



UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS
DE GRAN CANARIA

TESIS DOCTORAL

**Variabilidad de la señal superficial del
Sistema de la Corriente de Bransfield,
Antártica.**

Carolina A. Salinas Núñez

Las Palmas de Gran Canaria

Noviembre 2015





D^a MARÍA ISABEL PADILLA LEÓN, SECRETARIA DE LA FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR, ÓRGANO RESPONSABLE DEL PROGRAMA DE DOCTORADO EN OCEANOGRAFÍA, DE LA UNIVERSIDAD DE LAS PALMAS DE GRAN CANARIA.

CERTIFICA

Que el Consejo de Doctores del Programa de Doctorado en Oceanografía, en su sesión de fecha 16 de noviembre de 2015, tomó el acuerdo de dar el consentimiento para su tramitación, a la tesis doctoral titulada:

"Variabilidad de la señal superficial del Sistema de la Corriente de Bransfield, Antártica"

presentada por la doctoranda: **D^a Carolina Alejandra Salinas Núñez**

dirigida por los Doctores

D. Pablo Sangrá Inciarte

D^a M^a Ángeles Marrero Díaz

Y para que así conste, a efectos de lo previsto en el Artº 6 del Reglamento para la elaboración, tribunal defensa y evaluación de tesis doctorales de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, firmo el presente en Las Palmas de Gran Canaria, a dieciséis de noviembre de dos mil quince.

PÁGINA 1 / 1	ID. DOCUMENTO		
	FIRMADO POR	FECHA FIRMA	ID. FIRMA

Documento firmado digitalmente. Para verificar la validez de la firma copie el ID del documento y acceda a / Digitally signed document.
To verify the validity of the signature copy the document ID and access to
<https://sede.ulpgc.es:8443/VerificadorFirmas/ulpgc/VerificacionAction.action>



PROGRAMA DE DOCTORADO EN OCEANOGRAFÍA
Facultad de Ciencias del Mar
Bienio 2009-2010

Variabilidad de la señal superficial del Sistema de la Corriente de Bransfield, Antártica.

Tesis doctoral presentada por D^a. Carolina Alejandra Salinas Núñez para
obtener el grado de Doctor por la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Dirigida por el Dr. Pablo Sangrà Inciarte y la Dra. M^a de los Ángeles Marrero
Díaz.

El Director

La Directora

La Doctoranda

Las Palmas de Gran Canaria, a de Noviembre de 2015.

Resumen

En este trabajo se presenta de forma pionera en análisis de la variabilidad estacional del Sistema de la Corriente de Bransfield. Las condiciones climáticas extremas de la región hacen que haya prácticamente 6 meses de temperaturas superficiales frías y de alta homogeneidad superficial, sin estructuras térmicas apreciables superficialmente. En cambio en el Verano Austral, se presenta una gran hegemonía térmica y valores que tienen un rango de variación superior a 1.5°C en menos de 2 meses. Toda esta dinámica genera 4 periodos: Invierno Austral (julio-agosto-septiembre-octubre), Primavera Austral (noviembre-diciembre), Verano Austral (enero-febrero-marzo-abril) y Otoño Austral (mayo-junio).

Toda la descripción de la evolución de la temperatura superficial del mar, indica que las Islas Shetland del Sur se ubican en la zona de transición entre las aguas del Mar de Weddell y las aguas del Mar de Bellingshausen y del Paso Drake. Esto, junto con la disposición geográfica, permite la existencia de marcados gradientes térmicos en pocos kilómetros y que se generan en un corto periodo.

Presentación de la tesis.

La presente tesis, titulada “*Variabilidad de la señal superficial del Sistema de la Corriente de Bransfield, Antártica.*”, se ha desarrollado en el contexto del proyecto de investigación COUPLING (CTM2008-06343-CO2-01) financiado por el Estado Español y gracias a la concesión, a favor de la doctoranda, de una beca del programa de Personal de Investigación en Formación de la ULPGC.

Este trabajo ha sido codirigido por el Dr. Pablo Sangrà Inciarte y la Dra. M^a de los Ángeles Marrero Díaz, ambos pertenecientes al Departamento de Física de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Esta tesis comienza con una Introducción, Metodología utilizada, Resultados y Discusiones de cada Capítulo y finaliza con las Conclusiones más relevantes y las Líneas futuras de investigación sobre el área de estudio. Las referencias que aparecen a lo largo del documento figuran al final del documento.

Presentación de la tesis.

La presente tesis, titulada “*Variabilidad de la señal superficial del Sistema de la Corriente de Bransfield, Antártica.*”, se ha desarrollado en el contexto del proyecto de investigación COUPLING (CTM2008-06343-CO2-01) financiado por el Estado Español y gracias a la concesión, a favor de la doctoranda, de una beca perteneciente al programa CONICYT-Becas Chile del Ministerio de Educación del Gobierno de Chile..

Este trabajo ha sido codirigido por el Dr. Pablo Sangrà Inciarte y la Dra. M^a de los Ángeles Marrero Díaz, ambos pertenecientes al Departamento de Física de la Universidad de Las Palmas de Gran Canaria.

Esta tesis comienza con una Introducción, Metodología utilizada, Resultados y Discusiones de cada Capítulo y finaliza con las Conclusiones más relevantes y las Líneas futuras de investigación sobre el área de estudio. Las referencias que aparecen a lo largo del documento figuran al final del documento.

*Chila, Mamucha,
Polo y Tío Luis*

Agradecimientos

Escribir esta sección ha sido el comienzo y fin de todo este trabajo, de toda **esta etapa vivida.**

Esta tesis se ha desarrollado gracias al proyecto de investigación COUPLING (CTM2008-06343-CO2-01) financiado por el Estado Español y al programa CONICYT-Becas Chile perteneciente al Ministerio de Educación del Gobierno de Chile.

En primer lugar, a mis directores: Dr. Pablo Sangrà Inciarte y la Dra. M^a de los Ángeles Marrero Díaz, gracias por ayudarme en todo este proceso. Les agradezco el apoyo, paciencia, tiempo y dedicación en la realización de esta tesis, sus visiones, experiencia y perfil profesional fueron el pilar y las bases de esta tesis, sin ustedes la visión, objetivo y realización hubiese sido totalmente diferente, gracias por enseñarme a trabajar bajo su alero.

Obviamente mi familia es la segunda mención honrosa que dedico este trabajo, **Chilita, Mamucha, tío Luis y Polo**, gracias por el eterno apoyo que siempre me han brindado, el universo me entrego dos madres y dos padres que superan cualquier expectativa o amor que una persona puede recibir, a pesar de la distancia transcurrida y todos los procesos que hemos tenido que vivir durante estos años, sus presencias siempre han estado conmigo y eso solo se llama AMOR. Mi vida hubiera sido muy diferente y mis opciones también si no hubieran estado presentes en cada paso de mi vida, como también si no existieran en mi vida una hermosa **Maritza** y un exasperante **Abel** junto con un **hada madrina** que siempre me han apoyado, ayudado, cobijado y aconsejado durante todo este camino... como no olvidar a **Miguel**, ese fiel amigo que ha estado con nosotros en las buenas, en las malas y en las re malas, sin ustedes mi vida sería MUY diferente y lo mas probable que aburridísima.

