



Anexo “2”
Proyecto “INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA MARINA PARA LA SEGURIDAD
MARÍTIMA EN LA ANTÁRTICA –ICEMAN - OCEANOGRAFÍA”

1. Relación con la Agenda Científica Antártica de Colombia 2014-2035

| Área Temática | Línea de Investigación | Sublínea |
|---|-----------------------------|--|
| Seguridad Marítima | Seguridad en la navegación | Deriva de hielos flotantes, proceso de formación de hielos no permanentes, detección de hielos flotantes, pronóstico del tiempo marítimo, fenómenos de resonancia en bahías y estrechos. |
| Relaciones entre Suramérica y Antártida | Oceanografía | Oceanografía física, química, biológica, pesquera y geológica. |
| | Climatología y meteorología | Meteorología marina. Interacción océano-atmósfera. Relaciones climatológicas con Colombia y Suramérica. Clima Antártico y fenómeno de El Niño. |

2. Investigadores y entidades participantes en esta fase del proyecto:

| Investigador | Entidad | Actividades desarrolladas |
|---------------------------------|---------|--|
| CN. Rafael Ricardo Torres Parra | DIMAR | Diseño metodológico y operacional de la investigación. Coordinación de las actividades de instalación y fondeo de equipos meteomarineros. Apoyo en el desarrollo de estaciones oceanográficas. |
| PD08. Ana Lucia Caicedo Laurido | | Configuración, instalación y fondeo de equipos oceanográficos para el registro de datos de oleaje, corrientes y nivel del mar. Apoyo en la obtención de perfiles de CTD durante las estaciones oceanográficas. |
| S2. José David Iriarte | | Configuración de equipos oceanográficos para la obtención de perfiles de CTD y desarrollo de estaciones oceanográficas. Apoyo en las actividades de fondeo de equipos oceanográficos. |
| S2. Néstor Avellaneda | | Configuración e instalación de estación meteorológica portátil. Apoyo en la obtención de perfiles de CTD durante las estaciones oceanográficas. Apoyo en las actividades de fondeo de equipos oceanográficos. |



Actividades desarrolladas en el ARC “20 de Julio”

- Configuración e instalación de la Plataforma Móvil Embarcada – PMO con 2 winches.
- Obtención de perfiles de temperatura y salinidad empleando CTD en 30 estaciones oceanográficas.
- Configuración de dos (02) registradores de oleaje direccional (DWR, por sus siglas en inglés) de acuerdo a las necesidades específicas de la investigación.
- Ensamblaje sistema de fondeo integrado por la estructura de acero inoxidable y los equipos de medición.
- Fondeo y recuperación de dos (02) registradores de oleaje direccional (DWR, por sus siglas en inglés) en cercanías de la base antártica González Videla y Yelcho.
- Configuración e instalación de una estación meteorológica portátil a bordo del ARC 20 de Julio.

3. Otras entidades participantes

- Tripulación del buque ARC 20 de julio, los cuales además de proporcionar el desplazamiento hasta las áreas de interés de investigación, brindaron información sobre las condiciones meteomarinas reinantes en el sector. De igual forma apoyaron en la ejecución de maniobras de instalación de la Plataforma Móvil Oceanográfica (PMO) y el Laboratorio Oceanográfico Móvil Embarcado (LOME), las cuales demandaron la participación del contra maestre y personal experto en áreas específicas.
- Escuela Naval Almirante Padilla (ENAP), apoyo durante el desarrollo de las estaciones oceanográficas a bordo del ARC 20 de Julio y en el ensamblaje de las estructuras necesarias para el fondeo de los equipos DWR.
- Grupo de Departamento de Buceo y Salvamento (DEBUSA), los cuales proporcionaron apoyo en el fondeo y recuperación de los equipos de investigación.
- Universidad de Valparaíso Chile y Universidad de Playa Ancha, por el suministro de fuentes de datos para la validación del reanálisis de oleaje, así como referencias y asesoría en el análisis de los datos.

4. Objetivo general del proyecto

Desarrollar investigación científica marina orientada a la seguridad marítima en el continente Antártico (Estrecho de Gerlache).

5. Objetivo(s) particular(es) para la fase del proyecto desarrollada en el verano austral 2015-2016.



Objetivo particular 1. Aportar al entendimiento de las condiciones oceanográficas y meteorológicas del estrecho de Gerlache durante el verano austral 2016-2017.

Objetivo particular 2. Estudiar la variabilidad interanual del oleaje y el nivel del mar en territorio Antártico (Estrecho de Gerlache).

Objetivo particular 3. Implementar bloques de interacción entre el hielo flotante y el oleaje bajo las condiciones termodinámicas del área de estudio, identificando la dinámica entre los mismos.

6. Base o buque donde desarrollaron los objetivos particulares

Las actividades de investigación fueron desarrolladas principalmente a bordo del buque ARC 20 de Julio, unidad desde la cual se efectuaron las estaciones oceanográficas que permitieron la obtención de perfiles de temperatura, conductividad (salinidad), profundidad y oxígeno, empleando para ello un CTDO (*Conductivity, Temperature, Depth & Oxygen*). De igual forma, desde esta plataforma, se llevó a cabo el desplazamiento del personal y equipo oceanográfico especializado, hasta puntos geográficos cercanos aptos para la transitabilidad de la embarcación, a las áreas más someras destinadas para las maniobras de fondeo. Una vez ahí, a bordo del bote *Defender* y el bote *Zodiac* se ejecutó dicha maniobra.

7. Descripción de equipo científico y de apoyo

De acuerdo con lo descrito en la sección 5.1 Oceanografía Física, secciones de equipo y metodología, del “Informe Final Crucero Expedición de Colombia a la Antártida 2016-2017” (Torres, 2017).

8. Descripción de las principales actividades de investigación desarrolladas.

Entre el 14 y 28 de enero 2017 sobre el Estrecho de Gerlache se desarrolló la III campaña oceanográfica de Colombia en la Antártida, a bordo del buque ARC 20 de Julio de la Armada Nacional de Colombia.

El crucero oceanográfico se realizó en el estrecho de Gerlache, sobre el área comprendida entre los meridianos 58.0° a 64.0°W y entre las latitudes 62.3° a 65.1°S en una grilla preestablecida con un total de 24 estaciones de muestreo (ver figura 1). En las estaciones donde la profundidad era menor de 1000 metros se realizaron los perfiles hasta la profundidad máxima prudente que la batimetría lo permitía. De igual forma considerando que un objetivo fundamental, dentro de las investigaciones es identificar las conexiones existentes entre el territorio antártico y las costas sudamericanas, se efectuaron 06 estaciones oceanográficas adicionales en donde se obtuvo perfiles de CTD, para un total de 30. Más detalles de las actividades realizadas durante el periodo señalado, se describen en el Informe Final de Crucero III Expedición



(Torres, 2017), así como el análisis preliminar de los perfiles en el anexo 3 de este mismo documento.

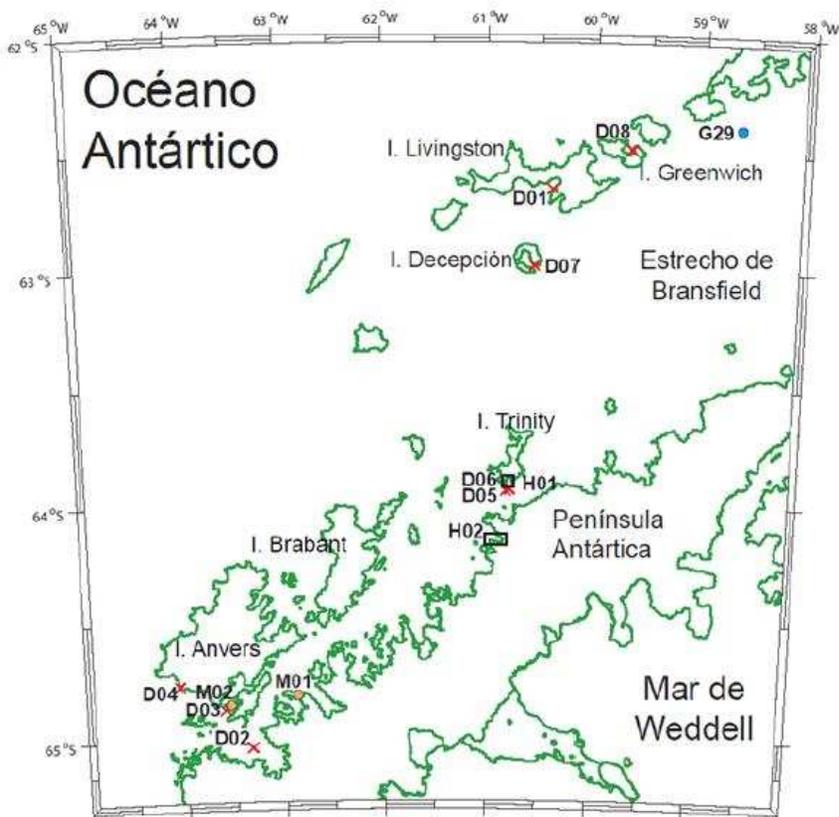


Figura 1. Puntos de fondeo equipos oceanográficos. Los Registradores de Oleaje Direccional se identifican como M01 y M02, correspondientes a las localidades cercanas a las bases antárticas González Videla y Yelcho, respectivamente: Fuente: (Torres, 2017).

Con la finalidad de garantizar un muestreo adecuado, los perfiladores se atemperaban a una profundidad de 2 m por un periodo de 2-3 minutos. Una vez se cumplía este lapso los equipos descendían a una velocidad constante de 1 m/s hasta la profundidad de estación, guardando un margen de seguridad con respecto al fondo marino el cual era medido por la ecosonda Kongsberg EA600 instalada en el buque.

Para la obtención de las variables, se emplearon dos CTDO protegidos uno por una canastilla de acero inoxidable (SBE25) y el otro (SBE 19 Plus V2) instalado en la roseta muestreadora SBE 32 (ver Figura 2), sirviendo como CTDO y vinculado al módulo SBE AF (Auto Fire) para el disparo autónomo de botellas Niskin (especificaciones en el Apéndice 1). Se contó con la capacidad de comunicación en tiempo real entre el CTDO y el Laboratorio Oceanográfico Móvil Embarcado-LOME, sin embargo no fue posible emplearse continuamente durante el crucero por problemas de comunicación en los terminales de las guayas. Detalles del procesamiento y verificación de los perfiles se encuentran consolidados en el Apéndice 2.



Figura 2. Perfiladores empleados durante las estaciones oceanográficas en el estrecho de Gerlache. De izquierda a derecha, CTDO SBE 25 y CTDO 19 Plus V2. Fuente: Autor.

Los datos obtenidos en cada lance, se almacenaban en cada perfilador durante el despliegue, posteriormente los registros en bruto se descargaron a través de un puerto RS-232 marino a una computadora de escritorio. Este archivo contiene información de la marca, modelo, serie, archivo de configuración, hora, fecha, estatus del perfilador, número de captura y la información del voltaje de los sensores (datos “crudos”). El procesamiento aplicado a cada archivo obtenido se realizó con el software provisto por el fabricante, el cual se presenta en el Apéndice correspondiente al proyecto ICEMAN Oceanografía, del “Informe III Expedición de Colombia a la Antártida”.

Durante el crucero se analizaban de forma preliminar los datos para efectuar seguimiento y control de calidad. En la primera estación se bajaron los dos perfiladores en simultáneo. Se logró evidenciar un error constante en la salinidad derivada con el SBE 19 Plus V2, con respecto de la salinidad derivada con el CTDO SBE 25. Para corregir este error fue necesario sumar 0.219 unidades de salinidad a los datos del perfilador SBE 19 Plus V2. Este error se definió mediante la comparación con los datos del CTDO SBE 25, análisis de masas de agua y comparación con resultados del I crucero a la Antártida. Al término de crucero se enviará este CTDO a la casa de fábrica para calibración y verificación del error.

Por último se efectuó un post-procesamiento de la información dispuesta en los archivos (*.asc), con el fin de registrar todos los perfiles de las estaciones en un solo archivo, en formatos (*.dat) y (*.xls), siguiendo los estándares del Centro Colombiano de Datos e Información Oceanográfica (CECOLDO) el cual se basa en estándares de la IODE. La información de esta campaña se encuentra disponible a profundidades estándar y metro a metro con su respectiva metadata.



Adicional al desarrollo de las estaciones, se efectuó el fondeo de equipos oceanográficos y la instalación de una estación meteorológica portátil a bordo del ARC 20 de julio con la cual se registró durante el periodo comprendido entre el 12 y 30 de enero 2017, la presión atmosférica, humedad relativa, temperatura del aire, sensación térmica y radiación solar en territorio antártico.

Para la identificación de las condiciones de oleaje se emplearon dos equipos oceanográficos especializados, conocidos como Registradores de Oleaje Direccional DWR (por sus siglas en inglés), diseñados para aguas someras. Estos fueron fondeados en cercanías de las bases Antárticas Chilenas González Videla y Yelcho. En la figura 1 se indica el área de estudio y se especifican las posiciones geográficas de fondeo de los equipos (Torres, 2017).

Para el análisis del comportamiento de las condiciones de oleaje de aguas profundas, se incluyó la consecución de datos a partir del fondeo de una boya tipo Triaxys con línea de fondeo para aguas intermedias (alrededor de 110m), en inmediaciones de la Base Palmer. Sin embargo por novedades presentadas durante el seguimiento de las transmisiones satelitales, efectuadas desde el zarpe en la ciudad de Cartagena, se decidió no efectuar el fondeo de la misma, respetando el protocolo de seguridad acordado. La principal función de estos datos in situ, consistía en la validación en territorio antártico del reanálisis de oleaje CSIRO (Durrant *et al.*, 2014), área geográfica que carece de este tipo de mediciones. Es por esta razón, que conservando la meta inicial, se optó por la vinculación de nodos del Atlas de Oleaje de Chile (Beyá *et al.*, 2016), facilitados por investigadores de la Universidad de Valparaíso y la Universidad de Playa Ancha en el marco del intercambio de iniciativas de investigación realizado durante la visita a esta última institución como parte de la agenda de la III Expedición Antártica.

9. Resultados preliminares

9.1 Variabilidad temporal de parámetros meteorológicos

El promedio de la temperatura ambiente registrada de forma horaria en territorio antártico durante el desarrollo de la expedición, para el periodo comprendido entre el 12 y 30 de enero del 2017, fue de 3.1°C. Se presentó un valor máximo de 7.4°C y mínimo de 0.3°C. En la figura 3 se indica mediante diagrama de cajas y bigotes las características de los datos. Entre las 16 y 20 horas UTC se registran las mayores temperaturas promedio, así mismo entre las 01 y 05 horas UTC, se registraron datos atípicos, entre los que se encuentra la mayor temperatura registrada de 7.4°C.

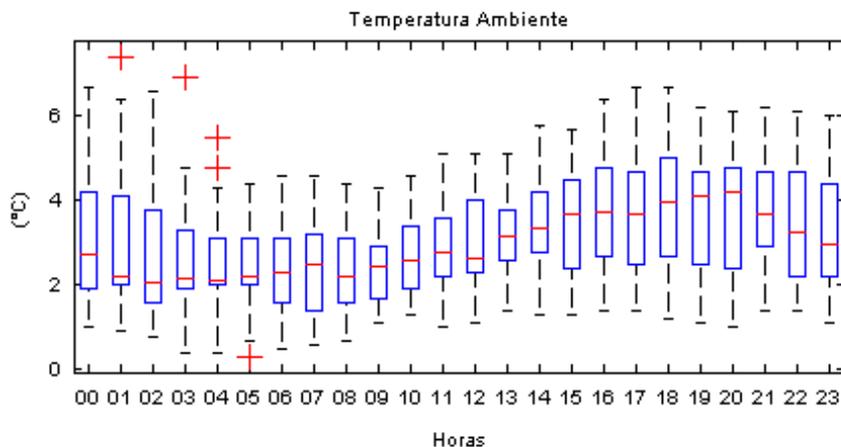


Figura 3. Comportamiento horario de la temperatura del aire en territorio Antártico mediante diagrama de cajas y bigotes. Fuente: Autor.

Con respecto a la sensación térmica se observó un promedio de -0.8°C , con un valor máximo de 6.9°C y el mínimo a -8°C . En la figura 3, se puede observar, como es coherente, que la variación en la sensación térmica fue directamente proporcional a la temperatura registrada (ver Figura 4), siendo la intensidad del viento el factor predominante para alcanzar la temperatura más baja, la cual se registró a las 04:00 horas UTC.

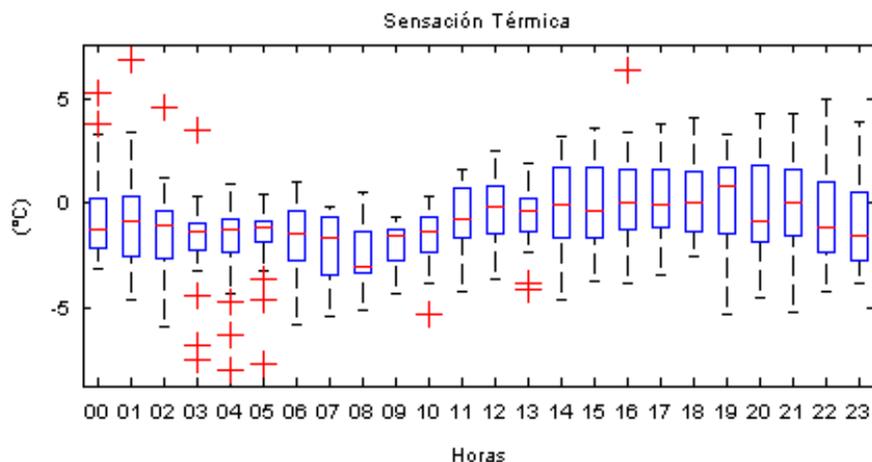


Figura 4. Comportamiento horario de la sensación térmica territorio Antártico mediante diagrama de cajas y bigotes. Fuente: Autor.

En cuanto a la humedad relativa, se observó que el máximo valor corresponde a 95% de humedad relativa, el mínimo a 48% y como promedio durante la expedición un porcentaje de 87.87%. En la figura 5, se puede observar que la humedad relativa promedio presentó una disminución entre las 13 y las 18 horas UTC, teniendo como valores atípicos los registrados entre las 01 y las 12 horas UTC.

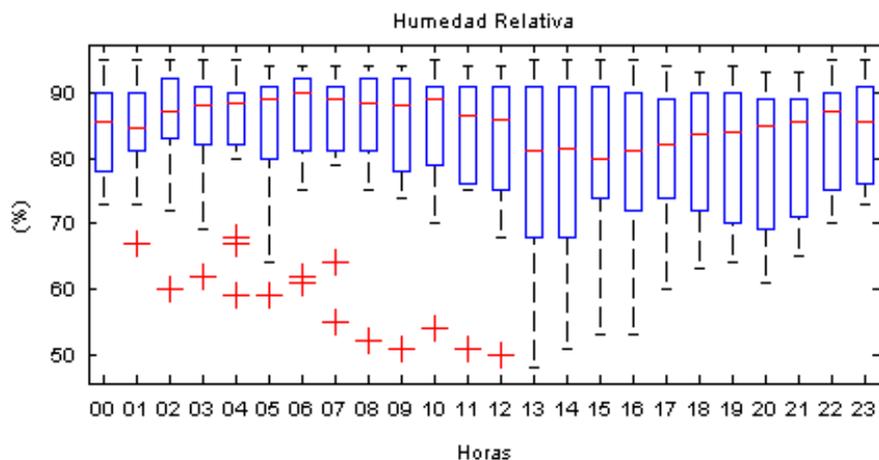


Figura 5. Comportamiento horario de la humedad relativa en territorio Antártico mediante diagrama de cajas y bigotes. Fuente: Autor.

En la figura 6, se puede observar que la presión atmosférica tuvo un comportamiento promedio estable, siendo afectada principalmente por el tránsito de sistemas frontales que circulan normalmente por el paso Drake. Se observó que la máxima presión fue de 1003.7 mb, la mínima de 980.8 mb, y como promedio una presión de 992.1 mb.

Por su parte, la radiación solar, se presentó un promedio de 166.7 w/m², con valor máximo y mínimo de 826 w/m² y 0 w/m², respectivamente. En la figura 7, se puede observar que la mayor radiación solar se registró entre las 13 y las 20 horas UTC, siendo coherente con el horario del día, así mismo entre las 23 y las 10 horas UTC se puede evidenciar la penumbra con valores mínimos de radiación debido a la menor exposición solar.

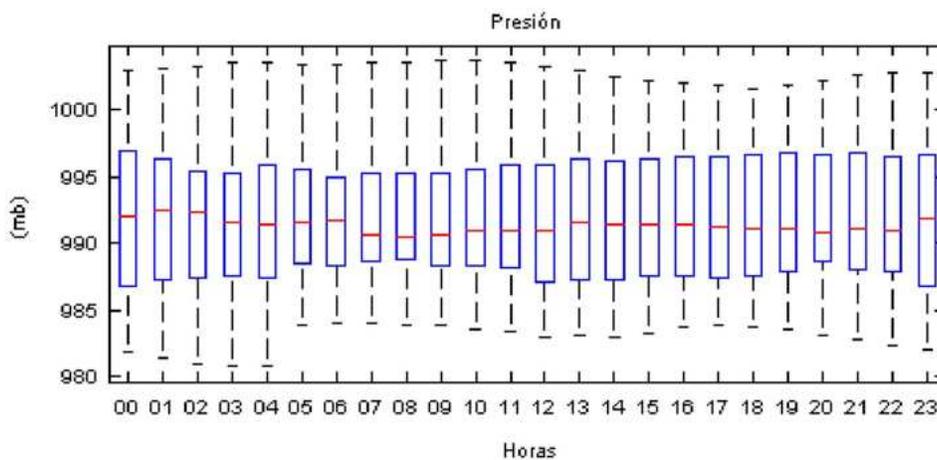


Figura 6. Comportamiento horario de la presión atmosférica en territorio Antártico mediante diagrama de cajas y bigotes. Fuente: Autor.



