



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLÓGICAS



**Calibración y validación de estimaciones de altura significativa a partir de un radar
de alta frecuencia en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN
OCEANOGRAFÍA COSTERA

PRESENTA

JUAN CARLOS GUEVARA AGUIRRE

ENSENADA, BAJA CALIFORNIA, AGOSTO DE 2023

FACULTAD DE CIENCIAS MARINAS
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES OCEANOLOGICAS
POSGRADO EN OCEANOGRAFÍA COSTERA

**Calibración y validación de estimaciones de altura significativa a partir de un radar
de alta frecuencia en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS EN
OCEANOGRAFÍA COSTERA

Presenta

JUAN CARLOS GUEVARA AGUIRRE

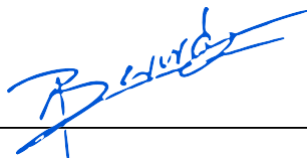
Aprobada por:



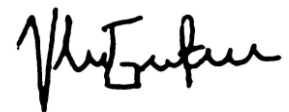
Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Director de Tesis



Dr. Héctor García Nava
Codirector de Tesis



Dr. Bernardo Esquivel Trava
Sinodal



Dr. Vladimir Toro Valencia
Sinodal

Asunto: Voto aprobatorio sobre trabajo
de tesis de grado de Maestría

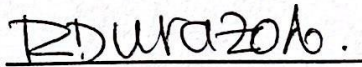
Dra. Adriana G. González Silvera
Coordinadora de Investigación y
Posgrado, F.C.M.
Presente

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Juan Carlos Guevara Aguirre**, para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera**, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

Calibración y validación de estimaciones de altura significativa a partir de un radar de alta frecuencia en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 24 de julio de 2023


Dr. Reginaldo Durazo Arvizu
Director de tesis

c.c.p. Expediente

Asunto: Voto aprobatorio sobre trabajo
de tesis de grado de Maestría

Dra. Adriana G. González Silvera
Coordinadora de Investigación y
Posgrado, F.C.M.
Presente

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Juan Carlos Guevara Aguirre**, para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera**, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

Calibración y validación de estimaciones de altura significativa a partir de un radar de alta frecuencia en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 24 de julio de 2023



Dr. Héctor García Nava
Co-Director de tesis

c.c.p. Expediente

Asunto: Voto aprobatorio sobre trabajo
de tesis de grado de Maestría

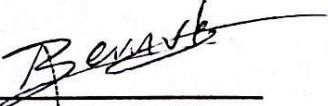
Dra. Adriana G. González Silvera
Coordinadora de Investigación y
Posgrado, F.C.M.
Presente

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Juan Carlos Guevara Aguirre**, para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera**, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

Calibración y validación de estimaciones de altura significativa a partir de un radar de alta frecuencia en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 24 de julio de 2023



Dr. Bernardo Esquivel Trava
Sinodal

c.c.p. Expediente

Asunto: Voto aprobatorio sobre trabajo
de tesis de grado de Maestría

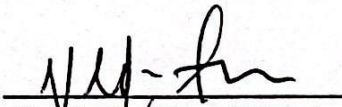
Dra. Adriana G. González Silvera
Coordinadora de Investigación y
Posgrado, F.C.M.
Presente

Después de haber efectuado una revisión minuciosa sobre el trabajo de tesis presentado por el estudiante **Juan Carlos Guevara Aguirre**, para poder presentar la defensa de su examen y obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Oceanografía Costera**, me permito comunicarle que he dado mi voto **Aprobatorio**, sobre su trabajo titulado:

Calibración y validación de estimaciones de altura significativa a partir de un radar de alta frecuencia en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México.

Esperando reciba el presente de conformidad, quedo de usted.

Ensenada, B. C., a 24 de julio de 2023


Dr. Vladimir Toro Valencia
Sinodal

c.c.p. Expediente

Resumen

En este estudio se evaluó la precisión de los valores de la altura significativa del oleaje (H_s) obtenida por un radar de alta frecuencia (HFR) por un periodo de 10 meses en la Bahía de Todos Santos, Baja California, México. Los espectros de frecuencia del oleaje se estimaron mediante un algoritmo empírico que se calibró al utilizar mediciones *in situ* de tres perfiladores acústicos (ADCP) ubicados dentro de la cobertura del radar. Los resultados mostraron que después de la calibración, la H_s medida por el radar obtuvo correlaciones superiores a 0.8 al compararlo con datos *in situ* de dos sitios. Las métricas de error como *RMSE* oscilaron entre 0.28 y 0.35 m y un sesgo despreciable. En este estudio se determinó que la dirección de propagación del oleaje no tiene un efecto considerable en las estimaciones de H_s por parte del radar. Los resultados también indicaron que la calibración del algoritmo mejoró significativamente su desempeño en comparación con la forma original en todas las métricas evaluadas en este trabajo.

Palabras clave: Radar de alta frecuencia, altura significativa, calibración, validación.

Dedicatoria

A mi amada Mirleidy Martínez, que, a pesar de la distancia, siempre me apoyó en cada paso de este camino. A nuestra hija Sophia, este logro es para que veas que con esfuerzo y dedicación puedes lograr todo lo que te propongas. Las amo y gracias por ser mi familia.

Agradecimientos

Estimados Reginaldo Durazo Arvizu y Héctor García Nava, director y codirector respectivamente de esta tesis, quisiera expresar mis más sinceros agradecimientos por confiar en mí, por su paciencia y compartir su vasta experiencia y conocimientos. También quisiera agradecer a Bernardo Esquivel, Vladimir Toro, Francisco Ocampo y Roberto Gómez por su guía invaluable y sus aportes significativos a esta investigación.

Asimismo, quisiera extender mi gratitud a la Universidad Autónoma de Baja California, Facultad de Ciencias Marinas e Instituto de investigaciones oceanológicas por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado. Agradezco profundamente al grupo de docentes del posgrado por su calidad y ser ese puente de conocimientos. También quisiera agradecer al grupo de oleaje del departamento de oceanografía física del CICESE y las reuniones de oceanografía física de la UABC por sus valiosas retroalimentaciones y sugerencias.

No puedo dejar de mencionar al apoyo económico recibido por parte del CONACYT a través de la beca para estudios de posgrado. Además, quiero agradecer al CEMIE-Océano por la financiación del sensor remoto, que es la base de este trabajo de investigación.

A Yorvin Zapata, Jorge Velázquez, Frank Olaya, Isabel Córdoba, Tatiana Sánchez y Wilson Solís, colombianos en Ensenada, Les agradezco por los momentos que me hicieron sentir como en casa. A mis compañeros y amigos del posgrado: Manuel Casariego, Eduardo Santiago, Arantxa Villa y Uriel Mirabal por las risas compartidas y momentos amenos. En especial quiero agradecer a mi mejor amigo en México Alexandre Tisseaux por su incondicionalidad y consejos siempre sabios... *“Pura vida mae”*.

Finalmente, agradezco a las personas maravillosas que conocí en México como: al “Hommie” Javier Acevedo, Yarely Vásquez, Julio Mercado, Gladys Morales, Blassa Cárdenas y Daniel Nañez, por compartir su cultura conmigo. Su presencia en estos dos años fueron una bendición.

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	1
2	Materiales y métodos.....	7
2.1	Área de estudio	7
2.2	Radars de alta frecuencia.....	9
2.3	Datos y métodos.....	11
2.3.1	Datos de HFR	12
2.3.2	Instrumentos in situ.....	12
2.4	Algoritmo WERA para estimar información del oleaje.....	15
2.5	Calibración de los coeficientes de corrección α	19
2.5.1	Calibración empírica en función de la frecuencia de transmisión del radar	19
2.5.2	Calibración empírica con una o varias referencias de Hs	20
2.6	Validación de datos	22
3	Resultados y discusión	24
3.1	Resultados de la calibración.....	24
3.2	Calibración empírica con datos de referencia de Hs	24
3.3	Comparación espectral.....	28
3.4	Comparación de altura significativa (Hs).....	30
3.5	Efecto del ángulo de propagación del oleaje en las mediciones	36
4	Conclusiones	41
5	Referencias	43

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Espectro Doppler de la señal reflejada, registrado a las 15:00 UTC del 19 de mayo de 2021 en la zona de estudio. Los picos de primer orden se muestran en los círculos verdes. El continuo de segundo orden está contenido en las áreas resaltadas en color naranja. Las olas que se alejan del radar están en la parte negativa de la frecuencia Doppler y las olas que se acercan están en la parte positiva de la frecuencia Doppler. Las frecuencias Bragg teóricas se muestran en las líneas rojas de +/- 0.49 Hz que corresponden a una frecuencia de transmisión de 25 MHz del radar..... 4
- Figura 2.** Ubicación geográfica de los sistemas de radar WERA en el mundo. Los marcadores de color azul indican la posición de los radares instalados. Imagen tomada de la página web oficial de Helzel (<https://helzel.com/radar-systems/#overview>)..... 5
- Figura 3.** Localización geográfica y batimetría del área de estudio. El Punto negro señala la ubicación de la estación del radar de alta frecuencia y el sector circular naranja de radio 30 km y ángulo 120°, denota su cobertura. Los triángulos rojos señalan los sitios de medición con dispositivos ADCP y las líneas negras las isóbatas. 8
- Figura 4.** Área de estudio que muestra (a) el área de cobertura del HFR delimitada por el sector circular naranja, con resolución angular de 7°. (b) Los nodos de estimaciones puntuales del algoritmo usado por WERA. 10
- Figura 5.** Disponibilidad temporal de los datos de los instrumentos. Las áreas en blanco representan la falta de información debido a inoperatividad de los ADCP..... 11
- Figura 6.** Esquema de algunas alternativas en las que se puede instalar un ADCP. Imagen tomada de: <https://www.hydro-international.com/content/news/the-latest-on-acoustic-doppler-current-profilers>. 13
- Figura 7.** Coeficientes de calibración obtenidos de manera independiente para los tres sitios: Isla todos santos (ITS), Bajo San Miguel (BSM) y Punta Morro (PM) 26
- Figura 8.** Coeficientes de corrección obtenidos en el experimento EuroROSE (αE), los ajustados a la frecuencia de transmisión del HFR de la Bahía Todos Santos (αk) y coeficientes optimizados con referencia local de H_s (αp). 27
- Figura 9.** Espectros de densidad de energía del oleaje estimados por el radar (a) y por ADCP en Isla de Todos santos (b). Los cuadros de color rojo indican eventos de oleaje local, los cuadros de color verde indican eventos de oleaje lejano y los recuadros de color amarillo indican regímenes bimodales..... 29
- Figura 10.** Análogo a la figura 7 en el sitio de Bajo de San Miguel. 29
- Figura 11.** Análogo a las figuras 7 y 8 en el sitio Punta Morro. 30

Figura 12.	Comparación de las estimaciones de Hs obtenidas por el radar (líneas azules) y los perfiladores acústicos (líneas naranjas) en los tres sitios: ITS (a), BSM (b) y PM (c).	31
Figura 13.	Diagramas de dispersión de las estimaciones de Hs del radar comparadas con datos medidos en los tres sitios: ITS(a), BSM(b) y PM(c). La línea solida de color negro corresponde a una línea de correlación perfecta 1:1	33
Figura 14.	Histogramas circulares que representan la dirección de propagación del oleaje medida por los instrumentos in situ en los tres sitios: ITS (a), BSM (b) y PM (c).	37
Figura 15.	Diagrama que representa el ángulo relativo θ para el sitio ITS, en el que se muestra un oleaje que se propaga hacia el este.	37
Figura 16.	Indicadores estadísticos de la comparación de la altura significativa estimada con HFR y con ADCP en función del ángulo relativo θ	39
Figura 17.	Representación gráfica de la diferencia de Hs entre las estimaciones del ADCP y el radar en función del ángulo relativo (θ). Los marcadores de color rojo representan el promedio y las barras de error una desviación estándar para intervalos del ángulo relativo cada 10°	40

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Características particulares del radar WERA que opera en BTS.....	12
Tabla 2.	Coefficientes determinados en el proyecto EuroROSE	18
Tabla 3.	Estadísticos resumidos de comparaciones de Hs entre el HFR y ADCP en los tres sitios de estudio. Se muestra los resultados obtenidos por el algoritmo WERA (αE), La optimización realizada con base a la ecuación 8 αk y la calibración con los datos de referencia Hs (αBTS). N hace referencia al número de datos.	34
Tabla 4.	Indicadores estadísticos en función del ángulo relativo (θ).....	38

1 Introducción

El oleaje es un fenómeno físico que tiene influencia en una serie de procesos oceánicos y costeros que van desde el intercambio de CO₂ entre el mar y la atmósfera hasta el transporte de sedimentos y la morfodinámica de algunas zonas costeras. El estudio del oleaje es de gran importancia para el desarrollo de actividades humanas como transporte marítimo, industria pesquera, diseño de estructuras ingenieriles, aprovechamiento energético, entre otras. En este contexto es fundamental poseer registros de alta calidad del oleaje con una buena resolución espacial y temporal.