Estos años en la isla he creado una familia excepcional, llena de vivencias que han ayudado a mantenerme tan a gusto aquí, a todas esas personas que han sido partícipes de mi experiencia, GRACIAS, y si no los nombro no es porque no los recuerde, es solamente que mi “cerebelo volátil” tan famoso ha hecho mella al escribir estos agradecimientos y lo más probable es que una vez impreso este trabajo recuerde muchos nombre más.

Ángeles, más que una profesora has sido la verdadera representación de la Pacha Mama durante todo este proceso, gracias por tu comprensión, paciencia, alegría y apoyo, gracias por dejar que los procesos personales que han interferido en este camino los haya podido solucionar a mis tiempos, a pesar de que la ciencia no espera, me has ayudado a levantarme y a seguir a pesar de que todo lo veía en contra. Ser maestro es más que enseñar cátedra, es enseñar y demostrar vida y tú me lo has enseñado con creces.

Pablo, gracias por tu paciencia, tu visión, tu forma de hacer ver mis falencias como profesional y como persona, trabajar contigo me ha demostrado de lo que soy capaz, mantener humildad y agradecer que existan personas que me guíen como tu lo hiciste.

Ali, Fabio, Fede, Dani, Shei, Mire mis “HERMANOS” en las buenas y en las malas, compartir con ustedes me ha dado mucha fuerza, su cariño, comprensión han sido unos pilares y sé que el tiempo sabrá mantener.

Carmen, mi gaditana, gracias por ser mi juez, mi amiga, mi consejera y mi oreja, siempre fuiste y serás una de las pocas personas que vio más allá de mi exterior y a pesar de que la vida nos ha puesto trabas siempre te recordaré y agradeceré todo.

Mis amigos perrunos (**Carlos, Mica, Arturo**) gracias por alegrarme, apoyarme y siempre los mejores recuerdo de la isla serán gracias a ustedes, especialmente a ti Arturo, tu apoyo en esta última etapa ha sido primordial, gracias por cuidar a Poh.

Agradecimientos

Escribir esta sección ha sido el comienzo y fin de todo este trabajo, de toda **esta etapa vivida.**

Esta tesis se ha desarrollado gracias al proyecto de investigación COUPLING (CTM2008-06343-CO2-01) financiado por el Estado Español.

En primer lugar, a mis directores: Dr. Pablo Sangrà Inciarte y la Dra. M^a de los Ángeles Marrero Díaz, gracias por ayudarme en todo este proceso. Les agradezco el apoyo, paciencia, tiempo y dedicación en la realización de esta tesis, sus visiones, experiencia y perfil profesional fueron el pilar y las bases de esta tesis, sin ustedes la visión, objetivo y realización hubiese sido totalmente diferente, gracias por enseñarme a trabajar bajo su alero.

Obviamente mi familia es la segunda mención honrosa que dedico este trabajo, **Chilita, Mamucha, tío Luis y Polo**, gracias por el eterno apoyo que siempre me han brindado, el universo me entrego dos madres y dos padres que superan cualquier expectativa o amor que una persona puede recibir, a pesar de la distancia transcurrida y todos los procesos que hemos tenido que vivir durante estos años, sus presencias siempre han estado conmigo y eso solo se llama AMOR. Mi vida hubiera sido muy diferente y mis opciones también si no hubieran estado presentes en cada paso de mi vida, como también si no existieran en mi vida una hermosa **Maritza** y un exasperante **Abel** junto con un **hada madrina** que siempre me han apoyado, ayudado, cobijado y aconsejado durante todo este camino... como no olvidar a **Miguel**, ese fiel amigo que ha estado con nosotros en las buenas, en las malas y en las re malas, sin ustedes mi vida sería MUY diferente y lo mas probable que aburridísima.

Estos años en la isla he creado una familia excepcional, llena de vivencias que han ayudado a mantenerme tan a gusto aquí, a todas esas personas que han sido partícipes de mi experiencia, GRACIAS, y si no los nombro no

es porque no los recuerde, es solamente que mi “cerebelo volátil” tan famoso ha hecho mella al escribir estos agradecimientos y lo más probable es que una vez impreso este trabajo recuerde muchos nombre más.

Ángeles, más que una profesora has sido la verdadera representación de la Pacha Mama durante todo este proceso, gracias por tu comprensión, paciencia, alegría y apoyo, gracias por dejar que los procesos personales que han interferido en este camino los haya podido solucionar a mis tiempos, a pesar de que la ciencia no espera, me has ayudado a levantarme y a seguir a pesar de que todo lo veía en contra. Ser maestro es más que enseñar cátedra, es enseñar y demostrar vida y tú me lo has enseñado con creces.

Pablo, gracias por tu paciencia, tu visión, tu forma de hacer ver mis falencias como profesional y como persona, trabajar contigo me ha demostrado de lo que soy capaz, mantener humildad y agradecer que existan personas que me guíen como tu lo hiciste.

Ali, Fabio, Fede, Dani, Shei, Mire mis “HERMANOS” en las buenas y en las malas, compartir con ustedes me ha dado mucha fuerza, su cariño, comprensión han sido unos pilares y sé que el tiempo sabrá mantener.

Carmen, mi gaditana, gracias por ser mi juez, mi amiga, mi consejera y mi oreja, siempre fuiste y serás una de las pocas personas que vio más allá de mi exterior y a pesar de que la vida nos ha puesto trabas siempre te recordaré y agradeceré todo.

Mis amigos perrunos (**Carlos, Mica, Arturo**) gracias por alegrarme, apoyarme y siempre los mejores recuerdo de la isla serán gracias a ustedes, especialmente a ti Arturo, tu apoyo en esta última etapa ha sido primordial, gracias por cuidar a Poh.

Olga y Guadalupe, mis mamuchas canarias, gracias por adoptarme y apoyarme en todo sentido, gracias por quererme como lo han hecho, gracias por no hacerme sentir guachita en estas tierras.

Fuimos 3, 5 y después 7 y así seguiremos aumentando como el infinito Pi, gracias por aceptarme, quererme y formarme, el universo es mucho más que materia, también es energía, alma y corazón y ustedes me han ayudado a encontrar mi corazón y a darle estabilidad a mi alma.

Ni un océano podrá separarnos y eso con los años se ha demostrado, **Caro, Hani, Claudia, Pedrote, Pelao, Nacho, Paty, Sus** gracias por ser mis amigos, gracias por alegrarme desde esas latitudes cuando mi alma extrañaba esa tierra que amarra como el hambre, gracias por sus bromas, tonteras y alegrías, gracias por siempre estar conmigo.

A ti **Claudio**, no hay ni tiempo ni espacio ni filósofo que entienda esto, pero gracias por empujarme a volar, gracias por aconsejarme en los momentos más difíciles, gracias por leer más allá de lo que mi persona podía expresar, gracias por venir, gracias por estar, gracias por ser.

Graçia y Paola, gracias por ser unas hermanas mayores, por abrirme sus casas y sus familias cuando necesité arrancar y cobijarme en un espacio donde sólo éramos nosotras.

Sheila, oh mi negra!, creo que esta experiencia vivida en paralelo nos ha unido mas y mas, aún recordaré el día que nos acercamos, el día que hablamos y el día que nos cone"X"tamos, "pocas pero buenas" y tú estás entre esas.

"**Lab F-212 4ever**", chiquillos!! que sería de mi si no hubieran estado ustedes aquí conmigo, a pesar de que la vida fue separando nuestros caminos la amistad sigue y sigue llena de risa, encanto y cariño y eso es lo que más me gusta de aquí "La Pecera!".

