

**INFORME DE CALIBRACIÓN DE LOS DATOS DE OLEAJE DE LA NOAA
CON MEDICIONES DE CAMPO**

CONTRATACIÓN DIRECTA No. 2013-CD000470-32800

**Consultoría para la medición del oleaje en Bahía Caldera con la
Fundación de la Universidad de Costa Rica para la Investigación
(FUNDEVI).**

Realizado por: IMARES-INII-UCR

Para: Dirección de Infraestructura, DMP-MOPT

Diciembre 2017

INFORME DE CALIBRACIÓN

INDICE

1.	JUSTIFICACIÓN.....	5
2.	ALCANCE.....	5
3.	INTRODUCCIÓN	7
4.	OBJETIVO	8
5.	INFORMACIÓN UTILIZADA.....	8
6.	FUENTES DE DATOS.....	9
6.1.	Equipos de medición	9
6.1.1.	AWAC.....	9
6.1.2.	Boya inercial.	11
6.1.3.	Localización del equipo de medición.....	12
6.2.	Base de datos de oleaje de la NOAA	13
6.3.	Datos instrumentales y numéricos.....	14
6.4.	Datos numéricos.....	17
7.	Calibración de los datos de simulados mediante datos instrumentales.....	19
7.1.	Metodología de calibración.....	19
7.2.	Validación.	¡Error! Marcador no definido.
8.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	33
8.1.	Conclusiones.....	33

8.2. Recomendaciones	34
9. BIBLIOGRAFÍA	35
ANEXOS I.....	36

1. JUSTIFICACIÓN

El Ministerio de Obras Públicas y Transportes (MOPT) promovió la Licitación Abreviada N° 2013LA-000000-32800 denominada “Consultoría para la medición del oleaje en Bahía Caldera con la Fundación de la Universidad de Costa Rica para la Investigación (Fundación UCR)”.

La Proveeduría institucional del MOPT mediante la resolución final N° 017-2014, manifiesta que la licitación antes mencionada se adjudica a la Fundación UCR.

Fundación UCR realiza por medio de la Unidad de Ingeniería Marítima, de Ríos y Estuarios (IMARES) los trabajos según los términos solicitados en el Cartel de Licitación.

2. ALCANCE

Tal y como se indica en los términos de referencia de la presente contratación, el Contratante solicita a IMARES realizar la calibración de los datos de oleaje pronosticados por la NOAA mediante el modelo numérico Wavewatch III (WWIII).

Para desarrollar el trabajo de calibración se recurre a los datos instrumentales medidos por un perfilador de corriente acústico (ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler, por sus siglas en inglés), durante los años entre el 2014 y 2017 en Cabo Blanco. Asimismo y debido al corto tiempo de medición de datos instrumentales, se validaron los resultados con los obtenidos por Alfaro (2017), quién utilizó datos provenientes de satélite para calibrar otra base de datos de reanálisis alternativa. Lo anterior con el fin de corroborar los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Este documento ha sido elaborado por los miembros de la Unidad de Ingeniería Marítima, de Ríos y de Estuarios:

-
- **Ing. Georges Govaere Vicarioli, Dr., Director, INII.**
 - **Ing. Henry Alfaro Chavarría, Dr., Investigador, IMARES.**
 - **Ing. Manuel Corrales González. Investigador, IMARES.**

La supervisión de este estudio ha sido efectuada por los profesionales de la Dirección de Infraestructura de la División Marítimo Portuaria del Ministerio de Obras Públicas y Transportes:

- **Ing. Diego Leal Obando, Dirección de Infraestructura**
- **Ing. Fabricio Badilla Vargas, Director**

3. INTRODUCCIÓN

Las mediciones de campo de variables como el oleaje son comúnmente empleadas como parte de la caracterización del clima marítimo en una localización concreta, sin embargo, su carácter puntual y generalmente de corta duración, hace que su aplicación se vea limitada para contar con un carácter estadístico del clima marítimo adecuado, y suficiente para su posterior explotación en cualquier estrategia de obra costera o portuaria.

Las bases de datos de oleaje obtenidas mediante técnicas de aproximación numérica y/o estadística, han cobrado especial protagonismo a lo largo de las dos últimas décadas. Estas bases de datos consisten en series continuas, homogéneas y de alta fiabilidad, que pueden llegar a aportar datos históricos y horarios.

Sin embargo, estas novedosas bases de datos no suelen abarcar las zonas costeras o litorales y a pesar de las mejoras en las herramientas numéricas, en cuanto a sus esquemas de resolución de ecuaciones y la incorporación de más variables que procuran reproducir los procesos físicos de la naturaleza, siempre se hace necesario recurrir a información instrumental ya sea para validar y/o calibrar las bases de datos de reanálisis de oleaje.

En el presente informe se describe el equipo utilizado para medir la variable del oleaje, la ubicación geográfica donde estuvo emplazado, la configuración del mismo y los parámetros medidos. Asimismo, se describe de manera general la base de datos de oleaje de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, por sus siglas en inglés) generada a partir del modelo WWIII. Se dedica, también un apartado para detallar el procedimiento empleado para calibrar los datos de la NOAA y las técnicas matemáticas utilizadas para realizar la calibración.

Por último, se incluye un apartado de recomendaciones y otro con las conclusiones más importantes acerca del trabajo realizado.

4. OBJETIVO

Calibrar el parámetro altura de ola pronosticada por la NOAA mediante el modelo de simulación WWIII en un nodo virtual frente a la entrada al golfo de Nicoya, utilizando datos recolectados por un instrumento colocado en Cabo Blanco.

5. INFORMACIÓN UTILIZADA

Para la realización del presente trabajo se utilizaron, entre otros, los siguientes datos:

Información topográfica y batimétrica:

- Carta náutica C.R. 006, 21554 denominada “Golfo de Nicoya”. 20 Ed., Junio 24, 1995. Según levantamientos realizados de 1973 a 1981 por la Dirección General de Obras Portuarias y Fluviales del MOPT.
- Batimetría y topografía de detalle frente y dentro del puerto, playa nueva y playa Caldera, realizada por la Unidad de Hidrografía de la División Marítimo Portuaria del MOPT en febrero 2013.

Información sobre la dinámica (oleaje):

- Base de datos de oleaje de la NOAA simulada mediante el modelo numérico WWIII, cuyo registro comprende los años desde 2005 hasta la actualidad (Fuente: NCEP, National Center for Environmental Prediction-National Center for Atmospheric Research).
- Registros de oleaje medidos por un instrumento tipo ADCP, modelo AWAC de la marca NORTEK.

6. FUENTES DE DATOS

El siguiente apartado describe las fuentes de datos utilizadas, tanto instrumentales y numéricas, utilizadas para lograr el objetivo de este trabajo. Primero se realiza una descripción de los equipos de medición utilizados, su configuración de medida y localización. Posteriormente se continúa con una descripción general acerca de la base de datos de la NOAA, y se finaliza con la descripción de los resultados obtenidos tanto de las mediciones en campo como los datos numéricos

6.1. Equipos de medición

6.1.1. AWAC

El AWAC es un perfilador acústico de corrientes y medidor de oleaje direccional mediante el método de seguimiento acústico de la superficie AST (Acoustic Surface Tracking), de la marca NORTEK.

El AWAC es un equipo sólido de 6.1 kg, que cuenta con cuatro haces acústicos, uno vertical y los otros tres en un ángulo de 45°. Tiene forma cilíndrica, el diámetro y la longitud son de aproximadamente 21 cm y 17.5 cm respectivamente; utiliza baterías alcalinas o de litios de 9-18 V, donde la duración depende de configuración de medición elegida y la cantidad de datos registrados. La capacidad de almacenamiento de información del equipo es de 4 GB (NORTEK AS, s.f).

El AWAC mide el oleaje por medio de una detección acústica de la superficie mediante un transductor vertical. Por medio de la función AST se determina el estado de mar y se estiman los parámetros de oleaje basados en el análisis de series temporales, lo que significa que el AWAC puede medir

directamente diferentes parámetros como altura de ola máxima del registro, promedio de las 10 mayores olas del registro y período medio de pasos ascendentes por cero (H_{max} , $H_{1/10}$, T_z respectivamente). Por medio de la combinación de la función AST y las medidas de las velocidades orbitales se puede calcular la dirección del oleaje.

La figura 1.0 muestra el AWAC y la base construida para su fijación en el fondo marino.

