recomendación se podría optar para diseños de gran importancia utilizar datos de diseño a través bases de datos como EEM o NOAA CFSR de tal manera de asegurar una cota suficientemente alta, mientras que para obras de menor importancia modelos de reanálisis como ERA-I, obteniendo así alturas menores.

#### **4.2. DESEMPEÑO PARA LA DIRECCIÓN MEDIA ( $D_m$ )**

Mediante los resultados de la dirección media ( $D_m$ ) expuestos en el apartado 3.2.2 a través de las gráficas de la Figura 3-9 a la Figura 3-11, IFREMER mostró el mejor ajuste en los cuatro parámetros estadísticos, mientras que EEM tuvo el desempeño más bajo. Por su parte, ERA-I y FUGRO tienen resultados similares para cada estadístico compartiendo así el 2° y 3° lugar en desempeño, según se muestra en la Tabla 4-4, el ranking del desempeño de cada uno de los modelos de oleaje para la dirección media de oleaje.

Tabla 4-4: Ranking para la comparación de modelos de reanálisis de oleaje con la dirección media de boyas ( $D_m$ ).

	RMSE	SS	MAE	$R_c^2$
1°	IFREMER	IFREMER	IFREMER	IFREMER
2°	ERA-I	ERA-I	FUGRO	FUGRO
3°	FUGRO	FUGRO	ERA-I	ERA-I
4°	EEM	EEM	EEM	EEM

### 4.3. DESEMPEÑO PARA LA DIRECCIÓN PICO ( $D_p$ )

En la comparación de la dirección pico ( $D_p$ ) presentada en el ítem 3.2.3 y cuyos resultados fueron expuestos entre la Figura 3-12 y la

Figura 3-14, se tuvo poca disponibilidad de información de esta variable donde solo se pudo analizar en una cantidad limitada de bases de datos y localidades, mostrando una baja calidad en los datos de los modelos de reanálisis de oleaje en la estimación de este parámetro con valores de no alcanzan más de  $R_c^2 = 0.31$ , valores de RMSE mínimos de 18.13[°], y MAE de 12.01[°], además se tiene en sus gráficos formas que no asemejan a la recta, más bien a nubes de datos con poca correlación.

Si bien los resultados no son los esperados, pues muestran calidades bastante inferiores al resto de otros parámetros, se presenta en la Tabla 4-5 el ranking por desempeño de cada modelo de oleaje de reanálisis en cada estadígrafo.

Tabla 4-5: Ranking para la comparación de modelos de reanálisis de oleaje con la dirección pico de boyas ( $D_p$ ).

	RMSE	BIAS	SS	$R_c^2$
1°	FUGRO	NOAA WWIII	FUGRO	NOAA WWIII
2°	IFREMER	IFREMER	IFREMER	FUGRO
3°	NOAA WWIII	FUGRO	NOAA WWIII	NOAA CFSR
4°	NOAA CFSR	NOAA CFSR	NOAA CFSR	IFREMER

### 4.4. DESEMPEÑO PARA EL PERIODO MEDIO ( $T_m$ )

A través de los resultados para la comparación para el periodo medio ( $T_m$ ) desarrollado en el ítem 3.2.4 y mostrados a través de la Figura 3-15 a la Figura 3-17, mostró que FUGRO es el modelo de reanálisis de oleaje con mejor desempeño. Por el contrario, los peores ajustes se obtuvieron en IFREMER, evidenciado en al menos cinco de los seis estadísticos empleados. En la

Tabla 4-6 se presenta el ranking de acuerdo al desempeño por estadístico de la totalidad de bases de datos de oleaje analizadas.

Tabla 4-6: Ranking para la comparación de modelos de reanálisis de oleaje con el periodo medio ( $T_m$ ) de boyas.