La vida siempre te pone angelitos en las diferentes etapas en las que uno vive, y por lo visto al final, cuando uno esta más sensible, intolerante, enojona aparecen personas que te despejan de la nube tóxica que uno arrastra, gracias **Raúl, Paula y Esther** por hacerme reír, enojar, reír, discutir, reír y alejarme de mis preocupaciones, gracias por ser mis amigos sobre toda las cosas.

Tania y Blondie, conocerlas en este periodo de mi vida y que a pesar de todo aún me quieran, ha sido lo mejor del año, esta cercanía y conexión se agradece un montón!! Nunca pensé en que existieran mujeres como ustedes y ahora no me imagino mi vida sin nuestras conversaciones e historia.

Obviamente tengo que agradecer por ser la mas fiel, cercana, guerrillera y que me ame con locura, a mi súper **POH**, gracias por ser la mejor compañera de vida, viaje, aventuras, mi vida sin ti no tendría lógica ni coherencia.

Y no porque seas de los últimos eres el menos importante, gracias a ti **papá** donde quiera que tu alma esté, siempre he sabido que aquí estás conmigo, me acompañas y ayudas, pero principalmente te agradezco por los hermanos que me dejaste (**Ignacio, Sebastián e Ítalo**), esos locos hombres que a pesar de conocernos tan grandes la conexión es hermosa, sincera y feliz, creo que somos lo mejor de tu reflejo y tu legado.

En la vida hay docentes que te dejan huellas en tu formación y que te acompañan siempre, no sólo en lo académicamente hablando, si no que también en la forma de ver la vida, en la forma de enseñar, en la forma de vivir, esas son personas que te marcan en la vida y que siempre recuerdas, especialmente en estas ocasiones, con admiración, respeto, cariño y son un ejemplo a seguir. **Juanita Osorio, Carlos Núñez, Jaime Letelier, Cristian Rodrigo, Profe Helmuth Sievers, Profe Emilio Quiroga**, gracias por ver “eso”, gracias por apoyarme cuando no sabía como maniobrar este barco, gracias por enseñarme a volar, mirar que hay más y seguir este camino, todas sus conversaciones, historias, consejos y ánimos los guardo dentro.

A **Inmaculada Martín Yáñez**, Gestora de Recursos Humanos de Investigación de la Subdirección de Gestión de Recursos y Ayudas a la Investigación del Servicio de Investigación y Tercer Ciclo de la ULPGC. Inmaculada ojala hubieran más personas con tu compromiso, empatía y capacidades profesionales, siempre recordaré y agradeceré tus gestiones, apoyo y ayuda. Sin tus tramites iniciales y cuando después, ocupaste de tu tiempo personal para gestionar mi situación laboral, a pesar de que no te correspondía hacerlo, tu seguiste y esta tesis esta terminando en parte gracias a ti, a tu pasión por tu labor, al reflejo de la excelente mujer que eres. En mis utópicos sueños la meritocracia existe y van acompañados de justicia, humanidad, empatía y profesionalidad.

XX Universal, sin tus desvaríos y tus rutas jamás hubiera vivido tantas aventuras, tantas historias, tantas experiencias, gracias por hacerme mirar atrás y ver que no me arrepiento, que todo fue lo mejor.

Y a todas esas personas que me hicieron sufrir o alegrar en este camino, el aporte de cada uno formó las bases de mi persona y me dieron las fuerzas necesarias para continuar.

GRACIAS TOTALES!!!!

Índice

Capítulo 1. Introducción.....	1
1.1.- Región de estudio	2
1.2.- Monitorización de la dinámica superficial con datos satelitales de SST.....	8
1.3.- Motivación de este estudio	12
1.4.- Objetivos.....	14
1.5.- Estructura de la tesis.	15
Capítulo 2. Datos.....	17
2.1.- Datos hidrográficos	18
2.1.1.- Campañas oceanográficas.....	18
2.1.2.- Procesamiento de datos hidrográficos	20
2.1.3.- Finalidad de los datos hidrográficos	25
2.2.- Índice Multivariado ENSO (MEI).....	26
2.3.- Imágenes SST	27
2.3.1.- Productos SST utilizados	27
2.3.2.- Tratamiento realizado a las imágenes de SST.....	29
2.3.3.- Finalidad de los datos SST.....	34

Capítulo 3. Distribución de la temperatura superficial del mar alrededor de las SSI.....	37
3.1.- Distribución anual promedio.	38
3.2.- Distribución mensual promedio.....	40
3.3.- Periodos climáticos y distribución estacional media.	45
3.4.- Variabilidad espacio-temporal durante los periodos de transición.....	50
3.5.- Variabilidad espacio-temporal durante el Verano Austral.....	54
3.6.- Rasgos más notables de la distribución de SST alrededor de las SSI.....	58
Capítulo 4: Dinámica alrededor de SSI durante el Verano Austral.....	61
4.1.- Masas de agua.	65
4.2.- Circulación alrededor de SSI a partir de datos hidrográficos.....	67
4.2.1.- Circulación en el Estrecho de Bransfield.....	68
4.2.2.- Recirculación de la Corriente de Bransfield	70
4.3.- Circulación alrededor de las SSI a partir de boyas lagrangianas	75
4.4.- Identificación y evolución de las zonas frontales alrededor de las SSI	78
4.4.1.- Distribución de SST durante COUPLING.....	81
4.4.2.- Estructuras frontales alrededor de SSI durante 2010	84
4.5.- Características más notables de la Dinámica alrededor de SSI durante el verano austral estudio	88
Capítulo 5: Variabilidad de las estructuras frontales en SSI. Influencia del ENSO.....	93
5.1.- Metodología para el análisis de la variabilidad espacio-temporal alrededor de las SSI	95
5.2.- Variabilidad y gradientes SST alrededor de las SSI en un año promedio.....	97
5.3.- Establecimiento y desaparición del SF y PF.....	102
5.4.- Variabilidad de los zonas frontales entre 2003 y 2013	104
5.5.- Influencia del ENSO.....	108
5.5.1.- Influencia en la temperatura superficial del mar y en su gradiente.....	111

5.5.2.- Periodos de variabilidad dominante en la distribución SST entre 2003 y 2013.....	115
5.6.- Principales características de la variabilidad de las estructuras frontales en SSI y de la influencia del ENSO	116
Capítulo 6: Conclusiones, líneas futuras y difusión de resultados.....	119
6.1.- Conclusiones	119
6.2.- Líneas futuras	123
6.3.- Difusión de resultados	124
Bibliografía.....	127

Índice de figuras

Capítulo 1. Introducción

Figura 1.1: Mapa de la región de estudio.....	2
Figura 1.2: Distribución frentes hidrográficos pertenecientes al Sistema de la Corriente Circumpolar Antártica.....	3
Figura 1.3: Esquema de circulación del océano Austral	4
Figura 1.4: Esquema del Sistema de la Corriente del Bransfield.....	8
Figura 1.5: Diagrama esquemático de un perfil vertical de temperatura en los primero 10m de profundidad.	10