Tradicionalmente, el oleaje se ha medido por medio de instrumentos oceanográficos que proporcionan información de manera puntual. Por ejemplo, sensores de presión, boyas y perfiladores acústicos que proveen información muy limitada sobre la variabilidad espacial. Para caracterizar el oleaje en un área extensa (de decenas hasta centenas de kilómetros cuadrados), se utilizan dispositivos de teledetección como los radares de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés *Synthetic Aperture Radar*). Este tipo de sensores comúnmente están incorporados a satélites o aviones por lo que su cobertura temporal es de resolución baja. Este tipo de tecnología tiene ciertas limitaciones referentes a la medición detallada de las olas cortas, y en ocasiones requiere de información *a priori* de modelos numéricos (Schulz-Stellenfleth *et al.*, 2005) o la medición simultánea con otros sensores (Mastenbroek & De Valk, 2000).

Otro sensor remoto que se utiliza para caracterizar condiciones oceanográficas con gran cobertura espacial es el radar de alta frecuencia (en adelante, HFR por sus siglas en inglés). Estos dispositivos tienen la capacidad de proporcionar información con una resolución alta en el tiempo (decenas de minutos) y el espacio (centenas de metros) de variables como corrientes superficiales, espectros direccionales y parámetros del oleaje. Además, pueden proveer información de otras variables como dirección del viento (Vesecky *et al.*, 2002) y detección de tsunamis (Lipa *et al.*, 2012).

Los HFR son una herramienta importante que se utiliza en la investigación oceanográfica para medir las corrientes superficiales y oleaje hasta un alcance de 200 km fuera de la costa. Estos sensores remotos tienen algunas características generales como su alto rango de frecuencias de operación (3-50 MHz), por lo regular se instalan en tierra cerca de la transición al mar lo que no hace necesario que estén situados en un sitio alto y pueden operar en condiciones meteorológicas adversas como vientos fuertes y lluvias intensas. Por otra parte, las mediciones realizadas por los HFR tienen ciertas limitaciones generalizadas cuando existe una baja conductividad del agua de mar (Gurgel *et al.*, 1999), en estados de mar extremos (Wyatt *et al.*, 2011), y principalmente cuando existe una baja relación de señal-ruido (Mantovani *et al.*, 2020; Toro *et al.*, 2014).

Los sistemas HFR utilizan las señales reflejadas por la superficie de mar. Cuando la longitud de onda de la señal coincide con el doble de la longitud de onda de las olas, las

ondas retrodispersadas se suman en fase, lo que conduce a una mayor intensidad de la señal reflejada. A este fenómeno se le conoce como teoría resonante de Bragg (Zhang *et al.*, 2013).

La señal intensa reflejada se traduce en la aparición de dos picos bien definidos que se encuentran a una frecuencia relativa Doppler (figura 1) que varía según la velocidad de fase de las olas (Paduan & Graber, 1997). De esta manera, cualquier desviación de la frecuencia teórica esperada en los picos se puede atribuir a la presencia de corrientes superficiales. Estos dos picos de energía (conocidos como retornos de primer orden) son fundamentales para medir la dirección y velocidad de las corrientes superficiales del océano.

La señal reflejada que registra el HFR no solo contiene información de los retornos de primer orden, también incluyen interacciones hidrodinámicas y electromagnéticas entre las olas y las ondas de radio, lo que agrega energía al espectro Doppler en diferentes frecuencias (positivas y negativas). Estas interacciones dan lugar a cuatro continuos de segundo orden adyacentes a los dos picos de primer orden y contienen información relevante sobre el espectro de altura de las olas (Hasselmann, 1971).

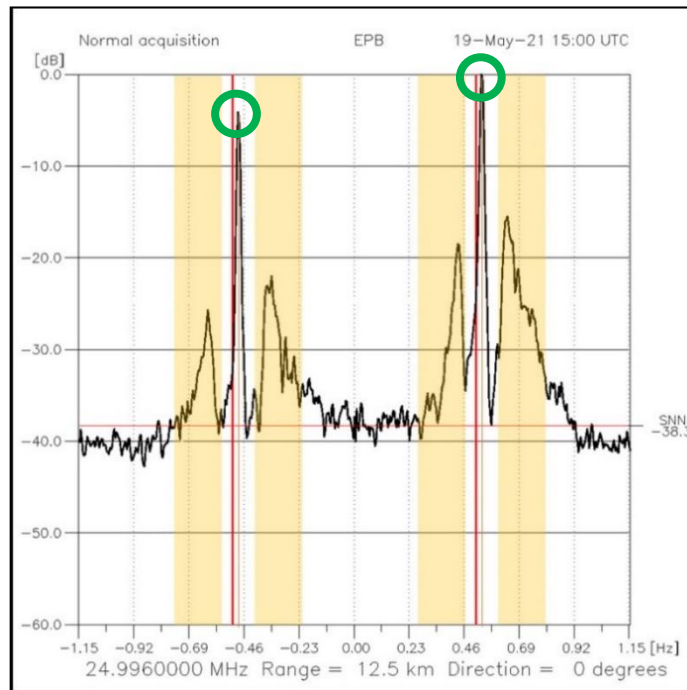


Figura 1. Espectro Doppler de la señal reflejada, registrado a las 15:00 UTC del 19 de mayo de 2021 en la zona de estudio. Los picos de primer orden se muestran en los círculos verdes. El continuo de segundo orden está contenido en las áreas resaltadas en color naranja. Las olas que se alejan del radar están en la parte negativa de la frecuencia Doppler y las olas que se acercan están en la parte positiva de la frecuencia Doppler. Las frecuencias Bragg teóricas se muestran en las líneas rojas de ± 0.49 Hz que corresponden a una frecuencia de transmisión de 25 MHz del radar.

Para contar con la capacidad de estimar la altura y la dirección de las olas, un HFR debe contar con al menos 12 antenas receptoras que reciben la señal reflejada desde el océano. Uno de estos HFR es el sistema WERA (WEllen RADar, en alemán), desarrollado por la universidad de Hamburgo en 1996 (Gurgel *et al.*, 1997) y que actualmente son fabricados por la compañía Helzel Messtechnik (<https://helzel.com/>). Los Radares WERA

pueden obtener información de corrientes superficiales y parámetros del oleaje. En la figura 2 se muestra la ubicación geográfica de los sitios donde se ha utilizado este modelo de radar.



Figura 2. Ubicación geográfica de los sistemas de radar WERA en el mundo. Los marcadores de color azul indican la posición de los radares instalados. Imagen tomada de la página web oficial de Helzel (<https://helzel.com/radar-systems/#overview>).

Los radares WERA emplean un método empírico desarrollado por Gurgel *et al.* (2006) para determinar los parámetros del oleaje. Este método obtiene los espectros de

frecuencia de olas a partir de la información del espectro Doppler medido por el radar. Se basa en una relación lineal entre el continuo de segundo orden normalizado con los picos de primer orden, ponderado con una función angular y corregido con coeficientes empíricos (α) dependientes de las frecuencias espectrales de las olas. Los radares WERA utilizan por defecto coeficientes de corrección (α_E), obtenidos en el proyecto EuroROSE (European Ocean Sensing) en Noruega en el año 2000 con radares que funcionaban a 27.65 MHz (Gurgel *et al.*, 2006)

El objetivo principal de este trabajo es obtener un parámetro de corrección particular (α_{BTS}) para la Bahía de Todos Santos, Baja California, al utilizar registros de Hs medidos *in situ*. Para lograr esto, se compararon las series de tiempo entre las estimaciones de Hs realizadas por el radar al usar los parámetros de corrección (α_E) y (α_{BTS}) con mediciones de los instrumentos *in situ*. Además, se establecerán los rangos angulares de propagación del oleaje en los cuales el error de medición entre ambos instrumentos se minimice.

La siguiente sección proporciona una descripción general del área de estudio, los dispositivos en los que se realizaron las mediciones mostradas aquí y el método utilizado para determinar α_{BTS} . En la sección 3 se presentan y discuten los resultados de la comparación de series de tiempo de Hs en diferentes escenarios y se analiza la influencia

de la dirección de propagación del oleaje en las mediciones. En la sección 4 se concluye y resaltan los aspectos más relevantes en esta investigación.

2 Materiales y métodos

2.1 Área de estudio

Las mediciones analizadas en este trabajo fueron realizadas dentro de la Bahía de Todos Santos, Baja California, México (en adelante, BTS), la cual alberga la ciudad de Ensenada en su margen derecho (figura 3). Esta localidad se encuentra en la costa noroccidental de la península de Baja California, aproximadamente ~100 km al sur de la frontera con Estados Unidos.

En mayo de 2021 se instaló en uno de los bordes de la BTS un HFR modelo WERA que permite la obtención de las componentes radiales de las corrientes superficiales y la Hs del oleaje. La configuración de operación del instrumento permite realizar mediciones con una resolución espacial de aproximadamente ~780 m y una resolución temporal de 30 minutos. Sobre el área de cobertura del radar se instalaron tres perfiladores acústicos (figura 3) denominados Isla de Todos Santos, Bajo San Miguel y Punta Morro (en adelante ITS, BSM y PM respectivamente) que proporcionaron información sobre las corrientes y el espectro direccional del oleaje a intervalos de una hora.