	RMSE	BIAS	SS	MAE	SI	$R^2$
1°	FUGRO	FUGRO	FUGRO	FUGRO	FUGRO	FUGRO
2°	EEM	EEM	EEM	EEM	EEM	ERA-I
3°	ERA-I	ERA-I	ERA-I	ERA-I	ERA-I	IFREMER
4°	IFREMER	IFREMER	IFREMER	IFREMER	IFREMER	EEM

#### 4.5. DESEMPEÑO PARA EL PERIODO PICO ( $T_p$ )

La comparación para el periodo pico ( $T_p$ ) que se desarrolló en el ítem 3.2.5 y que exhibe sus resultados a través de la Figura 3-18 a la Figura 3-19 mostró que ningún modelo de oleaje obtuvo un ajuste satisfactorio para este parámetro de oleaje, que complementados los con gráficos de dispersión expuestos en el Anexo F, mostraron una baja correlación de la información de los modelos de oleaje de reanálisis en contra de las medidas por boyas.

Otros autores han obtenido rendimientos similares para las comparaciones del periodo pico, como mostró Bidlot et al. (2002) que obtuvo con gráficas de dispersión similares a las elaboradas en este trabajo tal como se aprecia en la Figura 4-1 para la base de datos ECMWF, se aprecian rectas paralelas a las abscisas que aumentan su distancia de una manera exponencial.

Pese al bajo desempeño y tras mostrar que ninguna base de datos de oleaje tuvo una buena calidad en la información del periodo pico, se presenta el ranking del desempeño para cada estadístico en la Tabla 4-7.

Tabla 4-7: Ranking para la comparación de modelos de reanálisis de oleaje con el periodo pico ( $T_p$ ) de boyas.

	RMSE	BIAS	SS	MAE	SI	$R^2$
1°	FUGRO	FUGRO	FUGRO	FUGRO	FUGRO	FUGRO
2°	NOAA WWIII	NOAA WWIII	IFREMER	NOAA CFSR	IFREMER	NOAA WWIII
3°	NOAA CFSR	NOAA CFSR	NOAA CFSR	IFREMER	NOAA CFSR	IFREMER
4°	IFREMER	IFREMER	NOAA WWIII	NOAA WWIII	NOAA WWIII	NOAA CFSR

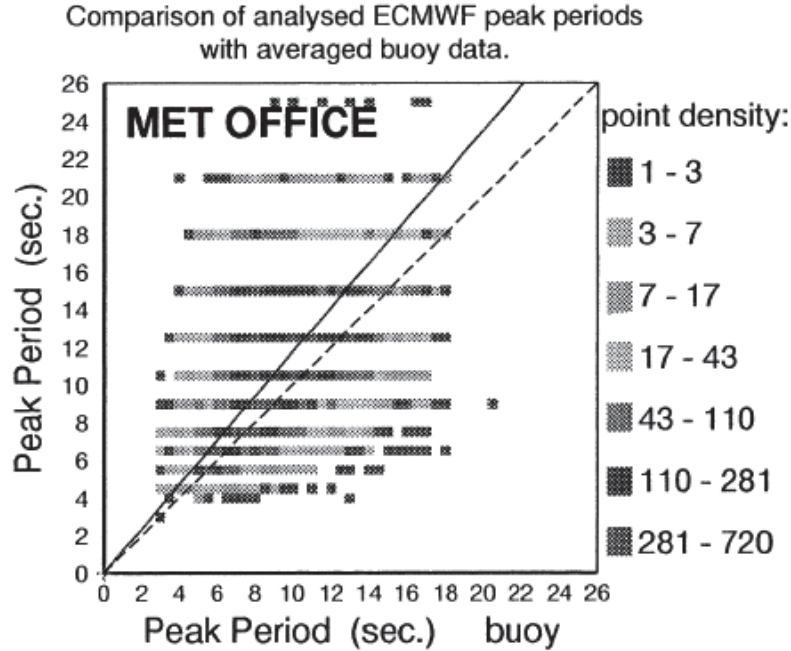


Figura 4-1: Comparación de periodo pico versus datos de boya, para un modelo implementado entre diciembre de 1996 – 1999 (Bidlot et al., 2002).