Capítulo 2. Datos

Figura 2.1: Distribución de las estaciones de la campaña CIEMAR, campaña BREDDIES y campaña COUPLING	18
Figura 2.2: lanzamiento de boya lagrangiana durante la campaña COUPLING	20
Figura 2.3: Roseta con CTD y portasal Guidline 8400.....	21
Figura 2.4: Curva de calibración para la salinidad del CTD durante la campaña COUPLING	22
Figura 2.5: Posición de lanzamiento y trayectorias de las boyas lanzadas en las campañas BREDDIES (línea roja) y COUPLING	24
Figura 2.6: Índice multivariado del ENSO a partir de enero 2003 a diciembre del 2013	26
Figura 2.7: Observaciones satelitales correspondientes al 15 de abril del 2006 en el área de estudio	27

Capítulo 3. Distribución de la temperatura superficial del mar alrededor de las SSI

Figura 3.1: Distribución media de SST para un año promedio	38
Figura 3.2: Distribución de la SST media para los meses de julio, agosto, septiembre y octubre entre los años 2006 y 2011.	40
Figura 3.3: Distribución de la SST media en los meses de noviembre y diciembre entre los años 2006 y 2011.	41
Figura 3.4: Distribución de la SST media para los meses de enero, febrero, marzo y abril entre 2006 y 2011.	42
Figura 3.5: Distribución de la SST media en los meses de mayo y junio entre 2006 y 2011.	44
Figura 3.6: Distribución media SST de invierno, primavera, verano y otoño entre los años 2006 y 2011.	46
Figura 3.7: Distribución media del módulo del gradiente SST durante el invierno, primavera, verano y otoño entre los años 2006 y 2011.	47
Figura 3.8: SST semanal media en los meses de diciembre y enero entre los años 2006 y 2011	52
Figura 3.9: SST semanal media de los meses medios de abril y mayo entre los años 2006 y 2011	53
Figura 3.10: SST semanal media de la segunda semanas de enero, febrero, marzo y abril año promedio total entre 2006 y 2011.	55
Figura 3.11: SST diaria media en la segunda semana de los meses de febrero y marzo entre 2006 y 2011.	56
Figura 3.12: Distribución media de SST anual, mes de febrero, durante la segunda semana del mes entre los años 2006 y 2011.	57

Capítulo 4: Dinámica alrededor de SSI durante el verano austral

Figura 4.1: Mapa estaciones CTD de la campaña COUPLING	64
Figura 4.2: Diagrama θ -S del transecto central de la campaña COUPLING	66
Figura 4.3: Distribución vertical de θ ($^{\circ}\text{C}$), S y anomalía de densidad potencial ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) en todo el transecto central de la campaña COUPLING	69
Figura 4.4: Sección vertical de salinidad, de los primeros 300m de la columna de agua, en los distintos transectos en la zona norte de las SSI realizados durante la Campaña COUPLING.	73
Figura 4.5: Transporte geostrófico en Sv, relativo a 500 dbar, obtenido durante la campaña COUPLING... ..	74
Figura 4.6: Trayectoria de derivadores lanzados durante la campaña BREDDIES y COUPLING.....	77
Figura 4.7: Diagramas θ -S en las campañas CIEMAR y BREDDIES.....	80
Figura 4.8: SST semanal media y módulo de gradiente de SST para las semanas 2, 3 y 4 de enero del año 2010 y la distribución promedio de ambas magnitudes durante dicho periodo.....	83
Figura 4.9: SST semanal media y módulo del gradiente de SST para las semana 4 de diciembre del año 2009 y la semana 1 de enero del año 2010	85
Figura 4.10: SST y módulo del gradiente de SST semanales medios para las semanas 3 y 4 de febrero 2010.	86
Figura 4.11: SST y módulo de gradiente de SST semanales medios para la semanas 1 y 2 de mayo del año 2010.....	88
Figura 4.12: Esquema de circulación del Sistema de la Corriente de Bransfield.....	91

Capítulo 5: Variabilidad de las estructuras frontales en SSI. Influencia del ENSO

Figura 5.1: Localización de los transectos y puntos tomados para el análisis de variabilidad.....	96
Figura 5.2: Diagramas de Hovmöller del patrón diario medio de la SST y del gradiente de la SST a lo largo del transecto TC.	99
Figura 5.3: Diagramas de Hovmöller del patrón diario medio de la SST y del gradiente de la SST a lo largo del transecto TE	101
Figura 5.4: Serie temporal del patrón medio diario durante un año promedio del periodo de estudio	103
Figura 5.5: Serie temporal de la SST para Frente de las Shetland y Frente Peninsular entre el 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013..	106
Figura 5.6: Series de tiempo para el gradiente quincenal de SST de las señales Frente de las Shetland y Frente Peninsular entre el 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013.....	107
Figura 5.7: Región este-central ecuatorial del océano Pacífico.....	109
Figura 5.8: Índice Oceánico Niño.....	110
Figura 5.9: Anomalías de SST del Frente de las Shetland, Frente Peninsular e Índice MEI entre el 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013	112
Figura 5.10: Diagrama Hovmöller del SST diario del transecto TC; Diagrama Hovmöller del gradiente diario del transecto TC; posición en distancia del valor máximo de gradiente de SST al norte de las SSI para el periodo 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013	114
Figura 5.11: Serie de tiempo quincenal de la SST para la señal de SF; espectro de potencia Wavelet y espectro global de ondas para el espectro de potencia Wavelet. En el periodo del 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013.....	115

Índice de tablas

Capítulo 1. Introducción.

Tabla 1.1: Información satélites utilizados en el Microwave Plus Infrared (MWIR) OI product	12
--	----

Capítulo 2. Datos.

Tabla 2.1: Salinidad corregida (PSU) de las muestras en estación.....	23
Tabla 2.2: Valores específicos que no corresponde a valores de SST	29

Lista de Abreviaturas

Se han mantenido las nomenclaturas anglosajonas

AAIW	Agua Antártica Intermedia
ACC	Corriente Circumpolar Antártica
ACS	Sistema Circumpolar Antártico
AE	Sistema de remolinos anticiclónicos
AP	Península Antártica
APF	Frente Polar Antártico
ASF	Frente de Talud Antártico
ASSW	Agua subsuperficial Antártica
ASW	Agua Superficial Antártica
BC	Corriente de Bransfield
BCr	recirculación Corriente de Bransfield
BCS	Sistema de la Corriente de Bransfield
BdyACC	Límite sur de la ACC
BF	Frente de Bransfield
BIOMASS	Investigaciones biológicas de los sistemas antárticos marinos y sus stocks
BREDDIES	Remolinos/meandros de mesoescala en la parte central del Estrecho de Bransfield: Identificación y acoplamiento físico-biológico
CB	Cuenca Central
CDW	Agua Profunda Circumpolar
CDWm	Agua Profunda Circumpolar modificada
CIEMAR	Campaña de Investigación del Ecosistema Antártico
COUPLING	Acoplamiento mesoescalar físico-biológico alrededor de las Islas Shetland del Sur (Antártica)
CTD	Conductividad, temperatura y profundidad

CWB	Límite Aguas Continentales
DP	Paso Drake
EB	Cuenca Este
ENSO	Oscilación Sur El Niño
FIDEX	primer experimento BIOMASS internacional
MEI	Índice Multivariado El Niño
ISOS	Estudios Internacionales del Océano Austral
PF	Frente Peninsular
SACCF	Frente Austral de la Corriente Circumpolar Antártica
SAF	Frente Sub-Antártico
SAMW	Agua Modal Subantártica
SIBEX	segundo experimento BIOMASS internacional
SSI	Islas Shetland del Sur
SST	Temperatura Superficial del Mar
TBW	Agua de Transición Zonal con Influencia de Bellingshausen
TWW	Agua de Transición Zonal con Influencia de Weddell
UCDW	Agua Profunda Circumpolar superior
LCDW	Agua Profunda Circumpolar inferior
WB	Cuenca Oeste
WW	Agua Invernal