Finalmente, de acuerdo a la figura 8, se observó que el máximo índice ultravioleta registrado corresponde a una exposición de 3.5 o moderada. Así mismo se identifica que los mayores índices de exposición ultravioleta son directamente proporcionales a la radiación solar registrada.

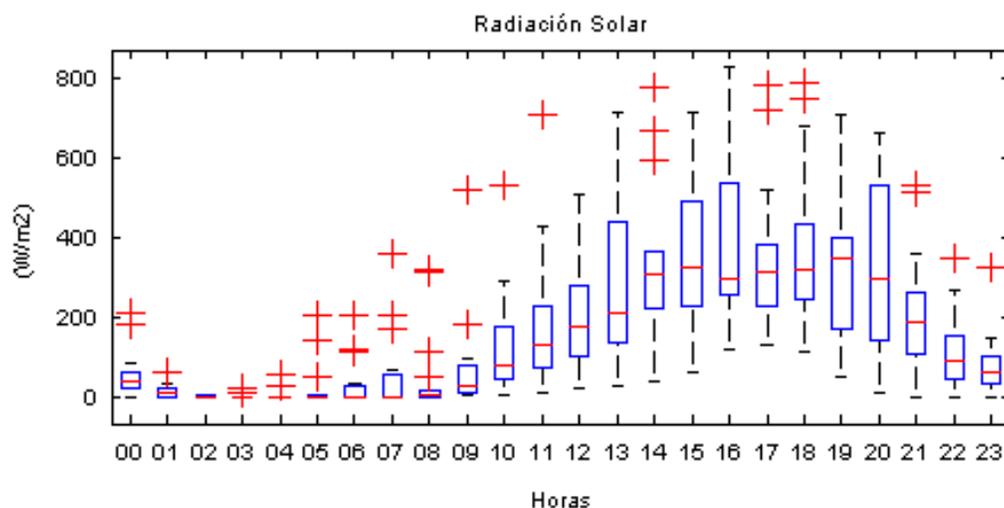


Figura 7. Comportamiento horario de la radiación solar en territorio Antártico mediante diagrama de cajas y bigotes. Fuente: Autor.

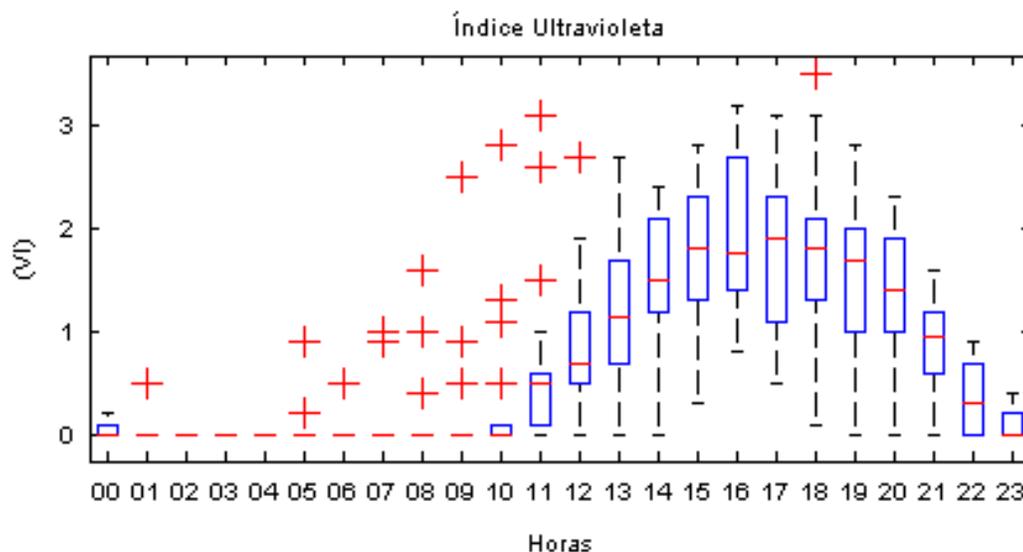


Figura 8. Comportamiento horario de la índice ultravioleta en territorio Antártico mediante diagrama de cajas y bigotes. Fuente: Autor.

Con respecto a las condiciones de viento identificadas durante el periodo señalado, de acuerdo a la tabla 1, se puede observar que la velocidad predominante oscilo entre 0 a 4 nudos con una frecuencia del 52.94%, mientras que la dirección predominante fue del sur-



sureste, con una frecuencia de 30.91%. La figura 9, representa las frecuencias de las velocidades registradas por rangos y las direcciones del viento que predominaron.

Tabla 1. Resumen estadístico del régimen de viento en territorio antártico. Fuente: Autor.

| Velocidad del viento [nudos] | | Dirección del viento | |
|---------------------------------|---------------------|------------------------|---------------------|
| Intensidad | Frecuencia Relativa | Dirección Predominante | Frecuencia Relativa |
| 0-4 | 52,94% | Norte | 3,64% |
| 4-7 | 24,71% | Norte-Noreste | 10,91% |
| 7-11 | 16,47% | Noreste | 6,36% |
| 11-17 | 3,53% | Este-Noreste | 10% |
| >17 | 2,35% | Este | 8,18% |
| | | Este-Sureste | 5,45% |
| | | Sureste | 5,45% |
| | | Sur-Sureste | 30,91% |
| | | Sur-Suroeste | 5,45% |
| | | Suroeste | 2,73% |

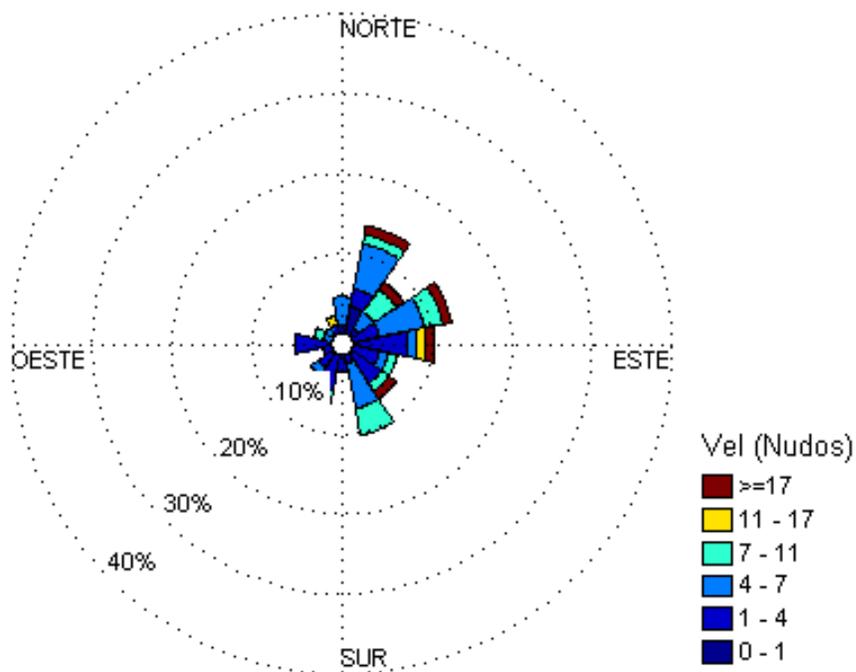


Figura 9. Rosa de viento para los datos obtenidos en territorio antártico para el periodo del 12 al 30 de enero 2017. La escala de colores denota la magnitud del viento medida en nudos. Fuente: Autor.



9.2 Variabilidad espacial y temporal de la temperatura y salinidad en territorio Antártico

La distribución espacial de la temperatura superficial del mar, mostró aguas más cálidas en las inmediaciones de la zona nororiental del Estrecho de Gerlache, con un mayor predominio cerca de las Islas Liege, Two Hummock y Christiania, donde se registraron valores de 0.84° a 3.8°C. Las isotermas superficiales se distribuyeron en forma irregular formando núcleos de aguas cálidas principalmente frente a las Islas Liege, sur de Isla Brabant e Isla Murray, por otra parte, hacia la zona suroccidental del estrecho se apreciaron bajos registros, con un núcleo ligeramente cálido (0.7° a 1.0°C) ubicado entre la Isla Anvers y el sur de la costa Danco (Figura 10a).

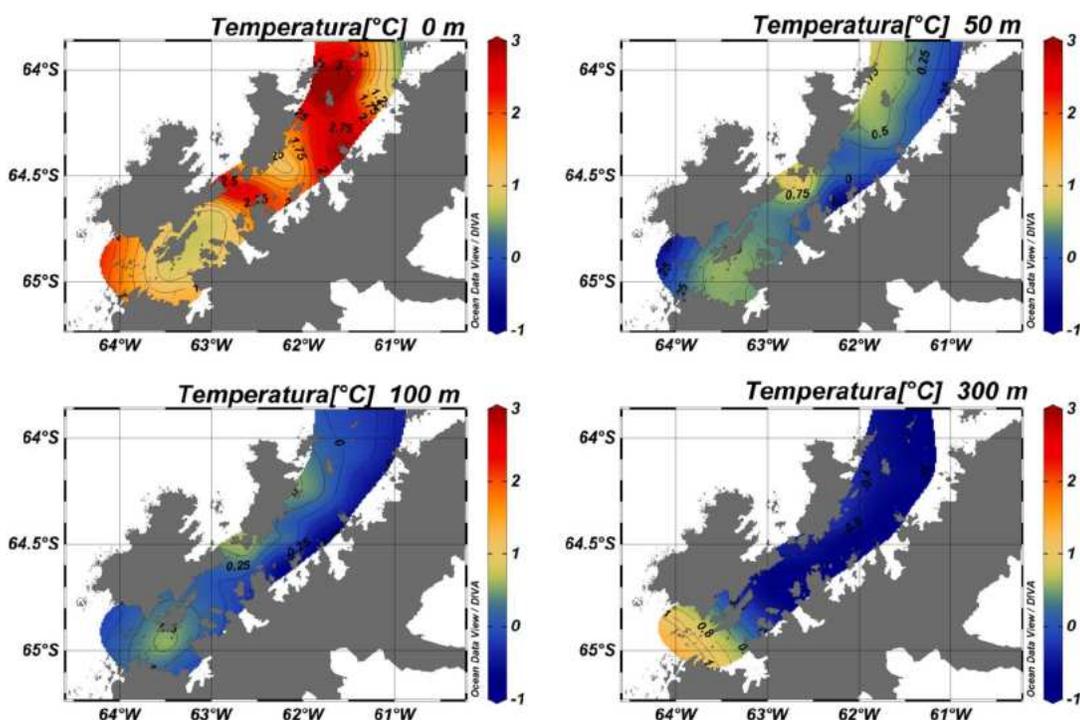


Figura 10. Distribución horizontal de la temperatura III Expedición Antártica (14 al 28 enero 2017). **a)** 0m, **b)** 50m, **c)** 100m **d)** 300m. Fuente: Autor.

La distribución horizontal de la temperatura en el nivel de 50 y 100 m, muestra similares características, en el nivel de los 50 m de profundidad (Figura 10b), la masa de agua cálida continua influenciado los registros de temperatura, observándose la persistencia de dos núcleos cálidos con menor gradiente térmico que en la capa superficial, con registros de 0.5° a 0.75°C. Por otro lado se evidencia una distribución más regular de las isotermas de -0.25° y 0°C, especialmente desde el centro y norte de la costa Danco hacia el interior del estrecho. En el nivel de los 100 m de profundidad se observa 03 isotermas, con valores desde -0.25° a 0.25.0° C, presentando menor influencias de



aguas cálidas (Figura 10c), sin embargo continuo la presencia de núcleos ligeramente cálidos frente a las Islas Liege, Brabant y Wiencke.

A 300 m profundidad, las isothermas se distribuyeron regularmente desde la costa Danco hacia el interior del estrecho, con predominio de temperaturas por debajo de los 0°C , a excepción del costado suroccidental, el cual presentó un cambio direccional en la distribución del gradiente térmico, donde se observó el ingreso de un frente de aguas cálidas, con registros de 0.8° a 1.5°C (Figura 10d) procedentes del Mar de Bellingshausen.

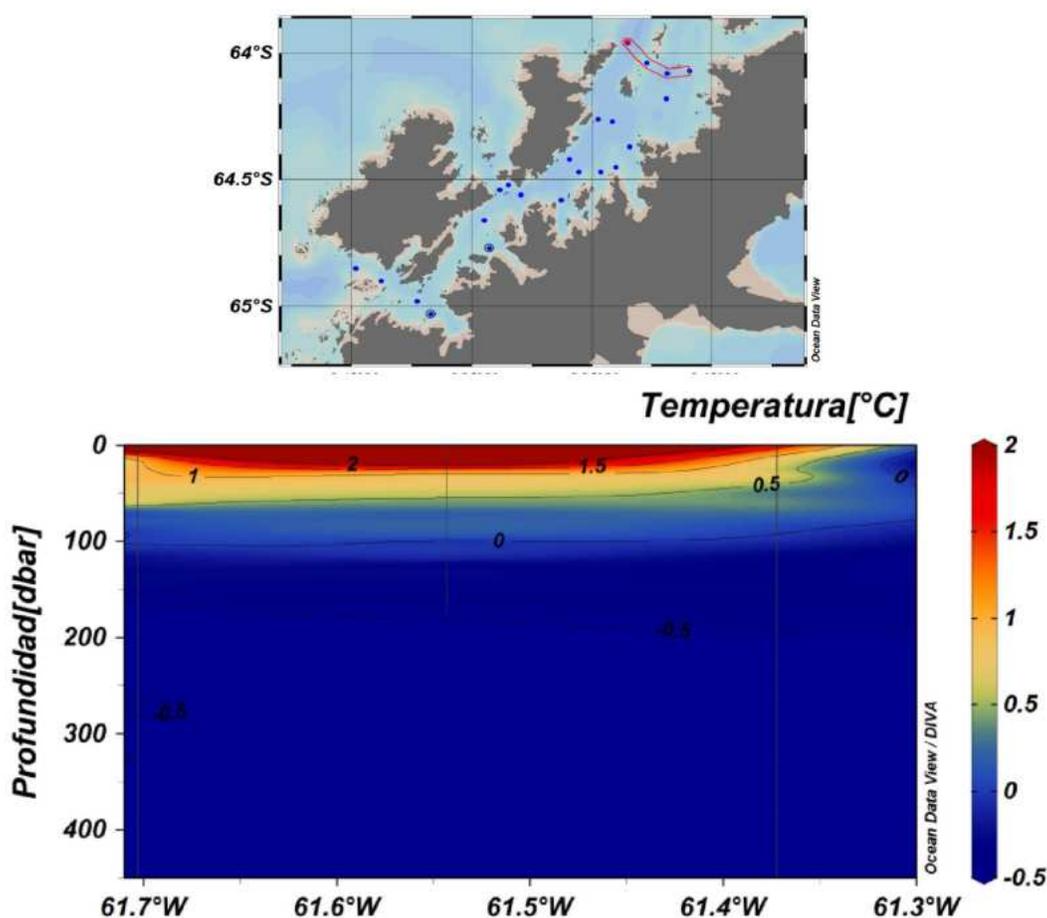


Figura 11. Transepto norte de Temperatura Estrecho de Gerlache 14 al 28 enero 2017. Arriba, posición de las estaciones oceanográficas analizadas. Abajo, sección trasversal de la temperatura para el área señalada. Fuente: Autor.

En cuanto a la distribución vertical de la temperatura, en la sección norte (Figura 11), la primera capa de isothermas evidenció el ingreso de aguas cálidas con moderada termoclina frente a las Islas Liege y Christiania. Se observó la termoclina entre los 3 y 50 m de profundidad, superficializándose conforme se aproximaba al borde costero de



la Península Antártica ($61.3^\circ - 61.4^\circ\text{W}$). Desde la superficie hasta los 500 m la distribución fue homogénea, con isotermas verticales que mostraron un marcado gradiente térmico, asimismo evidenciaron la intrusión de aguas cálidas procedentes del mar de Bellingshausen a través de las Islas Two Hummock y Christiania, lo cual generó un frente junto con las aguas frías que ingresaron desde el Estrecho de Bransfield, los registros a través de esta sección variaron entre los -0.5° y 3.0°C .

En la sección central (Figura 12.) se observa un comportamiento similar al de la sección norte, pero con mayor gradiente térmico, y una termoclina en promedio entre los 23 y 45 m de profundidad, en general se observaron registros de temperatura a través de del transepto entre -0.5° y 2.3°C . Frente a la Isla Brabant, entre los 62.05° y 62.15°W , se observó una profundización de la isoterma de 0.25°C , hasta los 120 m aproximadamente, manteniendo registros ligeramente calidos entre los 0 y 50 m. Hacia el borde costero (Frente a Punta Reclus) se distribuyeron los registros más calidos de esta sección hasta los primeros 50 m, con valores entre 0.75° y 2.3°C .

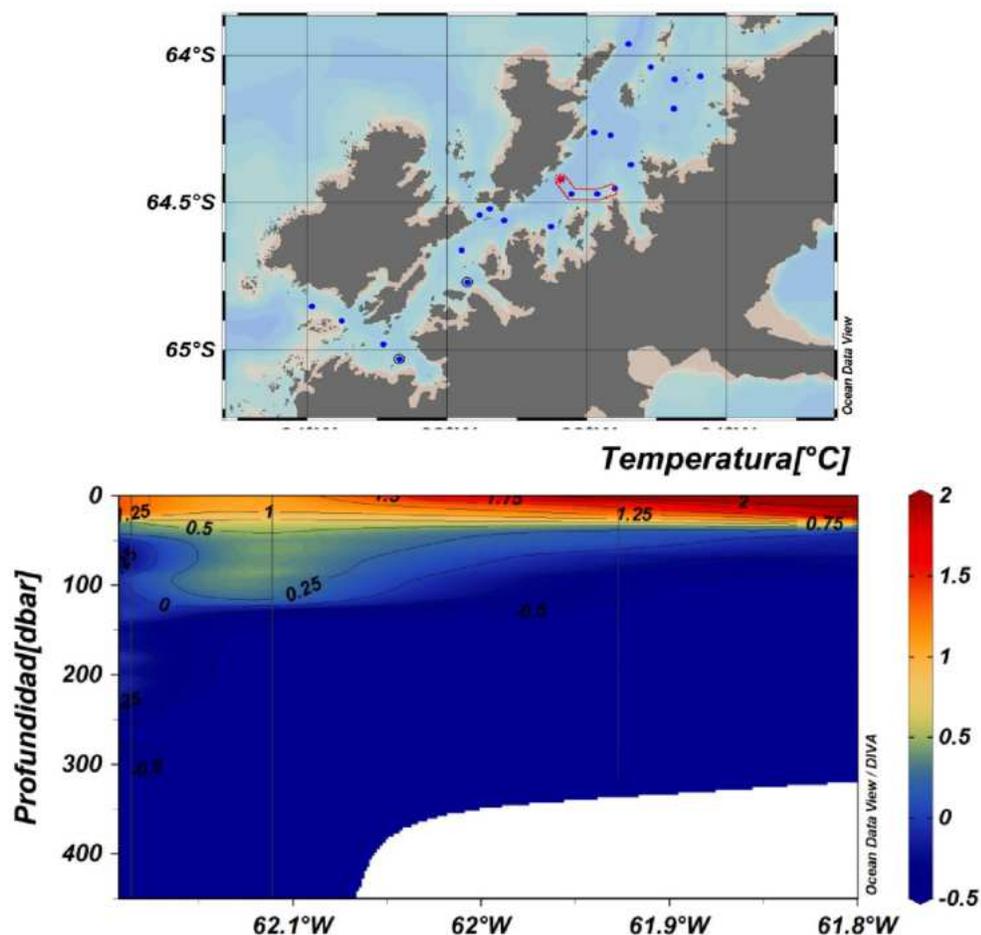


Figura 12. Transepto central de Temperatura Estrecho de Gerlache 14 al 28 enero 2017. Arriba, posición de las estaciones oceanográficas analizadas. Abajo, sección transversal de la temperatura para el área señalada. Fuente: Autor.



La sección sur (Figura 13) se diferenció notoriamente de las anteriores, debido principalmente al predominio de registros de temperatura por encima de los 0°C a través de todo el transepto. Sobre el costado suroccidental de Gerlache, a través del Estrecho Bismarck, se evidenció en superficie la presencia de valores de temperatura por encima de los 1.2° hasta los primeros 25 m, sin embargo desde los 30 y hasta los 150 m de profundidad fue observada la intrusión de una lengua de agua fría procedente del Mar de Bellingshausen, la cual se extendió hasta los 63.45°W , albergando valores entre los -0.25° y 0.5°C . Entre los 150 y 500 m de profundidad nuevamente aparecen aguas más cálidas, con registros de temperatura entre los 0.75° y 1.3°C . La termoclina se superficializó hacia la costa Danco, cerca de Bahía Flandes, mostrándose poco profunda al sur de Isla Anvers.