#### 4.6. ATLAS DE OLEAJE DE CHILE

Esta memoria de título forma parte del proyecto Atlas de Oleaje de Chile (Beyá et al., 2016), como un trabajo que marcara un antecedente de la información que fuese recopilada para la generación del primer Atlas de Oleaje de Chile de forma gratuita, se destacan los aportes más relevantes para el estudio mencionado.

El primero fue recopilar todos los modelos de oleaje de reanálisis existentes para la costa de Chile para establecer sus ajustes en cada parámetro de oleaje, de esta manera al establecer el desempeño de las bases existentes (Hidalgo, 2016) fue optimizando los ajustes de la base generada, y así elaborar una mejor que las existentes. Para mostrar esto se presentan a continuación dos tablas: -La primera es la Tabla 4-8 que muestra un resumen el ajuste del estadístico  $R^2$  para cada parámetro estadístico en las 5 boyas de la base de datos AOC1 (Beyá et al., 2017), -La segunda Tabla 4-9, corresponde al promedio del  $R^2$  de cada boya por parámetro, exceptuando los valores de EEM. Es así como se tuvo que los ajustes de AOC1 superan a  $\overline{R^2}$  en 11 de las 13 comparaciones realizadas, destacando además los altos ajustes para el estadístico en la  $H_{m0}$ , que van desde 0.73 hasta 0.97.

El bajo desempeño de  $D_p$  en la boya NDBC 32012 no es una situación particular de AOC1, más bien corresponde a una situación que ya fue observada al analizar los resultados del resto de bases de datos de oleaje, con bajos desempeños en general.

Tabla 4-8: Valor de  $R^2$  de los parámetros estadísticos  $H_{m0}$ ,  $T_m$ ,  $D_m$  y  $D_p$  de la base de datos AOC1 del Atlas de Oleaje (Beyá et al., 2017)

		$R^2(H_{m0})$	$R^2(T_m)$	$R^2(D_m)$	$R^2(D_p)$
Boyas	NDBC 32012	0.84	0.77		0
	SHOA1	0.74		0.63	
	SHOA2	0.73	0.57	0.63	
	C-INNOVA1	0.77	0.66	0.47	
	C-INNOVA2	0.97	0.64	0.67	

Tabla 4-9: Valor de  $R^2$  promedio ( $\overline{R^2}$ ) por boya de cada uno de los parámetros estadísticos  $H_{m0}$ ,  $T_m$ ,  $D_m$  y  $D_p$  de los modelos de reanálisis de oleaje analizados.

		$\overline{R^2(H_{m0})}$	$\overline{R^2(T_m)}$	$\overline{R^2(D_m)}$	$\overline{R^2(D_p)}$
Boyas	NDBC 32012	0.76	0.62		0.22
	SHOA1	0.60		0.60	
	SHOA2	0.56	0.50	0.55	
	C-INNOVA1	0.74	0.53	0.51	0.14
	C-INNOVA2	0.67	0.47	0.76	0.29

El segundo aporte corresponde a lo desarrollado en el punto 3.1, donde se estableció el radio de influencia de los nodos para la información y de esta manera establecer la distancia entre nodos con que fue presentado el Atlas de Oleaje, el cual determinó la presentación de 19 nodos separados, cada 2 grados de latitud, donde la recomendación de este trabajo fue de 2.2 [°] según se mostró en la Tabla 3-2.

## CONCLUSIONES

Al evaluar distintas bases de datos es importante revisar los diferentes estadígrafos para lograr tener una visión más completa de los desempeños, ya que todos son complementarios y aportan en la identificación del comportamiento del error.