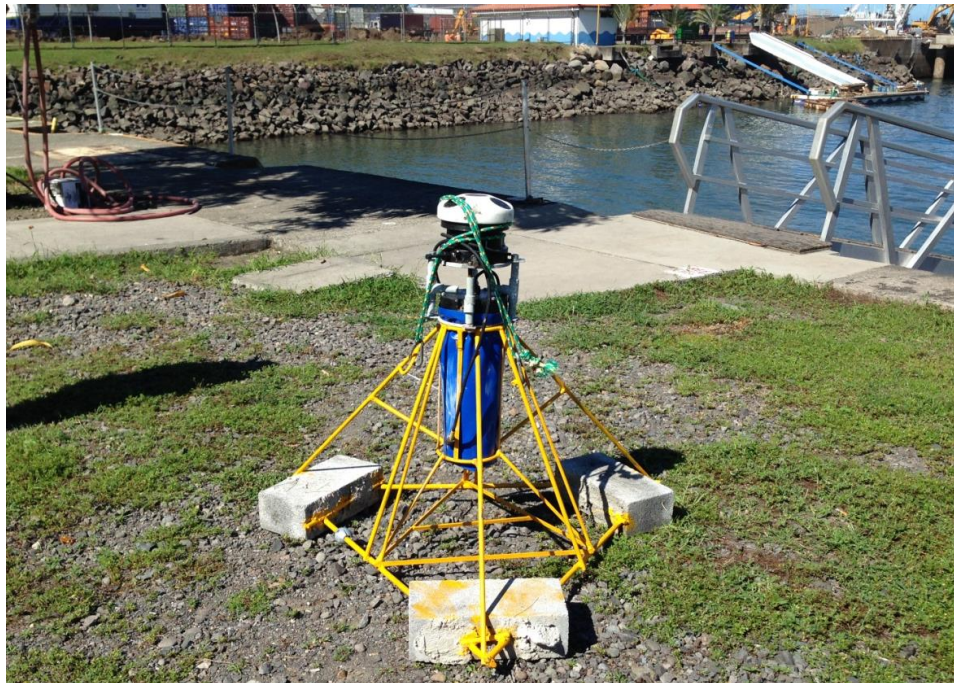


Figura 1. AWAC y base de fijación para el fondo marino.

El AWAC se ha configurado para tomar datos a 2 Hz durante aproximadamente 17 minutos, lo que equivale a 2048 datos. Esta medición es representativa de cada 3 horas, por lo que los estados de mar que se tienen han sido cada 3 horas, con información de los parámetros de oleaje de H_s , T_p , dir entre otros.

6.1.2. Boya inercial.

La boya para medición de oleaje denominada Bares de la marca HCTech, realiza las medidas inerciales mediante un giroscopio de tres ejes, un acelerómetro de tres ejes y un compás también de tres ejes, todos controlados por un microcontrolador de bajo consumo. El equipo posee una memoria interna y a su vez una tarjeta micro SD de 8 Gb, GPS y reloj interno. Los sensores se encuentran dentro de una boya de polietileno rotomoldeado y rellena de espuma de poliuretano de celda cerrada con cúpula de policarbonato. La boya es autónoma, tiene paneles solares de silicio, batería AMG 12 V de alta capacidad. Además posee una linterna autónoma de luces leds de 2 millas náuticas. La comunicación se realiza por medio de señal GPRS vía SMS, por lo que la información se tiene en tiempo real (HCTech, s.f). La figura 2 muestra la boya de medición.



Figura 2.Boya Bares escalar colocada en puerto Caldera.

La boya se ha configurado para tomar datos durante aproximadamente 10 minutos. Los estados de mar son horarios, con información de los parámetros de oleaje de H_s y T_p entre otros.

6.1.3. Localización del equipo de medición

La figura 3 muestra la ubicación y el nombre de cada uno de los equipos de medición de oleaje que se utilizaron para el presente trabajo y que se colocaron en distintos sitios frente a la costa del Pacífico de Costa Rica.

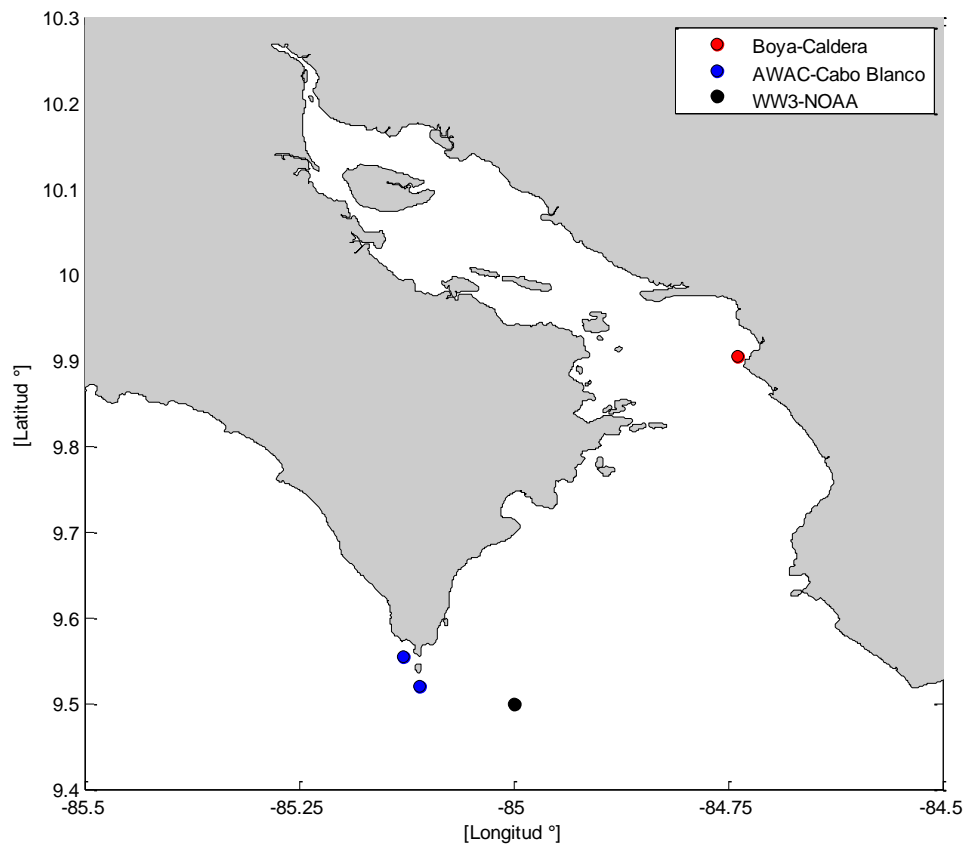


Figura 3. Ubicación de los equipos de medición de oleaje en el Golfo de Nicoya y nodo donde se localiza el reanálisis de oleaje de la NOAA.

El AWAC se colocó durante el año 2014 al Sur de la isla que se localiza frente a Cabo Blanco donde el oleaje incide de manera directa y sin obstrucciones físicas significativas (ver figura 3). El AWAC se fondeó a una profundidad de 18 m aproximadamente. El AWAC se cambió de ubicación a partir del año 2015, se trasladó más al Oeste de la posición inicial, con el fin de minimizar los efectos de reflexión de la isla y disminuir la peligrosidad de las operaciones de buceo; el equipo se fondeó a unos 16 metros de profundidad aproximadamente.

La boya inercial se colocó en bahía Caldera dentro del Golfo de Nicoya y alejado del puerto, cuyo nombre es igual al de la bahía con el propósito de medir las olas antes de que ingresen al puerto y así minimizar la influencia de los contornos y su efecto en las mediciones. Este equipo se fondeó a una profundidad de 18 m aproximadamente (ver figura 3, punto de color rojo). El cuadro 1 muestra las coordenadas donde estuvieron colocados los equipos de medición.

Cuadro 1. Coordenadas aproximadas de la ubicación de los equipos instalados.

Sistema de proyección CRTM05

Equipo	Este	Norte
AWAC (año 2014)	377.719,7	1.054.759,6
AWAC (2015- actualidad)	376.345,2	1.056.937,7
Boya inercial	419.322,4	1.095.957,1

6.2. Base de datos de oleaje de la NOAA

Para la realización de este trabajo se contó con la bases de datos generada mediante un modelo numérico de generación y propagación de oleaje, el cual utiliza información meteorológica disponible, que se denomina Wavewatch III.

A partir de diversas investigaciones y validaciones con datos medidos en campo, GIOC (2004) y Alfaro et al (2010), se ha comprobado que los datos generados por un modelo numérico de generación de oleaje como el WWIII, tiene errores inherente en el cálculo producto del método de resolución de las ecuaciones, de los datos meteorológicos que se utilizan de entrada y por la resolución espacial y temporal del modelo. Sin embargo, la gran ventaja que brindan es la extensión de las bases de datos que se generan, lo cual es muy conveniente para caracterizar el agente o variable ambiental en su condición media y extrema. No obstante, debido a los posibles errores de cálculo antes mencionados, se requiere calibrar estas bases de datos por medio de fuentes que tengan mayor fiabilidad, como es el caso de los datos instrumentales.

El objetivo de la calibración consiste en establecer relaciones entre el parámetro de altura de ola significativa (H_s) del WWIII con el correspondiente parámetro instrumental de H_s . Para ello se utilizó la base de datos de WWIII en el nodo de interés que se expone en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.3** (punto color negro), el cual cuenta con una resolución temporal de un estado de mar cada 6 horas, compuesto por el parámetro antes mencionado y los complementarios altura de ola media (H_m), período pico (T_p) y dirección media (Dir).

6.3. Datos instrumentales y numéricos

El AWAC estuvo colocado durante el 2014 en Cabo Blanco por un período de aproximadamente 9 meses, tomando la primera medición el 23 de enero del 2014 y finalizando el 28 de octubre del 2014, lo que equivale a 2223 estados de mar 3 horarios. El AWAC luego de reubicarse el sitio de medición reinició la toma de datos durante el 2015, tomando la primera medición el 18 de junio del 2015 y finalizando de manera continua hasta julio del 2016. Posteriormente se tiene un hueco en el registro de aproximadamente un mes y medio y se reanuda en setiembre del 2016 de manera continua hasta la actualidad. Los parámetros de oleaje registrados por el AWAC durante el tiempo que estuvo colocado en Cabo Blanco son H_s , T_p , T_{m02} y Dir .