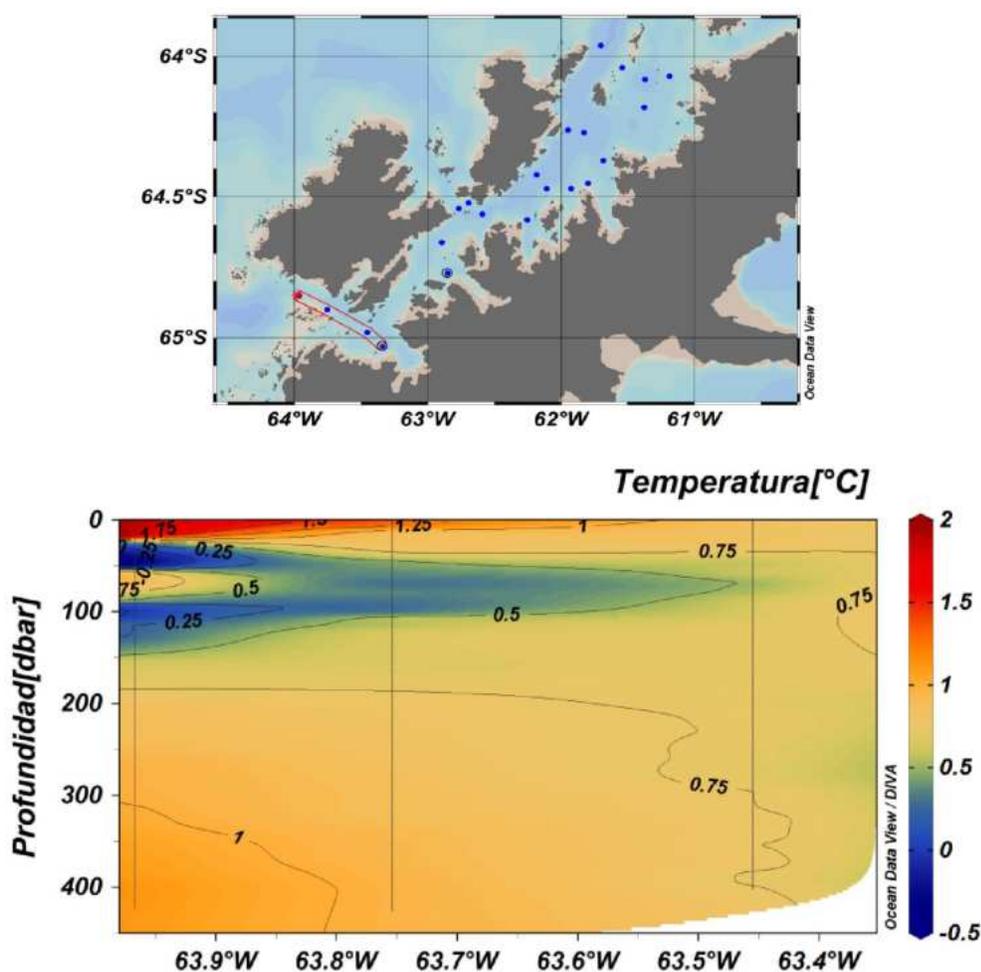


Figura 13. Transepto sur de Temperatura Estrecho de Gerlache 14 al 28 enero 2017. Arriba, posición de las estaciones oceanográficas analizadas. Abajo, sección trasversal de la temperatura para el área señalada. Fuente: Autor.



Con respecto a la salinidad, la distribución horizontal de las isohalinas superficiales mostró un comportamiento similar a la temperatura. La salinidad encontrada durante la etapa de estudio, registró valores entre 33.4 y 35.2, con valores inferiores distribuidos principalmente hacia el costado suroccidental del estrecho, sin embargo frente a la Península Reclus se evidenció un núcleo con altos valores de salinidad, entre 34.0 a 35.0, hacia el extremo nororiental del área muestreada, fueron aguas ligeramente más salinas. Las isohalinas superficiales se distribuyeron formando núcleos en el centro y extremo norte del estrecho (Isla Trinidad), con un intenso gradiente en la parte central frente a la península Antártica. (Figura 14a)

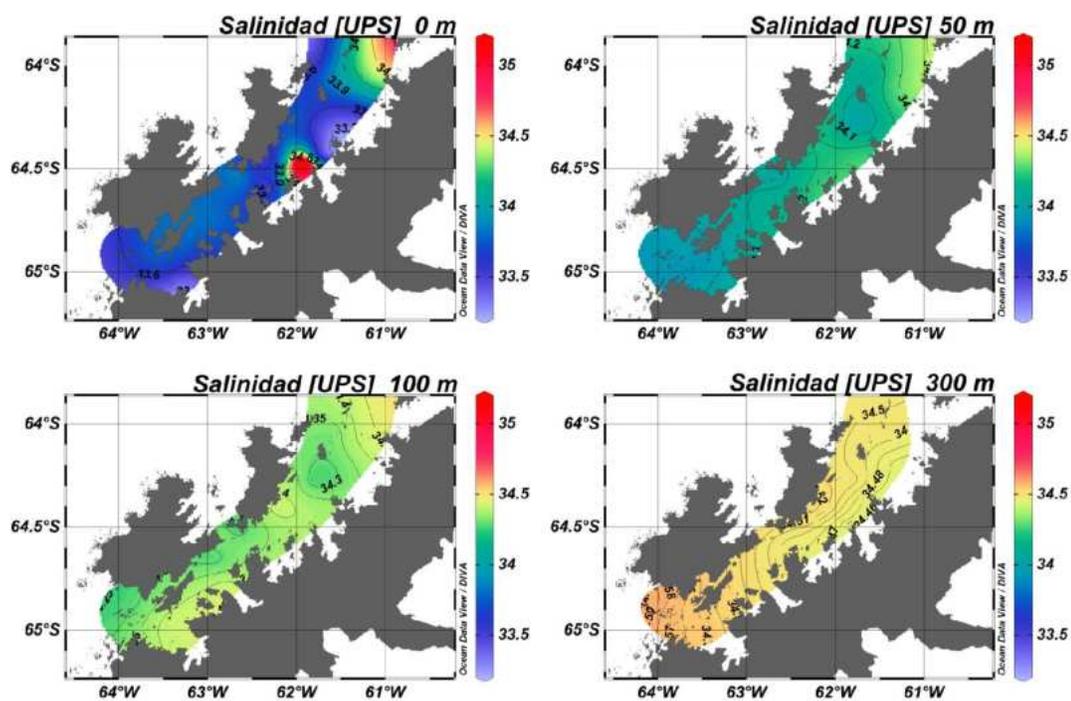


Figura 14. Distribución horizontal de la salinidad III Expedición Antártica (14 al 28 enero 2017). a) 0m, b) 50m, c) 100m d) 300m. Fuente: Autor.

En los niveles de 50 y 100 m de profundidad, las isohalinas conservan su distribución. En el nivel de 50 m, las isohalinas muestran un gradiente más regular y distribución más homogéneo que en superficie. Hacia el extremo suroccidental se distribuyen los registros de salinidad más bajos alrededor de 33.9 y 34.3 (Figura 14b). En la capa de 100 m, las isohalinas aún conservan su distribución característica; pero con un leve gradiente y mayor salinidad, con valores entre 34.2 y 34.4 (Figura 14c). A 300 m de profundidad se observa un incremento en los registros, con salinidades mayores de 34.5, especialmente al suroccidente del estrecho, se presenta un gradiente halino mas definido que varía gradualmente de forma longitudinal, aumentando desde el borde costero Danco (Península Antártica) hacia el interior del Estrecho y sus extremos (Figura 14d), en este nivel se observaron aguas más homogéneas, con salinidades promedio de 34.5.



La distribución vertical de la salinidad nos muestra en la sección norte (Figura 15), un comportamiento acorde con la temperatura, el transepto presenta una estratificación bien definida y homogénea, con una haloclina muy superficial hacia el Cabo Sterneck (Costa Danco). Por otro lado entre los 61.45° y 61.7°W se agruparon los registros salinos más bajos de este tramo (0 - 25 m), presentándose una haloclina más profunda, alrededor entre los 40 y 50 m de profundidad. A través del transepto se pudieron observar valores de salinidad entre 33.2 a 35.2.

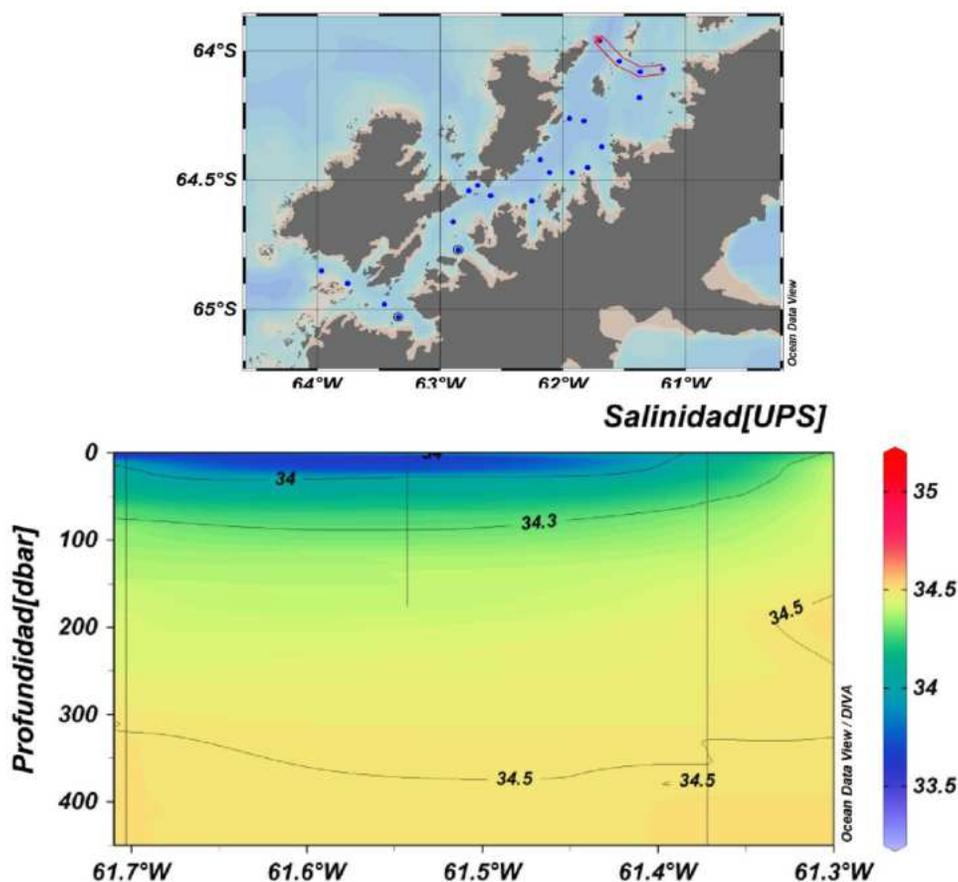


Figura 15. Transepto norte de salinidad Estrecho de Gerlache 14 al 28 enero 2017. Arriba, posición de las estaciones oceanográficas analizadas. Abajo, sección trasversal de la temperatura para el área señalada. Fuente: Autor.

En la sección central (Figura 16), dentro del mismo estrecho, observamos menor influencia de ingresos de agua con salinidades bajas procedentes del mar de Bellingshausen, sin embargo fueron evidentes frente a Isla Brabant (62.1° -62.2°W) bajas salinidades, hasta una profundidad de 25 m. hacia la zona central del transepto se evidenció una ligera capa superficial de salinidad con registros por encima de los 34.2, la cual se extendió hacia la Costa Danco, cerca de la Península Reclus, sin embargo a nivel subsuperficial también se observaron registros de baja salinidad. La



haloclina se mantuvo estable entre los 40 y 52 m de profundidad, con valores entre 34.0 y 34.3, en profundidad la distribución fue homogénea, con valores de 34.5 y 35.0.

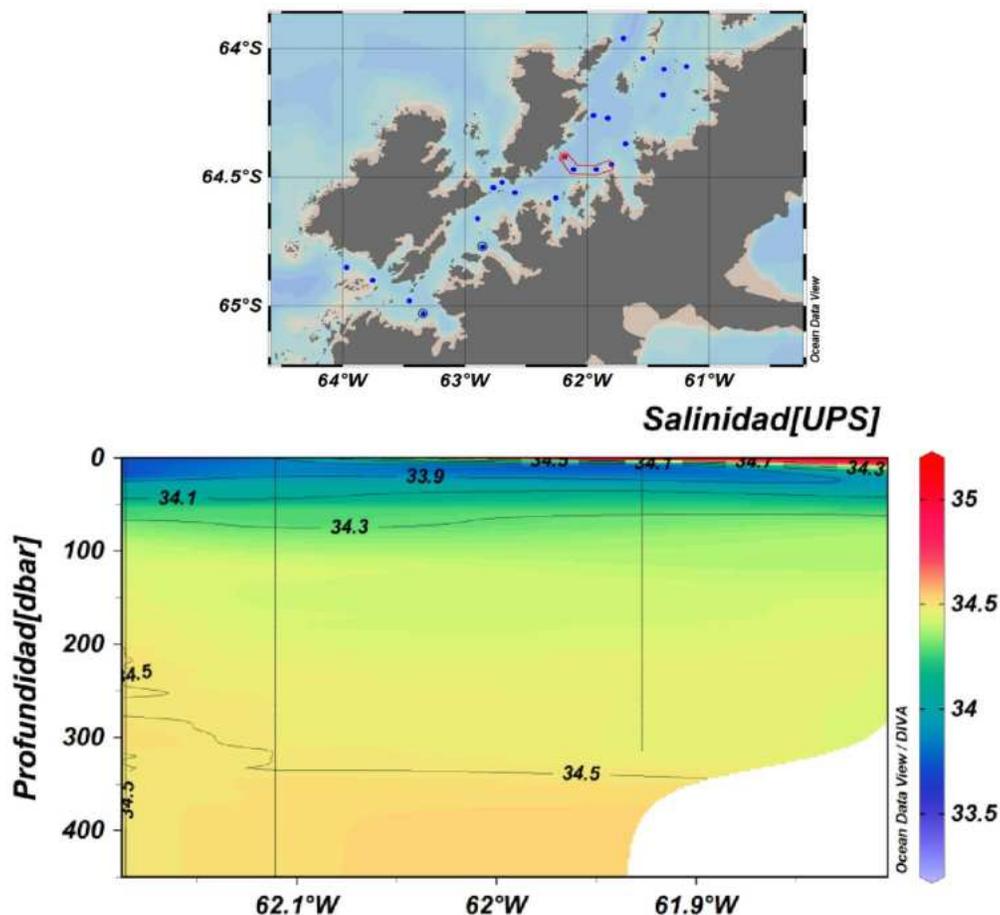


Figura 16. Transecto central de salinidad Estrecho de Gerlache 14 al 28 enero 2017. Arriba, posición de las estaciones oceanográficas analizadas. Abajo, sección transversal de la temperatura para el área señalada. Fuente: Autor.

La sección sur (Figura 17) presentó una distribución homogénea en profundidad, con una haloclina bien definida entre los 60 y 110 m de profundidad, esta capa se mostró más profunda hacia el estrecho Bismarck, comportamiento asociado principalmente a la intrusión de aguas frías procedentes del Mar de Bellingshausen, sus valores salinos oscilaron entre 33.2 y 33.8. Cerca de Bahía Flandes se agruparon bajos registros de salinidad hasta los 45 m aproximadamente, en profundidad no se observaron variaciones significativas siguiendo una distribución normal, con valores entre 34.5 y 35.5.

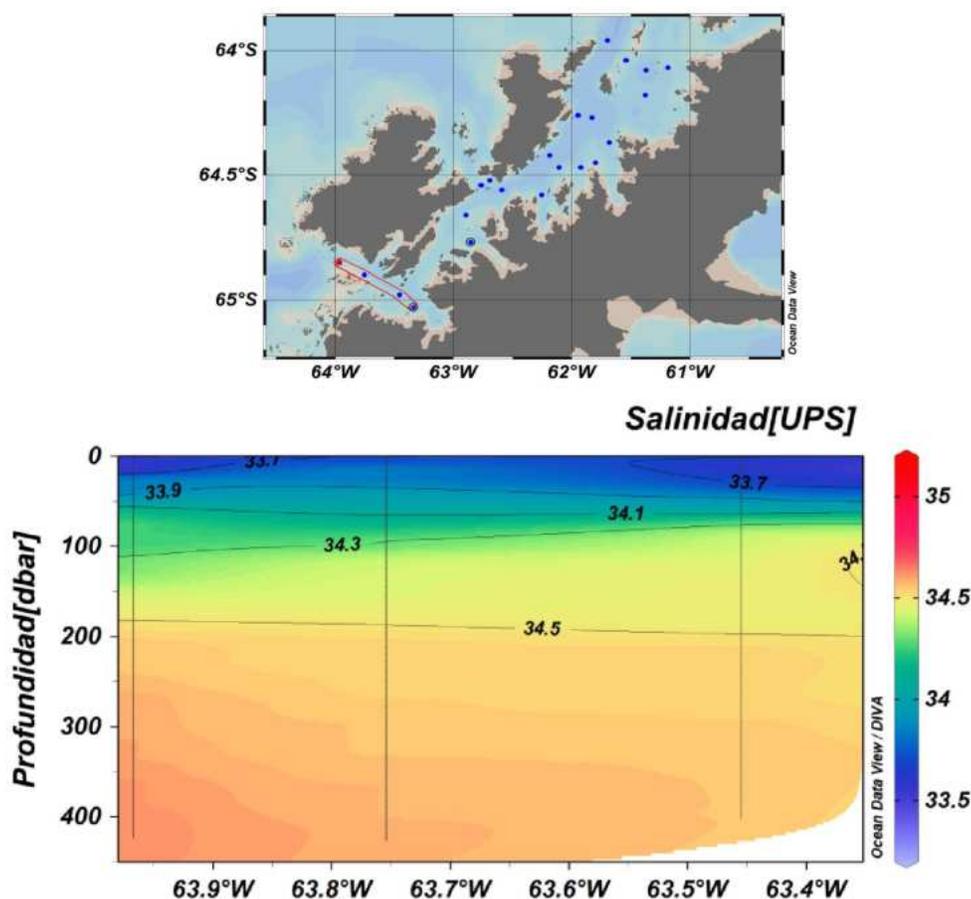


Figura 17. Transepto central de salinidad Estrecho de Gerlache 14 al 28 enero 2017. Arriba, posición de las estaciones oceanográficas analizadas. Abajo, sección transversal de la temperatura para el área señalada. Fuente: Autor.

Finalmente, a través del análisis del promedio de TSM realizado con la información disponible en la plataforma web Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) de NOAA, como herramienta de apoyo para el análisis, se pudo comprobar la presencia en superficie de masas de agua calidas en el Mar de Bellingshausen, lo cual nos permite inferir que estas masas de agua influenciaron los registros superficiales de temperatura al interior del Estrecho de Gerlache (Figura 18), ingresando desde los extremos y área central del mismo, lo cual coincide con el comportamiento descrito anteriormente, y que estuvo basado en los registros obtenidos in situ durante la III Expedición Antártica verano Austral 2016-2017.

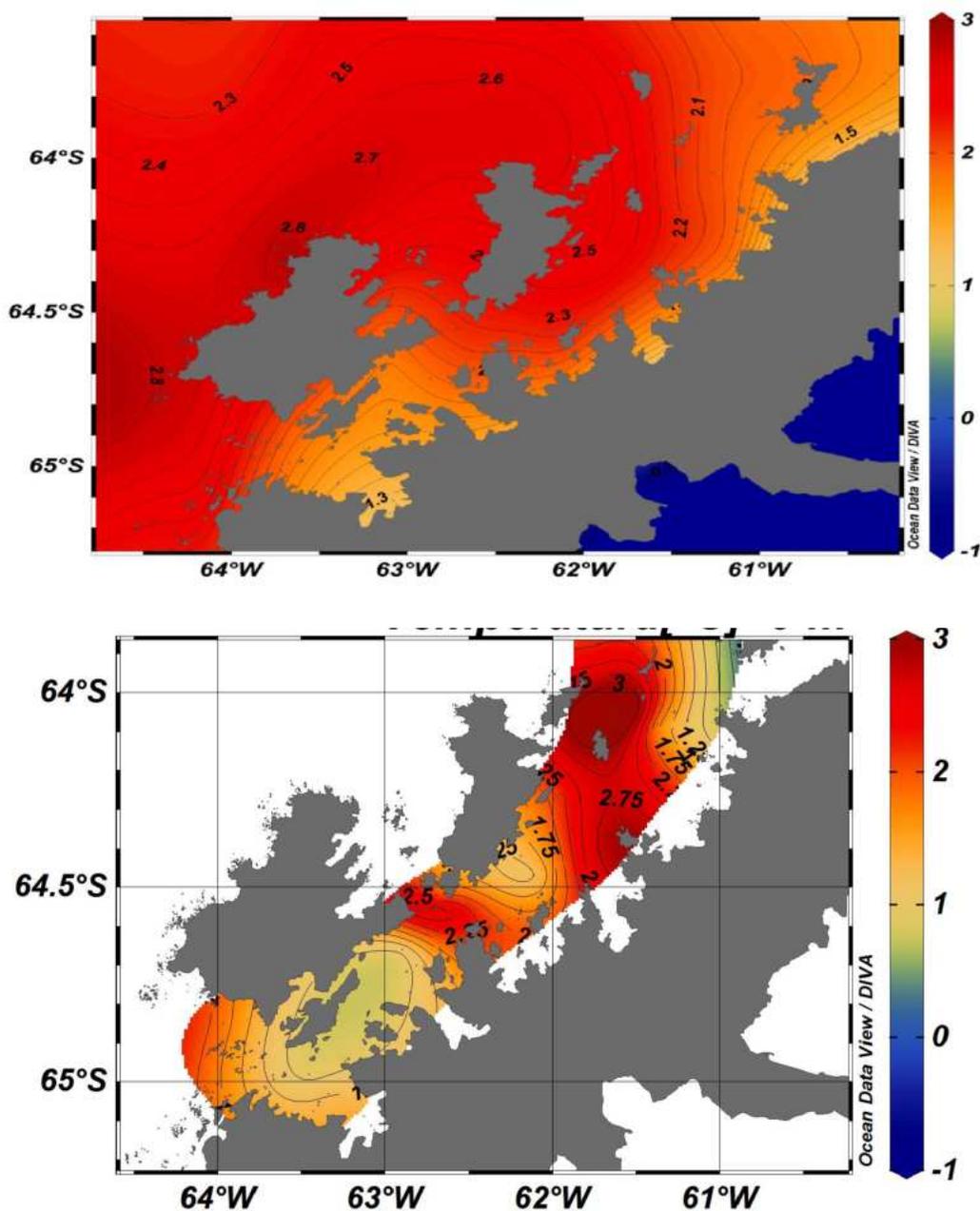


Figura 18. TSM Estrecho de Gerlache 14 al 28 enero 2017 (arriba) OISST NOAA y (abajo) perfiles de CTDO obtenidos durante la III Expedición de Colombia en la Antártida. Fuente: Autor.