Se logró estimar el valor del radio de influencia de los datos, que si bien dependían del modelo de reanálisis de oleaje y su latitud, en el peor de los casos en promedio se obtuvo un valor de  $2^\circ$  de separación, lo que corresponden a más de 220 kms.

En la comparación con boyas se estableció a través de la evaluación de parámetros estadísticos que la base de datos con mejor ajuste para la altura significativa y dirección media corresponde a IFREMER. A su vez FUGRO es el modelo de reanálisis con el mejor ajuste en valores de periodo medio. Mientras que los resultados obtenidos para la dirección pico y periodo pico, mostraron pocas fuentes de comparación y resultados con ajustes bastante bajos, por lo cual no se pudo establecer un modelo que fuese superior al resto.

La información satelital de clima medio mostró que los ajustes tienden a mejorar de manera significativa de norte hacia el sur, siendo IFREMER y FUGRO las bases de dato con mejor, sin embargo, esta última solo pudo compararse en una cantidad bastante limitada de nodos. Mientras que el análisis de datos de tormenta satelital mostró bajos desempeños los modelos con resultados de mejor ajuste son: FUGRO, IFREMER y NOAA CFSR, mientras que ERA-I fue el que tuvo los valores más bajos de tamaño de tormentas a lo largo de la costa de Chile.

En el estudio análisis de oleaje extremo se logró identificar una gran variación en la estimación de los periodos de retorno de ocurrencia de marejadas extremas en una amplia zona de localidades frente a la costa de Chile. Por otro lado, existen pocas mediciones de eventos extremos, la extensión temporal de mediciones de boya es restringida en duración, tiene poca cobertura espacial y segmentada, mientras que la información satelital es discontinua y no permite evaluar la evolución del oleaje en un punto.

Las bases de datos de oleaje presentan, en general, ajustes de menor calidad para el oleaje de clima extremo que para el clima de oleaje operacional, por lo que es imprescindible mejorar la precisión que estos modelos tienen para los eventos más energéticos en Chile.

Al igual que lo realizan otros países, sería importante para Chile contar con una red de medición de oleaje continua de fácil y libre acceso. Al imaginar un avance de este tipo, y al tener una extensión lo suficientemente robusta en espacio y tiempo, se podrían generar las curvas reales

de altura significativa versus periodo de retorno, lo cual sería un avance que eliminaría la incertidumbre que existe actualmente en cada uno de los modelos de oleaje.

## REFERENCIAS

Ardhuin, F., Hanafin, J., Quilfen, Y., Chapron, B., Queffelec, P., Obrebski, M., 2011. Calibration of the “IOWAGA” global wave hindcast (1991-2011) using ECMWF and CFSR Winds. In: 12<sup>th</sup> International Workshop in Wave Hindcasting and Forecasting, Kohala Coast, Hawai’I, pp 1-13.

Attema, E., Francis, R., 1991. ERS-1 Calibration and Validation, pp. 80-87 ESA Bulletin No. 65 Feb, 1991.

AVISO. 2015. Satellite Altimetry Data. [<http://www.aviso.altimetry.fr/es/techniques/altimetria/principio.html>]. Revisado: 3 de Septiembre de 2015.

Baird & Associates Coastal Engineers. 2015. Olas del Pacífico - Validación [<http://www.olasdelpacifico.com/validacion.html>]. Revisado: 26 de julio de 2015.

Barstow, S., G. Mork, L., Lonseth & J. Mathisen. 2009. WoldWaves wave energy resource assessments from the deep ocean to the coast. Proceedigs of the 8<sup>th</sup> European Wave and Tidal Energy Conference, Uppsala, pp. 151-152.

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., Aguirre, C., Valdivia, J., Parra, C., Méndez, L., Contretas, F., Winckler, P., Molina, M., 2016. Atlas de Oleaje de Chile. Primera Edición. Escuela de Ingeniería Civil Oceánica – Universidad de Valparaíso, Valparaíso, Chile.