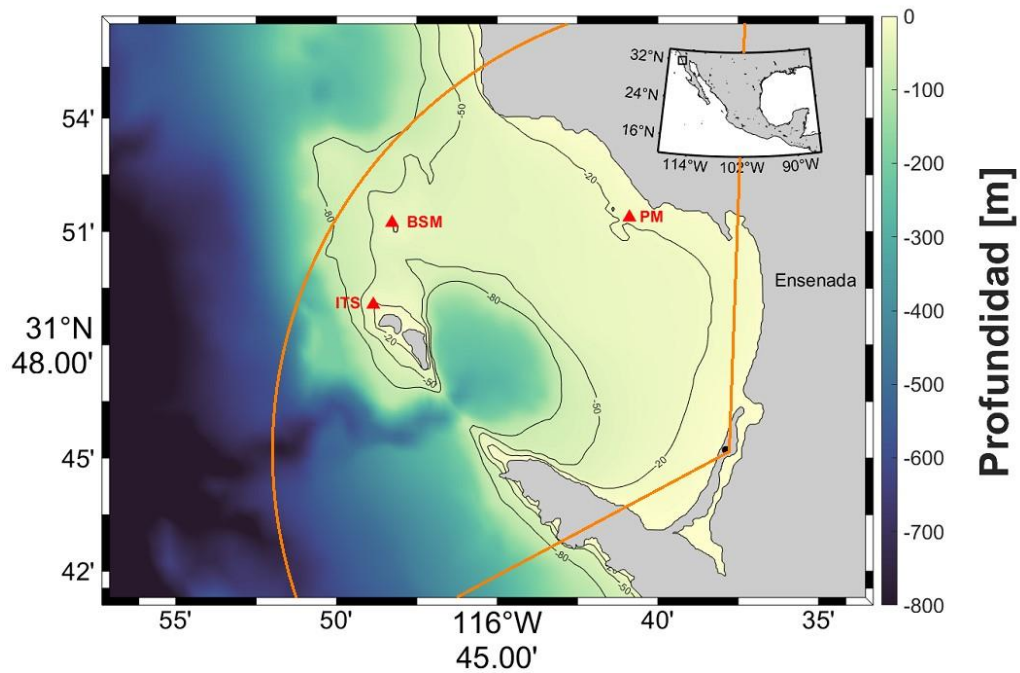


Figura 3. Localización geográfica y batimetría del área de estudio. El Punto negro señala la ubicación de la estación del radar de alta frecuencia y el sector circular naranja de radio 30 km y ángulo 120°, denota su cobertura. Los triángulos rojos señalan los sitios de medición con dispositivos ADCP y las líneas negras las isóbatas.

El oleaje predominante en la BTS es de tipo swell (Esquivel-Trava & Acosta, 2021). Además, se caracteriza por una estacionalidad marcada con registros de valores medios de H_s y periodo en invierno de 1.5 m y 12 s, respectivamente, y en verano de 0.7 y 8 s (Martínez-Díaz-De-Leon, 2004; Martínez-Díaz-de-León *et al.*, 1989).

2.2 Radares de alta frecuencia

Los HFR se clasifican en dos tipos según el método que utilizan para analizar la señal reflejada: Radiogoniometría (en inglés, *direction finding*) y la formación de haz (en inglés, *beam forming*).

La radiogoniometría utiliza una antena de transmisión y un receptor compacto que consta de dos antenas de bucle cruzado y una de bucle monopolo (Barrick, 2008). Las antenas están ubicadas en línea recta, y cada una de ellas recibe la señal de los reflectores (olas con longitud de onda Bragg). La diferencia de fase entre las señales recibidas en cada antena se utiliza para determinar la dirección de las olas en movimiento (Falco *et al.*, 2016). Por otro lado, la formación de haz se basa en el uso de múltiples antenas (4 de transmisión Tx y 4, 8, 12 ó 16 de recepción, Rx) para generar una señal que se enfoca en una dirección específica. En el caso de los radares WERA, esto se logra mediante un arreglo lineal de antenas receptoras paralelas a la costa (Roarty *et al.*, 2019). Cada antena en la matriz recibe la señal reflejada y se transmite a un procesador central que combina las señales de todas las antenas para crear un patrón de radiación (Gurgel *et al.*, 1999). Aunque comercialmente se han desarrollado varios radares de formación de haz en los últimos años (Mantovani *et al.*, 2020), el último sistema de radar en formación de haz o matriz de fase disponible comercialmente hasta el momento es el WERA (Al-Attabi, 2021).

El algoritmo que utilizan los radares WERA interpola los retornos recibidos por rango y azimut (figura 3a) en una malla regular (figura 3b) en el área de cobertura (Gurgel *et al.*, 1999). En cada nodo de la malla se genera un espectro Doppler a través de una transformada rápida de Fourier (FFT, por sus siglas en inglés) (Gómez *et al.*, 2015). En cada espectro generado es posible identificar el pico de primer orden más prominente y el continuo de segundo orden que lo rodea. Enseguida, las frecuencias Doppler de los continuos de segundo orden se transforma linealmente en frecuencias del oleaje, las amplitudes espectrales asociadas se interpolan en frecuencias preestablecidas que van desde 0.05 Hz hasta 0.25 Hz con una resolución de 0.01 Hz. A partir de estas amplitudes espectrales (E), es posible determinar la altura significativa de las olas.

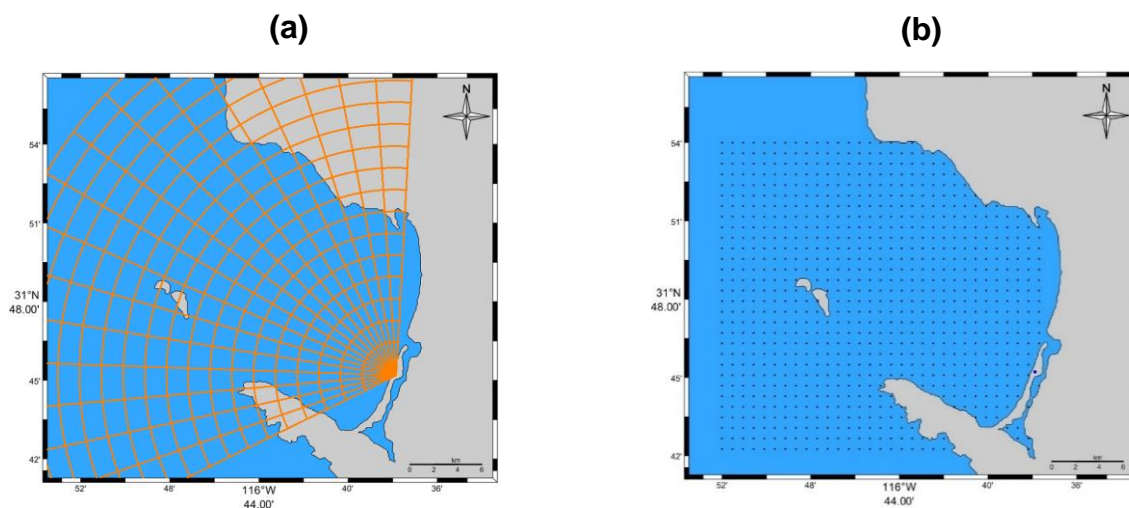


Figura 4. Área de estudio que muestra (a) el área de cobertura del HFR delimitada por el sector circular naranja, con resolución angular de 7°. (b) Los nodos de estimaciones puntuales del algoritmo usado por WERA.

La resolución angular del área de mapeo está directamente relacionada con el número de antenas RX (Toro, 2014), de acuerdo con la relación:

$$\Delta a = \frac{2}{n - 1} \quad (1)$$

donde:

Δa , es la resolución angular (en grados) y

n , es el número de antenas receptoras en el arreglo Rx

2.3 Datos y métodos

En este trabajo se utilizó un conjunto de datos de Hs obtenidos a partir de mediciones *in situ* del nivel del mar, que corresponden al periodo específico mostrado en la figura 5. Las estimaciones *in situ* de Hs se obtuvieron con tres perfiladores acústicos (ADCP, por sus siglas en inglés). En cada nodo de la malla (figura 4b), el radar estima la amplitud espectral (E) y con base en esta información se calculó la altura significativa de la ola.

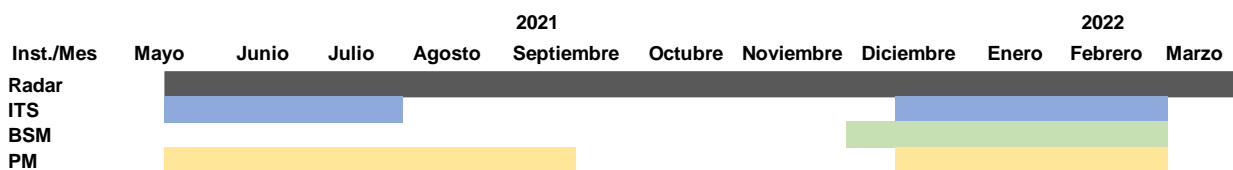


Figura 5. Disponibilidad temporal de los datos de los instrumentos. Las áreas en blanco representan la falta de información debido a inoperatividad de los ADCP.

2.3.1 Datos de HFR

En este trabajo se analizaron datos del periodo entre el 20 de mayo de 2021 y el 10 de marzo de 2022. En dicho periodo, el porcentaje de retorno de datos espectrales del oleaje del HFR fue de 71.3%, 70.8% y 57.4% en ITS, BSM y PM, respectivamente. La ausencia de mediciones se debe a periodos con baja relación señal-ruido, las cuales se asocian con velocidades bajas de viento, entre 0-4 ms⁻¹ (Lopez & Conley, 2019).

En la tabla 1 se muestra las características particulares del radar WERA utilizado en este trabajo.

Tabla 1. Características particulares del radar WERA que opera en BTS.

Variable	Valor
Antenas transmisoras	4
Antenas receptoras	16
Alcance máximo	50 km
Alcance de mapeo para estimar S	20 km
Resolución angular	7°
Frecuencia central de transmisión	25 MHz
Ancho de banda	+ - 125 KHz
Potencia de transmisión	45 W
Longitud de onda de transmisión	12 m
Longitud de onda de las olas Bragg	6 m
Frecuencia Bragg	+ - 0.49 Hz
Tasa de muestreo	1664 s (27 min 44 s)
Intervalo de medición	30 minutos

2.3.2 Instrumentos in situ

Los ADCP operan mediante la emisión de pulsos acústicos de alta frecuencia que se reflejan en las partículas en movimiento presentes en la columna de agua. A través del

análisis del cambio en la frecuencia de estos pulsos, los ADCP pueden determinar la velocidad y dirección del flujo de agua a diferentes profundidades. Dado que las olas inducen velocidades orbitales en la columna de agua y cambios en la presión que pueden ser medidos por un sensor de presión en los ADCP, estos proporcionar información acerca de las características de las olas, incluyendo la altura, periodo y dirección de propagación. En cuanto a su instalación, los ADCP son muy versátiles ya que se pueden instalar en vehículos autónomos, buques, boyas y en plataformas fijas al suelo marino (figura 6).

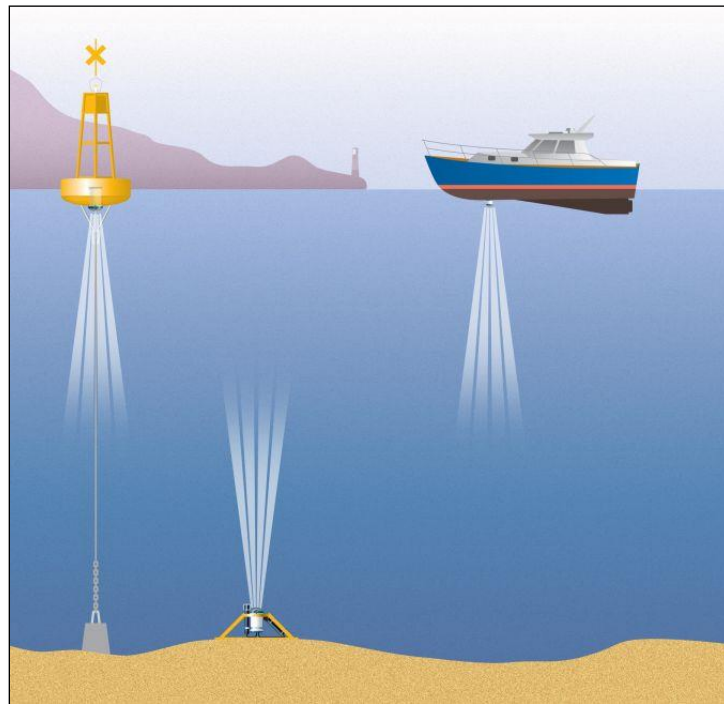


Figura 6. Esquema de algunas alternativas en las que se puede instalar un ADCP. Imagen tomada de: <https://www.hydro-international.com/content/news/the-latest-on-acoustic-doppler-current-profilers>.