En profundidad no se encontró una estratificación definida, a partir de los 150 m sobre el costado suroccidental de Gerlache se apreció el ingreso de un frente calido desde el Mar de Bellinghausen, teniendo en cuenta el comportamiento presentado en las otras dos secciones muestreadas (norte y centro), se estima que la mayor variabilidad en torno a los registros de temperatura y salinidad se presentan en esta



zona, como consecuencia de la configuración costera y poco profunda (~450 m) del estrecho en esta zona, lo cual facilita el ingreso frentes termicos al no encontrar resistencia en su avance.

Se apreció un comportamiento similar en el sector norte y centro del estrecho de Gerlache tanto en superficie como en profundidad, sin embargo una marcada diferencia se observó hacia el sector sur del estrecho de Gerlache, especialmente en profundidad. En profundidad se apreció un aumento de las temperaturas hacia el sector del mar de Bellingshausen, siendo notorio el hundimiento brusco de las isothermas, teniendo su origen en la convergencia entre las aguas frías de fondo del estrecho Gerlache y las aguas más cálidas provenientes del mar de Bellingshausen.

La salinidad conservó un comportamiento muy asociado a el comportamiento de la temperatura, ubicandose los mayores registros de esta variable sobre la zona central y nororiental del Estrecho de Gerlache, predominado en su mayoría valores por debajo de los 33.8 desde la parte media hasta el extremo suroccidental del estrecho.

9.3 Variabilidad espacial y temporal del oleaje en el sector de la península Antártica.

El clima de oleaje en territorio antártico es influenciado por la dinámica estacional de la cobertura de hielo que circunda el continente, afectando principalmente el perímetro que bordea el paralelo 61°S (aproximadamente en el extremo de la península antártica). De acuerdo a investigaciones previas (Beyá *et al.*, 2016), durante la época de invierno el oleaje no alcanza la costa terrestre, y durante el verano, aunque logra atravesar los campos de hielo, sufre atenuación de sus parámetros durante la propagación.

Tomando como referencia la península antártica, es posible observar que las condiciones de oleaje que prevalecen al lado oeste y este de la misma, tienen características opuestas. Como se puede ver en la figura 19, el promedio anual de la altura significativa del oleaje (H_{m0}) al lado oeste de la península presenta valores más altos que los que se observan para el lado oriental (alrededor de los 3m), esto es claro, toda vez que el mismo no sufre los impactos del fuerte oleaje procedente del lado occidental, que alcanza alturas de 5m. Esta misma condición hace que la dinámica de la cobertura del hielo al lado oriental presente mayor expansión, lo que al tiempo propicia atenuación en H_{m0} , identificando valores que no superan los 2m.

A la altura del paso del Drake (alrededor del paralelo 60°S) se identifica dirección este (W) del oleaje, la cual, a medida que se desciende hasta la latitud 70°S, se torna noroeste (NW), y en su trayecto hasta el oriente de la península antártica se curva por efecto de la difracción, convirtiéndose en dirección norte en proximidades al paralelo 65°S. Este comportamiento prevalece a lo largo del año y presenta leves modificaciones al oriente de la península.

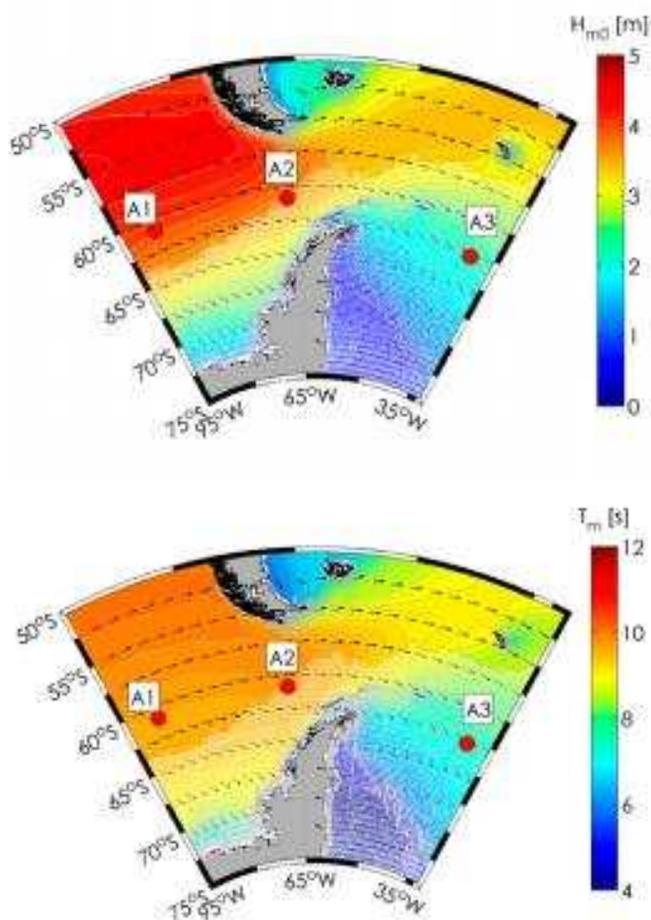


Figura 19. De arriba a abajo, promedio anual de Altura significativa de oleaje (H_{mo}) y Periodo de oleaje (T_m) para territorio Antártico, entre los 50°S y 75°S de latitud, y 35°W a 95°W de longitud. La escala de colores representa respetivamente la altura en metros y el periodo en segundos. Los puntos denotados como A1, A2 y A3, representan posiciones geográficas estratégicas para el desarrollo de rosas de oleaje (ver figuras 21 a 23). Fuente: (Beyá *et al.*, 2016).

Por su parte, el periodo del oleaje, al igual que en el caso de H_{mo} , presenta valores superiores (entre 9s y 10s) en el lado occidental de la península antártica, en comparación con oriente en donde el máximo valor del promedio anual está alrededor de los 7s.

Para los meses de diciembre a marzo (verano austral), las condiciones de oleaje entre el oriente y occidente de la península antártica son relativamente opuestas. Mientras en el primer sector, se encuentran las H_{mo} de menor magnitud durante todo el año, con valores que no superan los 4m entre los paralelos 50°S y 60°S, y longitudes de 95°W a 64°W; al oriente se identifican una mayor distribución espacial de H_{mo} con valores de 2m, entre paralelos 65°S y 72.5°S. Esto es coherente, dado que durante esta temporada la cobertura de hielo es menor, debido a la mayor longitud de horas con exposición solar, lo que posibilita la entrada de trenes de oleaje más hacia el continente.

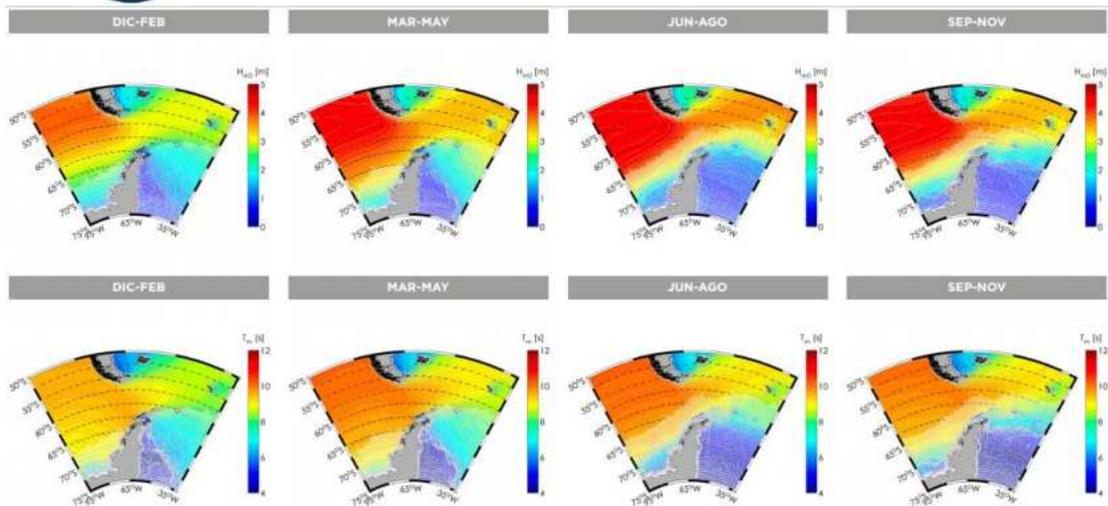


Figura 20. Promedios trimestrales de la altura significativa de oleaje (H_{m0}) y Periodo de oleaje (T_m) para territorio Antártico, entre los 50°S y 75°S de latitud, y 35°W a 95°W de longitud. La escala de colores representa respectivamente la altura en metros y el periodo en segundos. Fuente: (Beyá *et al.*, 2016).

Lo anterior contrasta con las características identificadas para la época de invierno austral (junio a agosto), en donde las magnitudes de H_{m0} alcanzan los 5m al occidente de la península, y se presentan las menores alturas de oleaje al oriente de la misma (entre 1 y 1.5m), debido al incremento en la cobertura de hielo, dadas las bajas temperaturas. Esta misma relación entre magnitudes entre los lados de la península, se evidencia para el periodo del oleaje durante las estaciones.

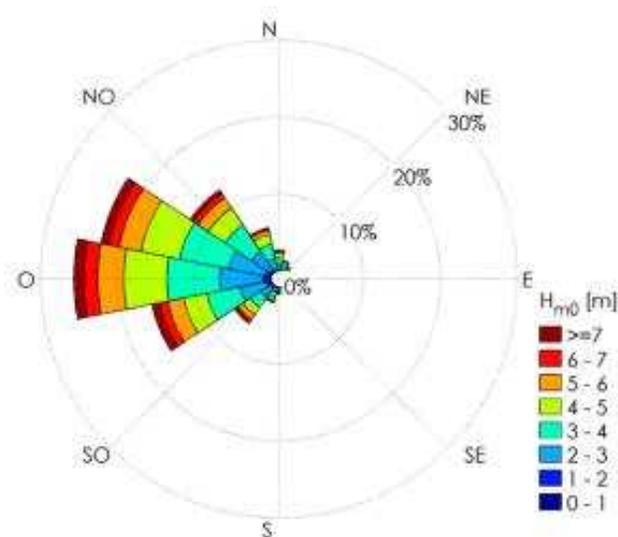


Figura 21. Rosa de oleaje para el punto A1. La escala de colores representa la altura significativa del oleaje (H_{m0}) en metros: Fuente: (Beyá *et al.*, 2016).



Las rosas de oleaje presentadas en las figuras 21, 22 y 23, identificadas como A1, A2 y A3, respectivamente, nos permiten corroborar lo expuesto en términos de dirección de oleaje, en la cual las H_{m0} se encuentra distribuida principalmente entre direcciones (NW y SW), con predominio en la dirección oeste (W), en los puntos A1 y A2, con porcentaje cercano al 25% y 28%, respectivamente.

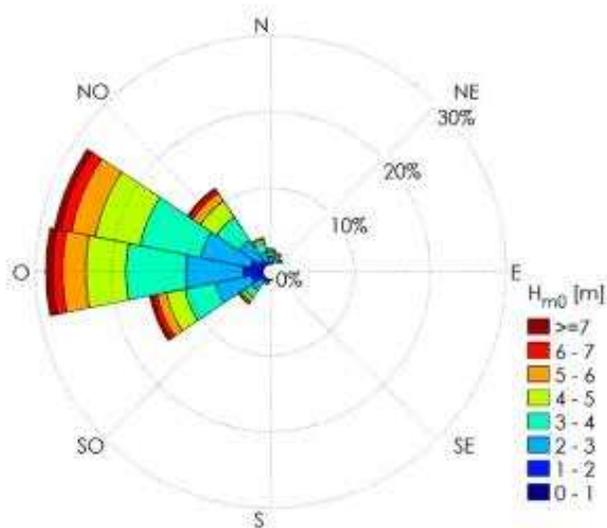


Figura 22. Rosa de oleaje para el punto A2. La escala de colores representa la altura significativa del oleaje (H_{m0}) en metros: Fuente: (Beyá *et al.*, 2016).

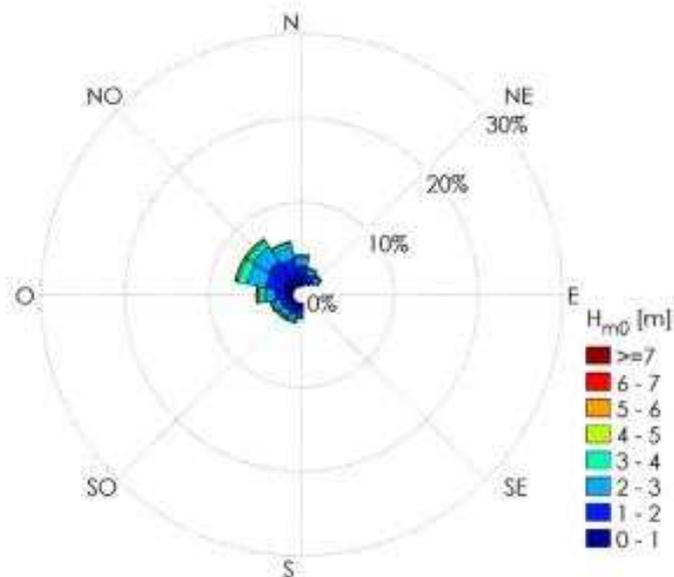


Figura 23. Rosa de oleaje para el punto A3. La escala de colores representa la altura significativa del oleaje (H_{m0}) en metros: Fuente: (Beyá *et al.*, 2016).



Las rosas de oleaje presentadas en las figuras 21, 22 y 23, identificadas como A1, A2 y A3, respectivamente, nos permiten corroborar lo expuesto en términos de dirección de oleaje, en la cual las H_{mo} se encuentra distribuida principalmente entre direcciones (NW y SW), con predominio en la dirección oeste (W), en los puntos A1 y A2, con porcentaje cercano al 25% y 28%, respectivamente.

Validación reanálisis de oleaje

Con el objetivo de identificar el nivel de representación de las condiciones de oleaje del reanálisis realizado por el *Centre for Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation* (CSIRO) en el área de estudio, se adoptó para la validación de éste, datos del Atlas de Oleaje de Chile (AOC).

El AOC, fue generado a partir de la configuración del modelo *WaveWatchIII III v.4.18*, empleando una grilla computacional de $1^\circ \times 1^\circ$ que abarca el océano Pacífico desde 64° S, 110° E hasta 64° N 60° W. Los exhaustivos procesos de calibración y optimización realizados a partir de mediciones satelitales, registros de boyas ubicadas en aguas profundas por el Servicio Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) y del Centro Nacional de Datos de Boyas (NBDC, por sus siglas en inglés), así como de mediciones efectuadas en el marco de diferentes proyectos nacionales, hacen que esta fuente de datos sea idónea para validar el reanálisis de oleaje en territorio antártico (Gallardo, Álvarez, Beya, & Winckler, 2017). Resultados de las comparaciones cuantitativas realizadas con otras bases de datos de reanálisis de oleaje disponibles a nivel internacional demuestran su calidad en la representación del clima de oleaje (Gallardo, Álvarez, Beya, & Winckler, 2016).

Para este proceso se emplearan 8 nodos computacionales, cuyas coordenadas geográficas y demás características son presentadas en la tabla 2, siendo el nodo N19, el que se encuentra más cercano al territorio antártico.

De igual forma, considerando que el objetivo del estudio, busca a futuro identificar conexiones entre la dinámica del oleaje en territorio antártico y su influencia en las costas sudamericanas, específicamente las del Pacífico colombiano, se incluyó en el proceso de validación datos in situ registrados en este último lugar. Es así como se incorporará, datos de la boya de oleaje ubicada en la posición (3.9° N 77.08° W) en la localidad de Buenaventura, como parte del Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina SMPOM de DIMAR y datos del reanálisis Interim-ECMWF de un nodo computacional ubicado en Isla Galápagos en Ecuador (1° S, 93° W), facilitados en el marco cooperaciones de investigación internacional. En la tabla 2 se indican las características generales de los datos y en la figura 24 se ilustra la posición geográfica de cada una de ellas. Se seleccionó como periodo de validación el año 2009, considerando la disponibilidad de los datos de la boya de oleaje de DIMAR (B1), y de esta manera facilitar la comparación con los resultados proporcionados por las otras fuentes. En el Apéndice



Tabla 2. Series temporales empleadas para la fase de validación del reanálisis de oleaje CSIRO. Fuente: Autor.

| Fuente | Posición Geográfica | | Serie temporal | | Localidad |
|--------------------------|---------------------|--------|----------------|-------------|--------------------------------|
| | LAT[°] | LON[°] | Fecha inicio | Fecha final | |
| SMPOMM | 3.9°N | 77°W | 01/01/2009 | 31/12/2009 | B1-Buenaventura |
| Interim-ECMWF | 1.0°S | 93°W | | | G1-Galápagos |
| Atlas de Oleaje de Chile | 19°S | 72°W | | | N1- Arica |
| | 27°S | 72°W | | | N5- Bahía Inglesa |
| | 39°S | 75°W | | | N11-P. Saavedra |
| | 47°S | 77°W | | | N15 –Golfo de Penas |
| | 55°S | 73°W | | | N19- Isla London |
| | 27°S | 81°W | | | N20 – Isla Desventura |
| | 28°S | 110°W | | | N21- Isla de Pascua |
| | 35°S | 81°W | | | N22- Archipiélago J. Fernández |

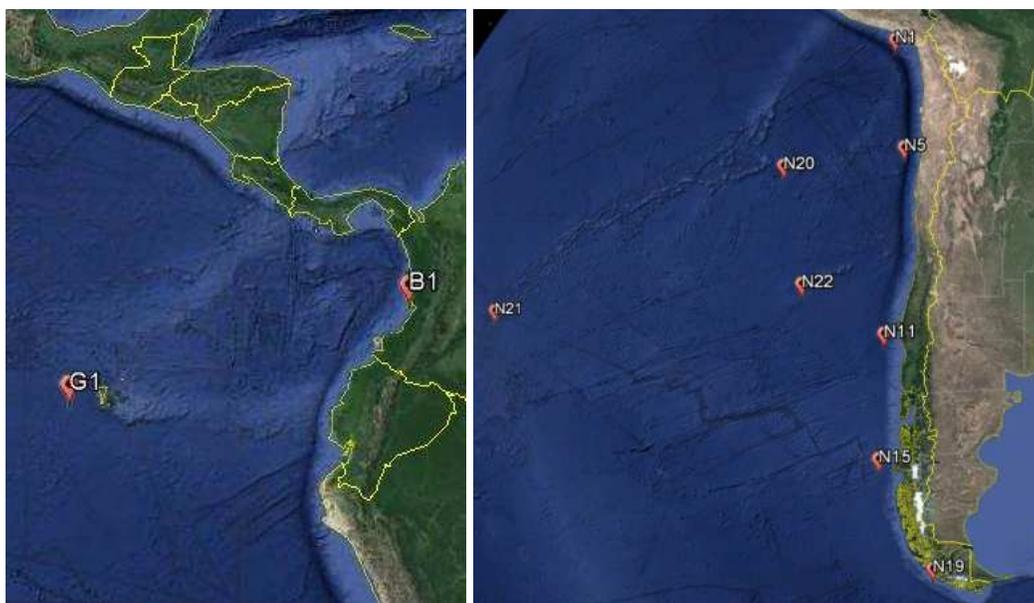


Figura 24. Ubicación de los puntos geograficos empleados en la validación del reanálisis de oleaje CSIRO. De izquierda a derecha, posición datos boya de oleaje de Buenaventura (B1) e Isla Galápagos (G1) del sistema SMPOMM de DIMAR y, y nodos computacionales del AOC. Fuente: Google Earth.



En la figura 25 se presentan las series temporales y el diagrama de dispersión de la altura significativa, periodo y dirección del oleaje de boya de DIMAR ubicada en Buenaventura, y el reanálisis CSIRO. Por su parte la figura 26 indica estos mismos resultados entre el nodo computacional N19, ubicado en Isla London, posición más austral de todos los puntos suministrados por el AOC. Para comodidad del lector, los resultados gráficos correspondientes a los nodos computacionales adicionales, se han condensado en el Apéndice 3, y los resultados del análisis estadístico para la altura significativa en la tabla 3. Por otro lado para completar el análisis desde el punto de vista de la probabilidad, en el Apéndice 4, se presentan diagramas cuantil-cuantil para H_s .

Los parámetros estadísticos analizados fueron el coeficiente de determinación (R^2) sesgo (BIAS), definido como la diferencia entre la media de los datos observados y la media de los datos sintéticos; el error cuadrático medio (RMSE), con la que se mide la dispersión global de los datos alrededor de la línea de regresión; y el índice de dispersión (o SI, adimensional), que indica la desviación estándar de los datos calculados con respecto a la línea de mejor ajuste, dividido entre la media de las observaciones, para cada una de las regiones estudiadas.

Tabla 3. Resultados de la validación del reanálisis CSIRO a partir de datos in situ y nodos computacionales del AOC para la altura significativa del oleaje. Fuente: Autor.

| Localidad | Hs | | | | |
|--------------------------------|------|-------|-------|------|-------|
| | CC | R^2 | RMSE | SI | BIASS |
| B1-Buenaventura | 0.56 | 0.314 | 0.24 | 0.36 | -0.13 |
| G1-Galápagos | 0.90 | 0.86 | 0.21 | 0.11 | 0.14 |
| N1- Arica | 0.97 | 0.943 | 0.17 | 0.08 | 0.13 |
| N5- Bahía Inglesa | 0.95 | 0.917 | 0.36 | 0.14 | 0.32 |
| N11-P. Saavedra | 0.96 | 0.938 | 0.64 | 0.20 | 0.59 |
| N15 –Golfo de Penas | 0.96 | 0.934 | 0.52 | 0.13 | 0.38 |
| N19- Isla London | 0.97 | 0.954 | 0.40 | 0.08 | 0.13 |
| N20 – Isla Desventura | 0.97 | 0.951 | 0.17 | 0.06 | 0.09 |
| N21- Isla de Pascua | 0.96 | 0.935 | 0.19 | 0.07 | 0.03 |
| N22- Archipiélago J. Fernández | 0.97 | 0.954 | 0.219 | 0.07 | 0.10 |

Como se puede observar a través de la comparación de las figuras 25, 26 y 27, al igual que los resultados de la tabla 3, vemos como se han obtenido valores de correlación mayores (superiores a 0.95) para las validaciones realizadas con los datos del AOC en comparación con los de la boya de Dimar. De igual forma, se encuentran sesgos positivos para las validaciones con los nodos de AOC, y negativo para el caso de la boya de Buenaventura.