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H. y Winckler, P., 2017. Generation and validation of the Chile Wave Atlas database. Elsevier Ltd. Ocean Modelling. pp 16-32.

Bidlot, J-R., Holmes D., Wittmann P., Lalbeharry, R., Chen H., 2002. Intercomparison of the performance of operational ocean wave forecasting system with buoy data. Weather Forecasting 17: 287-310.

Caballero I., Gómez-Enri J., Cipollini P. y Navarro G. 2014. “Validation of High Spatial Resolution Wave Data From Envisat RA-2 Altimeter in the Gulf of Cádiz”. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, vol. 11, no. 1.

Chawla, A., D. Spindler & H. Tolman. 2011. WAVEWATCH III ® Hindcast with re-analysis winds. Initial report on model setup. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch. NOAA Tech. Note 291.

Chawla, A., D. Spindler & H. Tolman. 2012. 30 Year Wave Hindcasts using WAVEWATCH III ® with CFSR winds, Phase 1. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch. NOAA Tech. Note 302.

Cruz, J., M. Thomson & E. Stavroliia. 2009. Preliminary site selection Chilean marine energy resources. Report by Garrad-Hassan & Partners Ltd. for the Inter-American Development Bank, Document number 1005/BR/02 Issue B: 8-14pp.

Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S. 2011. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 553-597 pp.

DGF, Departamento de Geofísica – Universidad de Chile. 2013. Explorador de Energías Marinas Base de datos de oleaje. [<http://walker.dgf.uchile.cl/Explorador/Marino/>] Revisado: Agosto de 2014

DOP. Dirección de Obras Portuarias. 2015. Climas de oleaje utilizado en proyectos de la Dirección de Obras Portuarias – Chile. 1, (Archivo de datos enviado vía e-mail el 24 de abril de 2015). Ministerio de Obras Públicas, MOP, Santiago.

Eakins, B.W. and G.F. Sharman. 2010. Volumes of the World's Oceans from ETOPO1, NOAA National Geophysical Data Center, Boulder.

Fisher, N.I. and A.J. Lee. 1983. A correlation coefficient for circular data. Reino Unido. Biometrika Trust. 70(2):327-332.

FUGRO-OCEANOR. World Wide Wave Statistics (WWWS) [<http://www.oceanor.no/Services/WWWS>]. Revisado: Septiembre de 2016.

Francis, C.R., Graf, G., Edwards, P.G., McCaig, M., McCarthy, C., Lefebvre, A., Pieper, B., Pouvreau, P., Wall, R., Weschler, F., Louet, J., Schumann, W., Zobl, R., August. 1995. The ERS-2 spacecraft and its payload. ESA Bull. 83, pp 13-31.

Gallagher, E. L., S. Elgar, and R. T. Guza. 1998. Observations of sand bar evolution on a natural beach, *J. Geophys. Res.*, 103 (C2), 3203-3215.

Gallardo, A. 2015. Evaluación del Clima de Oleaje en el sector de Curaumilla, Región de Valparaíso. Mediante una Metodología Espectral Simplificada, Apoyada con el modelo Stwave 5.0. Universidad de Valparaíso. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico.

Gallardo, A., Valdivia, J. & Beyá, J., 2017. Incertidumbre en los valores extremos del oleaje en Chile. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 45(4): 649-658, 2017. DOI: 10.3856/vol45-issue4-fulltext-2

García, M., 2013. Análisis Comparativo de Diferentes Metodologías para el Cálculo de Corrientes Litorales Generadas por el Oleaje. Universidad da Coruña. Proyecto Técnico. pp 78.

Gelci, R., H. Cazalé & J. Vassal. 1957. Prévission de la houle. La méthode des densités spectroangulaires. *Bull. Inform. Comité Océanogr. Etud. Côtes*, 9. pp. 416-435.

Goda, Y. 2000. Random seas and design of maritime structures. (ed. 2). Yokohama National University. Yokohama, Japón.