El ADCP ubicado en ITS es un modelo *Aquadopp profile* fabricado por la compañía Nortek es usado principalmente en zonas estuarinas o costeras someras menores a 85 m de profundidad. Este sensor contiene tres transductores acústicos y un sensor de presión el cual se puede configurar como un sistema de medición combinado para oleaje y corrientes. Este modelo de perfilador acústico opera a tasa de muestreo de 1 o 2 Hz (Para más detalle, consultar su ficha técnica en: <https://www.nortekgroup.com/products/aquadopp-profiler-1-mhz/pdf>). Este instrumento se programó para realizar mediciones durante 1200 s (20 minutos) a intervalos de una hora y fue ubicado sobre la isobata de 22 m.

En las estaciones de monitoreo BSM y PM, se instalaron perfiladores acústicos *Signature 1000*, también fabricados por la empresa Nortek, anclados a profundidades de 17 y 19 m, respectivamente. Estos ADCP constan de cinco transductores, uno central y cuatro laterales. Este modelo tiene la capacidad de medir simultáneamente o de manera alternada las corrientes y características de las olas (entre ellas, Hs) con una tasa de muestreo de 16 Hz (Para más detalle consultar su ficha técnica en: <https://www.nortekgroup.com/products/signature-1000/pdf>). Los instrumentos se programaron para realizar mediciones durante 1024 segundos (equivalente a 17 minutos y 4 segundos) a intervalos de una hora.

2.4 Algoritmo WERA para estimar información del oleaje

El método utilizado por los sistemas WERA para estimar la altura significativa del oleaje a partir de la información del continuo de segundo orden en el espectro Doppler, utiliza un conjunto de coeficientes empíricos que varían en función de la frecuencia de transmisión. La metodología empleada se describe brevemente a continuación, para mayor detalle se recomienda consultar el trabajo de Gurgel *et al.* (2006).

La metodología para calcular H_s a partir de datos de HFR parte del supuesto que existe una relación lineal entre el continuo de segundo orden S y el espectro de altura de ola H medido por una boya direccional mediante las ecuaciones 2 y 3:

$$\alpha S_m = H * F(\varphi - \gamma) \quad (2)$$

$$\alpha S_p = H * F(\varphi - \gamma + \pi),. \quad (3)$$

Los subíndices m y p de S se refieren al desplazamiento Doppler negativo y positivo respectivamente. F es una función de dispersión angular que depende de φ , que es la dirección media de las olas medidas por la boya y γ hace referencia a la dirección de observación del radar, ambas medidas como grados azimutales.

El objetivo del algoritmo WERA es determinar H y φ mediante un método de inversión para las estimaciones de S . Gurgel *et al.* (2006) proponen soluciones para F como

$$F = [\cos(0.5\beta)]^s \quad (4)$$

donde β es el argumento de F , según sea el caso de la ecuación 2 ó 3

Las soluciones de las ecuaciones 2 y 3 son:

$$H = \alpha(S_m + S_p), \quad \text{con } s = 2 \quad (5)$$

$$H = \alpha\left(S_m + S_p + 2\sqrt{S_m S_p}\right), \quad \text{con } s = 4, \quad (6)$$

donde

$$S_m = \sum_{k=1}^2 \frac{\sigma_{(2)m}(f_D)}{\sigma_{(1)m}(f_D)}, \text{ se refiere al cambio de frecuencia Doppler positivo}$$

$$S_p = \sum_{i=1}^2 \frac{\sigma_{(2)p}(f_D)}{\sigma_{(1)p}(f_D)}, \text{ se refiere al cambio de frecuencia Doppler negativo.}$$

y σ_1 , σ_2 se utilizan para indicar los retornos de primer y segundo orden, en función de la frecuencia Doppler f_D , respectivamente.

El parámetro de corrección α está compuesto por una serie de coeficientes y se pueden determinar como la razón entre el espectro de altura del oleaje medido por alguna referencia (boya, ADCP, modelo numérico, etc.) y el espectro estimado por el radar. En la tabla 2 se proporcionan los coeficientes α_E , determinados en el experimento EuroROSE, asociados a las 21 frecuencias espectrales del oleaje medido por el radar que utilizan los modelos WERA por defecto.

Tabla 2. Coeficientes determinados en el proyecto EuroROSE

Índice (j) de la frecuencia espectral	Frecuencia de las olas medidas (Hz)	Coeficiente α_E
1	0.05	18.75
2	0.06	23.75
3	0.07	28.75
4	0.08	33.75
5	0.09	35
6	0.1	31.25
7	0.11	27.5
8	0.12	23.75
9	0.13	20
10	0.14	16.25
11	0.15	12.5
12	0.16	10.625
13	0.17	8.44
14	0.18	7.53
15	0.19	6.84
16	0.2	6.25
17	0.21	5.73
18	0.22	5.27
19	0.23	4.84
20	0.24	4.44
21	0.25	4.06

Finalmente, el cálculo de H_s depende del espectro de segundo orden y de los valores de α como se muestra en la ecuación 7

$$H_s = \sqrt{0.4 * \alpha \sum \frac{S * f_t^2}{27.65}} \quad (7)$$

donde:

S , amplitud espectral de las olas

f_t , frecuencia de transmisión del radar de cada medición.

α , parámetro de corrección.

2.5 Calibración de los coeficientes de corrección α

De acuerdo con Gurgel *et al.* (2006), se establece que los coeficientes de corrección α para las frecuencias de operación del radar pueden ser determinadas mediante la multiplicación de los coeficientes por el cuadrado del cociente entre 27.65 (frecuencia de operación donde se preestablecieron α_E) y la frecuencia de un radar particular en cuestión. Además, si se dispone de una referencia de Hs (boya, ADCP, modelo numérico) dentro del área de medición del radar, es posible determinar un nuevo conjunto de coeficientes a través del uso de cuadrados mínimos, tal como se explica en la sección 2.6.2

2.5.1 Calibración empírica en función de la frecuencia de transmisión del radar

De acuerdo con Gurgel *et al.* (2006), los coeficientes α se pueden determinar en función de la frecuencia central de transmisión y de los coeficientes α_E (ver tabla 2). Esta metodología se implementó por primera vez en el proyecto *Wings For Ships* durante abril y mayo de 2004 en la isla de Corsica, Italia en la que se compararon los resultados de Hs medidos por una boya y las estimaciones de un radar que operaba a 12.48 MHz.

La ecuación 8 relaciona el cálculo del parámetro empírico para una frecuencia central de transmisión particular.

$$\alpha_k = \left(\frac{27.65}{f_t} \right)^2 \alpha_E, \quad (8)$$

donde el valor de 27.65 es la frecuencia de transmisión utilizada en el experimento de EuroROSE.

2.5.2 Calibración empírica con una o varias referencias de Hs

La empresa Helzel Messtechnik implementó una actualización en el algoritmo de WERA que permite utilizar un conjunto diferente de coeficientes de corrección (α_p) ajustados a condiciones locales que permiten mejorar la estimación de parámetros del oleaje. Esta metodología optimiza α_E mediante valores de Hs de referencia proporcionados por una boya, ADCP, modelo numérico, etc. que se encuentre(n) dentro de la cobertura del radar.

La metodología de esta calibración relaciona el espectro Doppler normalizado de segundo orden (S) multiplicado por el parámetro de corrección (α_p), proporcional al cuadrado de la altura significativa (Hs) utilizada por la referencia (Hs_{ref}) expresada de la siguiente forma:

$$\sum_{k=1}^{21} S * \alpha_p = 6.25 * \left(\frac{Hs_{ref} * f_{tn}}{27.65} \right)^2, \quad (9)$$

el subíndice k se refiere a las bandas de frecuencia que resuelve el radar.

La ecuación 9 se puede escribir de forma matricial de la siguiente manera

$$\begin{bmatrix} S_{1,1} & S_{1,2} & \dots & S_{1,21} \\ \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ \cdot & \dots & \dots & \cdot \\ S_{n,1} & \dots & \dots & S_{n,21} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \alpha_{P_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \alpha_{P_{21}} \end{bmatrix} = \frac{25}{4(27.65^2)} \begin{bmatrix} (H_{S_{ref_1}} * f_{t_1})^2 \\ \cdot \\ \cdot \\ (H_{S_{ref_n}} * f_{t_n})^2 \end{bmatrix}$$

o en notación matricial compacta

$$E\alpha = C$$

La solución más adecuada consiste en encontrar la pseudoinversa de la matriz de coeficientes (E^+) y realizar una multiplicación matricial con el vector C (el cual hace referencia al producto de la altura significante de referencia y a la frecuencia de transmisión del radar) con el fin de minimizar el cuadrado de los residuos de $(C - E\alpha)^2$

$$\alpha = E^+ \cdot C \quad (10)$$

Es importante tener en cuenta que este procedimiento puede generar resultados con valores negativos de α , los cuales no corresponden con fenómenos físicos reales. Con el fin de evitar esta situación, se establece una restricción de la forma $A\alpha \leq B$. Con esta restricción se asegura que los valores de α sean siempre positivos y, por lo tanto, físicamente plausibles.

2.6 Validación de datos

En la actualidad, los datos generados por los HFR son ampliamente utilizados en diversas áreas, como la predicción del clima, la gestión costera, aprovechamiento de energía marina y las operaciones marítimas. Debido a la relevancia y diversidad de los usos de estos datos, es fundamental realizar un proceso de validación de los mismos. En particular, el error obtenido en las estimaciones del oleaje mediante los HFR puede ser crucial para mejorar la seguridad y eficiencia económica en áreas marino-costeras. La validación de los datos puede permitir identificar posibles errores o limitaciones de este sensor remoto, lo que, a su vez, puede contribuir a mejorar las estimaciones futuras y la precisión de los resultados.

En el presente estudio se emplearon tres indicadores estadísticos para evaluar la concordancia entre las estimaciones de H_s realizadas por el radar WERA y las mediciones obtenidas con tres perfiladores acústicos. En concreto se calculó la raíz del error cuadrático medio, (*RMSE*, por sus siglas en inglés), el coeficiente de correlación

lineal (R) y el sesgo, mediante las ecuaciones 11, 12 y 13 respectivamente. Estos indicadores se utilizan comúnmente en estudios de validación de datos ya que permiten evaluar los resultados obtenidos. En este sentido el $RMSE$ se utiliza para cuantificar la discrepancia entre los valores observados y estimados, mientras que el coeficiente de correlación y el sesgo se emplean para medir la fuerza y la dirección de la relación lineal de los mismos.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2} \quad (11)$$

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}} \quad (12)$$

$$sesgo = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n} \quad (13)$$

donde x_i es el i -ésimo registro del instrumento *in situ*, y_i la i -ésima estimación por el radar y \bar{x} y \bar{y} son el promedio temporal de los valores medidos por el instrumento *in situ* y el radar respectivamente.