Una de las razones del bajo nivel de correlación encontrado en el punto B1, responde a la ubicación en la cual se encuentra instalada la boya de oleaje, la cual al encontrarse muy cercano al borde costero, se ve influenciado por los procesos de asomeramiento, procesos que no puede ser representados de manera fiel por el reanálisis CSIRO, dado que su esencia es la simulación del oleaje en aguas profundas (Durrant, et al., 2014). Sin embargo, como parte de las etapas subsiguientes al desarrollo de esta investigación, se efectuará la validación del reanálisis con datos de boyas ubicadas en otras localidades del Pacífico colombiano para mayor veracidad de los resultados.

De esta manera se puede observar de manera preliminar, que el reanálisis CSIRO es capaz de caracterizar de manera coherente las condiciones de propagación de oleaje desde zonas remotas y la variabilidad de las series temporales de altura significativa (ver valores del coeficiente de



determinación en la tabla 3 (R^2), características necesarias para el análisis de la influencia de fenómenos de variabilidad interanual en el oleaje, así como la identificación de conexiones entre el Pacífico colombiano y la región antártica.

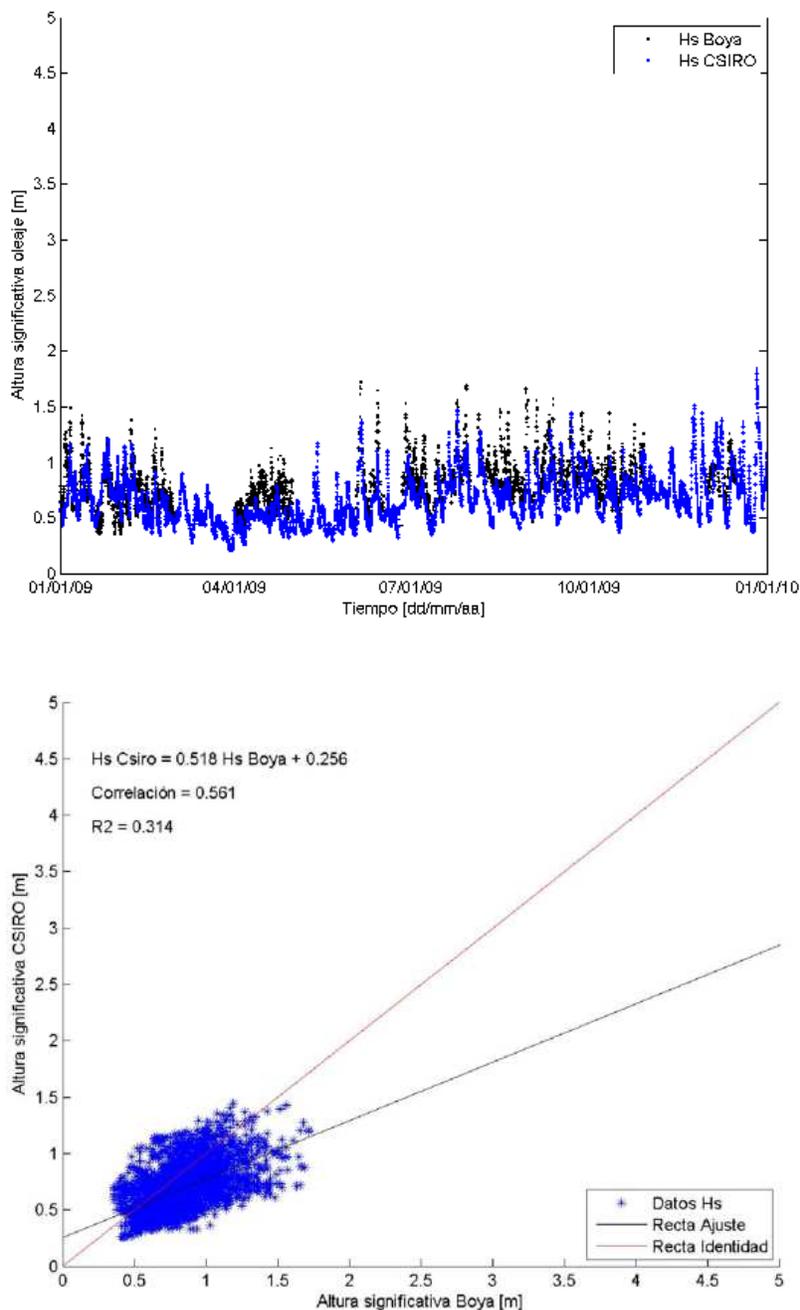


Figura 25. Comparación de series temporales (arriba) y diagramas de dispersión (abajo) de H_s , realizados a partir de datos del reanálisis CSIRO y datos de la boya de Dimar (B1). La línea roja representa el ajuste ideal (función identidad) y la línea negra el mejor ajuste. En las series temporales, color azul datos del reanálisis CSIRO y en negro los datos de la boya. Fuente: Autor.

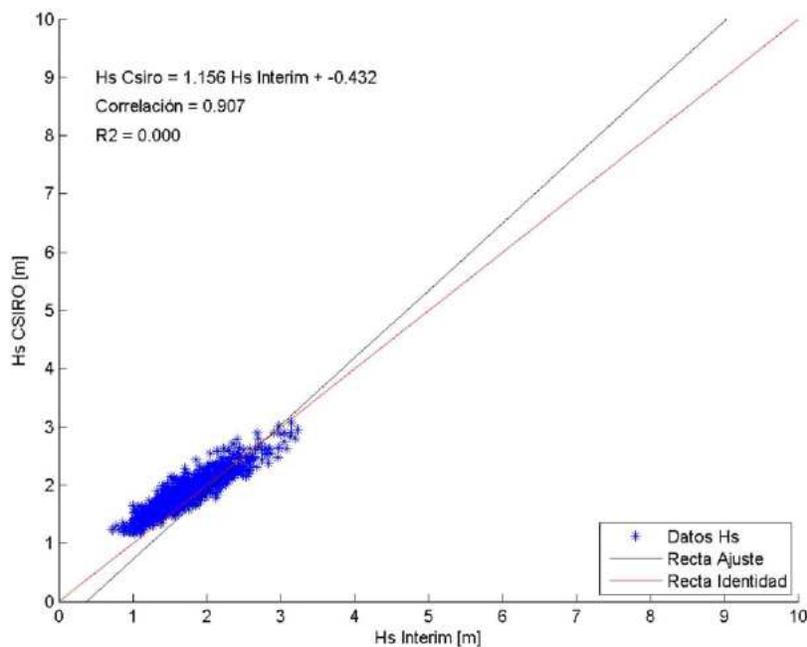
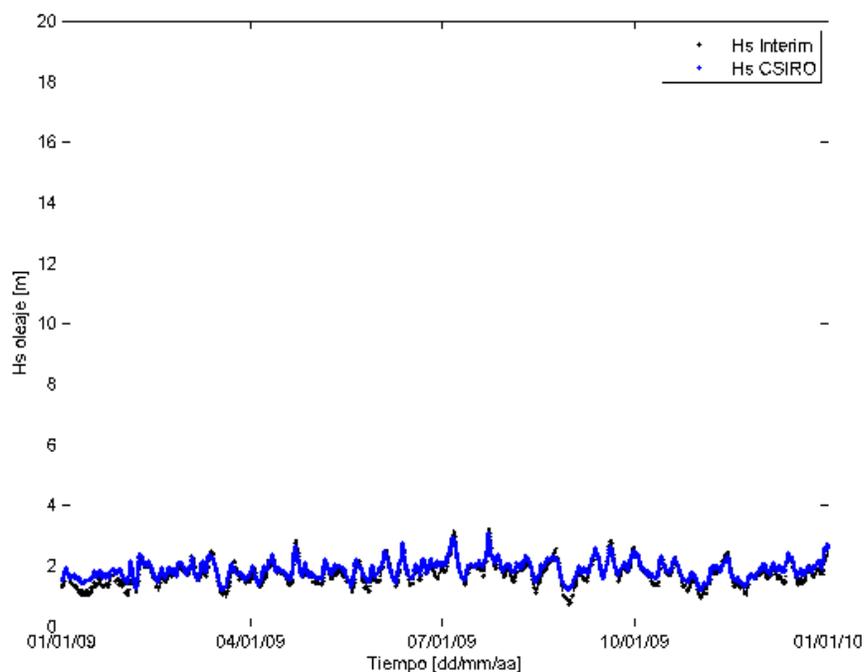


Figura 26. Comparación de series temporales (arriba) y diagramas de dispersión (abajo) de H_s , realizados a partir de datos del reanálisis CSIRO y datos de reanálisis Interim-ECMWF para un punto cercano de Isla Galápagos (G1). La línea roja representa el ajuste ideal (función identidad) y la línea negra el mejor ajuste. En las series temporales, color azul datos del reanálisis CSIRO y en negro los datos G1. Fuente: Autor.

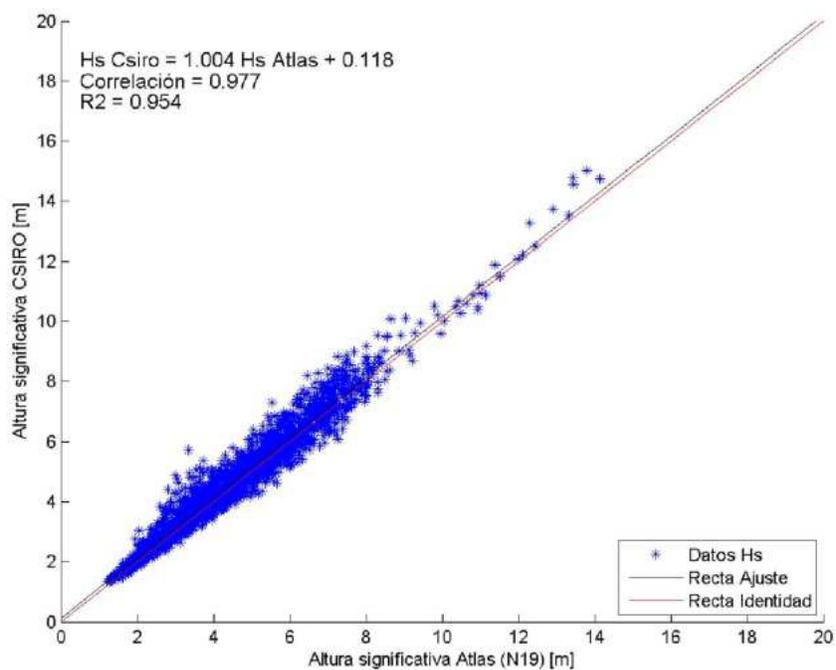
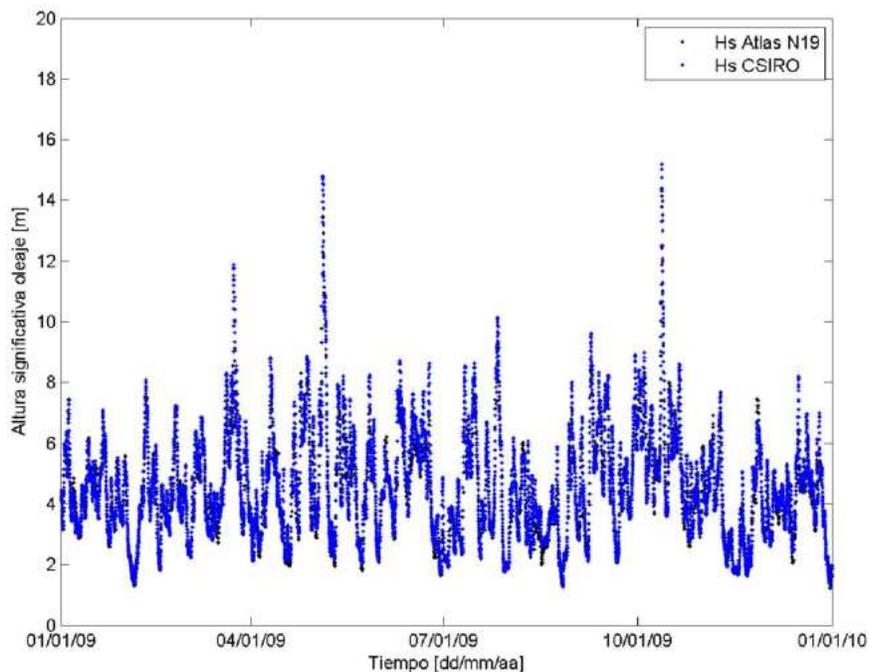


Figura 27. Comparación de series temporales (arriba) y diagramas de dispersión (abajo) de H_s , realizados a partir de datos del reanálisis CSIRO y el nodo computacional 19 (N19) del AOC. La línea roja representa el ajuste ideal (función identidad) y la línea negra el mejor ajuste. En las series temporales, color azul datos del reanálisis CSIRO y en negro los datos del AOC. Fuente: Autor.



10. Resultados Esperados

El alcance de los objetivos de investigación propuestos en el proyecto de investigación, permitirán además de la generación de nuevo conocimiento de las condiciones oceanográficas y meteorológicas del territorio antártico, perfeccionar el modelo hidrodinámico implementado como parte de las metas de la I Expedición Antártica de Colombia (verano-austral 2014-2015), en conjunto con el módulo de deriva de hielos para el estrecho de Gerlache. Esto sumado a los productos propuestos en conjunto con la Escuela Naval de Cadetes Almirante Padilla (ENAP), en el marco del proyecto “Estudio de Atenuación de parámetros de oleaje bajo la dinámica de fijo y flotante en la Antártica”, generaran herramientas que permitirán a la DIMAR, hacer del territorio antártico una nueva jurisdicción para ejercer acciones de seguridad en la navegación y demás actividades inherentes a la institución, a través de la obtención de capacidades de pronóstico de variables meteomarinas.

Por otro lado, gracias a las estaciones oceanográficas realizadas a lo largo del Pacífico suramericano se abordará en conjunto con la ENAP, el análisis de la dinámica de las masas de agua, no sólo en el estrecho de Gerlache, sino que además será posible identificar con mayor detalle la evolución de las mismas a lo largo de las costas colombianas.

Por otro lado el enfoque de análisis interanual, de las condiciones de oleaje y el nivel del mar, a partir de fuentes de datos de reanálisis, como en el que aquí se presenta (CSIRO) para el tema de oleaje, aportará importantes resultados en temas de variabilidad climática y cambio climático contemporáneo. Esto es fundamental para la mejora de los pronósticos de oleaje operacionales existente en los Centros de investigación de la DIMAR, generación de información para la toma de decisiones estratégicas en temas de protección de obras civiles costeras, y determinación de la influencia de fenómenos naturales como el fenómeno de El Niño- Oscilación Sur en las costas sudamericanas, especialmente en las colombianas.

11. Actividades de divulgación

Durante el año 2017, se realizará la presentación de los resultados preliminares en el Seminario Nacional de Ciencias del Mar (SENALMAR) y el Congreso Latinoamericano de Ciencias del Mar (COLACMAR), por parte de los investigadores que integran el proyecto de investigación. Adicionalmente, se socializarán los resultados del proyecto de manera periódica en eventos realizados al interior de la institución, en donde harán presencia la comunidad en general y entidades relacionadas con el tema.

En el año 2018 se publicaran 02 artículos científicos, y se presentaran los resultados finales de la investigación en eventos internacionales relacionados con temas Antárticos.



12. Recomendaciones

Para corroborar la capacidad de representación del reanálisis CSIRO, de las condiciones de oleaje en territorio antártico, y considerando las limitaciones presentadas en lo concerniente a la adquisición de datos de oleaje en aguas intermedias, se sugiere contratar el sistema de comunicación satelital IRIDIUM que garantice la transmisión de datos de boyas de oleaje tipo Triaxys en territorio antártico. De igual forma la consecución de una línea de fondeo de 500 metros que permita el registro de las condiciones de oleaje en aguas profundas.

Con respecto al desarrollo de mediciones de variables oceanográficas durante la próxima expedición, es necesario contar con equipos especializados, cuyos procesos de calibración y mantenimiento hayan sido realizados de manera reciente. Esto sumado a la realización de pruebas de los equipos de manera oportuna, aminora en gran medida la ocurrencia de percances operacionales durante las maniobras en campo. Lo anterior incluye pruebas del winche oceanográfico, herramienta fundamental para la izada y arriada de los equipos para el registro de perfiles de variables oceanográficas.

Con el objetivo de contar con mayor cantidad de datos para el análisis de la evolución de las variables meteorológicas, se recomienda realizar la instalación de la estación portátil a bordo del buque ARC 20 de Julio, desde el inicio de la expedición, dando la posibilidad de identificar el comportamiento de las variables, a lo largo del recorrido por Suramérica. Este aspecto es fundamental para el estudio de las teleconexiones existentes en esta área y el territorio antártico, sumado a fuentes de datos internacionales que solvente las limitaciones espaciales y temporales de estos registros in situ.



13. Bibliografía

- Beyá J., Álvarez M., Gallardo A., Hidalgo H., Aguirre C., Valdivia J., Parra C., Méndez L., Contreras F., Winckler P., Molina M. (2016). Atlas de Oleaje de Chile. Primera edición. Valparaíso, Chile, Escuela de Ingeniería Civil Oceánica - Universidad de Valparaíso.
- Reiner Schlitzer, P. (2017). AWI's Ocean Data View (ODV). Alfred Wegener Institute for Polar and Marine Research.
- Durrant et al., 2014. A Globe Wave Hindcast Focussed on the Central and South Pacific. CAWCR Technical Report N° 0.70. Australian Government.
- Gallardo, A., Álvarez, M., Beyá, J., & Winckler, P. (2016). Informe Técnico 05: Comparación Atlas con otras bases de datos. Valparaíso, Chile: Un Atlas de Oleaje para Chile U, niversidad de Valparaíso.
- Gallardo, A., Álvarez, M., Beya, J., & Winckler, P. (2017). Informe Técnico 02: Calibración del modelo Wavewatch III. Valparaíso, Chile: Un Atlas de Oleaje para Chile, Universidad de Valparaíso.
- National Climatic Data Center (NCDC). (s.f.). OISST - National Climatic Data Center - NOAA. Recuperado el 11 de 4 de 2017, de <https://www.ncdc.noaa.gov/oisst>.
- Sea-Bird Scientific. (2016, 11 16). Manual CTD Real - Time Data Acquisition Software for Windows. Retrieved from http://www.seabird.com/sites/default/files/documents/Seasave_7.26.4.pdf
- Sea-Bird Scientific. (2017, 11 16). Manual SBE Data Processing, CTD Data Processing & Plotting Software for Windows. Bellevue, Washington, USA.
- Sea-Bird Scientific. (2017, 04 09). Sea-Bird Scientific | Advancing the Science of Ocean Measurement. Retrieved from www.seabird.com.
- Torres, 2017. Informe Final de Crucero Oceanográfico, Crucero Expedición de Colombia a la Antártida 2016-2017.



Apéndice 1. Especificaciones técnicas de los sensores empleados para la obtención de perfiles de CTDO.

| EQUIPO | SENSORES | MARCA | RANGO | PRECISIÓN | CALIBRACIÓN | No. SERIE |
|--|---------------------------------|---------|---------------------------|------------|-------------|------------------|
| SBE 25 (S/N 0510) | *Presión | SBE | 0 a 7000 m | 0.1% | 11/06/2014 | 290720 |
| | **Temperatura | | -5 a +35°C | +/- 0.002 | 11/06/2014 | 3F 035490 |
| | *Conductividad | | 0 a 7 | +/- 0.003 | 11/06/2014 | 4C 043839 |
| | *Oxígeno SBE 43 | | 120% | +/- 2% | 11/06/2014 | 432207 |
| | *~Fluorimetro /Turbidimetro | WetLabs | 0-50 µg/l Chl 0-25 NTU | ----- | 11/06/2014 | FLNTURTD2422 |
| SBE 19 Plus V2 (S/N 6869) | **Presión | SBE | 0 a 7000 m | 0.1% | 12/10/2013 | 6869 |
| | **Temperatura | | -5 a +35°C | +/- 0.005 | 12/10/2013 | 6869 |
| | **Conductividad | | 0 a 9 S/m | +/- 0.0005 | 12/10/2013 | 6869 |
| | *Oxígeno SBE 43 | | 120% | +/- 2% | 12/10/2013 | 432151 |
| | ** Fluorimetro /Turbidimetro | WetLabs | 0-50 µg/l Chl 0-25 NTU | ----- | 12/10/2013 | FLNTURTD 2354 |

(*) Sensores independientes al CTD – (**) Sensores integrados al CTD – (*~) Sensores combinados



Apéndice 2. Procesamiento de datos de CTDO y verificación de Perfiles

Para el tratamiento inicial de los datos, se utilizó el software provisto por el fabricante del CTD, SBE Data Processing versión 7.23.1 del 2013. Este paquete informático contiene diversas herramientas de procesamiento que permiten convertir, editar, procesar, y plotear los perfiles obtenidos durante cada estación. En el presente estudio se emplearon algunas herramientas contenidas en el SBE Data Processing así:

Data conversión: Permite convertir los datos en bruto (*.hex), en unidades de ingeniería de común interpretación, generando un archivo de extensión “*.cnv” a partir de un archivo de configuración que porta los coeficientes de cada sensor (Figura 28).