Goda Y, 1988. "Numerical investigations on plotting formulas and confidence intervals of return values in extreme statistics" Rept. Port and Harbour Res. Inst. 27 (1). Pp. 31-92.

Hanafin, J., Quilfen, Y., Ardhuin, F., Vandemark, D., Chapron, B., Feng, H., Sienkiewicz, J., Queffeuilou, P., Obrebski, M., Chapron, B., Reul, N., Collard, F., Comand, D., de Azevedo, E. B., Stutzmann, E., 2012. Phenomenal sea states and swell radiation: a comprehensive analysis of the 12-16 February 2011 North Atlantic storms. *Bull. Amer. Meterol. Soc.* In press.

Hasselmann, S., Hasselmann, K., Bauer, E., Janssen, P., Komen, G., and P. Lionello. 1988. The WAM model – a third generation ocean wave prediction model, *Journal of Physical Oceanography*. 18. pp. 1775-1819.

Hauser, R. 2012. Evaluación del Potencial Undimotriz de Uruguay. Universidad de la República. Tesis de maestría en Mecánica de Fluidos Aplicada. Uruguay.

Hidalgo H. 2016. Calibración y Validación del Modelo WaveWatch III v 4.18, para su aplicación en la generación de un reanálisis de oleaje en las costas de Chile. Universidad de Valparaíso. Memoria del proyecto para optar al Título de Ingeniero Civil Oceánico.

Holthuijsen, L. H. 2007, Waves in oceanic and coastal waters, Cambridge University Press.

IOWAGA. [<http://wwz.ifremer.fr/iowaga/Products>] Revisado en Marzo de 2015.

ISO 2394. 1998. General principles on reliability for structures (3th ed.).

Jacob, D., Podzun, R., 1997. Sensitivity studies with the regional climate model REMO. Meteorol. Atmos. Phys. 63. pp 119-129.

Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L. & Joseph D. 1996. The NCEP/NCAR 40-year Reanalysis project. Bulletin of the American Meteorological Society. pp 437-471.

Lambin, J., Morrow, R., Fu, L.-L., Willis, J.K., Bonekamp, H., Lillibridge, J., Perbos, J., Zauche, G., Vaze, P., Bannoura, W., Parisot, F., Thouvenot, E., Coutin-Faye, S., Lindstrom, E., Mignogno, M., 2010. The PSTM/Jason-2 mission. Marine Geodesy 33 (suppl. 1), 4-25 OSTM/Jason-2.

Losada, I., Vidal, C., Méndez, F., Mínguez, R., Requejo, S., Camus, P., Tomás, A., Menéndez, M., Izaguirre, C., Espejo, A., González, B., Kakeh, N., Fernández, F. & Felipe M. 2011. Evaluación del potencial de la energía de olas. Instituto de Hidráulica Ambiental IH Cantabria. Madrid. España.

Louet J., 2001. The Envisat Mission and System, ESA Bulletin No. 106, Junio 2001, pp 11-25.

Lucero, F. 2015. Caracterización de energía del oleaje utilizando selección de climas de oleaje y métodos de propagación calibrados. Universidad Técnica Federico Santa María: Memoria de título y tesis de grado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil y al grado de Magíster en Ciencias de la Ingeniería Civil.

Ménard, Y., Guillaume, A., Brossier, C., Minster, J.-F., Mongnard, N., Arnault, S., Ramamonjariisoa, F., Merle, J., Lago, B., Casse, V., 1991. Geophysical Validation of

TOPEX/Poseidon Altimetry products. TOPEX/Poseidon Science Investigations Plan. National Aeronautics and Space Administration, Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, pp. 82-88.

Ménard, Y., Fu, L.-L., Escudier, P., Parisot, F., Perbos, J., Vicent, P., Desai, S., Haines, B., Kunstmann, G., 2003. The Jason-1 mission special issue: Jason-1 calibration/validation. *Marine Geodesy* 26 (3-4), 131-146.