3 Resultados y discusión

3.1 Resultados de la calibración

Con el objetivo de establecer un conjunto de coeficientes optimizados en función de la frecuencia de transmisión específica de transmisión del radar de la BTS ($f_t = 25 \text{ MHz}$), se empleó la ecuación 8 para calcular un nuevo conjunto de coeficientes de corrección α_k . Los resultados de este cálculo se presentan en la figura 8, en el que se compara los coeficientes α_E , α_k y α_p asociados a cada una de las frecuencias espectrales del oleaje.

3.2 Calibración empírica con datos de referencia de Hs

En los tres sitios de estudio, se emplearon 948 registros horarios de Hs de referencia proporcionados por los ADCP correspondientes al periodo comprendido entre el 12 de diciembre de 2021 y el 21 de enero de 2022.

Durante la aplicación del método numérico para encontrar la solución, se estableció una restricción representada por la siguiente desigualdad matricial:

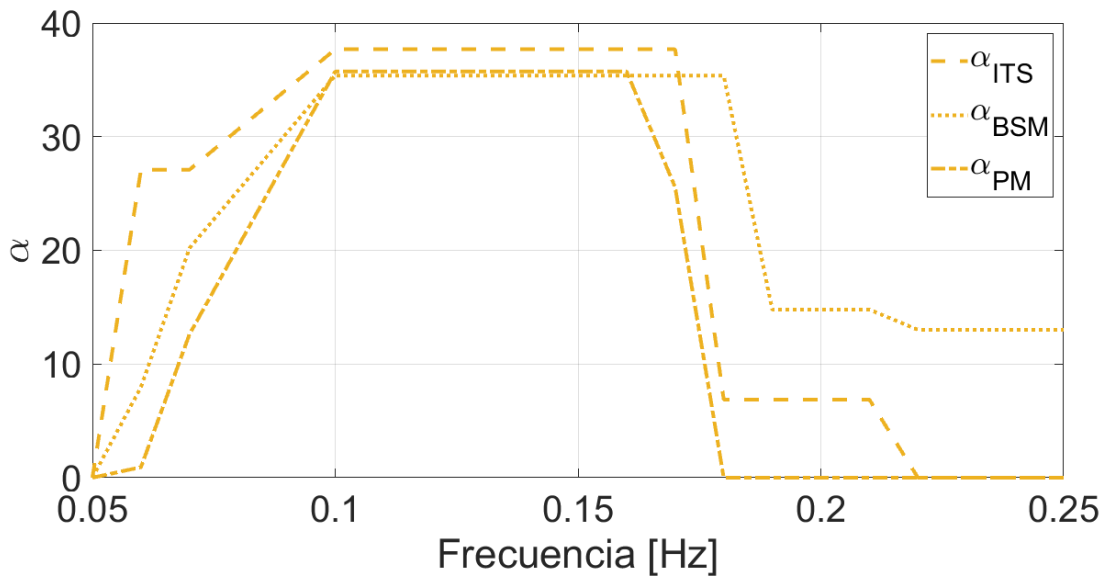


Figura 7. Coeficientes de calibración obtenidos de manera independiente para los tres sitios: Isla todos santos (ITS), Bajo San Miguel (BSM) y Punta Morro (PM)

Adicionalmente, se utilizó el algoritmo para procesar conjuntamente los datos de los tres sitios con el fin de obtener los coeficientes representativos de la Bahía de Todos Santos. Estos coeficientes se denominarán α_{BTS} , ya que son parámetros derivados de mediciones locales en sitios al interior de la bahía. La figura 8 muestra la comparación de los tres coeficientes α_E , α_k y $\alpha_p(\alpha_{BTS})$.

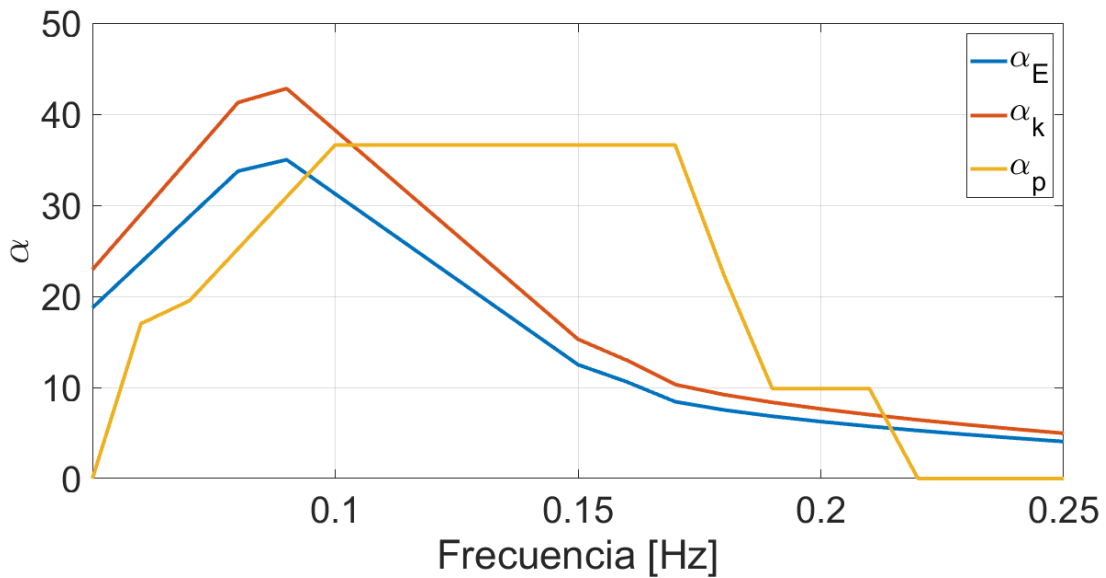


Figura 8. Coeficientes de corrección obtenidos en el experimento EuroROSE (α_E), los ajustados a la frecuencia de transmisión del HFR de la Bahía Todos Santos (α_k) y coeficientes optimizados con referencia local de Hs (α_p).

Los diferentes métodos de cálculo aplicados para obtener estos coeficientes de corrección revelaron que las variaciones numéricas entre ellos fueron mínimas. Este descubrimiento sugiere que el algoritmo empleado para la calibración es robusto, estable y brinda mayor confiabilidad al momento de calcular Hs.

El proceso de calibración basado en la solución óptima (α_p) de un sistema de ecuaciones lineales con múltiples incógnitas permite ajustar y corregir cualquier desviación o error sistemático que pueda afectar las mediciones del radar HF. Al minimizar la suma de los cuadrados de los residuos de la solución, se garantiza que los valores calibrados se

ajusten de manera óptima a las observaciones reales, y por tanto, se obtenga un conjunto de datos más coherentes.

3.3 Comparación espectral

Es fundamental considerar la variabilidad en la frecuencia asociada a la energía del oleaje dominante en el sitio de medición. La presencia de diferentes tipos de oleaje, como el oleaje local (windsea) y el oleaje proveniente de lugares lejanos (swell), influyen en las frecuencias en el espectro de oleaje. Por lo tanto, es relevante realizar un análisis detallado para discernir las características distintivas de estos eventos y cómo afectan las estimaciones obtenidas mediante un radar HF.

Un aspecto sobresaliente de este análisis es la capacidad del radar para identificar y caracterizar eventos de oleaje. La presencia de similitud visual entre los espectros estimados por el radar (figuras 9a, 10a y 11a) y las mediciones puntuales (figuras 9b, 10b y 11b) es evidencia de la efectividad del algoritmo de estimación utilizado en el radar HF.

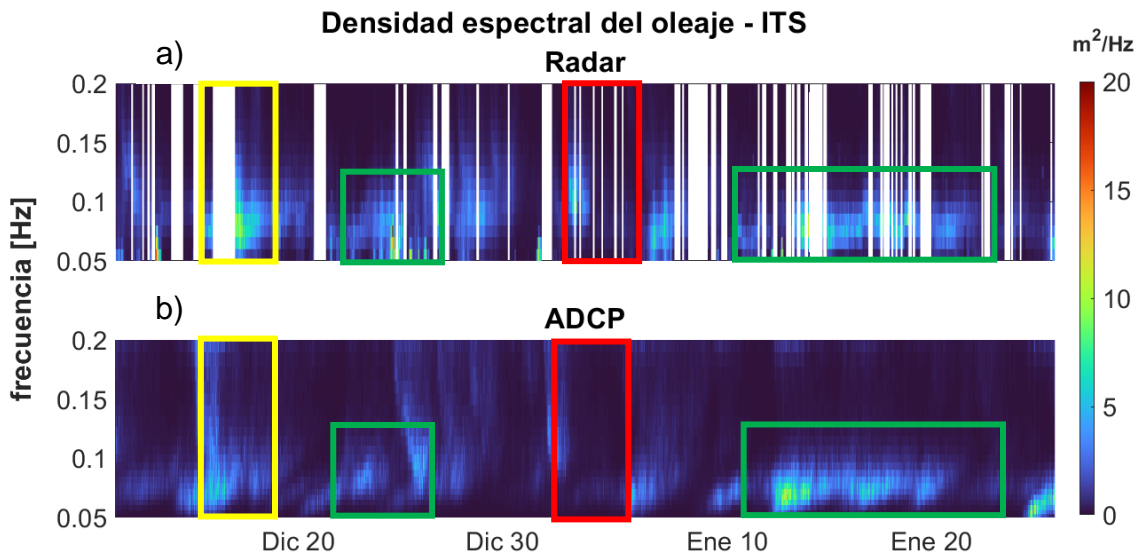


Figura 9. Espectros de densidad de energía del oleaje estimados por el radar (a) y por ADCP en Isla de Todos Santos (b). Los cuadros de color rojo indican eventos de oleaje local, los cuadros de color verde indican eventos de oleaje lejano y los recuadros de color amarillo indican regímenes bimodales.

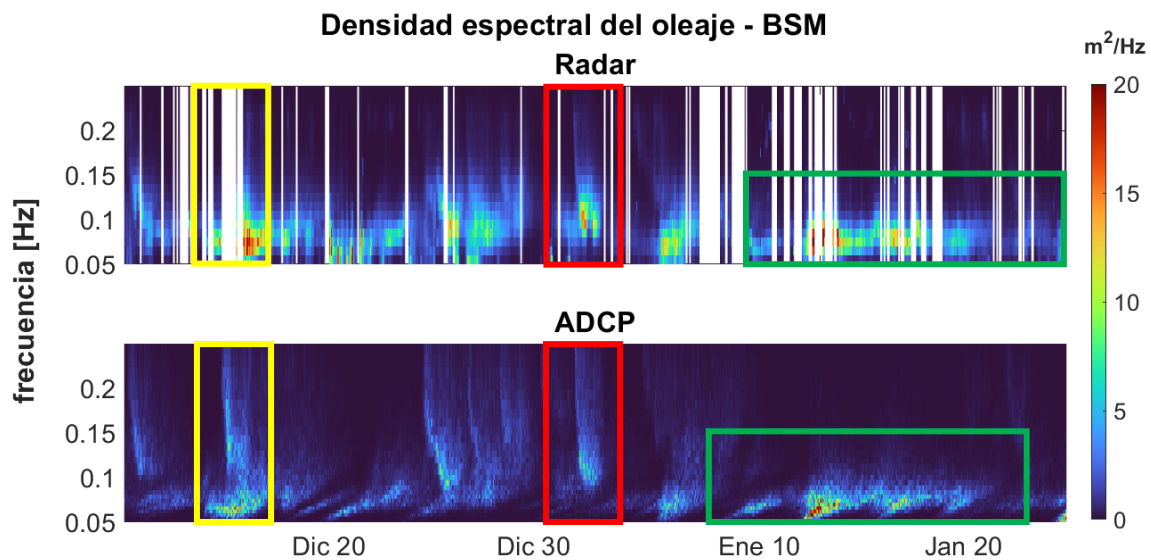


Figura 10. Análogo a la figura 7 en el sitio de Bajo de San Miguel.