La figura 4 (a) muestra las series temporales de los distintos parámetros medidos por el AWAC en los dos sitios en Cabo Blanco donde ha estado fondeado. La serie temporal del parámetro de H_s medida por el AWAC muestra dos familias de valores de altura distintos; durante el año 2014 las magnitudes de H_s son mayores a las registradas a partir del 2015, sus valores oscilaron entre los 0.75 y 6 m. Sin embargo, por la ubicación que tuvo durante el 2014 es posible que las magnitudes reportadas estén influenciadas por efectos de reflexión de la isla que amplificaron los resultados de las mediciones. A partir del 2015, posterior a la reubicación del equipo, se muestra que las magnitudes registradas son menores, oscilando entre los 0.75 y 3 m., con algunos eventos que superan los 3 m. La figura 4, asimismo, muestra el parámetro de H_s que evidencia la variación estacional que sucede a lo largo del año; los meses de menor energía suceden entre enero y abril, y los meses entre mayo y octubre son los de mayor energía, lo cual coincide temporalmente con el invierno del hemisferio austral.

El gráfico de T_p muestra resultados análogos tanto en el 2014 y posterior a este año, con valores de media de 14 s y en algunos momentos cercanos a los 20 s. Ver figura 4 (b).

La serie temporal de dirección registrada en la localización de Cabo Blanco, demuestra que el oleaje que incide proviene principalmente del tercer cuadrante, específicamente del SSW y SW. Ver figura 4 (c).

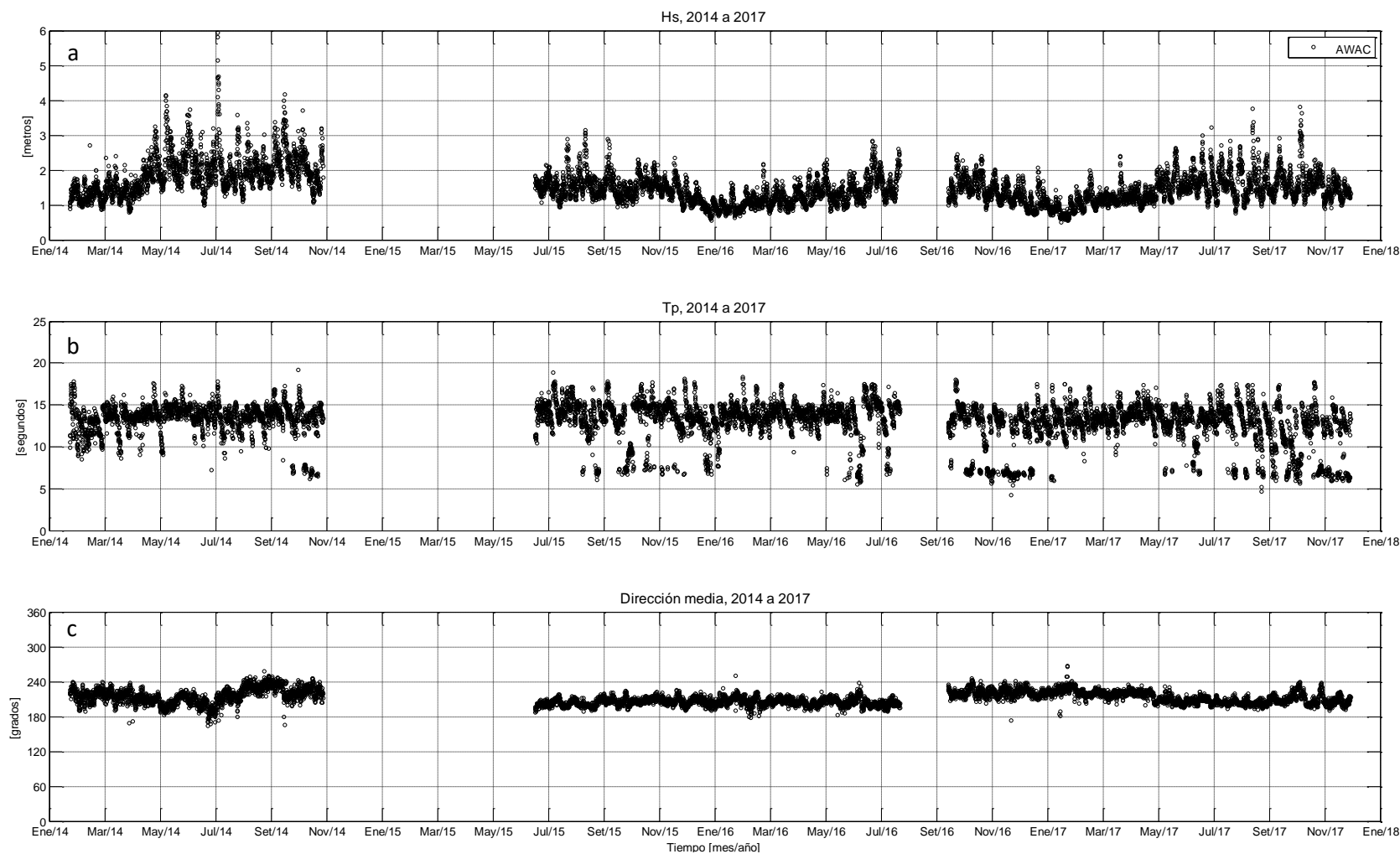


Figura 4. Series temporales de los parámetros de oleaje. (a) H_s , (b) T_p y (c) Dir , fuente: datos instrumentales.

6.4. Datos numéricos

La serie de reanálisis WWIII utilizada tiene disponible los parámetros espectrales del oleaje desde enero de 2005 hasta el mes de octubre de 2017. El punto de reanálisis de la serie WWIII en este trabajo es el mostrado en la figura 3.

La figura 5 muestran las series temporales de los parámetros espectrales de oleaje H_s , T_p , y Dir respectivamente, en el punto del reanálisis de la serie WWIII que colindan con el contorno de la malla del modelo SWAN y para el período completo del reanálisis.

La figura 5 (a) muestra la serie temporal de H_s donde se puede observar el comportamiento oscilatorio a lo largo del año y que se repite a lo largo del tiempo del registro de la base de datos. Los valores de dicho parámetro varían entre magnitudes de 0.75 y 2.5 m., con algunos eventos que superaron los 3 m que se debieron a eventos de tormentas. La figura 5 (b), presenta magnitudes y comportamiento de la variable T_p , el valor promedio es de 15 s aproximadamente a lo largo del tiempo. En cuanto a las direcciones, la figura 5 (c) presenta en término medio un mismo patrón y a lo largo del tiempo las olas vienen principalmente desde el tercer cuadrante (SSW y SW), con magnitudes entre los 180° y 240°.