Capítulo 1

Introducción

El área que rodea el archipiélago de las Islas Shetland del Sur, en la Antártica, se considera como una región altamente productiva para todos los niveles tróficos, desde producción primaria y agregaciones de zooplancton, hasta aves y mamíferos. Tanto el sistema de corrientes como las estructuras físicas que en ella se forman ejercen un importante papel en la determinación del transporte y retención de la biota de este sistema (García *et al.*, 1994; Zhou *et al.*, 2006; Morozov, 2007). Como en otras regiones, existe un acoplamiento entre el sistema marino y el régimen físico, particularmente entre los procesos de mesoesca/submesoesca y la dinámica de la comunidad planctónica (Holm-Hansen y Mitchel, 1991; Abbot *et al.*, 2000; Wright y Vaden-Enden, 2000; Holm-Hansen *et al.*, 2004). Sin embargo, su ubicación en la región Antártica hace que la mayor parte de las campañas oceanográficas y, por tanto, los estudios dinámicos en la zona hayan sido realizados en el verano austral. En este trabajo se pretende caracterizar la dinámica superficial alrededor de las Islas Shetland del Sur y su variabilidad espacio-temporal, a partir de la temperatura superficial del mar, obtenida tras la combinación de la señal de varios sensores satelitales.

A pesar de que en esta tesis se utilizará, en general, la terminología en español para ser coherente con el resto del texto, se emplearán las siglas en inglés de aquellos términos que son ampliamente utilizados en la comunidad científica.

1.1.- Región de estudio

Las Islas Shetland del Sur (SSI) se ubican entre el Paso Drake y el Estrecho de Bransfield, representando el límite físico entre la dinámica de ambos sectores (Figura 1.1).

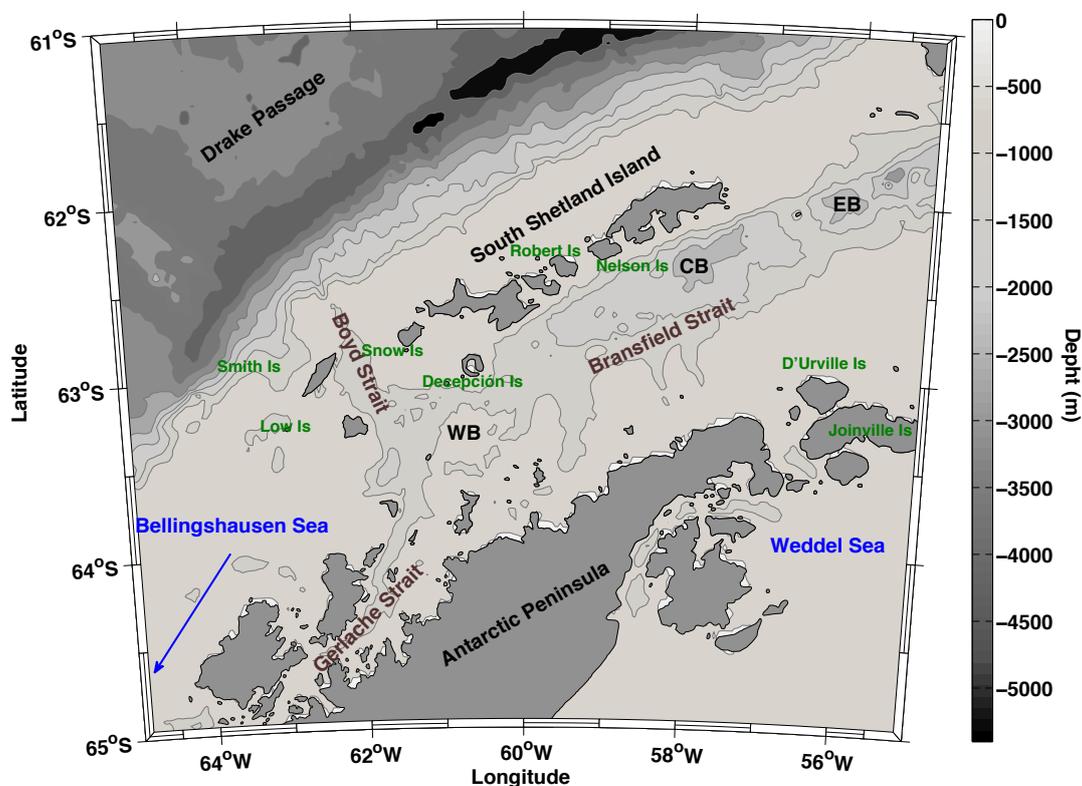


Figura 1.1: Mapa de la región de estudio. Se muestran las isóbatas cada 500m (Smith y Sandwell, 1997). Aparecen señaladas ubicaciones que serán mencionadas frecuentemente en este trabajo, como son: Paso Drake, Estrecho de Bransfield, Península Antártica, Estrecho de Gerlache, Estrecho de Boyd, archipiélago de las Islas Shetland del Sur, Mar de Bellingshausen, Mar de Weddell y el nombre (en verde) de algunas de las islas más relevantes para este trabajo. Además se señalan las cuencas Oeste (WB), Central (CB) y Este (EB) del Estrecho de Bransfield.

El Paso Drake está situado entre el extremo sur del continente Americano y la Península Antártica (AP), es la porción más estrecha del Océano Austral (800km), dentro del cual, el sistema de circulación predominante es el Sistema de Circulación Antártico (ACS). Este sistema está formado por la Corriente Circumpolar Antártica (ACC), corriente oceánica que fluye en dirección este circunnavegando el continente Antártico, siendo la vía principal de conexión entre el Océano Pacífico, Océano Atlántico y Océano Índico.

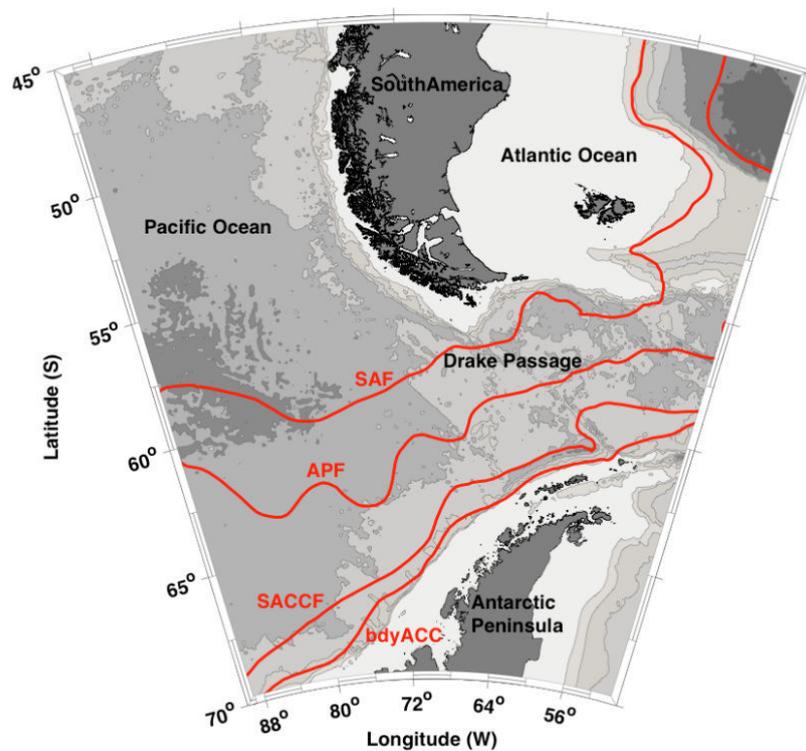


Figura 1.2: Distribución frentes hidrográficos pertenecientes al Sistema de la Corriente Circumpolar Antártica: Frente Sub-Antártico (SAF), Frente Polar Antártico (APF), Frente Austral de la Corriente Circumpolar Antártica (SACCF) y Frontera Austral de la Corriente Circumpolar Antártica (bdyACC) (Orsi *et al.*, 1995).