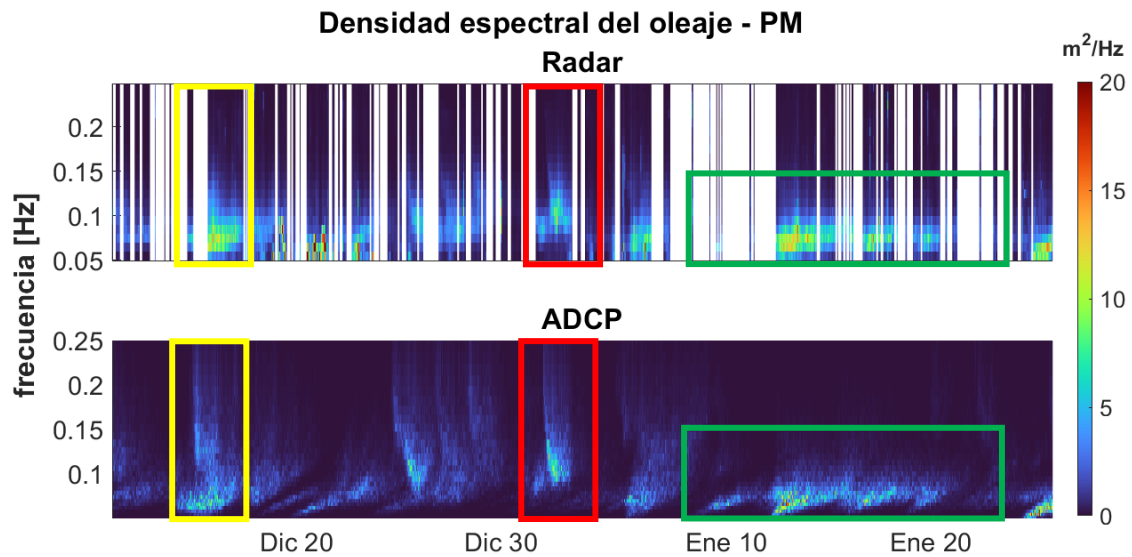


Figura 11. Análogo a las figuras 7 y 8 en el sitio Punta Morro.

Una adecuada representación de la forma y la amplitud del espectro del oleaje es de gran importancia para asegurar la confiabilidad de los resultados obtenidos mediante el radar HF. Por un lado, la forma del espectro proporciona información valiosa sobre la distribución de energía de las olas en diferentes rangos de frecuencia, lo que puede influir en la dinámica del oleaje en el área de estudio. Por otro lado, la amplitud del espectro está estrechamente relacionada con la altura significativa, un parámetro esencial para caracterizar el estado de mar.

3.4 Comparación de altura significativa (H_s)

La altura significativa se calculó para los tres sitios en el periodo entre el 20 de mayo de 2021 y el 10 de marzo de 2022. Para el cálculo se utilizó la amplitud espectral derivada del retorno de segundo orden y el parámetro de corrección α_{BTS} (ec. 7).

Una vez calibrado el algoritmo del radar se obtuvieron las series de tiempo de Hs las cuales se presentan en la figura 12. Se observa una notable coherencia entre los valores de Hs de entre el radar y el ADCP en los tres sitios, especialmente durante el periodo de diciembre de 2021 y marzo de 2022. Sin embargo, se identifican discrepancias entre ambos instrumentos en PM (figura 12c) cuando el perfilador acústico registra valores de Hs inferiores a 1 m.

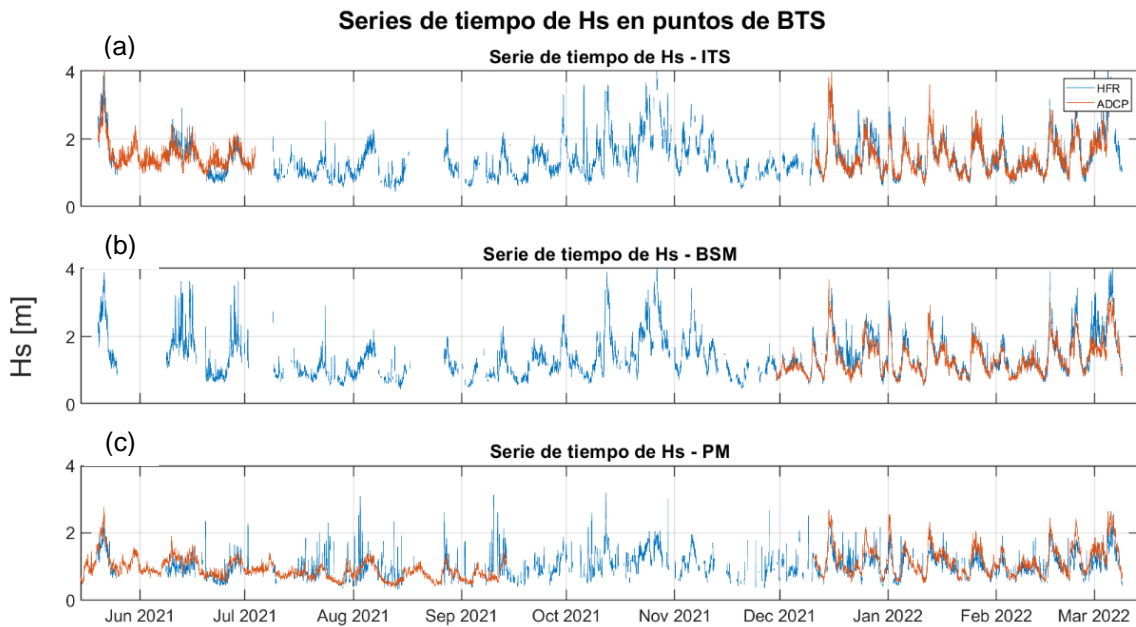


Figura 12. Comparación de las estimaciones de Hs obtenidas por el radar (líneas azules) y los perfiladores acústicos (líneas naranjas) en los tres sitios: ITS (a), BSM (b) y PM (c).

Las discrepancias en mediciones de Hs inferiores a 1 metro pueden atribuirse a factores como la influencia de las condiciones ambientales cercanas a la superficie del mar, como

la presencia de vientos locales o pequeñas corrientes, que pueden afectar las mediciones del radar.

En la figura 13 se presenta una comparación entre las mediciones de altura significativa obtenidas a través del radar y las mediciones in situ. En términos generales se observa una concordancia satisfactoria entre ambos instrumentos en ITS (figura 13a), especialmente para valores inferiores a 2 m de altura. Esto indica que el radar es capaz de capturar de manera adecuada las mediciones de Hs en este lugar. Sin embargo, en comparación con los valores obtenidos con el perfilador acústico, las observaciones del radar muestran una subestimación y una sobreestimación en BSM (figura 13b) y PM (figura 13c), respectivamente. Esta discrepancia puede atribuirse a factores como condiciones locales de propagación de las olas o posibles errores de mediciones en el radar.

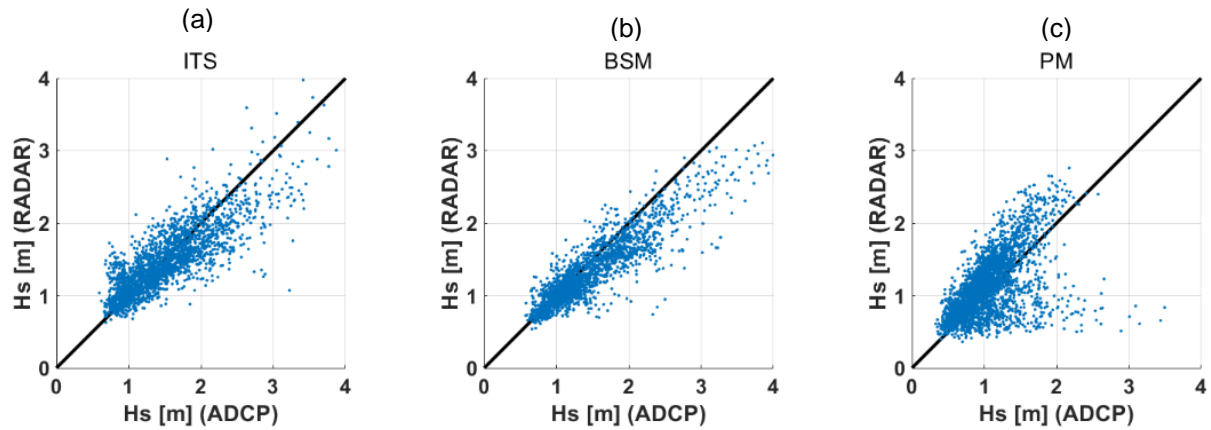


Figura 13. Diagramas de dispersión de las estimaciones de Hs del radar comparadas con datos medidos en los tres sitios: ITS(a), BSM(b) y PM(c). La línea sólida de color negro corresponde a una línea de correlación perfecta 1:1

Los resultados de los indicadores estadísticos descritos en la sección 2.7, referentes a la comparación del cálculo de Hs por parte del radar (estimados con α_E, α_k y α_{BTS}) y los ADCP en los tres sitios, se muestra en la tabla 3.

Tabla 3. Estadísticos resumidos de comparaciones de Hs entre el HFR y ADCP en los tres sitios de estudio. Se muestra los resultados obtenidos por el algoritmo WERA (α_E), La optimización realizada con base a la ecuación 8 (α_k) y la calibración con los datos de referencia Hs (α_{BTS}). N hace referencia al número de datos.

Sitio	Coefficientes usados	R	RMSE [cm]	sesgo [cm]	N
ITS	α_E	0.76	34.7	8.3	2232
	α_k	0.76	37.2	-6.6	
	α_{BTS}	0.82	30	4.7	
BSM	α_E	0.81	31.9	-5.7	1963
	α_k	0.81	40.6	-20.6	
	α_{BTS}	0.89	25.6	-5.6	
PM	α_E	0.4	47.1	11.9	2799
	α_k	0.4	48	10.3	
	α_{BTS}	0.54	40.7	13.56	

La optimización realizada al usar los coeficientes de α_{BTS} demostró mejoras significativas en los tres sitios analizados. En primer lugar, se observó un incremento de más del 9% en el coeficiente de correlación (R) tanto en ITS como en BSM, mientras que PM se destacó con un aumento del 14%. Estos resultados indican mayor precisión y confiabilidad al utilizar los coeficientes optimizados.