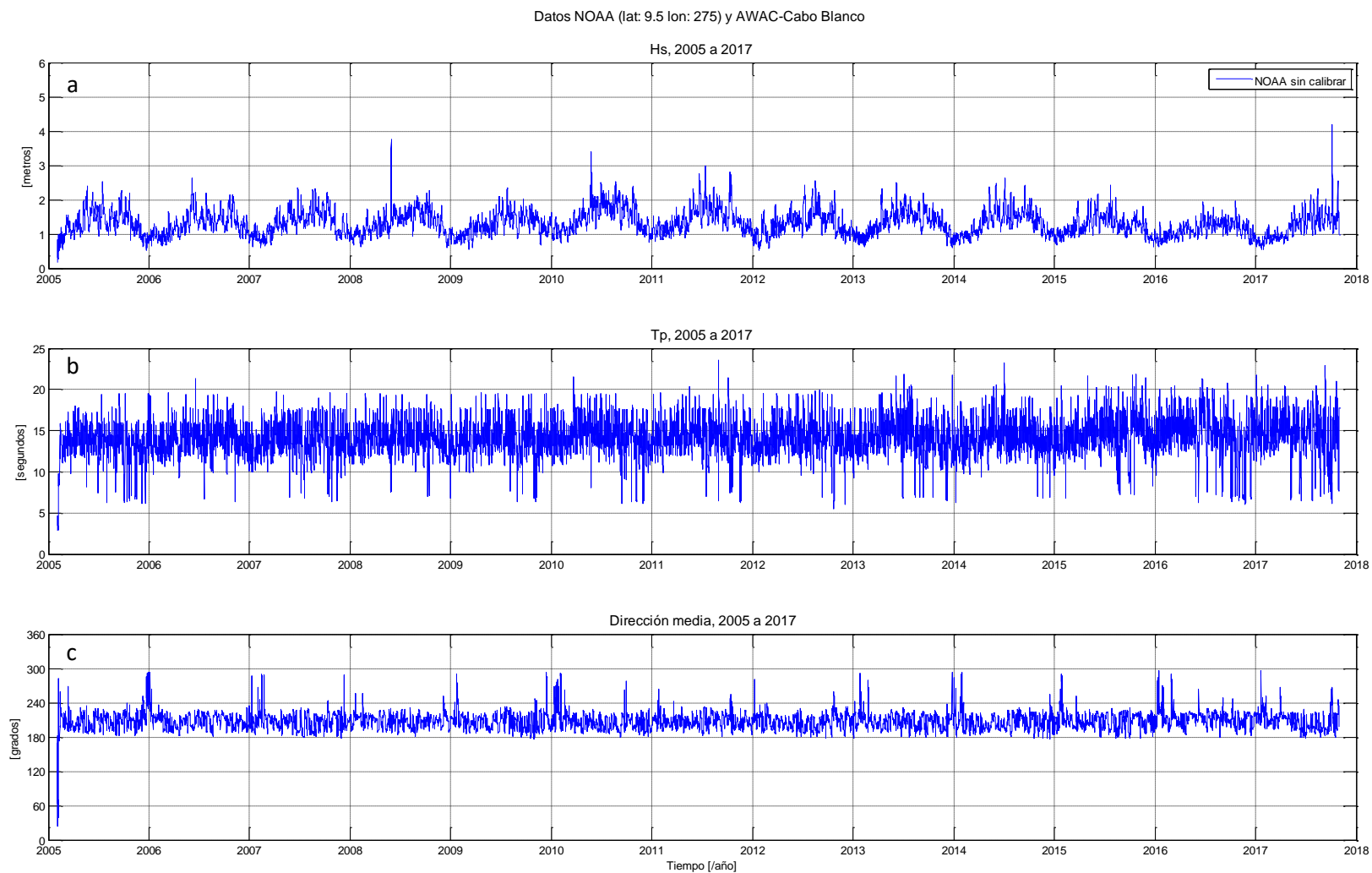


Figura 5. Series temporales de los parámetros de oleaje. (a) H_s , (b) T_p y (c) Dir , fuente serie de reanálisis WWIII.

INFORME DE CALIBRACIÓN DATOS DE OLEAJE DE LA NOAA.

7. Calibración de los datos de simulados mediante datos instrumentales

7.1. Metodología de calibración.

Una vez visto el comportamiento de los distintos parámetros de la variable del oleaje en el punto de reanálisis de la serie WWIII, se procede a comparar la magnitud de los parámetros H_s , T_p y Dir con las mediciones realizadas en Cabo Blanco. La figura 6 muestra dicha comparación; tal y como lo evidencia la serie 6 (a), los valores de H_s medidos y simulados, a pesar de no coincidir espacialmente, ambos presentan la misma evolución temporal pero con magnitudes diferentes. La serie temporal de H_s muestra claramente como los valores simulados del reanálisis presentan magnitudes menores a las medidas por el AWAC. En cuanto a los parámetros T_p y Dir , la figura 6 (b y c), muestra un comportamiento adecuado entre los datos del reanálisis y las mediciones de campo, en donde existe una coincidencia en la tendencia de ambas fuentes pero con diferencias en las magnitudes. En general, se observa la buena correlación temporal entre ambas bases de datos independientes.

La comparación hasta ahora realizada no coincide espacialmente, por lo que se procede a trasladar los valores del parámetro H_s al nodo de reanálisis del WWIII, para lo cual se afectan los datos medidos por el AWAC con un coeficiente de 0.91, el cual se obtiene a partir del trabajo realizado por Alfaro (2017). De esta forma se consigue la nueva serie denominada "AWAC Deep".

La figura 7, muestra un acercamiento para ilustrar de mejor manera la comparación en el nodo de reanálisis de la serie WWIII y "AWAC Deep" de H_s en aguas profundas. Se evidencia que ambas series siguen la misma evolución temporal pero las magnitudes de las H_s de la serie "AWAC Deep" al haber aumentado, ha generado también un aumento en relación a las magnitudes de la serie de reanálisis del WWIII, lo que implica que los valores del WWIII se aprecien aún menores.

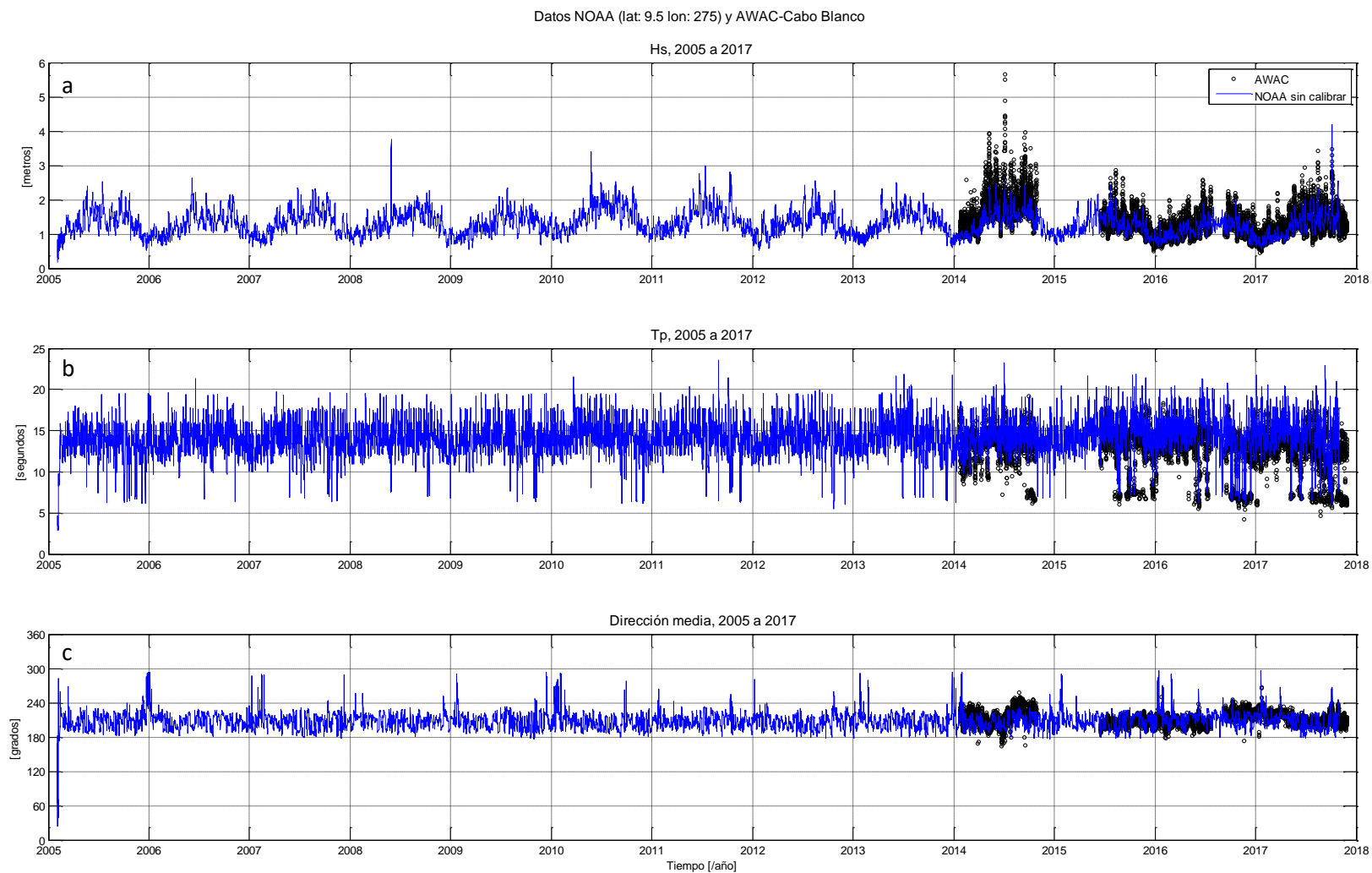


Figura 6. Series temporales de los parámetros de oleaje. (a) H_s , (b) T_p y (c) Dir , fuente reanálisis del WWIII y datos AWAC.

INFORME DE CALIBRACIÓN DATOS DE OLEAJE DE LA NOAA.

Datos NOAA y AWAC (lat: 9.5 lon: 275)