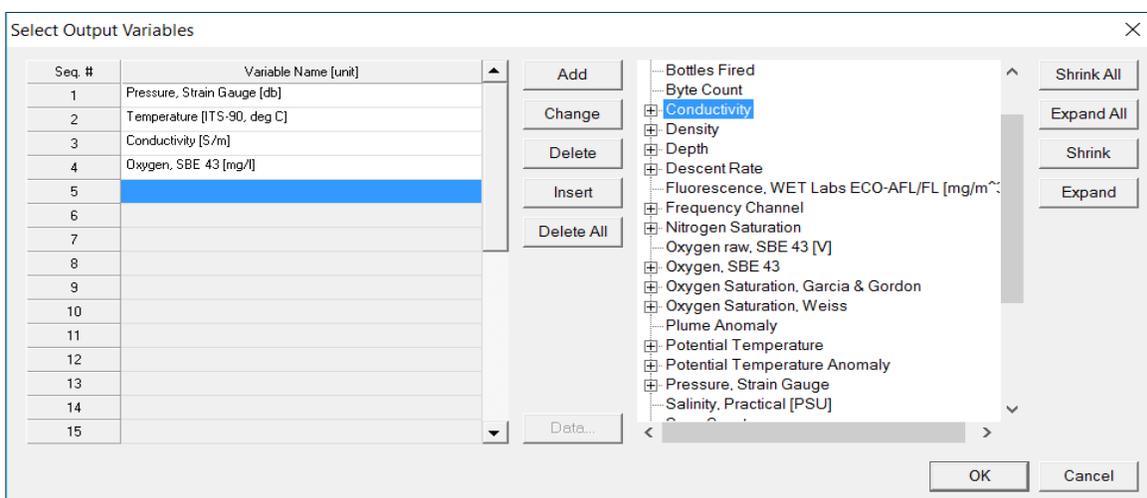


Figura 28. Módulo Data Conversión.

La conversión se logró usando los archivos de configuración 66869_10102013.xmlcon (SBE 19 Plus V2) y el 25-0510.xmlcon (SBE 25), ambos proporcionados por la casa matriz durante su periodo de calibración. El tratamiento incluyó los datos provenientes del descenso y del ascenso de los instrumentos. **Filter:** Esta herramienta aplica un filtro de pasa baja que suaviza las altas frecuencias (cambios repentinos) en una o más columnas contenidas en el archivo .cnv. Para el presente caso, los archivos fueron suavizados con un tiempo constante de 0.5 segundos (Figura 29).

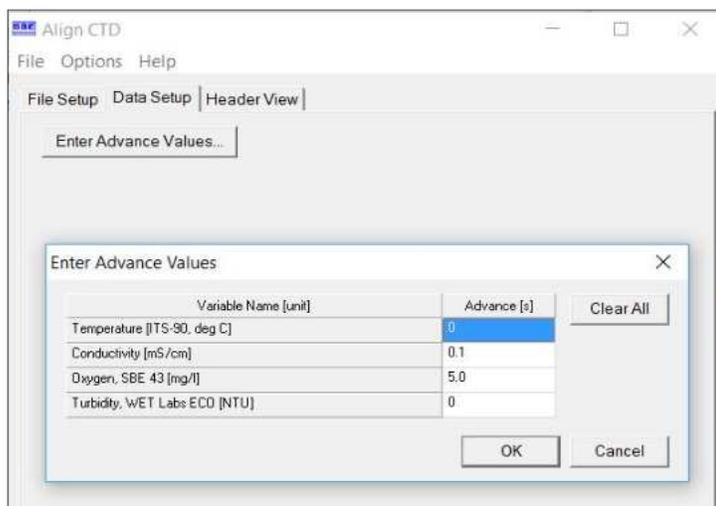


Figura 29. Módulo *Filter*.

Align CTD: Alinea los datos medidos en un instante de tiempo, con respecto a la celda de presión en que fue medido inicialmente (Figura 30). El procedimiento anterior permite asegurar que los cálculos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto entre otros, estén basados en mediciones que procedan de la misma parcela de agua donde fueron obtenidos.

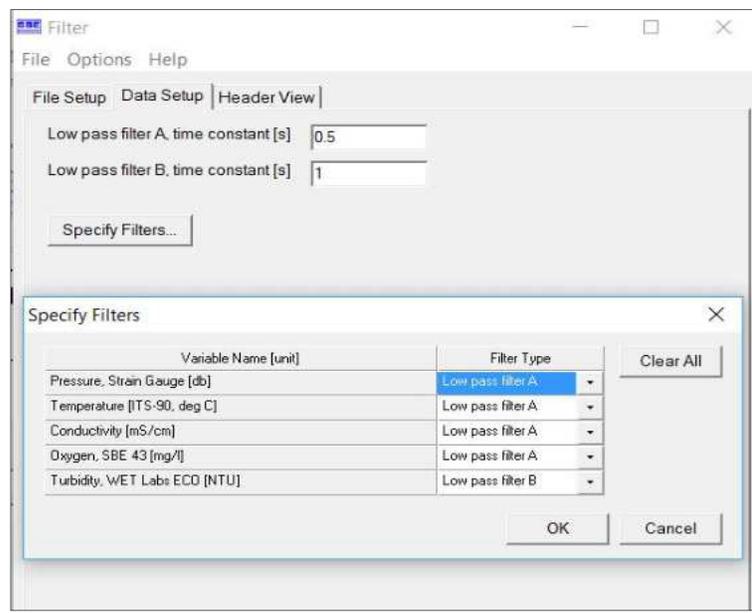


Figura 30. Módulo *Align CTD*.

Loop Edit: Marca los registros errados o inconsistentes, acuerdo configuración de valores asociados a registros de “*Badflag*” desde el archivo inicial “.cnv”, que tienen valores de presión con caída lenta o viceversa (a causa del movimiento del buque). Los registros obtenidos en cada archivo fueron procesados a una velocidad mínima promedio de 0.2 m/s (Minimum CTD velocity



[m/s]), se estableció un rango en profundidad para el atemperamiento del equipo entre 0 y 6 m, y de esta forma facilitar la remoción de registros con ruido en superficie (Figura 31).

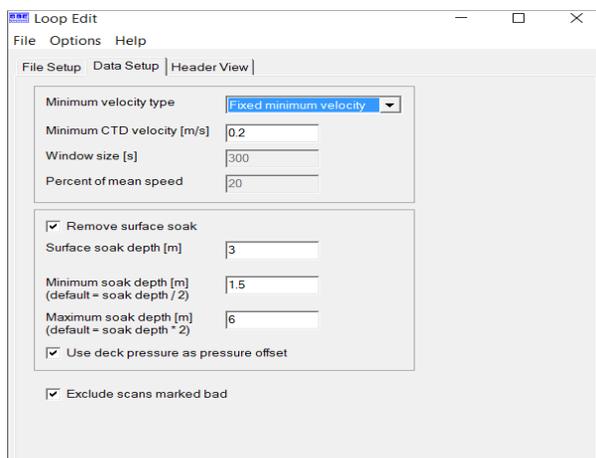


Figura 31. Módulo Loop Edit.

Derive: Este módulo emplea los registros de presión, temperatura y conductividad contenidos en el archivo .cnv para computar y obtener otras variables oceanográficas. Durante el procesamiento se empleó esta herramienta para el cálculo de la profundidad [m] y salinidad [ups] (Figura 32).

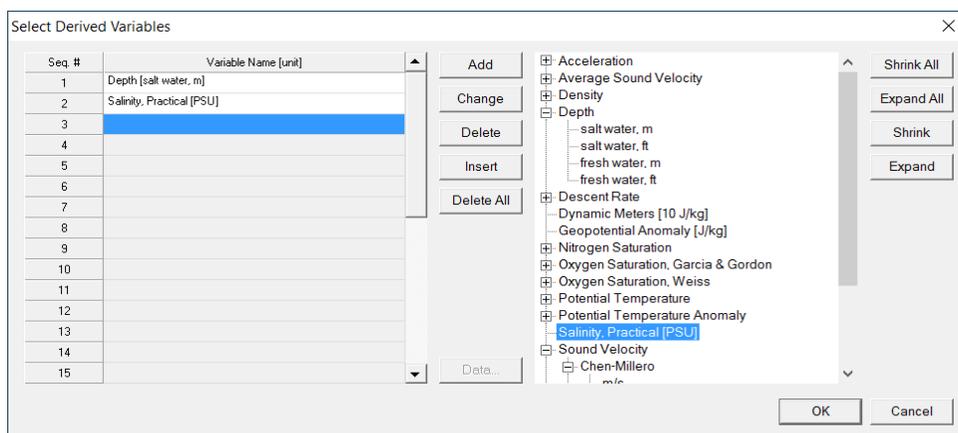


Figura 32. Módulo Derive.

Bin average: Promedia las celdas donde están contenidos los datos, usando intervalos definidos por el usuario (Figura 33). Existen cuatro opciones para promediar los datos; por rango de presión, por rango de profundidad, por rango de números de registros y por rango de tiempo de muestreo. Los archivos procesados fueron promediados por rango de presión, con un tamaño de celda de 1 (Bin size), excluyendo los registros marcados como erróneos.

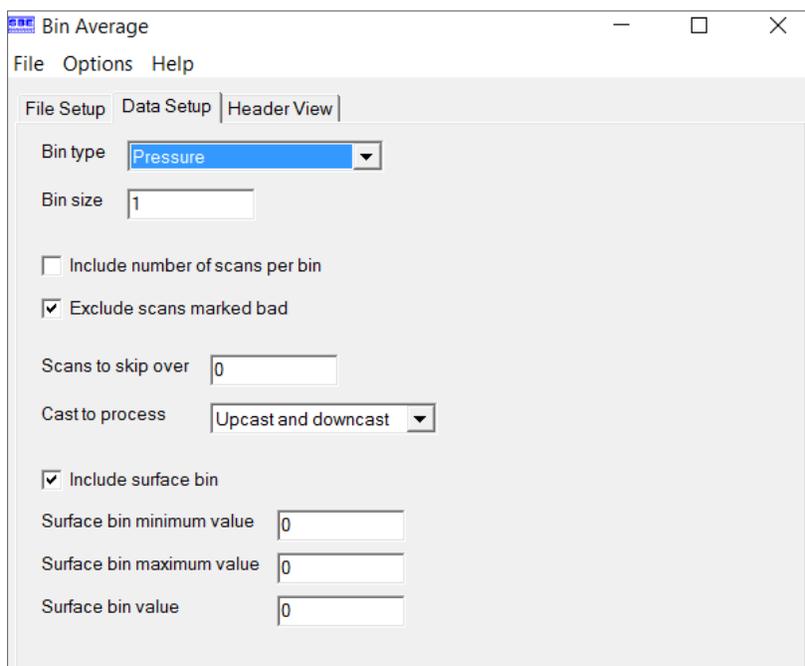


Figura 33. Módulo Bin Average.

Split: Esta herramienta separa los datos obtenidos durante el descenso y el ascenso con el CTDO, con respecto al ascenso y descenso de los registros de presión (Figura 34).

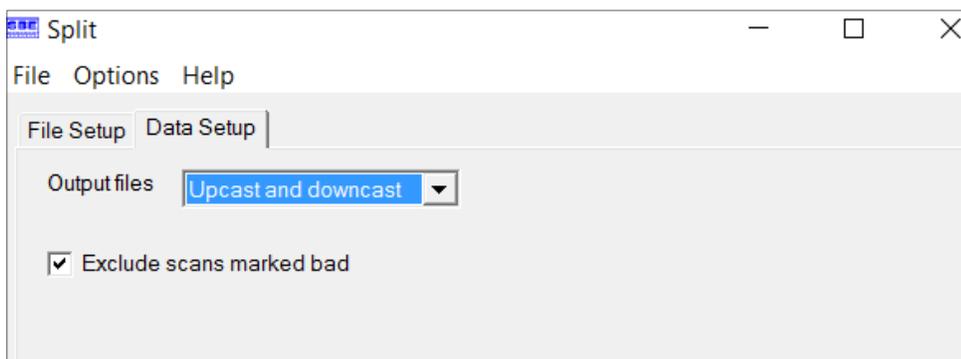


Figura 34. Módulo Split.

ASCII Out: Genera un archivo final de extensión “.asc”, conteniendo la información correspondiente al perfil muestreado, con su respectivo encabezado (Nombre del parámetro y unidad de medida).

Verificación de perfiles

Durante el análisis exploratorio de los datos procesados de cada perfilador, se logró evidenciar una mejor distribución en los rangos de salinidad obtenidos por medio del CTDO SBE 25, con respecto a los del SBE 19 Plus V2. Entre los dos equipos se observó un desfase de hasta 0.219 UPS (Figura 35a), el cual fue ajustado con base a la diferencia calculada (Figura 35b).

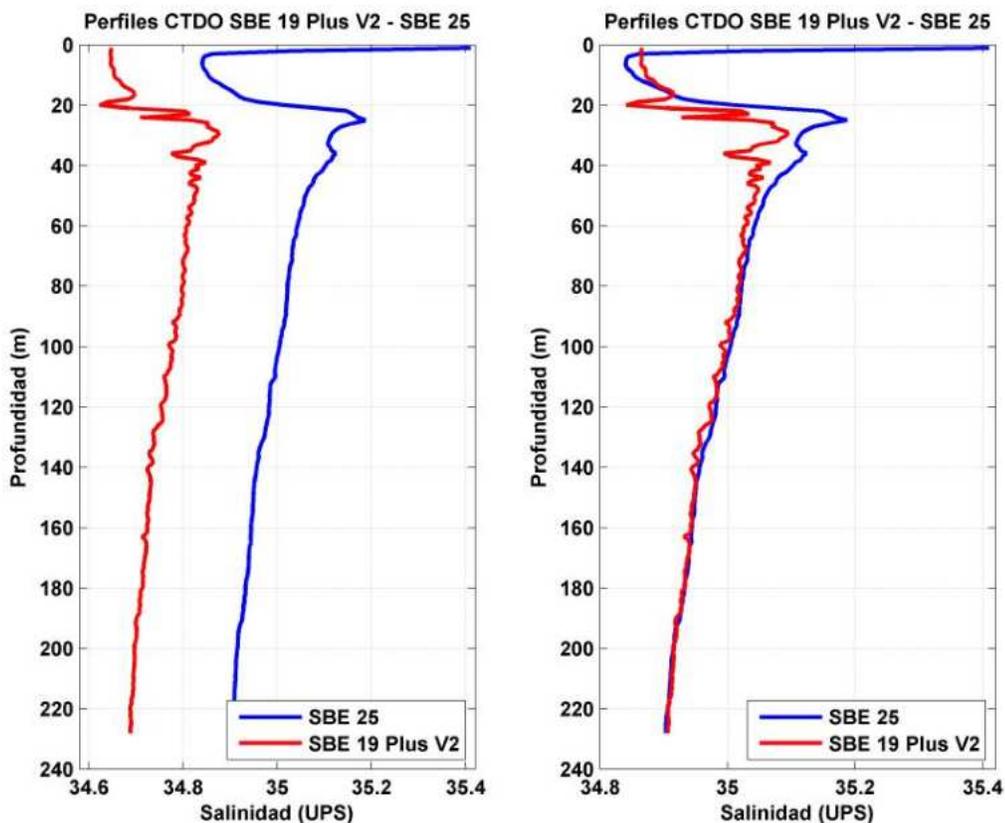


Figura 35. a.) Perfiles originales b.) Perfil SBE 19 Plus V2 ajustado a SBE 25.

Por otra parte este análisis permitió detectar y descartar los registros de fluorescencia del sensor WetLabs FLNTURTD 2422 instalado en el SBE 25, debido a fallas técnicas del mismo que arrojaron datos anómalos (Figura 36), motivo por el cual durante el post-procesamiento de los datos, solo se contemplaron los registros de fluorescencia obtenidos por el sensor WetLabs FLNTURTD 2354 instalado en el SBE 19 Plus V2.

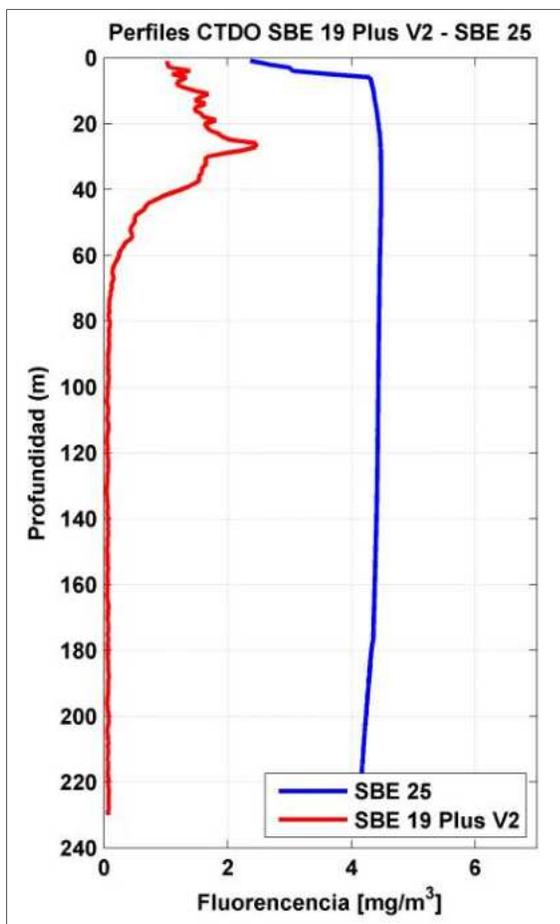


Figura 36. Perfil fluorescencia estación G08.

Por último se efectuó post-procesamiento de la información dispuesta en los archivos (*.asc) por medio de una rutina desarrollada en matlab, con el fin de integrar todos los perfiles de las estaciones en un solo archivo, en formatos (*.dat) y (*.xls) acuerdo estándares del Centro Colombiano de Datos e Información Oceanográfica (CECOLDO). La información de esta campaña estará disponible a profundidades estándar y metro a metro con su respectiva metadata.

Los datos productos de esta expedición quedan en custodia de la Dirección General Marítima (DIMAR) a través del Centro Colombiano de Datos e Información Oceanográfica (CECOLDO), en la tabla 4 se relaciona el total de estaciones muestreadas, al igual que cada uno de los parámetros muestreados.



Tabla 4. Estaciones oceanográficas realizadas y relación de los parámetros medidos en cada uno de ellos. Fuente: Autor.

| Estaciones | Fecha [dd/mm/aa] | Latitud [°] | Longitud [°] | Prof. Muestreo [m] | Presión [db] | Temperatura [°C] | Salinidad [UPS] | Oxígeno [mg/l] | Fluorescencia [mg/m ³] | Turbidez [NTU] | Conductividad [S/m] |
|------------|------------------|-------------|--------------|--------------------|--------------|------------------|-----------------|----------------|------------------------------------|----------------|---------------------|
| *S01 | 19/12/16 | 3,930 | -81,263 | 1265 | X | X | X | X | X | X | X |
| *S03 | 21/12/16 | -4,735 | -83,550 | 1385 | X | X | X | X | X | X | X |
| S04 | 23/12/16 | -13,336 | -79,575 | 1423 | X | X | X | X | X | X | X |
| *S06 | 25/12/16 | -21,314 | -75,622 | 1441 | X | X | X | X | X | X | X |
| S09 | 02/01/17 | -37,382 | -73,993 | 1017 | X | X | X | X | X | X | X |
| S10 | 12/01/17 | -59,435 | -64,095 | 549 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G16 | 14/01/17 | -64,768 | -62,856 | 442 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G17 | 14/01/17 | -64,662 | -62,898 | 453 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G18 | 15/01/17 | -64,982 | -63,455 | 402 | X | X | X | X | X | X | X |
| G21 | 15/01/17 | -65,032 | -63,340 | 266 | X | X | X | X | X | X | X |
| G22 | 16/01/17 | -64,901 | -63,754 | 426 | X | X | X | X | X | X | X |
| G27 | 16/01/17 | -64,851 | -63,967 | 422 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G28 | 17/01/17 | -63,938 | -60,772 | | *X | *X | *X | *X | *X | *X | *X |
| *G04 | 20/01/17 | -64,074 | -61,189 | 286 | X | X | X | X | X | X | X |
| G24 | 20/01/17 | -64,179 | -61,378 | 340 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G06 | 21/01/17 | -64,274 | -61,832 | 1018 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G11 | 21/01/17 | -64,419 | -62,186 | 520 | X | X | X | X | X | X | X |
| G10 | 21/01/17 | -64,470 | -62,111 | 483 | X | X | X | X | X | X | X |
| G25 | 22/01/17 | -64,537 | -62,769 | 305 | X | X | X | X | X | X | X |
| G26 | 22/01/17 | -64,518 | -62,694 | 254 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G13 | 22/01/17 | -64,564 | -62,592 | 729 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G12 | 22/01/17 | -64,583 | -62,257 | 442 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G09 | 23/01/17 | -64,468 | -61,927 | 314 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G08 | 23/01/17 | -64,454 | -61,800 | 302 | X | X | X | X | X | X | X |
| G05 | 23/01/17 | -64,366 | -61,687 | 527 | X | X | X | X | X | X | X |
| G07 | 23/01/17 | -64,256 | -61,948 | 370 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G01 | 23/01/17 | -63,956 | -61,703 | 1079 | X | X | X | X | X | X | X |
| G02 | 23/01/17 | -64,041 | -61,543 | 175 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G03 | 24/01/17 | -64,085 | -61,372 | 683 | X | X | X | X | X | X | X |
| *G29 | 28/01/17 | -62,393 | -58,662 | 1046 | X | X | X | X | X | X | X |