Melo dos Passos G. C., Violante-Carvalho N., Ferreire Pinho U., Pereira Cabral A. y Ostritz F. (2013). "Validation of Jason-2 and Envisat Wind Speed and Significant Wave Height Data in The Intertropical Zone". *Revista Brasileira de Geofísica*, 31(3): 483-493.

Ministerio de Obras Públicas (MOP). 2013. Guía de Diseño, Construcción, Operación y Conservación de Obras Marítimas y Costeras. Vol 2. 13p.

Monárdez, P., H. Acuña & D. Scoot. 2008. Evaluation of the potencial of wave energy in Chile. 27<sup>th</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Artic Engineering, Estoril, Portugal, pp. 1-8.

Molina, M. 2011. Estudio no estacionario de clima medio de oleaje en la costa central de Chile. Tesis de Ingeniería Civil Oceánica, Universidad de Valparaíso, Valparaíso, 147 pp.

NDBC. National Data Buoy Center. Station 32012 - Woods Hole Stratus Wave Station. [[http://www.ndbc.noaa.gov/station\\_page.php?station=32012](http://www.ndbc.noaa.gov/station_page.php?station=32012)] Revisado en Enero de 2015.

National Oceanographic and Atmospheric Administration (NOAA). NOAA Wavewatch III (NWW3) Global wave forecast model data archive [<http://polar.ncep.noaa.gov/waves/download.shtml>] Revisado en Mayo de 2015.

ONEMI. Oficina Nacional de Emergencias Ministerio del Interior. 2015. Boletín estadístico de emergencias periodo del 01 al 31 de agosto de 2015. Oficina Nacional de Emergencias Ministerio del Interior, División de Protección Civil, Boletín N°8, Santiago, 27 pp. [<http://repositoriodigitalonemi.cl/web/bitstream/handle/2012/1735/BoletinEstad%C3%AdsticoN8Agosto2015.pdf?sequence=1>]. Revisado 02 Noviembre 2017.

Ossandón, Á. 2014. Caracterización del recurso energético del oleaje en la zona centro-sur de Chile. Universidad Técnica Federico Santa María: Memoria de título y tesis de grado como

requisito parcial para optar al título de Ingeniero Civil y al grado de Magister en Ciencias de la Ingeniería Civil.

Pilar, P., Guedes, C. & J.C. Carretero. 2008. 44-year wave hindcast for the North East Atlantic European coast. *Coastal Engineering*. pp 861-871.

Pontes M., Aguiar, R. & Oliveira, H., 2003. A Nearshore Wave Energy Atlas for Portugal. 22<sup>nd</sup> International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. June 8-12, Cancún, México.

Rascle, N., Ardhuin, F. 2013. A global wave parameter database for geophysical applications. Part 2: Model validation with improved source term parametrization. *Ocean Modelling*. October 2013, Vol. 70, pp 174-188.

Randi A., Arinaga & Kwok F. 2011. Atlas of global wave energy from 10 years of reanalysis and hindcast data. *ScienceDirect. Renewable Energy* 39 (2012). pp 49-64.

Rivillas, G., 2008. Reanálisis de oleaje para México: 1948-2007. Universidad Nacional Autónoma de México. Tesis Maestría.

Saha, S., Moorthi S., Pan H-L, Wu X., Wang J., Nadiga S., Tripp P., Kistler R., Woollen J., Behringer D., Liu H., Stokes D., Grumbine R., Gayno G., Wang J., Hou Y-T., Chuang H., Juang H-M., Sela J., Iredell M., Treadon R., Kleist D., Delst P., Keyser D., Derber J., Ek M., Meng J., Wei H., Yang R., Lord S., Dool H., Kumar A., Wang W., Long C., Chelliah M., Xue Y., Huang B., Schemm J-K, Ebisuzake W., Lin R., Xie P., Chen M., Zhou S., Higgins W., Zou C-Z, Liu Q., Chen Y., Han Y., Cucurull L., Reynolds R., Rutledge G. & Goldberg M. 2010. NCEP Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) Selected Hourly Time-Series Products, January 1979 to December 2010. [<http://dx.doi.org/10.5065/D6513W89>]. Revisado: 10 Mayo de 2015.