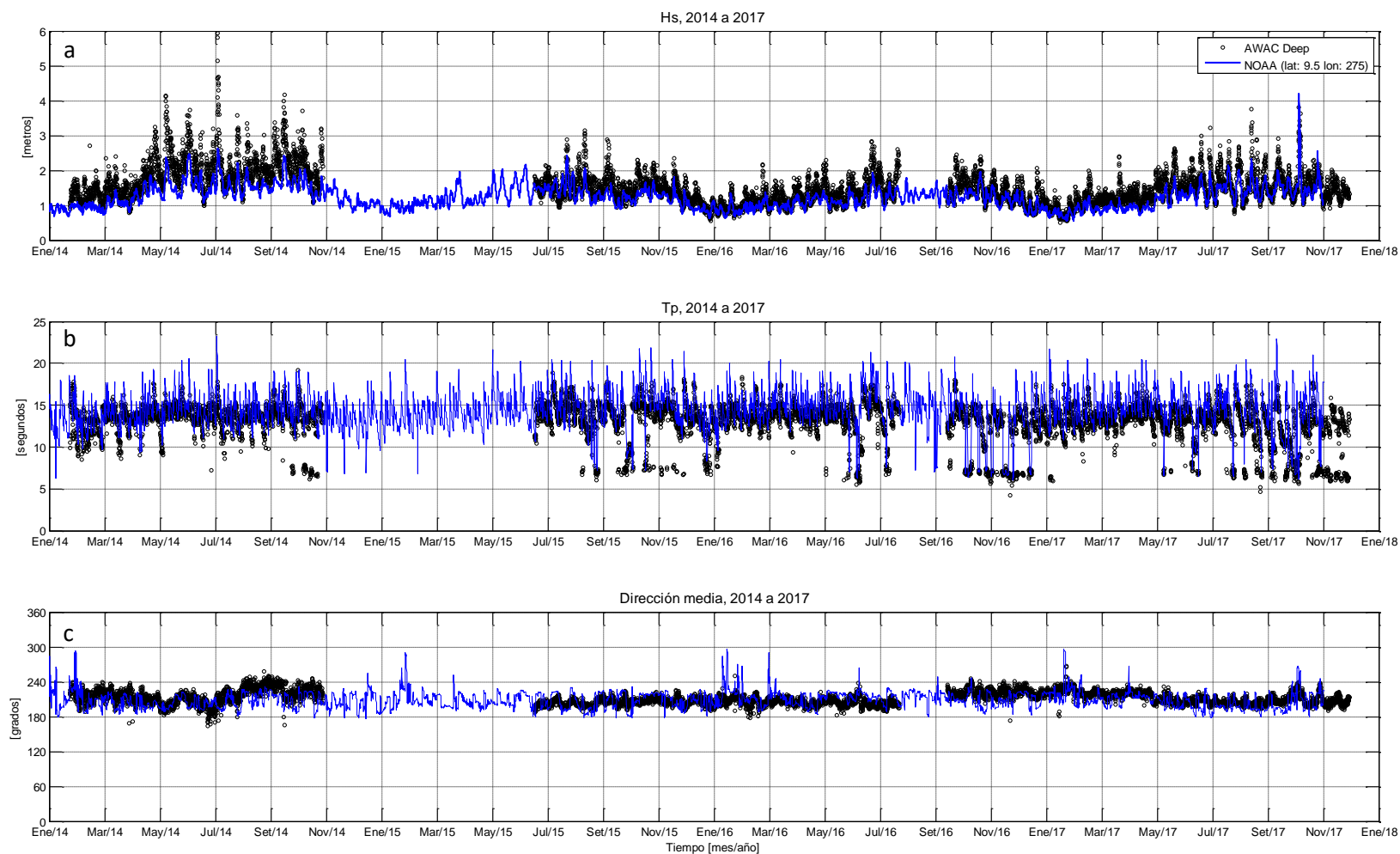


Figura 7. Series temporales de los parámetros de oleaje. (a) H_s , (b) T_p y (c) Dir , fuente reanálisis del WWIII y "AWAC Deep".

INFORME DE CALIBRACIÓN DATOS DE OLEAJE DE LA NOAA.

La figura 8 muestra el gráfico de dispersión cuantíl -cuantíl entre las fuentes "AWAC Deep" (H_s^I) y WWIII (H_s^R), en conjunto con parámetros estadísticos que miden la bondad del ajuste como son el sesgo (*BIAS*), la raíz del error cuadrático medio (*RMSE*, *Root Mean Square Error*, por sus siglas en inglés), la correlación (ρ) y la dispersión (*SI*).

Los estadísticos que miden la calidad del ajuste se han calculado de la siguiente manera:

- *BIAS* o sesgo: es la definición sistemática entre dos variable, mide la diferencia entre ambas variables y se define como:

$$BIAS = \bar{x} - \bar{y} \quad (1)$$

- *RMSE*: raíz del error cuadrático medio mide la exactitud con la que se parecen dos variables, se define como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - y_i)^2} \quad (2)$$

- ρ : el coeficiente de correlación de Pearson. Mide la intensidad de la relación de igualdad entre dos variables. Está definido entre -1 y 1, cuando existe correlación lineal perfecta entre las dos variables (los datos de X e Y son iguales) $\rho=1$ si la correlación es lineal y positiva o $\rho=-1$ si la correlación es lineal y negativa, si $\rho=0$ no hay correlación lineal entre las variable.

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

- *SI* o *RSI*: el índice mide la dispersión de los puntos respecto a la recta bisectriz; si todos los puntos se fijan sobre la recta bisectriz, el parámetro adimensional *SI* toma el valor de cero:

$$SI = \frac{RMSE}{\bar{x}} \quad (4)$$

donde x son los datos de referencia ($x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n$) y y ($y_1, y_2, \dots, y_i, \dots, y_n$) los datos a evaluar o aproximaciones.

Los valores de los descriptores del ajuste incluidos en la figura 8 presentan valores del *BIAS*, *RMS*, ρ y *SI* de 22 cm, 31 cm, 0.83 y 0.22 respectivamente. El *BIAS* indica como los valores están sesgados hacia los datos medidos, lo que implica que los datos de la serie de reanálisis están subestimados.

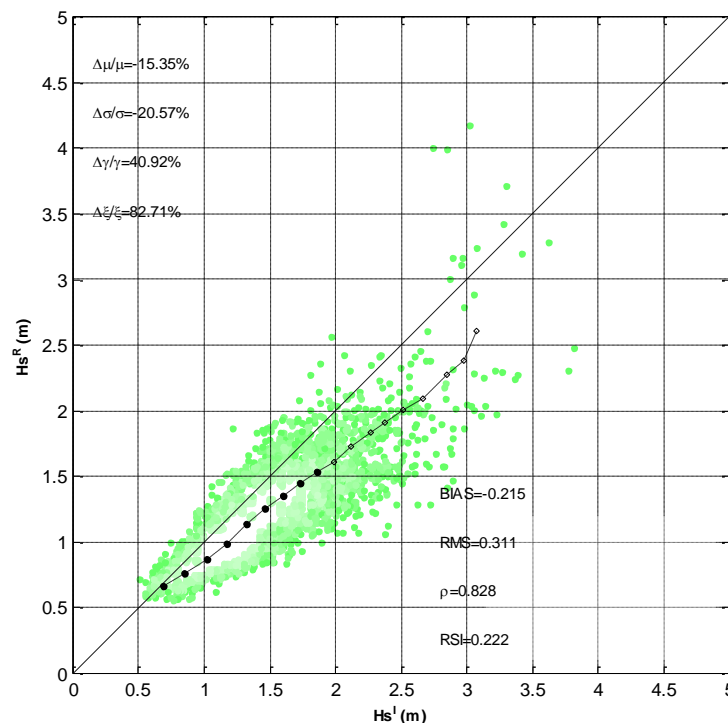


Figura 8. Gráfico de dispersión cuantil -cuantil, "AWAC Deep" (H_s^I) y WWIII (H_s^R).

Al coincidir espacial y temporalmente ambas fuentes de información pero diferir en cuanto a las magnitudes de H_s , se hace evidente que los datos del reanálisis de la serie WWIII requieren ser calibrados. Por lo tanto, se realiza un trabajo de calibración de los datos de reanálisis a partir de la serie "AWAC Deep".

Para la calibración se utilizaron los datos medidos a partir del 2015 y hasta el 2017. Se decidió utilizar este período de tiempo luego de realizar un proceso donde se evaluó el utilizar diferentes combinaciones de tiempo como fueron: datos medidos durante el 2014 vs WWIII 2014, datos medidos 2015 vs WWIII 2015, datos medidos 2016 vs WWIII 2016, datos medidos 2017 vs WWIII 2017 y datos medidos 2014-2017 vs WWIII 2014-2017, datos medidos 2015-2017 vs WWIII 2015-2017 y datos medidos 2016-2017 vs WWIII 2016-2017. A cada una de las diferentes combinaciones se les calcularon los estadísticos de bondad de ajuste, siendo la combinación datos medidos 2015-2017 vs WWIII 2015-2017, la que mejores resultados generó.

La calibración de los datos del reanálisis de la serie WWIII ha seguido el siguiente procedimiento:

1. Una vez procesados los datos procedentes de observaciones (el registro de “AWAC Deep”), se establecen los pares de datos con la base de datos de reanálisis del WWIII (datos que coinciden tanto temporal como espacialmente). Posteriormente se calibran los datos de H_s del reanálisis con los datos observados, mediante la metodología de calibración paramétrica dependiente de la dirección del oleaje (más detalles en Mínguez et al., 2011). El algoritmo matemático utilizado es el siguiente:

$$H_s^C = a^R(\theta)[H_s^R]^{b^R(\theta)} \quad (5)$$

donde:

H_s^R : es la altura de ola significativa del reanálisis de la serie WWIII.

H_s^C : es la altura de ola significativa calibrada.

$a^R(\theta)$ y $b^R(\theta)$: son los coeficientes de calibración en función de la dirección media del oleaje de la serie del reanálisis WWIII.

2. El algoritmo matemático de calibración se aplica a la totalidad de los datos de la variable H_s del nodo de la serie de reanálisis WWIII, Ver figura 3.

3. Por último se comprueba la calidad de la calibración mediante gráficos cuantil-cuantil, scatter plots, en conjunto con la recta bisectriz y los descriptores de calidad de ajuste.

La figura 9 (a) muestra los resultados de la calibración donde se observa que el método ha corregido las discrepancias entre el reanálisis WWIII y la serie “AWAC Deep”. Se incluyen los descriptores estadísticos de ajuste (*BIAS*, *RMSE*, ρ y *SI*) obtenidos posterior a la calibración cuyos valores son de 0.7 cm, 22 cm, 0.83 y 0.16 respectivamente. Los valores de dichos parámetros verifican los buenos resultados luego de realizar el procedimiento de calibración.