Esta corriente se compone de varios frentes hidrográficos (Figura 1.2): el Frente Sub-Antártico (SAF), límite norte de la ACC; el Frente Polar Antártico (APF), frente transicional hacia aguas más frías y el Frente Sur de la Corriente Circumpolar Antártica (SACCF), que se considera el límite sur de las aguas

profundas. Por otra parte, Orsi *et al.* (1995) y García *et al.* (2002) suman a estos frentes el límite sur de la ACC (BdyACC), al que se considera la extensión más al sur del flujo del ACS (Charrasin *et al.*, 2008). En el Paso Drake, donde los diferentes frentes y límites están muy próximos entre sí, García *et al.* (2002) encontraron una intensa corriente en la posición en la que coinciden la BdyACC y con el Límite de las Aguas Continentales (CWB) definido por Tomczak y Godfrey (2013). De manera que la BdyACC, muy próximo al talud norte de las SSI, representa al mismo tiempo, en la región de estudio, la extensión más al sur de ACS y la extensión más al norte de las aguas continentales antárticas.

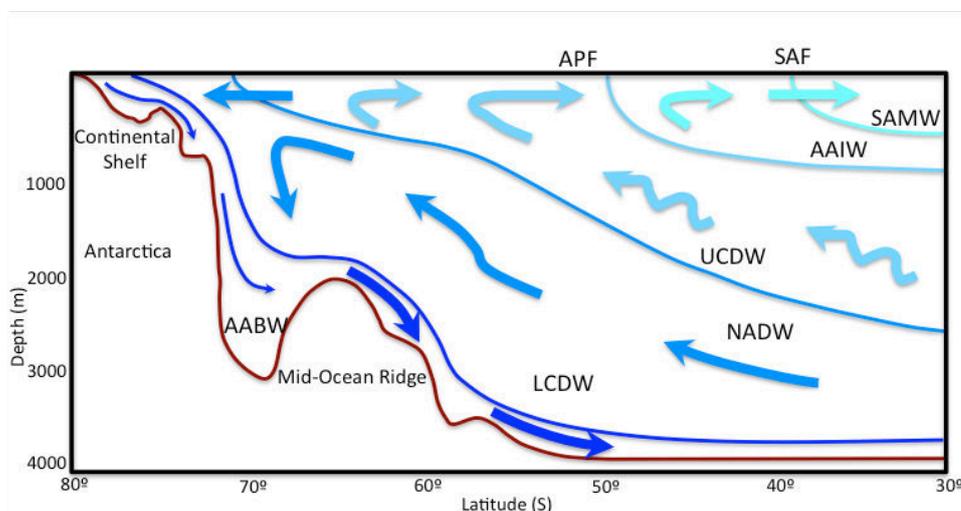


Figura 1.3: Esquema de circulación del océano Austral: Agua Sub-superficial Antártica (ASSW), Agua Antártica Intermedia (AIW), Agua Superficial Antártica (ASW), Agua Profunda Circumpolar superior (UCDW) e inferior (LCDW) (modificado de Speer *et al.*, 2000).

Las masas de aguas asociadas a la ACC son (Figura 1.3): el Agua Sub-superficial Antártica (ASSW), fina capa de agua superficial (150m); y el Agua Antártica Intermedia (AIW), que se ubica al norte del APF a profundidades intermedias, ambas situadas al norte del APF; el Agua Superficial Antártica (ASW), agua que se ubica al sur del APF, de unos 250 m de espesor y que se caracteriza por su temperatura relativamente baja; Agua Invernal (WW), agua con temperatura inferior a 0°C y el Agua Profunda Circumpolar (CDW), compuesta de dos capas, una superior (UCDW) y una inferior (LCDW) (Siervers, 1982).

La batimetría alrededor de las SSI (Figuras 1.1 y 1.2) es mucho más somera que la del Paso Drake, lo que puede hacer disminuir la influencia de la intensa dinámica presente en dicho paso en la región de estudio. De hecho, el norte de SSI se caracteriza por una amplia plataforma y un talud muy suave hasta los 500m. A partir de esta profundidad cambia abruptamente hasta alcanzar las profundidades típicas del Paso Drake. El Estrecho de Boyd, al oeste de SSI, y el Estrecho de Gerlache, en el suroeste de SSI, presentan pasos más profundos, por los que podrían llegar masas de agua más profundas procedentes de zonas próximas a la región. En el margen oriental de SSI hay un amplio y somero paso, entre la isla Livingston e isla Elefante, por el que se pueden comunicar el norte y el sur de SSI. En el margen sur de SSI, al contrario de lo que ocurre al norte, apenas hay plataforma y el talud es abrupto.

El talud sur de SSI representa el límite norte del Estrecho de Bransfield, este estrecho es un mar semi-cerrado que comprende un área de 50000km², con características dinámicas particulares respecto a los mares adyacentes como resultado de su aislamiento geográfico (Figura 1.1). En su extremo sur limita con la Península Antártica y a lo largo del Estrecho de Bransfield se distinguen tres cuencas: la Cuenca Oeste (WB); la Cuenca Central, (CB); y la Cuenca Este, (EB), con profundidades de 1200m, 1950m y 2500m respectivamente. Estas tres cuencas están comunicadas entre sí por umbrales inferiores a 1000m, mientras que con los mares adyacentes tiene pasos de conexión someros entre numerosas islas y algunos estrechos. De este modo, el Estrecho de Bransfield se comunica en su porción oeste con el Mar de Bellingshausen a través de los Estrechos de Gerlache y de Boyd, mientras que la Cuenca Central se comunica con el mar de Weddell a través del Canal Antártico, que se localiza entre la parte noroeste de la plataforma continental de la Península Antártica y las islas d'Urville y Joinville (Gracia *et al.*, 1997, Masqué *et al.*, 2002).

En la historia de los estudios del Estrecho de Bransfield fue pionero el trabajo realizado por Clowes (1934), en el que concluye que las aguas superficiales relativamente cálidas y menos salinas, así como los máximos

subsuperficiales de temperatura y salinidad, encontrados durante el verano austral en el extremo oeste y norte del Estrecho, provienen de aguas del mar de Bellingshausen, entrando por advección al estrecho. La parte sureste del Estrecho de Bransfield estaría influenciada por las aguas más frías y salinas del Mar de Weddell, las cuales entran al Estrecho pasando por encima de la plataforma continental cercana a las islas d'Urville y Joinville. Este autor ya argumentaba que esta agua se propagaría a lo largo de la costa norte de la Península Antártica hasta la isla Trinidad, donde se encontraría con las aguas que entraban al Estrecho de Bransfield desde el Estrecho de Gerlache (Silva, 1986; Tokarczyk, 1987; Rakusa-Suszczewski, 1996).