Apéndice 3 - Validación reanálisis CSIRO

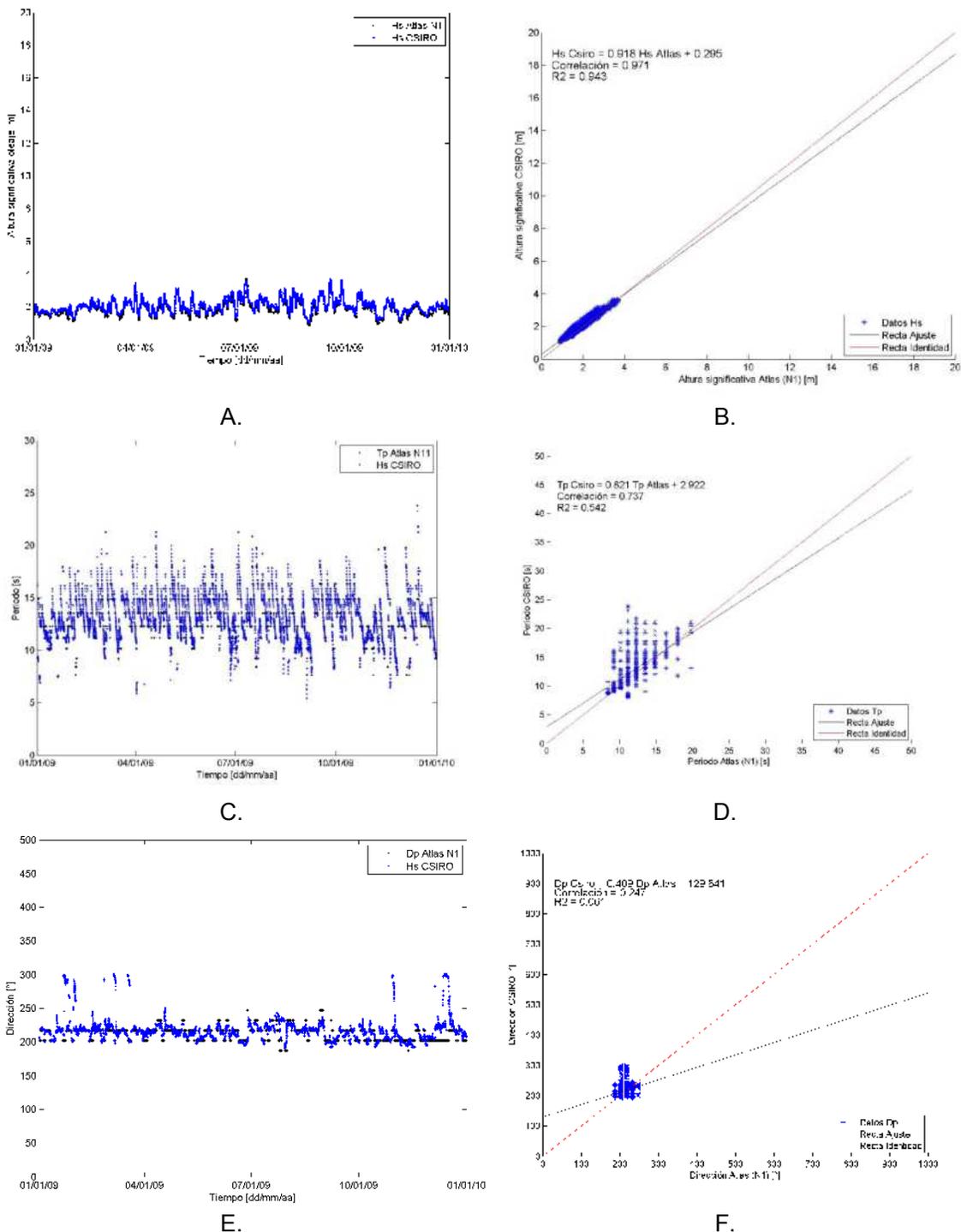
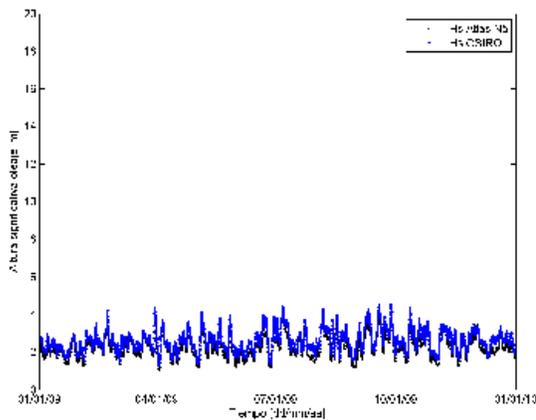
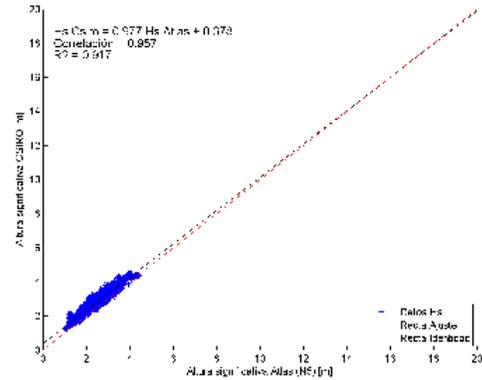


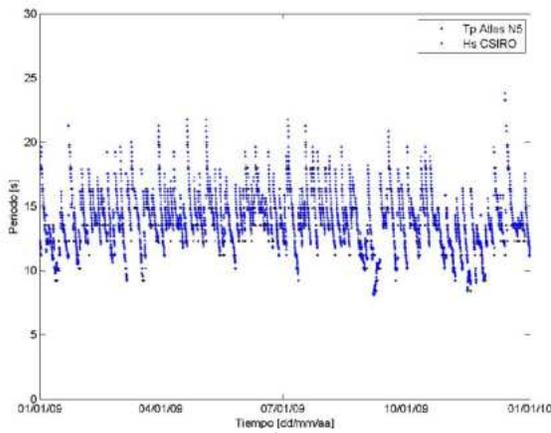
Figura 37. Series temporales (A, C, E) y diagramas de dispersión (B, D, F) de altura significativa del oleaje (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (D_p), realizados a partir de datos del reanálisis CSIRO y datos del AOC para el nodo computacional N1 ($19^\circ S, 72^\circ W$). La línea roja representa el ajuste ideal (función identidad) y la línea negra el mejor ajuste. En las series temporales, color azul datos del reanálisis CSIRO y en negro los datos del AOC. Fuente: Autor.



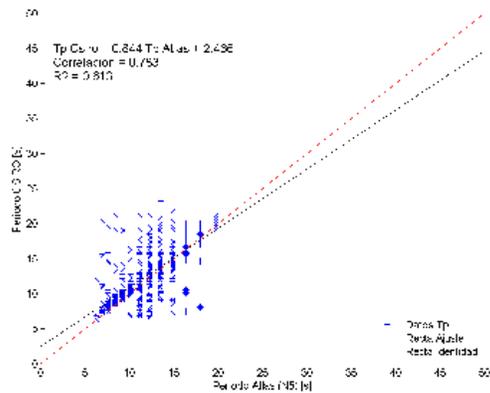
A.



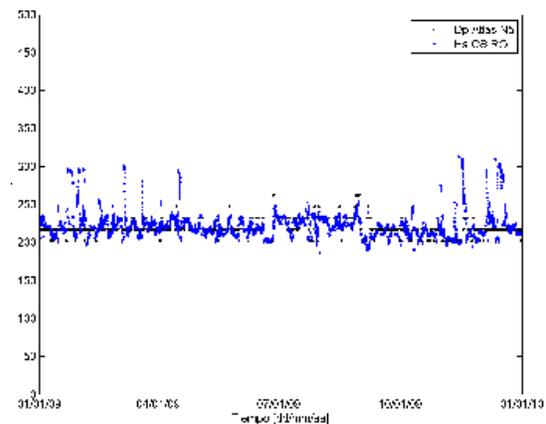
B.



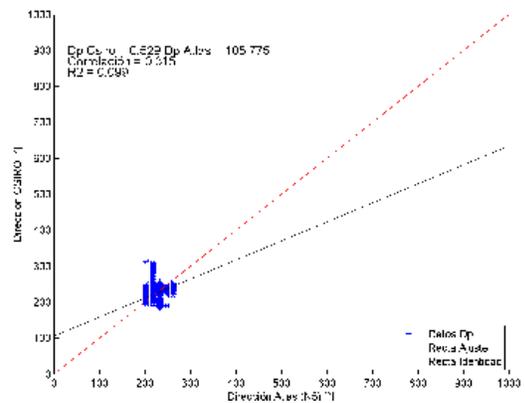
C.



D.



E.



F.

Figura 38 Series temporales (A, C, E) y diagramas de dispersión (B, D, F) de altura significativa del oleaje (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (D_p), realizados a partir de datos del reanálisis CSIRO y datos del AOC para el nodo computacional N5 ($27^\circ\text{S}, 72^\circ\text{W}$). La línea roja representa el ajuste ideal (función identidad) y la línea negra el mejor ajuste. En las series temporales, color azul datos del reanálisis CSIRO y en negro los datos del AOC. Fuente: Autor.

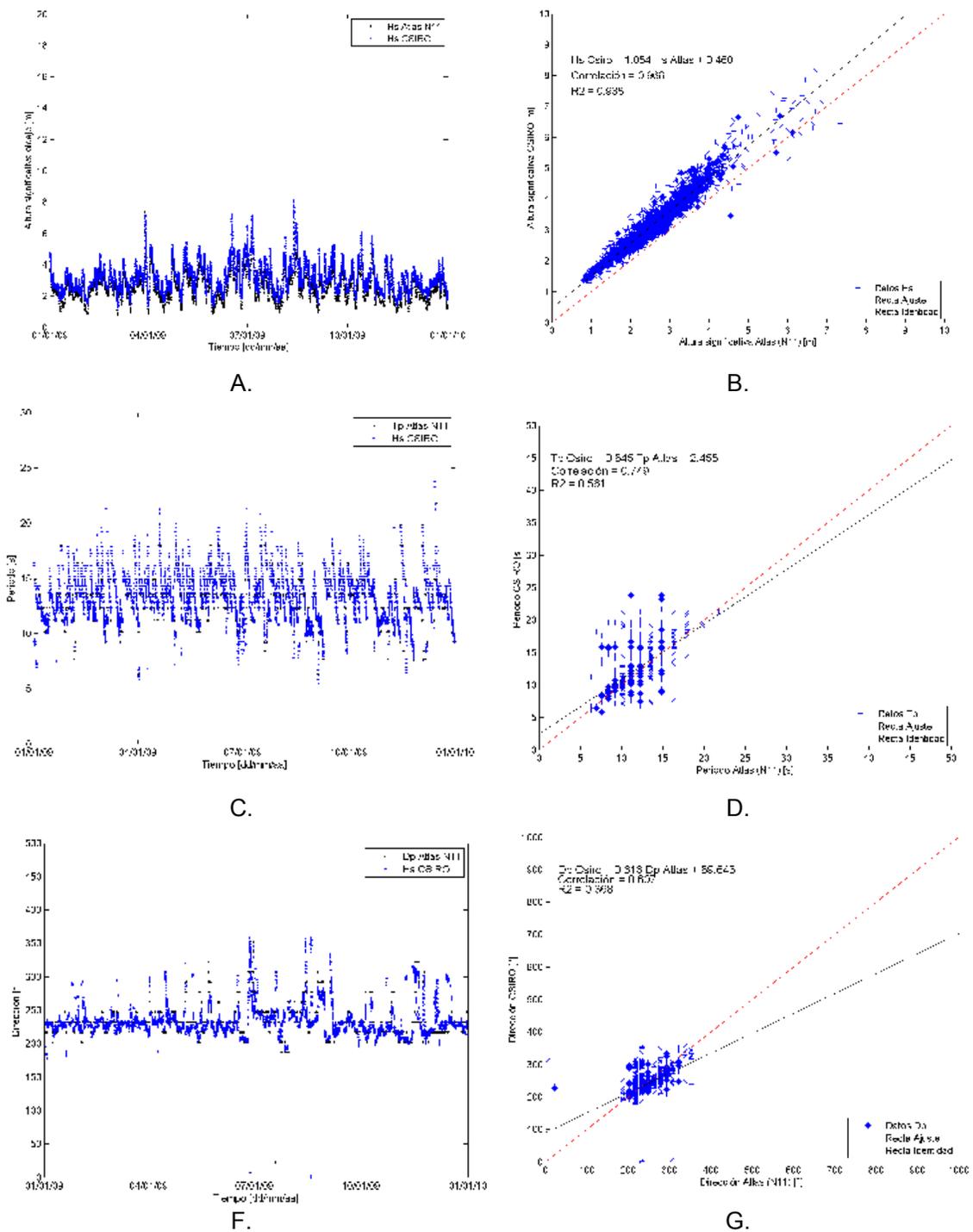
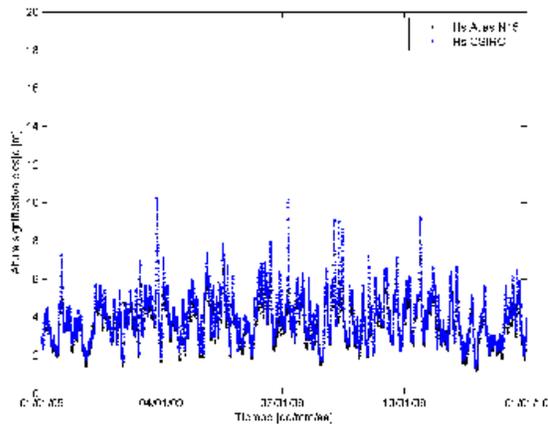
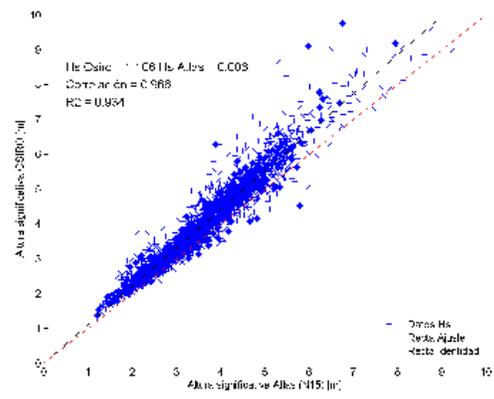


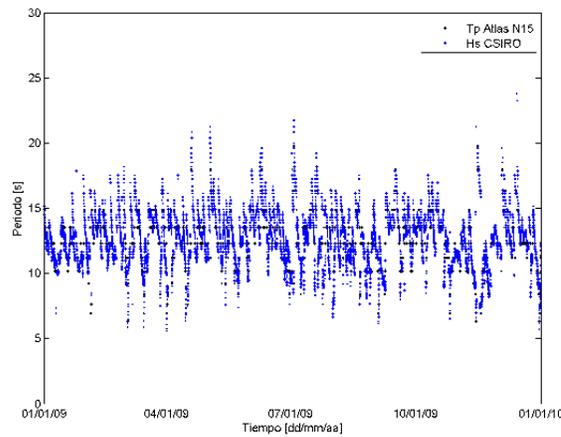
Figura 39. Series temporales (A, C, E) y diagramas de dispersión (B, D, F) de altura significativa del oleaje (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (D_p), realizados a partir de datos del reanálisis CSIRO y datos del AOC para el nodo computacional N11 (39°S, 75°W). La línea roja representa el ajuste ideal (función identidad) y la línea negra el mejor ajuste. En las series temporales, color azul datos del reanálisis CSIRO y en negro los datos del AOC. Fuente: Autor.



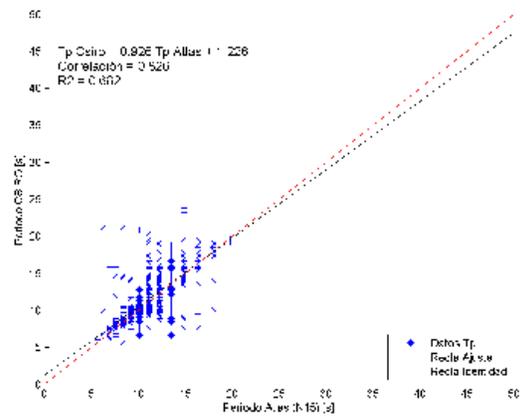
A.



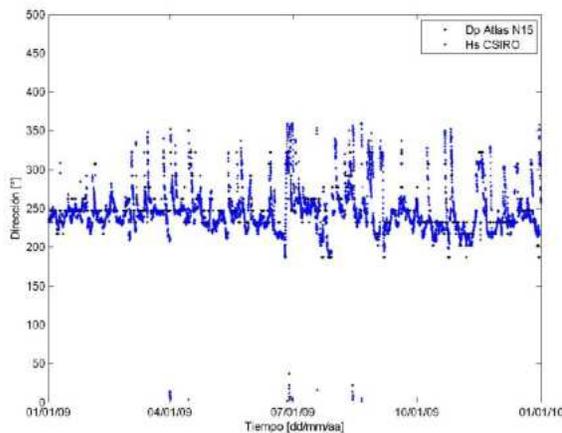
B.



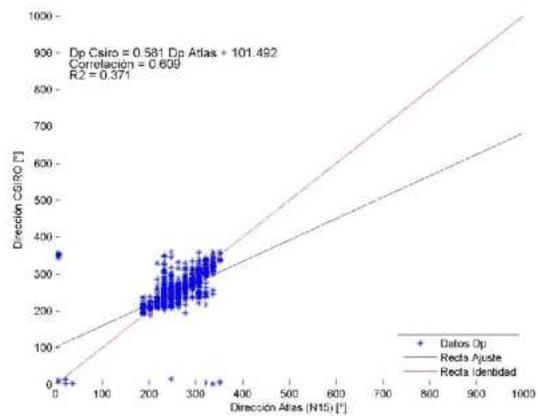
C.



D.



E.



F.

Figura 40. Series temporales (A, C, E) y diagramas de dispersión (B, D, F) de altura significativa del oleaje (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (D_p), realizados a partir de datos del reanálisis CSIRO y datos del AOC para el nodo computacional N15 ($47^\circ\text{S}, 77^\circ\text{W}$). La línea roja representa el ajuste ideal (función identidad) y la línea negra el mejor ajuste. En las series temporales, color azul datos del reanálisis CSIRO y en negro los datos del AOC. Fuente: Autor.

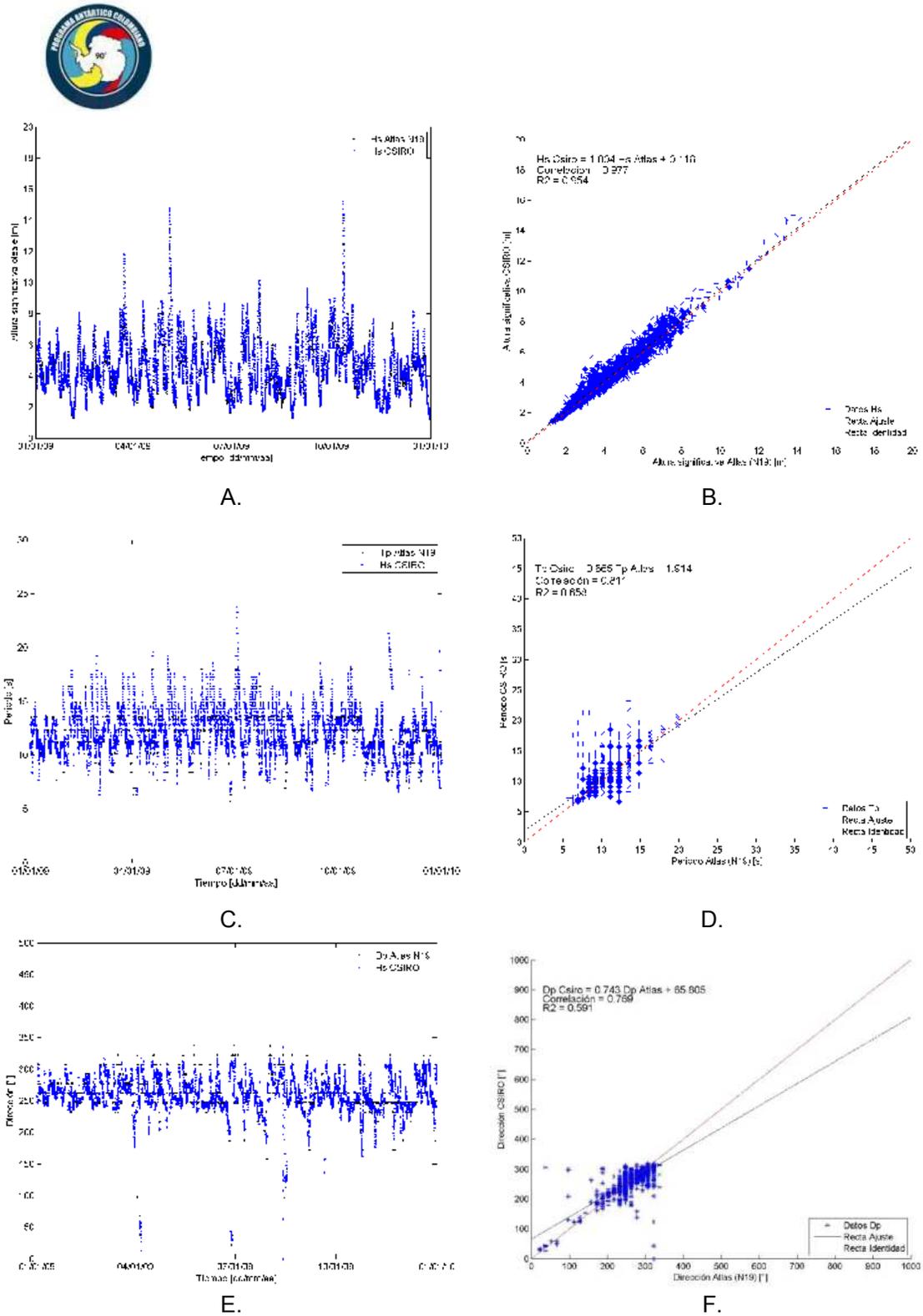


Figura 41. Series temporales (A, C, E) y diagramas de dispersión (B, D, F) de altura significativa del oleaje (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (D_p), realizados a partir de datos del reanálisis CSIRO y datos del AOC para el nodo computacional N19 ($55^\circ S, 73^\circ W$). La línea roja representa el ajuste ideal (función identidad) y la línea negra el mejor ajuste. En las series temporales, color azul datos del reanálisis CSIRO y en negro los datos del AOC. Fuente: Autor.