Los parámetros *BIAS*, *RMSE* y *SI* disminuyen sus valores hacia cero luego de la calibración, lo cual comprueba la mejoría del ajuste y el valor de ρ se mantiene, confirmando la correlación que existe entre ambas bases de datos. La figura 9 (b) muestra la función de distribución acumulada de la serie del reanálisis sin calibrar, los datos instrumentales, la serie de reanálisis calibrada y las bandas de confianza del 95%. Se comprueba como la calibración es bastante precisa para valores de H_s hasta una probabilidad de no excedencia de aproximadamente el 99,5%, entre esta probabilidad y el 99.95% aproximadamente, la calibración sobreestima los valores. Para probabilidades de no excedencia del orden del 99.95%, asociada a eventos extremos, la calibración nuevamente se ajusta a los valores medidos de H_s . La figura 9 (c) muestra la rosa de calibración, la cual indica que para valores de H_s del reanálisis menores a 1.0 m y mayores a 2.6 m aproximadamente, lo que se debe de aplicar es una corrección que aminora los magnitudes de H_s y para valores de H_s del reanálisis entre 1.0 m y 2.5 m la corrección consiste en un aumento de la magnitud en función del coeficiente a utilizar. Finalmente la tabla incluida en la figura 9 (d) muestra los coeficientes de calibración que están en función de la dirección media del oleaje de la serie del reanálisis WWIII

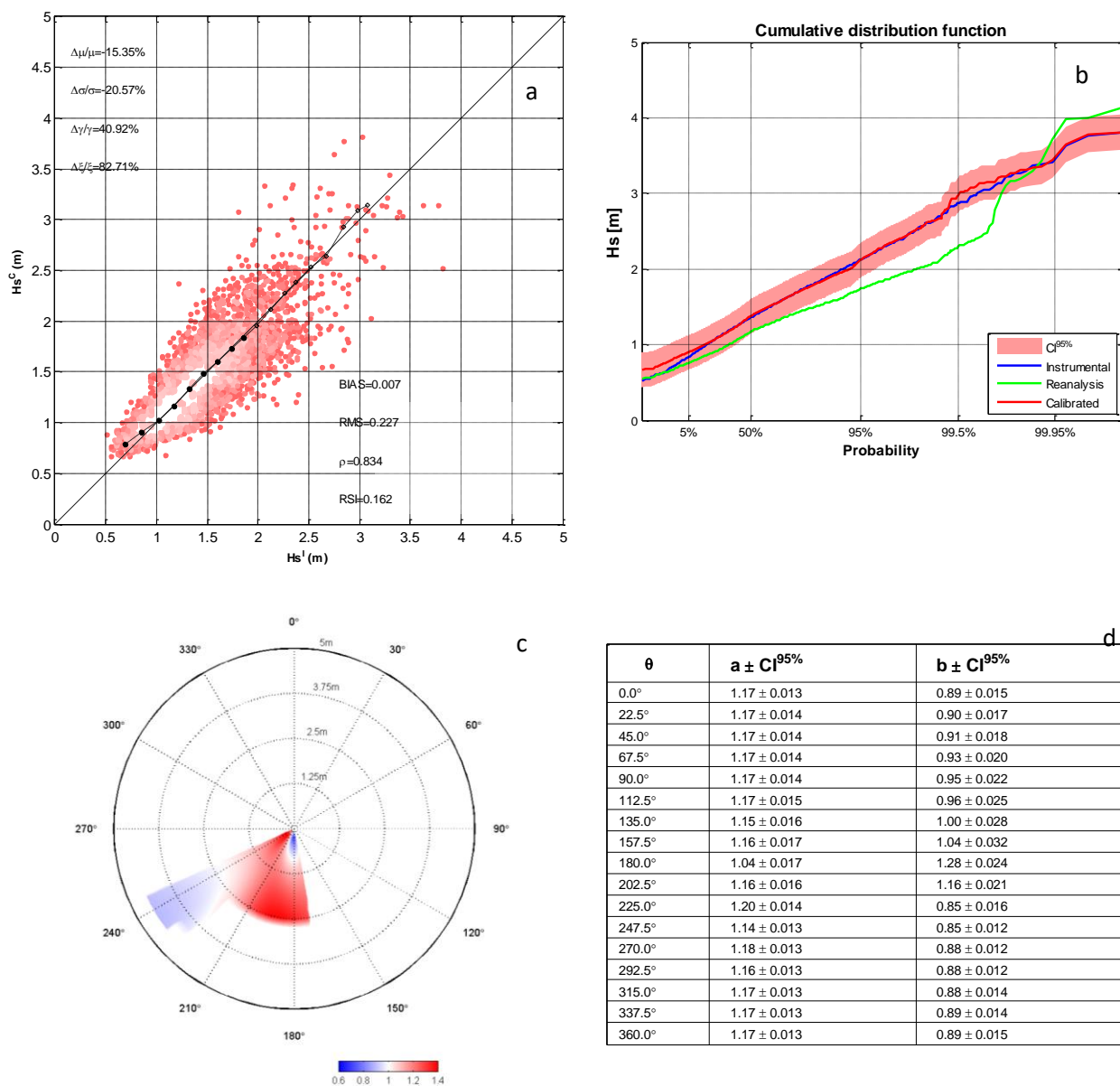


Figura 9. Gráficos de dispersión cuantil-cuantil. a) "AWAC Deep" (H_s^I) y WWIII calibrado (H_s^C), b) función de distribución acumulada, c) coeficiente de valoración entre los datos corregidos/sin corregir en escala polar y d) tabla con los valores de los coeficientes de calibración en función de la dirección.

Finalmente, se muestran en la figura 10 las series temporales de los datos de H_s de “AWAC Deep” junto con los datos del nodo de reanálisis calibrado. Se puede observar como las magnitudes de ambas series de datos coinciden nuevamente una vez corregidas las magnitudes de los datos de oleaje de la serie de reanálisis del WWIII, en el nodo frente a la entrada al Golfo de Nicoya.

Datos NOAA y AWAC (lat: 9.5 lon: 275)

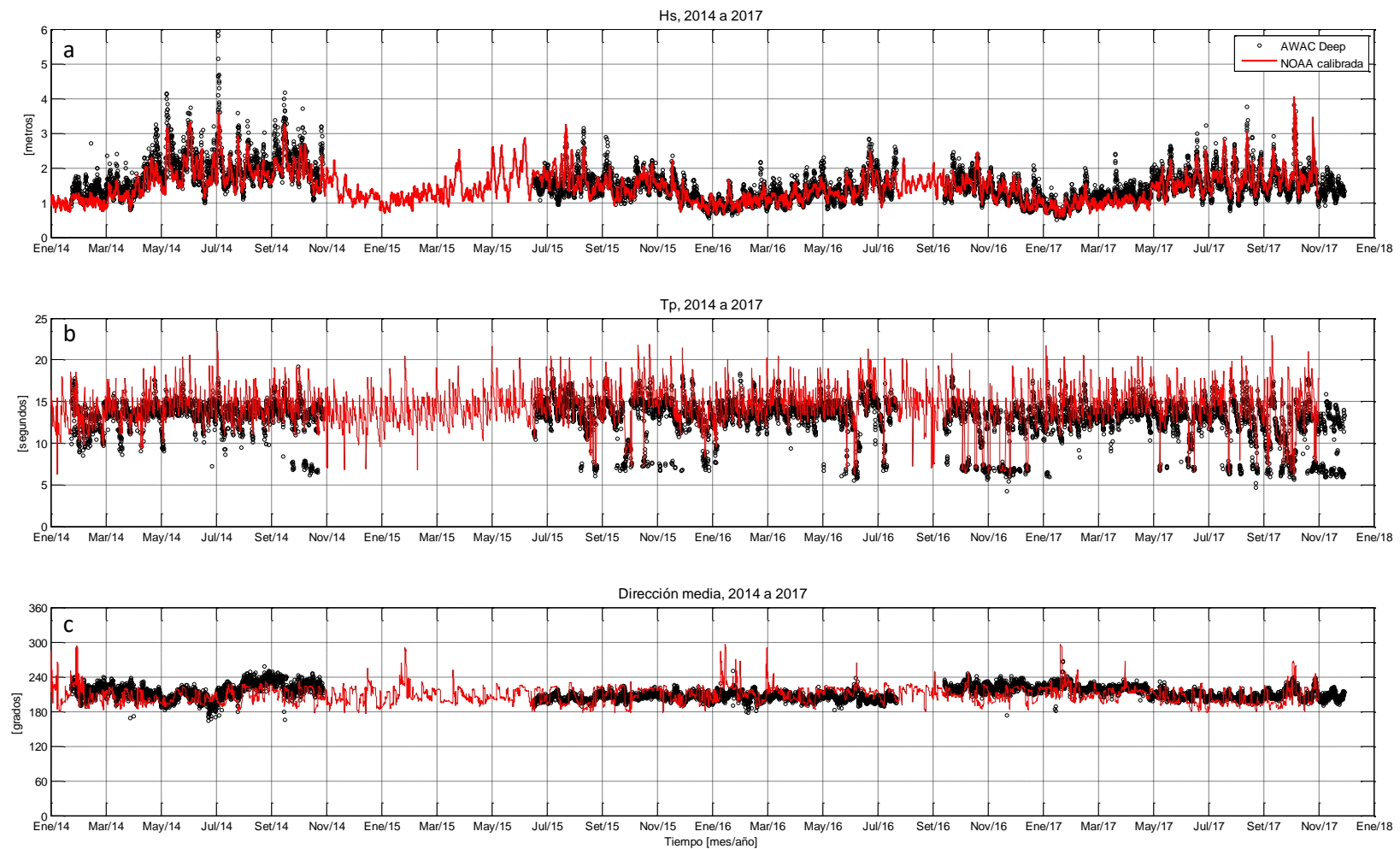


Figura 10. Series temporales de los parámetros de oleaje. (a) H_s , (b) T_p y (c) Dir , fuente: WWIII calibrada y "AWAC Deep".