Los resultados demuestran que los coeficientes α_{BTS} presentan la mejor concordancia con las mediciones *in situ* de Hs. Para determinar la significancia del coeficiente de correlación (R), se realizó una prueba *t-student* con un nivel de confianza del 95%, cuyo resultado indica que las correlaciones de Hs para los tres sitios en los instrumentos son significativas. Los valores de R obtenidos para los tres sitios con los coeficientes de α_{BTS}

son mayores que aquellos obtenidos con α_E y α_k , lo que sugiere una relación más consistente entre los datos del radar y los perfiladores acústicos. Además, los valores de *RMSE* y *sesgo* se encuentran en un rango menor cuando se utiliza α_{BTS} , lo que indica una mejor precisión y menor diferencia entre los valores estimados y las mediciones *in situ*.

Adicionalmente, los indicadores de error también demostraron una mejoría notable. El *RMSE* disminuyó en un 13.5% para ITS y PM, mientras que para BSM sobresalió con una disminución del 19.7%. Esto indica un progreso sustancial en la capacidad de reducir el error al utilizar los coeficientes optimizados. Por otro lado, es importante destacar los cambios en el *sesgo* en ITS con una disminución del 43.4%. Sin embargo, para el caso de BSM se mantuvo prácticamente igual mientras que para PM el *sesgo* aumentó en un 14%.

Es importante tener en cuenta otras propuestas de calibración del algoritmo WERA. Por ejemplo, Lopez *et al.* (2016) realizaron una calibración, utilizando como referencia los espectros de olas derivados de instrumentos *in situ* y, encontró correlaciones de H_s superiores a 0.9, *RMSE* cercanos a 35 cm y *sesgo* de 0.06 m en comparación con los mismos instrumentos. Toro *et al.* (2014) propusieron la calibración de (α_p) en función de dos parámetros: la velocidad del viento a 10 m por encima del nivel medio del mar (U_{10}) y la razón entre la energía asociada al swell y la energía asociada al oleaje local ($\frac{E_{Swel}}{E_{Sea}}$),

Sus comparaciones de H_s con mediciones de una boya arrojaron resultados de coeficiente de correlación $R = 0.91$, $RMSE = 0.26 m$ y $sesgo = 0.18 m$

3.5 Efecto del ángulo de propagación del oleaje en las mediciones

El ángulo de propagación de las olas es un factor importante que puede influir en las mediciones de un HFR. La interacción entre las olas y las ondas de radio en paralelo permite obtener mediciones más precisas de las olas (Lipa & Barrick, 1986). Esto se debe a que cuando ocurre la interacción hidrodinámica y electromagnética paralelamente, las ondas del radar pueden atravesar las olas sin reflejarse significativamente, lo que evita distorsiones en las señales reflejadas.

Con el fin de analizar cómo la dirección relativa de propagación del oleaje afecta la estimación de la altura significativa, se realizó un análisis de las diferencias entre la H_s estimada con el radar y la observada con los ADCP para diferentes direcciones de incidencia. Para este análisis se utilizaron solamente los datos de ITS, ya que como lo muestra la figura 14, es el sitio con la mayor variabilidad en la dirección de propagación del oleaje.

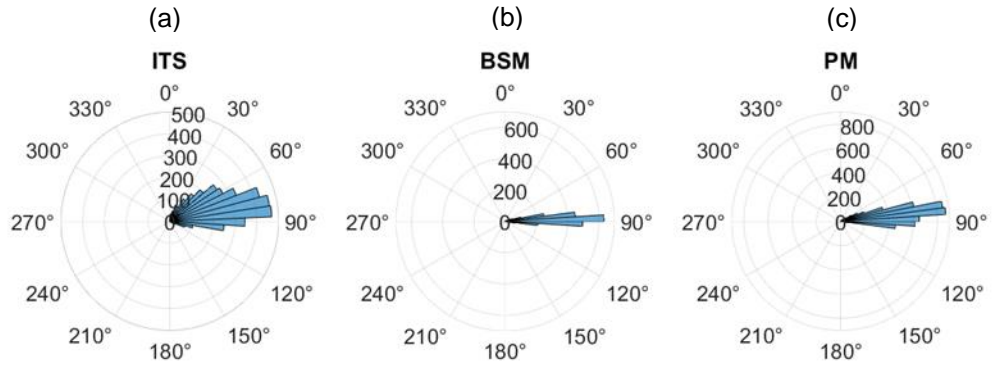


Figura 14. Histogramas circulares que representan la dirección de propagación del oleaje medida por los instrumentos in situ en los tres sitios: ITS (a), BSM (b) y PM (c).

Para este análisis se define el ángulo relativo θ como la diferencia entre la dirección de propagación del oleaje y la dirección del haz del radar que intercepta con el sitio de medición del instrumento in situ como se muestra en la figura 15 para el caso de ITS.

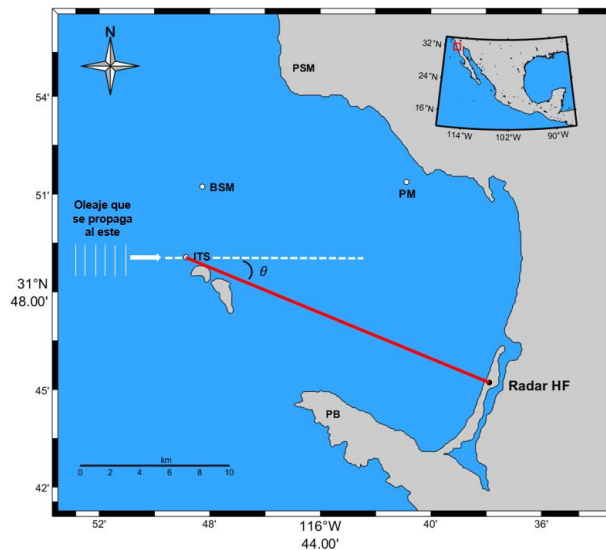


Figura 15. Diagrama que representa el ángulo relativo θ para el sitio ITS, en el que se muestra un oleaje que se propaga hacia el este.

Con el objetivo de analizar estadísticamente la influencia de θ , se agruparon los valores de Hs con base al rango de θ . Esta clasificación se realizó con intervalos de clase de 10°. Para cada intervalo se determinaron los indicadores estadísticos definidos en la sección 2.7, con el fin de evaluar la concordancia de los registros de ambos instrumentos.

Tabla 4. Indicadores estadísticos en función del ángulo relativo (θ).

Intervalo de clase	<i>R</i>	<i>RMSE</i> [cm]	<i>sesgo</i> [cm]	N
[0°,10°)	0.82	34.3	-1.5	105
[10°,20°)	0.81	33	-0.9	217
[20°,30°)	0.82	30	1.8	401
[30°,40°)	0.83	28	2.8	504
[40°,50°)	0.85	26.8	1.8	367
[50°,60°)	0.82	30.9	7	234
[60°,70°)	0.82	27.8	12.3	151
[70°,80°)	0.77	30.4	14.5	124
[80°,90°]	0.74	38.6	19.5	111

Los indicadores estadísticos obtenidos de la tabla 4 en relación con el ángulo relativo θ se resumen en la figura 16. Se puede observar que el coeficiente de correlación se mantiene en gran medida constante, aunque alcanza su valor máximo de 0.85 en el intervalo de clase [40,50). En cuanto al *RMSE* se evidencia una relación inversamente proporcional para valores de θ inferiores a 40°. Dentro de intervalo de clase de [40,50) el *RMSE* alcanza su valor mínimo, lo que indica una mayor precisión de los valores de Hs

estimados en este rango. Sin embargo, a medida que θ supera los 50° , el error exhibe un rápido incremento. En cuanto al sesgo, se observa que los intervalos de clase con menor error (sesgo casi nulo) se encuentran en el rango de $\theta < 40^\circ$. No obstante, a medida que θ supera los 50° , se observa un aumento progresivo en este indicador, lo que sugiere una tendencia a subestimar los cálculos derivados del radar en estos ángulos. Este resultado plantea la posibilidad de que el radar presente mayores dificultades de realizar predicciones en ángulos superiores a 50° .

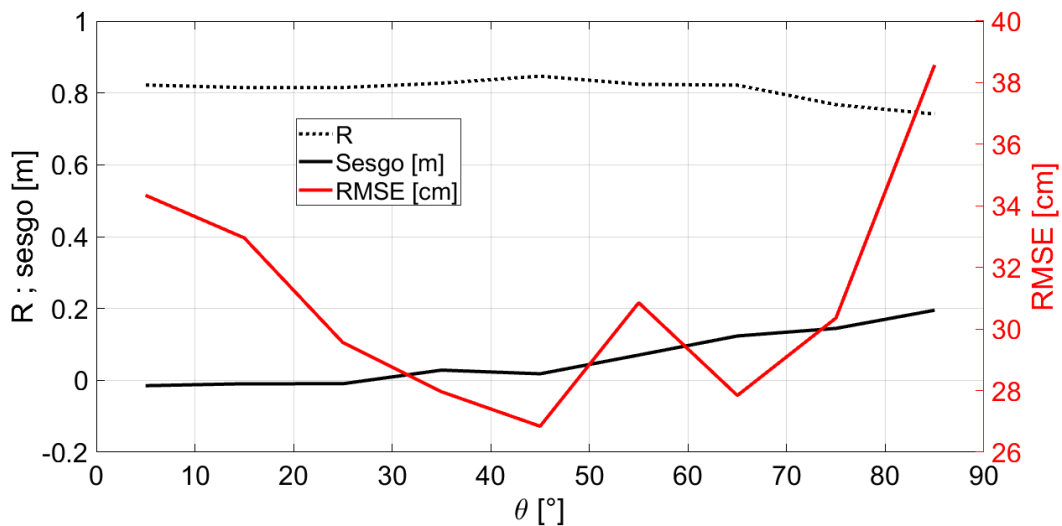


Figura 16. Indicadores estadísticos de la comparación de la altura significativa estimada con HFR y con ADCP en función del ángulo relativo θ .

La diferencia de la altura significativa estimada por el radar y la observada con el ADCP, ($\Delta H_s = H_{s_{ADCP}} - H_{s_{Radar}}$) como función de θ se muestra en la figura 17. Se observa que la dispersión de los datos, representada por las barras de error, es prácticamente

constante para todos los intervalos de clase, lo que indica que el error se mantiene invariable independiente del ángulo relativo considerado.

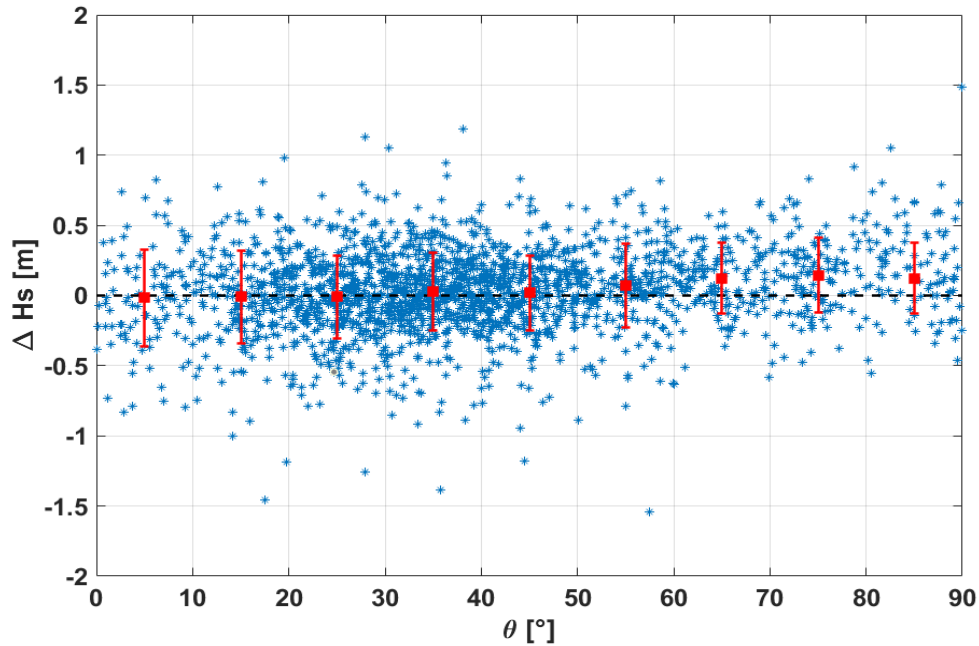


Figura 17. Representación gráfica de la diferencia de Hs entre las estimaciones del ADCP y el radar en función del ángulo relativo (θ). Los marcadores de color rojo representan el promedio y las barras de error una desviación estándar para intervalos del ángulo relativo cada 10°.