Ash E., Carter D. & Collard F. 2010. Satellite Wave Data Quality Report. *SatOC*. 29p.

Scott, D., D. Resio & C. Pantoja. 2002. Swell propagation and nearshore wave Climate. [[http://chl.erdc.usace.army.mil/Media/2/4/7/Scott\\_Resio\\_Pantoja.pdf](http://chl.erdc.usace.army.mil/Media/2/4/7/Scott_Resio_Pantoja.pdf)]. Revisado: 1 de Agosto 2015.

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). 2005. Pub 3201. Instrucciones oceanográficas N°1, Especificaciones técnicas para mediciones y análisis oceanográficos, Valparaíso. 30p.

Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA). 2018. Misión y Visión. [<http://www.shoa.cl/php/misionvision.php?idioma=es>]. Revisado en Septiembre de 2018.

Smith, W., and Sandwell, D. 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings, *Science*, 277, 1957-1962.

SPAWAR, 2010. Navy Geosat Follow-On (GFO) Altimetry Mission. NOAA/NESDIS/SAT Laboratory for Satellite Altimetry [[http://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/GFO/documents/GEOSAT\\_Follow-On.pdf](http://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/GFO/documents/GEOSAT_Follow-On.pdf)]. Acceso Septiembre de 2014.

Spindler, D., Chawla, A., and Tolman, H. 2011. An initial look at the CFSR Reanalysis winds for wave modeling. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch.

Thomas, Y., A. Nicolae-Lerma y B. Posada. 2012. Atlas climatológico del mar Caribe colombiano. Convenio Especial de Cooperación Colciencias – Gobernación del Magdalena – Invermar. Serie de Publicaciones especiales #25. Santa Marta. 132 páginas + CD.

Tolman, H., 2014. User Manual and System Documentation of Wavewatch III, Version 4.18. Environmental Modeling Center Marine Modeling and Analysis Branch.

Uppala, M., Kallberg, P., Simmons, A., Andrae, U., Da Costa, B., Fiorino, M., Gibson, J., Haseler, J., Hernandez, A., Kelly, G., Li X, Onogi, K., Saarinen, S., Sokka, N., Allan, R., Andersson, E., Arpe, K., Balmaseda, M., Beljaars, A., Van De Berg, L., Bidlot, J., Bormann, N., Caires S, Chevallier, F., Dethof, A., Dragosavac, M., Fisher, M., Fuentes, M., Hagermann, S., Hólm, E., Hoskins, B., Isaksen, L., Janseen, P., Jenne, R., McNally, A., Mahfouf JF, Morcrette J-J, Rayner N., Saunders, R., Simon, P., Sterl, A., Trenberth, K., Untch, A., Vasiljevic, D., Viterbo, P., Woollen, J. 2005. The ERA-40 re-analysis. *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 131: 2961-3012.

Weatherall, P., Marks., K., Jakobsson, M., Schmitt, T., Tani, S., Arndt., J., Rovere, M., Chayes., D., Ferrini., V. and Wigley, R. 2015. A new digital bathymetric model of the world's oceans, *Earth and Space Science*, 2, 331-345, doi: 10.1002/2015EA000107.

WHOI. Woods Hole Oceanographic Institution. 2000. Project Stratus. [<http://uop.whoi.edu/currentprojects/Stratus/stratus.html>]. Revisado en Septiembre de 2018.

Zar J. H. 1984. "Biostatistical analysis". Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. pp. 605-668.