INFORME DE CALIBRACIÓN DATOS DE OLAJE DE LA NOAA.

7.2. Validación.

Debido al corto tiempo del registro instrumental utilizado para la calibración, y asimismo para validar el proceso de corrección resultante de adaptar los datos WWII frente a la base de datos "AWAC Deep", para todo el periodo histórico disponible (2005-2017), se compararon los resultados obtenidos con los resultados de Alfaro (2017), quien obtuvo resultados similares luego de corregir con datos de satélite multi-misión otra base de datos de reanálisis alternativa denominada GOW2 (Global Ocean Waves 2.0, Pérez et al, 2017).

La figura 11 muestra la serie temporal del parámetro H_s incluido en la figura 7 (a) a la cual se le ha incluido el parámetro H_s de la serie GOW2, con el fin de mostrar la similitud de esta serie alternativa con la serie de reanálisis de oleaje de la NOAA. Es posible observar la similitud en cuanto a la evolución en el tiempo así como también en cuanto a las magnitudes del parámetro H_s .

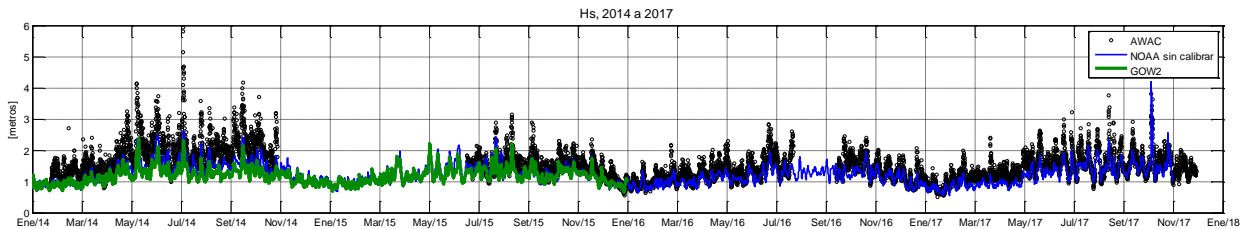


Figura 11. Series temporal del parámetros de H_s , fuente WWII, "AWAC Deep" y serie GOW2.

La figura 12 muestra un resumen a través de diferentes figuras que ilustran antes y después de la corrección de la serie GOW2 con datos de satélite, Alfaro (2017). Los gráficos de cuantiles en coordenadas polares se muestran en la parte superior. El color verde representa los datos brutos GOW2 (H_s^R), el color azul representa los datos de altimetría (H_s^I) y el color rojo representa los datos después del procedimiento de corrección (H_s^C).

En la parte central de la figura 12 se muestran los gráficos de dispersión y las funciones de distribución. En los diagramas de dispersión se incluye información de los cuantiles y varios índices estadísticos de las observaciones disponibles (eje x) frente a los datos GOW2 (eje y). Los rombos rellenos representan los valores de los cuantiles equiespaciados en la escala de Gumbel (rombos vacíos indican percentiles por

encima del 99,5%). Los puntos coloreados son los pares de datos de altura de ola significativa (m) y la intensidad del color representa la densidad de datos. En el panel central derecho se muestra la función de distribución acumulada de la serie del reanálisis sin calibrar, los datos instrumentales, la serie de reanálisis calibrada y las bandas de confianza del 95%, así como también una tabla con los valores de los coeficientes para la calibración.

En la parte inferior de la figura 12 se muestran la rosa clásica, las funciones de densidad polares de H_s^R y H_s^C y los cambios debido a la calibración paramétrica. Los parámetros estimados de la calibración también se proporcionan en la figura. El panel derecho en la parte inferior se muestra el aumento (rojo) -disminución (azul) de GOW2 después de la corrección. Como se puede observar, el procedimiento de corrección resulta en un aumento de las olas más energéticas y una disminución de las olas de baja energía.

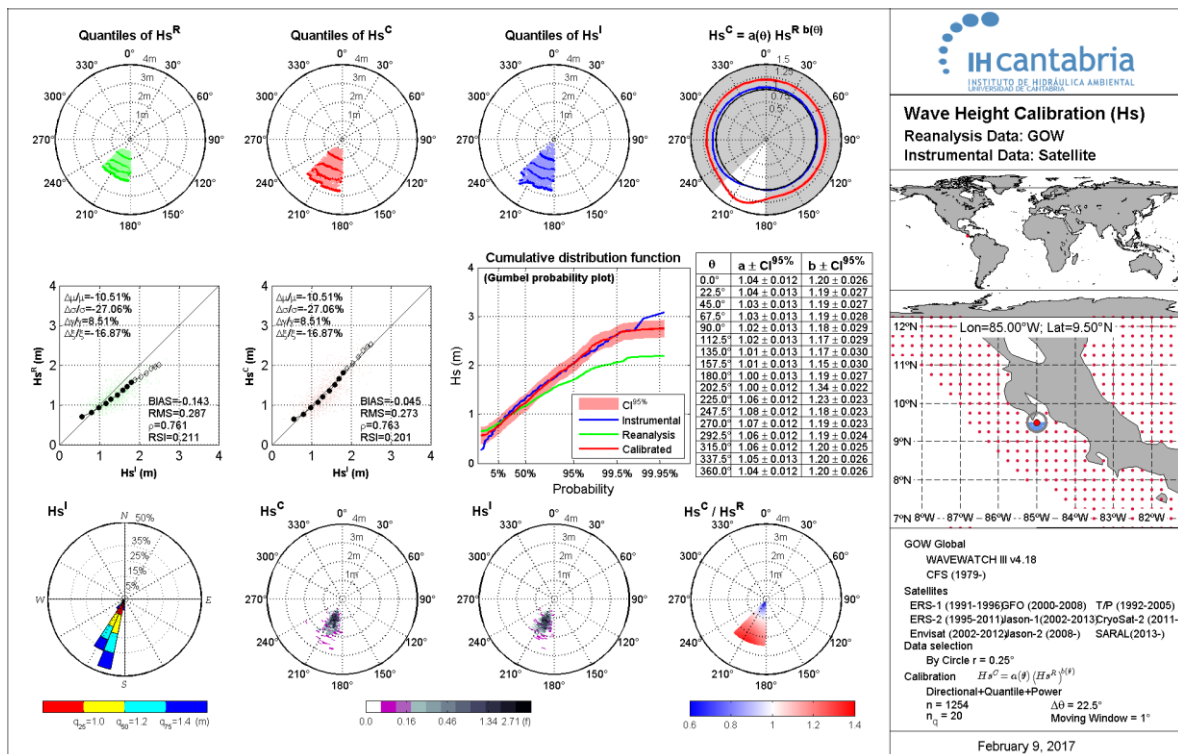


Figura 12. Resultados de corrección de datos de reanálisis con datos de satélite. Fuente: Alfaro (2017).

Tal y como se puede comparar en los gráficos polares que muestran el coeficiente de variación entre los datos corregidos/sin corregir direccionalmente y para distintas magnitudes (figura 9 (c) vs figura 12), las correcciones que resultan al aplicar el método de calibración, a partir de los datos medidos in-situ y de los datos remotos satelitales, los incrementos generalizados para el oleaje procedente de la dirección S y SSW y la pequeña disminución para los oleaje de menor magnitud son similares. Este hecho verifica que el proceso de calibración de la serie de reanálisis de oleaje del WWIII con los datos medidos por el AWAC 2015-2017, se puede aplicar a todo el registro histórico del reanálisis del WWIII disponible.

La figura 13, finalmente muestra los resultados de aplicar los coeficientes de calibración respectivos a la base de datos histórica del reanálisis de la NOAA, generada por el modelo WWIII desde el 2005 hasta el 2017. Tal y como se muestra en la serie temporal del parámetro H_s , los valores calibrados han aumentado su magnitud.