Con posterioridad al trabajo de Clowes (1934), las investigaciones en el Estrecho de Bransfield decayeron notablemente hasta la publicación del trabajo de Gordon y Nowlin (1978). Dichos autores efectuaron un nuevo análisis de las condiciones oceanográficas físico-químicas del estrecho, basado en los resultados obtenidos durante el proyecto de Estudios Internacionales del Océano Austral (ISOS), aportando nuevas evidencias que confirmaban la presencia de un fenómeno de convección como mecanismo de formación de agua de fondo del Estrecho de Bransfield. Durante el verano de 1981 se realizó un nuevo trabajo de investigación en el Estrecho de Bransfield, como parte del Proyecto Internacional BIOMASS (Investigaciones biológicas de los sistemas antárticos marinos y sus stocks). En la primera fase de este proyecto, los países participantes, realizaron una serie de expediciones biológico-oceanográficas en el área del estrecho y zonas adyacentes. Esta fase es conocida como FIDEX (primer experimento BIOMASS internacional). Posteriormente, y después de una serie de reuniones internacionales, en las que se analizó la información recolectada por los distintos países participantes, se planificó la segunda parte del proyecto BIOMASS, la cual fue denominada SIBEX, fase que se inició en el verano del año 1984 (Sievers, 1982; Silva, 1986).

Estudios actuales han demostrado que la estructura hidrográfica del área de estudio responde fuertemente a las características topográficas y su patrón varía estacionalmente (García *et al.*, 1994, Zhou *et al.* 2002, 2013). Su

principal restricción es la presencia en la Cuenca Oeste de numerosas cordilleras submarinas de hasta unos 100m de umbral que restringen en gran medida la entrada del flujo circumpolar en el Estrecho de Bransfield (Zhou *et al.*, 2002). El agua que entra por esta Cuenca Oeste del Estrecho de Bransfield proviene del Mar de Bellingshausen y se caracteriza por ser una masa de agua relativamente cálida y poco salina denominada Agua de Transición Zonal con Influencia de Bellingshausen (TBW) (López *et al.*, 1994, García *et al.*, 2002), que fluye por el noreste apoyada en el talud sur de las SSI. El agua más fría y relativamente más salina que proviene del Mar de Weddell, y entra por la Cuenca Central a través del Canal Antártico y por la Cuenca Este, denominada Agua de Transición Zonal con Influencia de Weddell (TWW) se propaga hacia el oeste apoyada en la plataforma norte de la Península Antártica (López *et al.*, 1994, García *et al.*, 2002). El resultado de interacción de ambas masas de agua es un complejo sistema de circulación denominado Sistema de la Corriente de Bransfield (BCS), definido por Sangrà *et al.* (2011) y descrito en detalle por Gordo (2013), cuyas componentes superficiales y subsuperficiales son: Corriente de Bransfield (BC); Frente Peninsular (PF); Frente de Bransfield (BF); Sistema de remolinos anticiclónicos (AE) y una lengua de Agua Profunda Circumpolar modificada (CDWm) (Figura 1.4).

La inmensa mayoría de los trabajos publicados alrededor de las SSI han sido realizados a partir de medidas tomadas durante el verano austral, por lo que se desconoce si la dinámica descrita se mantiene durante el año o en qué momento del mismo aparece y, en ese caso, cómo es la dinámica de transición. Estos estudios se han centrado en la dinámica en el Estrecho de Bransfield y de los pocos estudios que hay al norte de SSI, prácticamente ninguno ha estudiado la dinámica a lo largo de su plataforma. Por otro lado, tampoco se ha determinado cómo puede afectar a la dinámica de la zona las oscilaciones de la Corriente Circumpolar asociada con eventos tipo ENSO.

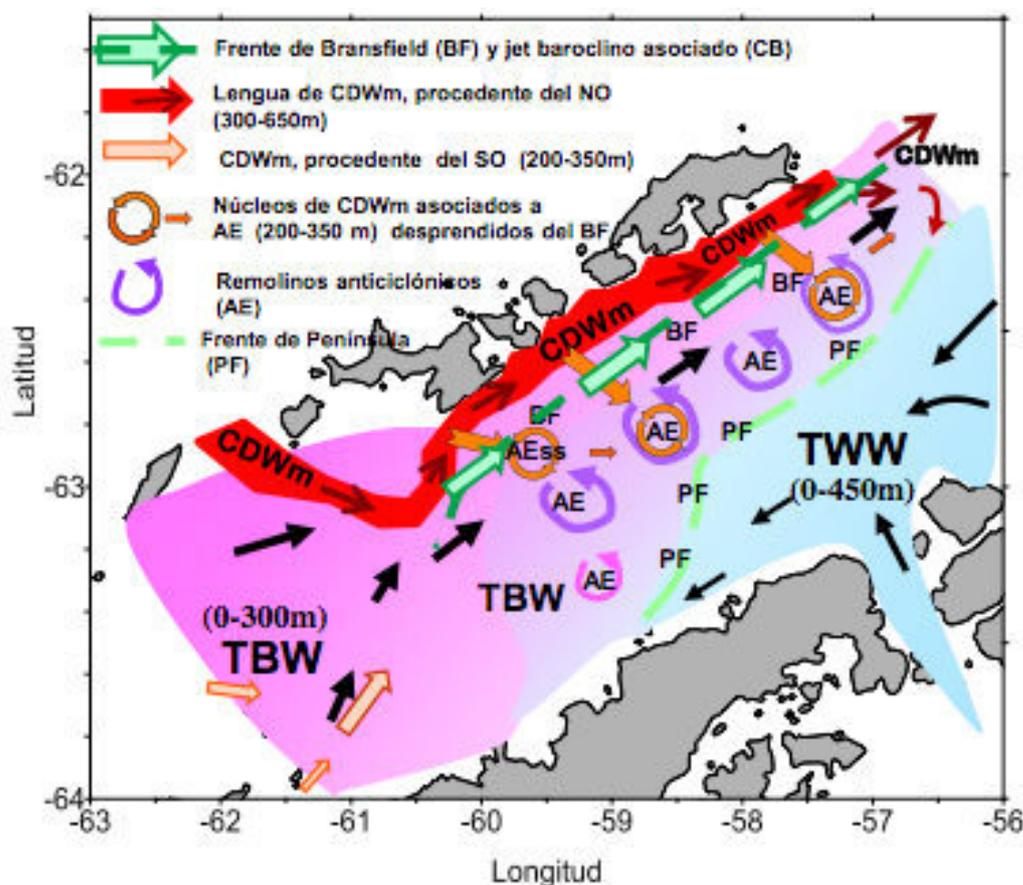


Figura 1.4: Esquema del Sistema de la Corriente del Bransfield (BCS).. Agua de Transición Zonal con Influencia de Bellingshausen (TBW), Agua de Transición Zonal con Influencia de Weddell (TWW), Frente de Bransfield (BF; verde oscuro), Frente Peninsular (PF; verde claro), Sistema de Remolinos anticiclónicos (AE) y la lengua de CDWm (rojo) (Gordo, 2013, modificado de Sangrà *et al.* (2011).

1.2.- Monitorización de la dinámica superficial con datos satelitales de SST.