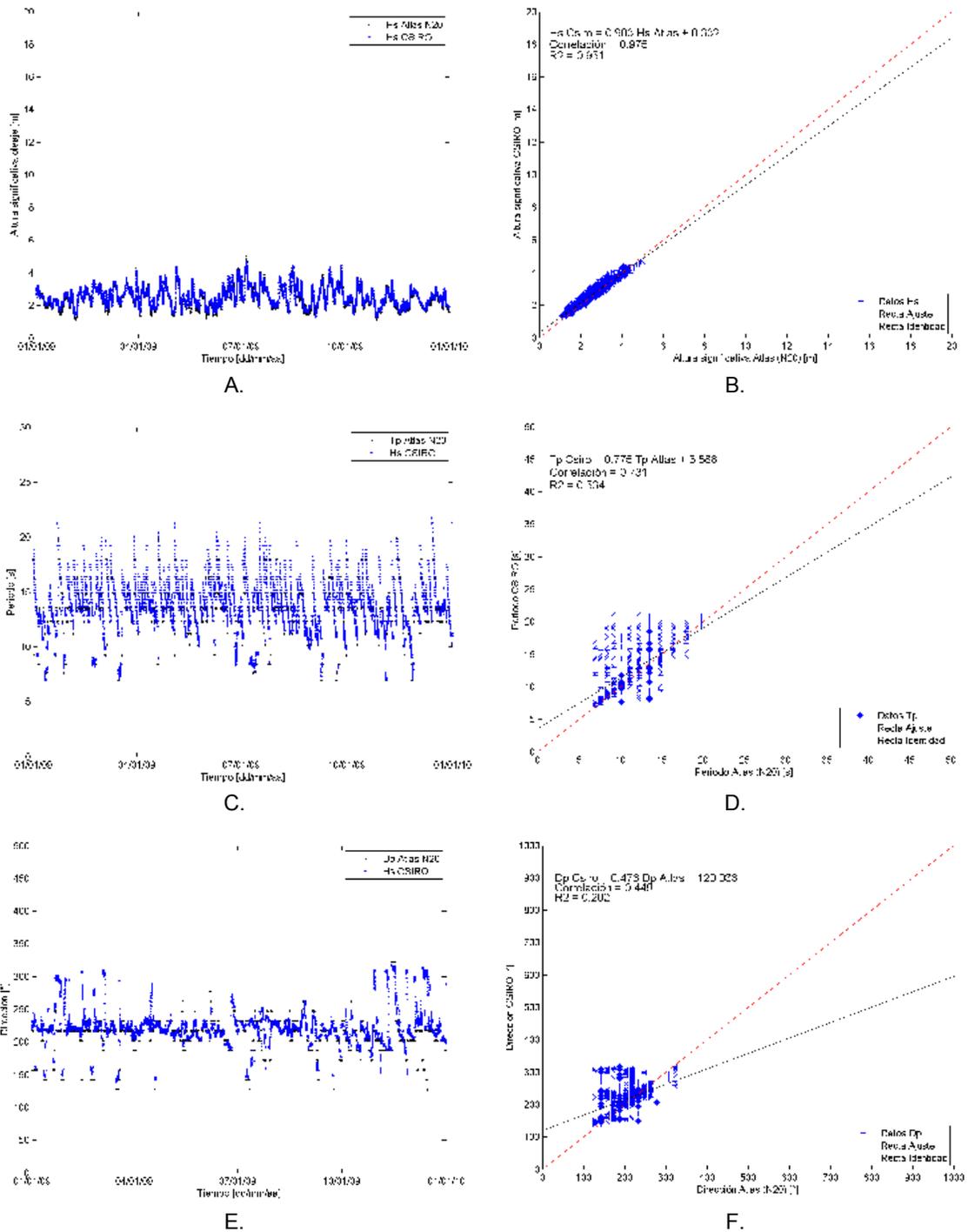


Figura 42. Series temporales (A, C, E) y diagramas de dispersión (B, D, F) de altura significativa del oleaje (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (D_p), realizados a partir de datos del reanálisis CSIRO y datos del AOC para el nodo computacional N20 (27°S, 81°W). La línea roja representa el ajuste ideal (función identidad) y la línea negra el mejor ajuste. En las series temporales, color azul datos del reanálisis CSIRO y en negro los datos del AOC. Fuente: Autor.

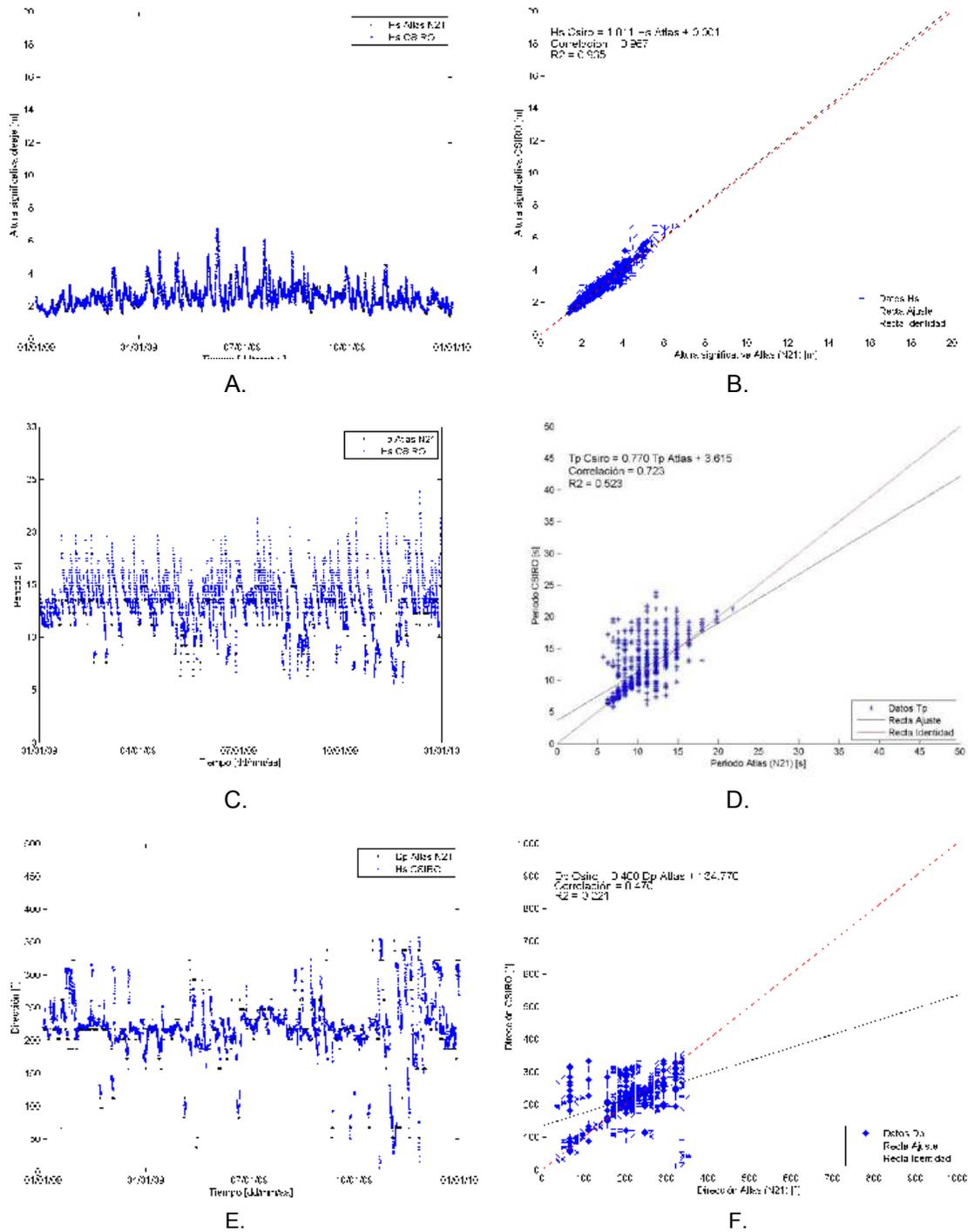
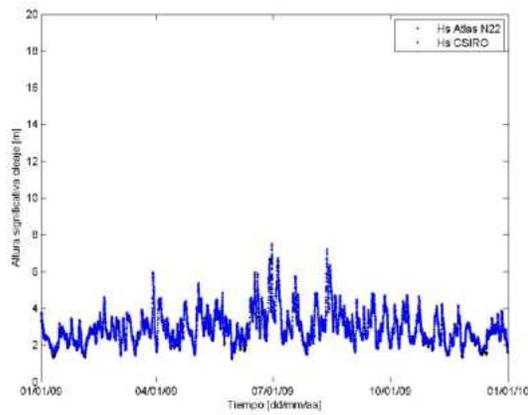
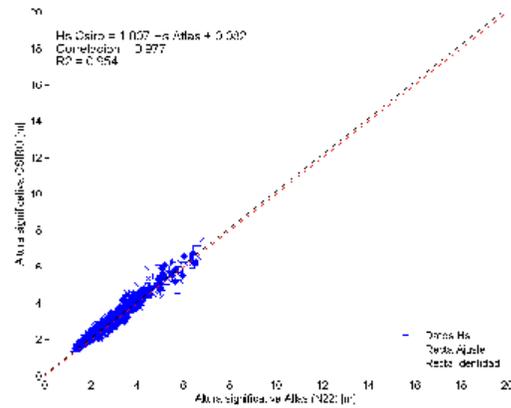


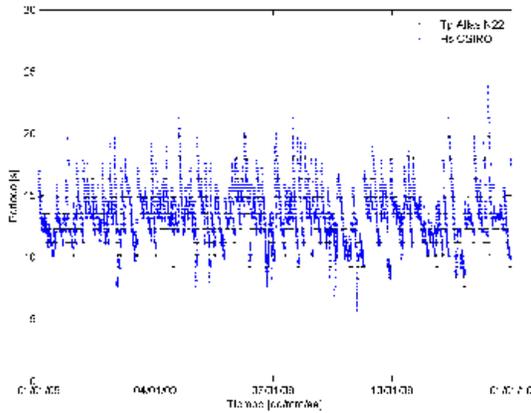
Figura 43. Series temporales (A, C, E) y diagramas de dispersión (B, D, F) de altura significativa del oleaje (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (D_p), realizados a partir de datos del reanálisis CSIRO y datos del AOC para el nodo computacional N21 (28°S, 110°W). La línea roja representa el ajuste ideal (función identidad) y la línea negra el mejor ajuste. En las series temporales, color azul datos del reanálisis CSIRO y en negro los datos del AOC. Fuente: Autor.



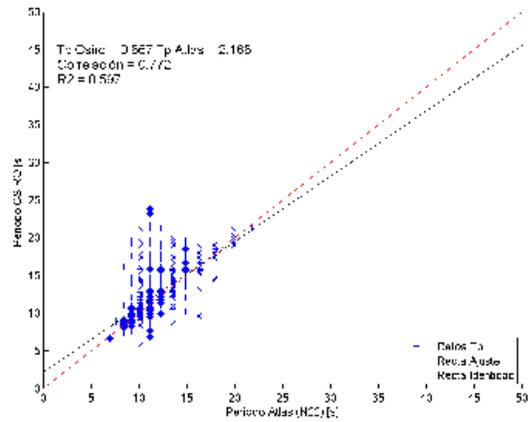
A.



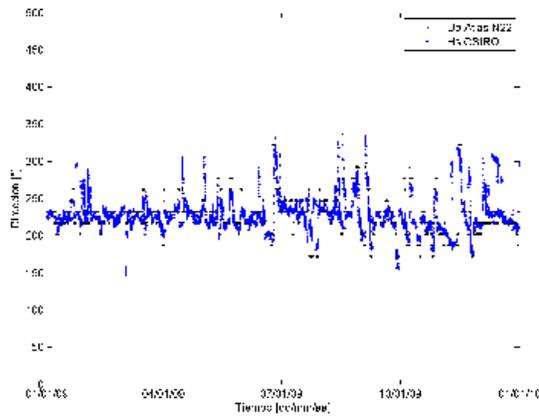
B.



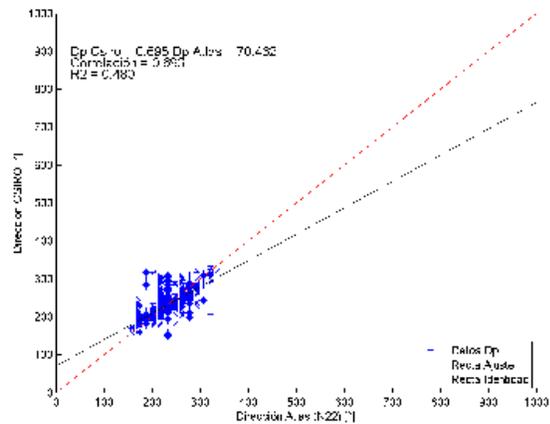
C.



D.



E.



F.

Figura 44. Series temporales (A, C, E) y diagramas de dispersión (B, D, F) de altura significativa del oleaje (H_s), periodo pico (T_p) y dirección pico (D_p), realizados a partir de datos del reanálisis CSIRO y datos del AOC para el nodo computacional N5 ($35^\circ\text{S}, 81^\circ\text{W}$). La línea roja representa el ajuste ideal (función identidad) y la línea negra el mejor ajuste. En las series temporales, color azul datos del reanálisis CSIRO y en negro los datos del AOC. Fuente: Autor.



Apéndice 4. Índices estadísticos de las validaciones de CSIRO para H_s, T_p y D_p del oleaje

| Tipo de dato | Localidad | H _s | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| | | CC | R ² | RMSE | SI | BI | BIASS |
| In situ | B1-Buenaventura | 0.56 | 0.314 | 0.24 | 0.36 | -0.20 | -0.13 |
| Reanálisis | G1-Galápagos | 0.90 | 0.86 | 0.21 | 0.11 | 0.07 | 0.14 |
| | N1- Arica | 0.97 | 0.943 | 0.178 | 0.08 | 0.068 | 0.139 |
| | N5- Bahía Inglesa | 0.95 | 0.917 | 0.36 | 0.14 | 0.125 | 0.32 |
| | N11-P. Saavedra | 0.96 | 0.938 | 0.64 | 0.20 | 0.190 | 0.59 |
| | N15 –Golfo de Penas | 0.96 | 0.934 | 0.52 | 0.13 | 0.097 | 0.38 |
| | N19- Isla London | 0.97 | 0.954 | 0.40 | 0.08 | 0.030 | 0.13 |
| | N20 – Isla Desventura | 0.97 | 0.951 | 0.17 | 0.069 | 0.037 | 0.09 |
| | N21- Isla de Pascua | 0.96 | 0.935 | 0.19 | 0.074 | 0.012 | 0.03 |
| N22- Archipiélago J. Fernández | 0.97 | 0.954 | 0.219 | 0.07 | 0.035 | 0.10 | |

| Tipo de dato | Localidad | T _p | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|----------------|----------------|-------|-------|-------|-------|
| | | CC | R ² | RMSE | SI | BI | BIASS |
| In situ | B1-Buenaventura | 0.26 | 0.0 | 7.8 | 0.6 | 0.50 | 6.42 |
| Reanálisis | G1-Galápagos | 0.54 | 0.0 | 2.54 | 0.173 | 0.09 | 1.452 |
| | N1- Arica | 0.73 | 0.54 | 1.61 | 0.11 | 0.03 | 0.491 |
| | N5- Bahía Inglesa | 0.78 | 0.61 | 1.66 | 0.12 | 0.03 | 0.416 |
| | N11-P. Saavedra | 0.74 | 0.56 | 1.55 | 0.11 | 0.03 | 0.443 |
| | N15 –Golfo de Penas | 0.82 | 0.68 | 1.27 | 0.09 | 0.023 | 0.296 |
| | N19- Isla London | 0.81 | 0.65 | 1.325 | 0.107 | 0.023 | 0.281 |
| | N20 – Isla Desventura | 0.73 | 0.53 | 1.802 | 0.130 | 0.043 | 0.600 |
| | N21- Isla de Pascua | 0.72 | 0.52 | 1.979 | 0.147 | 0.049 | 0.663 |
| N22- Archipiélago J. Fernández | 0.77 | 0.59 | 1.479 | 0.109 | 0.032 | 0.428 | |

| Tipo de dato | Localidad | D _p | | | | | |
|--------------------------------|-----------------------|----------------|----------------|--------|--------|-------|--------|
| | | CC | R ² | RMSE | SI | BI | BIASS |
| In situ | B1-Buenaventura | 0.35 | 0.065 | 30.42 | 0.11 | -0.04 | -12.25 |
| Reanálisis | G1-Galápagos | 0.46 | 0.07 | 43.036 | 0.19 | 0.08 | 19.11 |
| | N1- Arica | 0.247 | 0.06 | 17.891 | 0.019 | 0.082 | 4.092 |
| | N5- Bahía Inglesa | 0.31 | 0.09 | 18.020 | 0.012 | 0.081 | 2.665 |
| | N11-P. Saavedra | 0.607 | 0.36 | 20.645 | -0.002 | 0.089 | -0.493 |
| | N15 –Golfo de Penas | 0.60 | 0.37 | 28.132 | -0.008 | 0.115 | -1.899 |
| | N19- Isla London | 0.769 | 0.59 | 20.347 | -0.004 | 0.079 | -0.924 |
| | N20 – Isla Desventura | 0.449 | 0.20 | 29.848 | 0.041 | 0.135 | 9.132 |
| | N21- Isla de Pascua | 0.47 | 0.22 | 49.149 | 0.035 | 0.224 | 7.671 |
| N22- Archipiélago J. Fernández | 0.69 | 0.48 | 18.51 | 0.081 | 0.00 | 1.39 | |



Apéndice 5. Diagramas Cuantil-Cuantil (Hs)

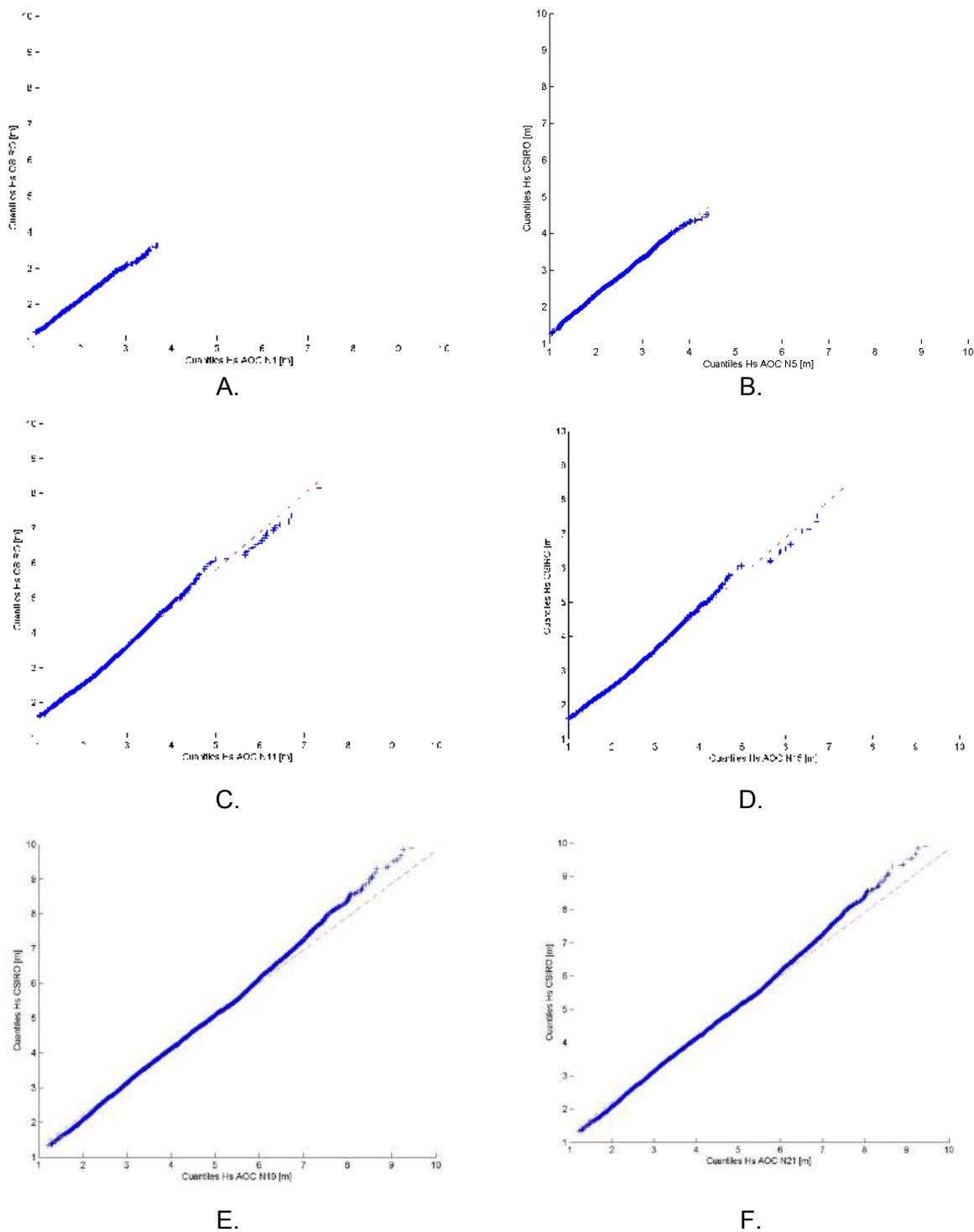


Figura 45. Diagramas cuantil-cuantil de Hs para los datos del Atlas de oleaje de Chile (AOC) y del reanálisis CSIRO. A, B, C, D, E y F, representan respectivamente los nodos computacionales N1, N5, N11, N15, N19, N21 y N22.