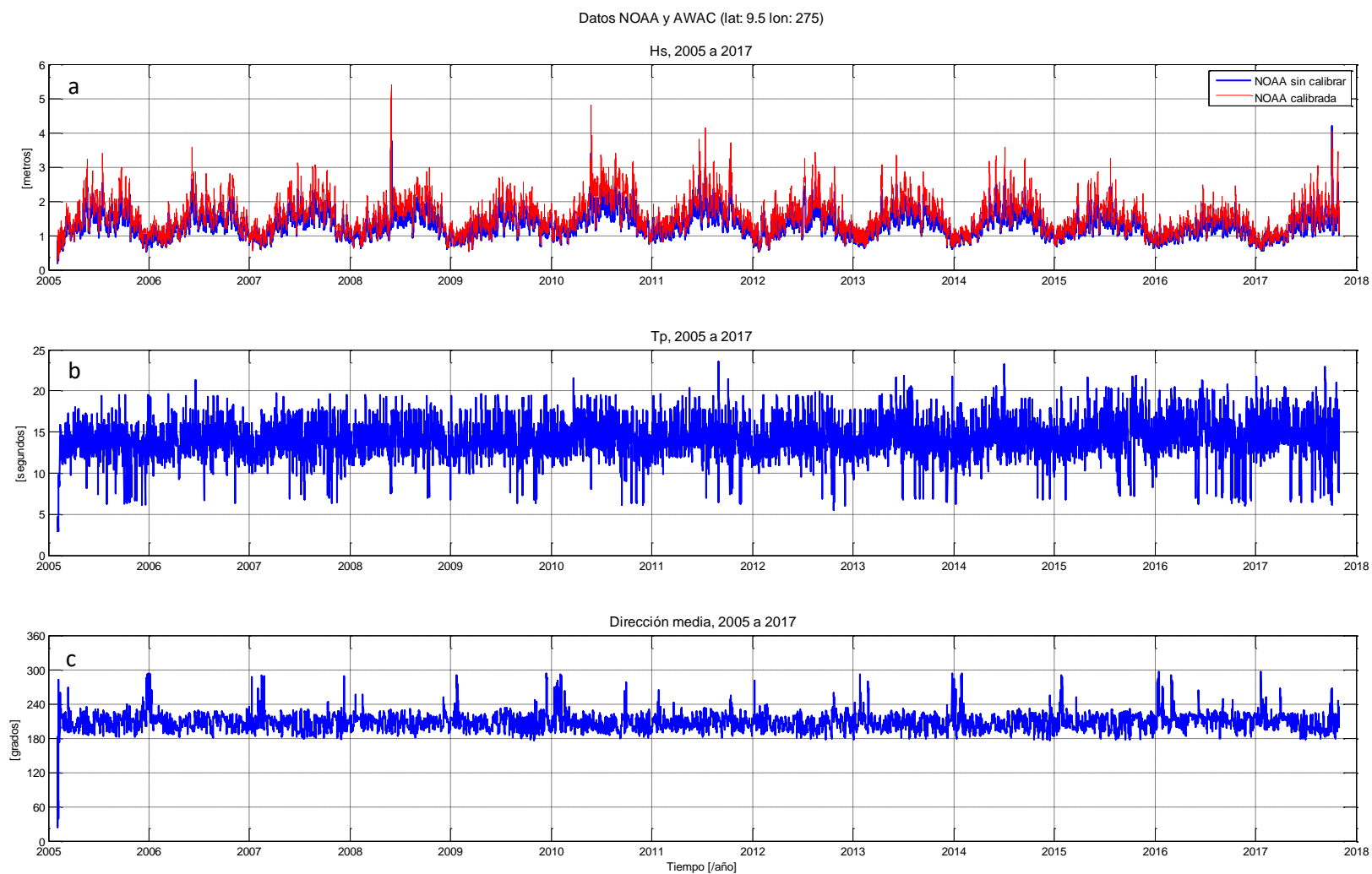


Figura 13. Series temporales de los parámetros de oleaje. (a) H_s , (b) T_p y (c) Dir , fuente WWIII calibrada y sin calibrar.

INFORME DE CALIBRACIÓN DATOS DE OLEAJE DE LA NOAA.

8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

Se ha tenido acceso a la base de reanálisis de oleaje pública generada por la NOAA mediante el modelo numérico WWIII, para un nodo frente a la entrada del Golfo de Nicoya, cuyo registro tiene una resolución tres horaria, con una extensión desde el 2005 hasta el 2017 y en continua actualización.

Se ha comprobado, por medio de comparaciones con datos instrumentales, que los datos relativos al parámetro de oleaje H_s de la base de reanálisis están subestimados. En razón de lo anterior, se ha realizado un trabajo de calibración de dicha base de datos de oleaje; para ello se han utilizado datos medidos por un instrumento tipo ADCP, el cual tiene un registro de tres años (2015 al 2017) cuasi continuos de la variable oleaje. Este trabajo de calibración se constituye, para este lugar, en el primer trabajo de este tipo que utiliza una serie de datos medidos de más de tres años para calibrar datos de reanálisis.

El trabajo de calibración consistió en ajustar el valor del parámetro H_s simulados por el modelo WWIII utilizando datos medidos por el ADCP. El resultado de dicho ajuste fue la obtención de una ecuación de tipo potencial (ecuación 5), por medio de la cual se obtienen el parámetro H_s calibrado. Dicha ecuación es función del parámetro H_s del modelo WWIII y de un par de coeficientes que a su vez están en función del parámetro Dir del modelo WWIII.

La función de calibración obtenida genera resultados más exactos para valores de H_s pronosticados por la NOAA entre 0,75 y hasta 2,8 m. aproximadamente. Para magnitudes de H_s pronosticados por la NOAA superiores a 2.8 m. los resultados de aplicar la ecuación 5 de calibración produce magnitudes que sobre estiman los datos medidos., ver figura 9.

Los resultados obtenidos del proceso de calibración se han medidos por medio de parámetros estadísticos que indican de manera cuantitativa la calidad del ajuste. Según los valores de dichos parámetros se considera que se ha logrado una adecuada calibración, a pesar de utilizar un registro de datos instrumentales de únicamente tres años (2015-2017).

En razón de lo previamente comentado, se ha realizado un proceso de validación al contrastar los resultados obtenidos de la calibración en el presente trabajo, con otros trabajos similares, GIOC (2004), Alfaro et al. (2010) y Alfaro (2017), comprobándose resultados equivalentes.

El resultado de aplicar la función de calibración a la base de datos de oleaje de la NOAA, es la obtención de una base de datos de doce años de información (2005 al 2017), con los parámetros de oleaje H_s calibrado, T_p y Dir , con resolución tres horaria calibrada.

8.2. Recomendaciones

Continuar con los esfuerzos de las mediciones de campo, tanto en el Puerto de Caldera como en Cabo Blanco y ampliarla a otros sitios estratégicos, para crear una base de datos lo suficientemente extensa, con el fin de mejorar la exactitud de la función de calibración obtenida, para que represente de mejor manera tanto los eventos de baja, mediana y alta energía.

Ampliar la red de medición a al menos cuatro sitios más; dos en el Pacífico, uno al Norte cercano a Cabo Velas y otro al Sur frente a la península de Osa; dos en el Caribe, uno frente al puerto de Moín y otro frente al puerto de Limón. Lo anterior con el fin de replicar el trabajo realizado a otros nodos de la NOAA, y de esta manera utilizar dicha información, la cual presenta un papel fundamental en distintos procesos naturales evidentes en la zona costera, como los procesos de erosión y acumulación litoral, el transporte de nutrientes necesarios para la producción pesquera y cultivo de especies comestibles, la regeneración de sistemas coralinos y el diseño de estructuras artificiales de protección costera y portuaria entre otros.

Realizar un trabajo de regionalización para trasladar la base de datos de oleaje del nodo que ha sido calibrado, hasta aguas poco profundas, específicamente frente a la entrada al Puerto de Caldera, dentro del mismo y otros sitios de interés frente a la costa.

9. BIBLIOGRAFÍA

Alfaro, H. (2017). *Estudio de la dinámica del oleaje en el litoral pacífico de Costa Rica: metodologías de regionalización y avances en servicios relativos al clima marítimo*. (Tesis Doctoral). Universidad de Cantabria. Santander, España.

Alfaro H., Rodríguez G., *Clima de Oleaje en Profundidades Indefinidas en la Costa Pacífica de Costa Rica*. 2010. (Informe final de trabajo). Ministerio de Obras Públicas y Transportes, Costa Rica.

GIOC. *Determinación de los Regímenes de Oleaje en la Costa Pacífica de Costa Rica*. 2004. (Informe final de trabajo). Comisión Interinstitucional de Marinas y Atracaderos Turísticos, Costa Rica.

HCTech, (s.f.). Boya de oleaje direccional Bares. Recuperado de http://www.herculescontrol.com/images/stories/catalogosespanol/boya_oleaje_es.pdf.

Japan International Cooperation Agency. Final Report. The Study on the Maintenance Project of the Port of Caldera in the Republic of Costa Rica. 1986.

Mínguez, R., Espejo, A., Tomás, A., Méndez, F. J., & Losada, I. J. (2011). Directional calibration of wave reanalysis databases using instrumental data. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 28(11), 1466–1485. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-11-00008.1>.

Nortek (s.f.). AWAC Acoustic Wave And Current Profiler. Recuperado de <http://www.nortek-as.com/lib/brochures/datasheet-awac>.

Pérez, J., Menéndez, M. & Losada, I.J. (2017). GOW2: A global wave hindcast for coastal applications. *Coastal Engineering*, 124. Recuperado de <http://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.03.005>.

ANEXOS I

SERIE DE DATOS DE OLEAJE DE LA NOAA GENERADA POR EL MODELO WWIII EN EL NODO NUMÉRICO
LATITUD: 9,5 - LONGITUD: 275

(En versión digital)