La dispersión constante para ΔH_s en función de θ es de gran relevancia en el contexto de la calibración y validación de mediciones de Hs. Esta invariabilidad sugiere que independientemente del ángulo de propagación del oleaje, el radar y el ADCP proporcionan mediciones coherentes de Hs. Una posible explicación para este resultado es que ambos dispositivos están respondiendo de manera similar a las condiciones oceanográficas presentes en la bahía. Es importante destacar que se necesitan investigaciones adicionales para corroborar esta suposición.

4 Conclusiones

En este trabajo de investigación se presenta la calibración del algoritmo empírico utilizado por el radar WERA para estimar la altura significativa del oleaje en una zona costera (Bahía de Todos Santos). Para llevar a cabo la calibración se utilizó un conjunto de datos horarios de altura significativa (Hs) de ~45 días obtenidos a través de tres perfiladores acústicos operantes dentro de la cobertura del radar.

En este estudio se utilizó una técnica de calibración basada en datos de referencia de Hs y se determinaron los mejores coeficientes de corrección mediante una técnica de análisis numérico. La serie temporal, basada en los nuevos coeficientes obtenidos tras la calibración del algoritmo, fue comparada con los resultados proporcionados por los perfiladores acústicos de los tres sitios durante un periodo de 10 meses, comprendido entre mayo de 2021 y marzo de 2022.

Los resultados indican que la calibración fue exitosa, ya que las mediciones de Hs realizadas con el algoritmo WERA calibrado, presentaron mayor concordancia con los valores medidos por los ADCP comparado con las mediciones realizadas por el algoritmo WERA sin calibrar. La calibración del algoritmo WERA resulta esencial para la exactitud de las mediciones de Hs y permite una mejor concordancia entre los valores estimados por el radar y los ADCP.

Los resultados sugieren que la calibración local del algoritmo empírico utilizado por el radar WERA es esencial para obtener estimaciones confiables de altura significativa del oleaje. Cabe destacar que, aunque los coeficientes α_E y α_k también producen estimaciones razonablemente precisas de H_s , los resultados obtenidos con α_{BTS} son significativamente mejores. Se observó que los coeficientes de corrección obtenidos con el método numérico en los tres sitios dentro de la bahía son similares, lo que indica poca variabilidad espacial en la calibración del radar a lo largo del área de estudio.

Esta homogeneidad en los coeficientes de corrección sugiere que el HFR utilizado ha sido confiable y consistente en sus mediciones a lo largo de la bahía. La uniformidad en la calibración es un indicativo de la capacidad del radar para proporcionar estimaciones fiables en la altura significativa del oleaje dentro de la bahía. Sin embargo, es importante tener en cuenta que la suposición de que las mediciones in situ son las verdaderas y que cualquier diferencia se atribuye a la técnica usada por el HFR puede no ser estrictamente cierta. Las diferencias pueden surgir debido a los principios de medición de ambos instrumentos, diferentes tasas de muestro y la variabilidad espacial en las comparaciones.

Además de la calibración, se estudió la incidencia del ángulo relativo (θ) entre la dirección de propagación del oleaje y la dirección radial del radar en dirección al ADCP. Los resultados de este trabajo indican que el ángulo de propagación del oleaje no tiene una

influencia significativa en las diferencias entre las mediciones de ambos instrumentos en términos de altura significativa (H_s). Es relevante resaltar que la consistencia en la dispersión de datos en los diferentes intervalos de clase respalda la fiabilidad de las estimaciones de las diferencias entre los dos instrumentos. Sin embargo, es necesario considerar otros factores ambientales que pueden afectar las mediciones y que podrían requerir una investigación adicional para evaluar su impacto en las discrepancias observadas y bajo diferentes escenarios.

5 Referencias

- Al-Attabi, Z. R. A. (2021). HF Radar Signal Inversion for Wind and Swell Ocean Waves. Doctoral dissertation, University of South Carolina. Retrieved from <https://scholarcommons.sc.edu/etd/6364>
- Barrick, D. (2008). 30 Years of CMTD and CODAR. *Working Conference on Current Measurement Technology*, 9, 131–136. <https://doi.org/10.1109/CCM.2008.4480856>
- Esquivel-Trava, B., & Acosta, G. (2021). Variabilidad temporal del campo del oleaje en el laboratorio natural de Bahía de Todos Santos, Baja California, México. Ponencia en primer congreso internacional CEMIE-OCÉANO 129–130. <https://doi.org/DOI:10.26359/EPOMEX.CEMIE052021>
- Falco, P., Buonocore, B., Cianelli, D., De Luca, L., Giordano, A., Iermano, I., Kalampokis, A., Saviano, S., Uttieri, M., Zambardino, G., & Zambianchi, E. (2016). Dynamics and sea state in the gulf of Naples: Potential use of high-frequency radar data in an

operational oceanographic context. *Journal of Operational Oceanography*, 9, s33–s45. <https://doi.org/10.1080/1755876X.2015.1115633>

Gomez, R., Helzel, T., Wyatt, L., Lopez, G., Conley, D., Thomas, N., Smet, S., & Sicot, G. (2015). Estimation of wave parameters from HF radar using different methodologies and compared with wave buoy measurements at the Wave Hub. *MTS/IEEE OCEANS 2015 - Genova: Discovering Sustainable Ocean Energy for a New World*. <https://doi.org/10.1109/OCEANS-Genova.2015.7271477>

Gurgel, K. W., Essen, H. H., & Schlick, T. (2006). An empirical method to derive ocean waves from second-order Bragg scattering: Prospects and limitations. *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 31(4), 804–811. <https://doi.org/10.1109/JOE.2006.886225>

Gurgel, K.-W., Antonischki, G., & Schlick, T. (1997). A Comparison of surface current fields derived by beam forming and direction finding techniques as applied by the HF Radar WERA. *IGARSS'97. 1997 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings*, 4, 1805-1807. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.1997.609081>

Gurgel, K.-W., Essen, H. H., & Kingsley, S. (1999). High-frequency radars: physical limitations and recent developments. *Coastal Engineering*. 37(3-4), 201-2018. [https://doi.org/10.1016/S0378-3839\(99\)00026-5](https://doi.org/10.1016/S0378-3839(99)00026-5)

Hasselmann, K. (1971). Determination of ocean wave spectra from Doppler radio from sea surface. *Nature Physical Science*, 229(1), 17–17. <https://doi.org/10.1038/physci229016a0>

- Lipa, B., & Barrick, D. (1986). Extraction of sea state from HF radar sea echo: Mathematical theory and modeling. *Radio Science*, 21, 81–100. <https://doi.org/10.1029/RS021i001p00081>
- Lipa, B., Isaacson, J., Nyden, B., & Barrick, D. (2012). Tsunami arrival detection with high frequency (HF) radar. *Remote Sensing*, 4(5), 1448–1461. <https://doi.org/10.3390/rs4051448>
- Lopez, G., & Conley, D. (2019). Comparison of HF radar fields of directional wave spectra against in situ measurements at multiple locations. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(8), 271. <https://doi.org/10.3390/jmse7080271>
- Lopez, G., Conley, D. C., & Greaves, D. (2016). Calibration, validation, and analysis of an empirical algorithm for the retrieval of wave spectra from HF radar sea echo. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 33(2), 245–261. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-15-0159.1>
- Mantovani, C., Corgnati, L., Horstmann, J., Rubio, A., Reyes, E., Quentin, C., Cosoli, S., Luis Asensio, J., Mader, J., Griffa, A., Best, al, Hermes, J., Dean Paduan, J., & Emery, B. (2020). Best practices on high frequency radar deployment and operation for ocean current measurement. *Frontiers in Marine Science*, 7, 210. *Frontiers in Marine Science*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00210>
- Martinez-Diaz-De-Leon, A. (2004). Spatial variability of wave data from Todos Santos Bay, Baja California, Mexico. *Journal of Coastal Research*, 20(4), 1231–1236. <https://doi.org/10.2112/03-0046rr.1>

- Martínez-Díaz-de-León, A., Nava-Button, C., & Ocampo-Torres, F. J. (1989). Ocean wave statistics for Todos Santos Bay, B.C., from September 1986 to August 1987. *Ciencias Marinas*, 15(3), 1–20. <https://doi.org/10.7773/cm.v15i3.659>
- Mastenbroek, C., & De Valk, C. F. (2000). A semiparametric algorithm to retrieve ocean wave spectra from synthetic aperture radar. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 105(C2), 3497–3516. <https://doi.org/10.1029/1999jc900282>
- Paduan, J. D., & Graber, H. C. (1997). Introduction to high frequency radar: Reality and myth. *Oceanography*, 10(2), 36–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.5670/oceanog.1997.18>
- Roarty, H., Cook, T., Hazard, L., Harlan, J., Cosoli, S., Wyatt, L., Fanjul, E. A., Terrill, E., Otero, M., Largier, J., Glenn, S., Ebuchi, N., Whitehouse, B., Bartlett, K., Mader, J., Rubio, A., Corgnati, L. P., Mantovani, C., Griffa, A., ... Matta, K. S. (2019). The global high frequency radar network. *Frontiers in Marine Science*, 6(MAR). <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00164>
- Schulz-Stellenfleth, J., Lehner, S., & Hoja, D. (2005). A parametric scheme for the retrieval of two-dimensional ocean wave spectra from synthetic aperture radar look cross spectra. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 110(5), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2004JC002822>
- Toro, V. G. (2014). Estudio sobre el crecimiento del oleaje limitado por el fetch en presencia del swell utilizando radares de alta frecuencia. CICESE. Tesis de doctorado. <http://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/1232>

- Toro, V. G., Ocampo-Torres, F. J., Osuna, P., García-Nava, H., Flores-Vidal, X., & Durazo, R. (2014). Análisis del crecimiento del oleaje limitado por el fetch usando radares de alta frecuencia en el golfo de Tehuantepec. *Ciencias Marinas*, 40(2), 113–132. <https://doi.org/10.7773/cm.v40i2.2403>
- Vesecky, J., Drake, J., Teague, C., Ludwig, F., Davidson, K., & Paduan, J. (2002). Measurement of wind speed and direction using multifrequency hf radar. *IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 3, 1899–1901. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2002.1026293>.
- Wyatt, L. R., Green, J. J., & Middleditch, A. (2011). HF radar data quality requirements for wave measurement. *Coastal Engineering*, 58(4), 327–336. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2010.11.005>
- Zhang, S. S., Wen, B. Y., & Zhou, H. (2013). Analysis of the higher order Bragg scatter in HF radar. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 27(4), 507–517. <https://doi.org/10.1080/09205071.2013.753844>