La temperatura superficial del mar (SST) es un factor medioambiental clave para medir los cambios climáticos tanto globales como locales. Estos cambios ocurren en un amplio rango de escalas temporales, desde variaciones durante el día, hasta variaciones interdecadales. Las causas de estas variaciones incluyen procesos tales como la insolación diurna, las fluctuaciones de la marea o el paso de frentes fríos y tormentas durante el invierno (Monaldo

et al., 1997), así como oscilaciones climáticas interanuales, decadales e interdecadales.

Inicialmente la SST era estimada a partir de escasas medias *in situ* tomadas tanto por barcos oceanográficos como por barcos de ocasión. Este sistema de adquisición no permitía disponer de la resolución espacio-temporal necesaria para detectar, los efectos de la variabilidad climática en la dinámica de la región que se estudiase. Actualmente, los registros de temperatura superficial del mar se obtienen mediante diferentes instrumentos de medición, como radiómetros de microondas y/o infrarrojos, mediciones *in situ* y boyas de deriva, por lo tanto su medición depende de la plataforma y tecnología que se esté utilizando, variando las características de control en tiempo y espacio (Portner, 2002; Halpern, 2011; Hare *et al.*, 2012), pero la capa superior del océano (~10 m) tiene una compleja y variable estructura vertical, la cual se relaciona con la turbulencia del océano y los flujos de calor océano-atmósfera, lo que genera que sea un parámetro difícil de definir con exactitud. Dentro de estos 10 m de profundidad se consideran 5 definiciones teóricas de la SST que se utilizan para entender el contenido de la información y las relaciones de medida de la SST realizados por diferentes instrumentos *in situ* y de satélites (Figura 1.5; Donlon, 2002). Éstas son:

- *Interfase de SST (SST_{int})*: es la temperatura teórica que existe en la zona de interfase entre el océano y la atmósfera. Representa la temperatura hipotética de la capa superior del océano y es considerada una mezcla uniforme de agua y aire molecular. La SST_{int} no es de uso práctico y aún no existen metodologías para su medición, pero es importante al considerar que esta capa es la que interactúa con la atmósfera.
- *Skin SST (SST_{skin})*: es la temperatura radiométrica medida por un radiómetro infrarrojo que opera en una banda de onda espectral de 10 a 12 μ m, representando la temperatura superficial de los primeros 12 μ m. y sus registros dependen de la variabilidad diurna presente.

- *Sub-skin SST (SST_{sub-skin})*: representa la temperatura superficial. Se aproxima a la medición superficial realizada con un radiómetro de microondas que trabaja a frecuencias gamma de 6-11Ghz y abarca el espesor aproximado de 1mm y sus registros no dependen de las condiciones diurnas.
- *SST(z)*: es la medición a una profundidad exacta realizada por un instrumento que no sea satelital y se utiliza para relacionar la profundidad (z) con un registro de temperatura determinado.
- *Foundation SST (SST_{fd})*: es la temperatura de la columna de agua libre de cualquier variabilidad diurna, tomada como temperatura base del desarrollo de la termoclina diurna diaria y representa la temperatura de la capa de mezcla. Esta temperatura sólo se mide con instrumentación *in situ* y no es detectada por instrumentos de satélites directamente.

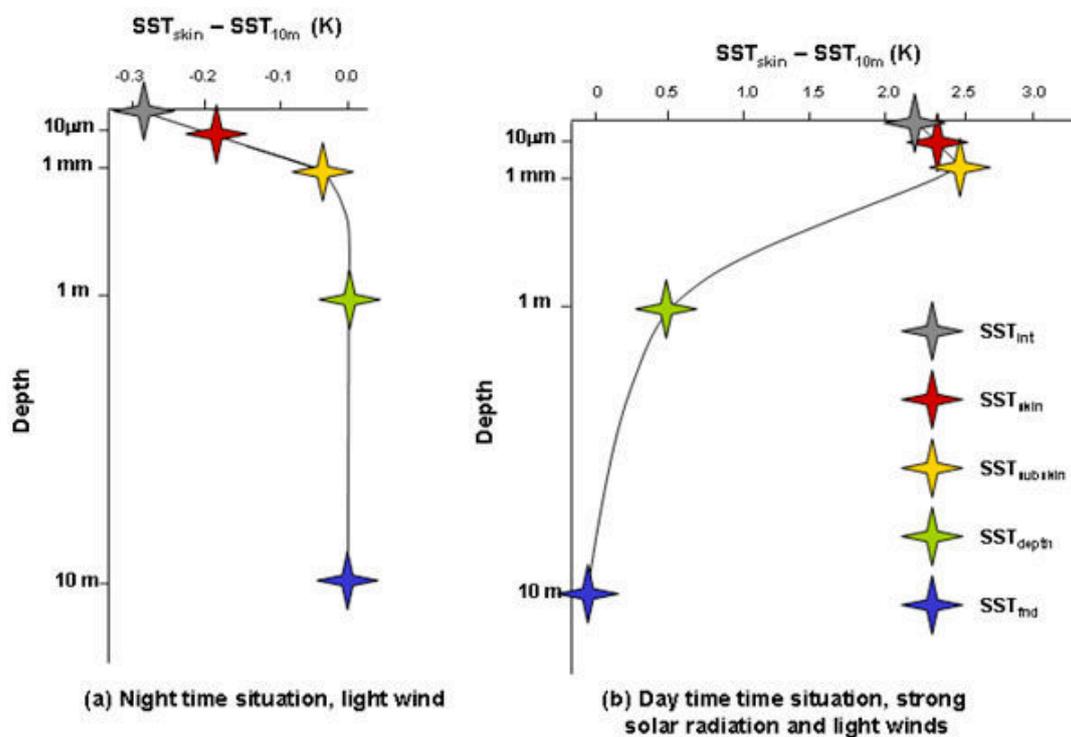


Figura 1.5: Diagrama esquemático de un perfil vertical de temperatura en los primeros 10m de profundidad bajo condiciones (a) nocturnas y (b) diurna (Donlon, 2002).

En 1960 la NASA comienza con el lanzamiento de una serie de satélites meteorológicos TIROS (Satélite de Observación por Televisión e Infrarrojos), siendo los primeros satélites capaces de teleobservar la Tierra, demostrando la utilidad de la observación del tiempo atmosférico por satélite. En octubre de 1978, la NASA lanza el satélite TIROS-N con diferentes instrumentos, incluyendo la primera serie de radiómetros avanzados de alta resolución (AVHRR), que permitieron obtener medidas de la SST en condiciones de cielo despejado (Halpern, 2011). Este tipo de medición infrarroja se ve afectada por la degradación de los aerosoles y la nubosidad, la cual oscurece la superficie marina impidiendo realizar la medición en esos puntos y cerca del 50% de la superficie del océano global esta nublada (Platnick *et al.*, 2003; Wylie *et al.*, 2005). En condiciones óptimas, cerca del 75% de la superficie puede estar libre de nubes, pero en el caso de las zonas polares la condición de baja nubosidad no se presenta.

Muchos satélites que operan actualmente tienen instrumentación infrarroja y de microondas para medir SST (Donlon *et al.*, 2007), y múltiples datos globales de SST son producidos en todo el mundo, pero son pocos los que dentro de su trayectoria incluyen el Polo Austral. En la actualidad se utilizan productos resultantes de la combinación de la información de SST obtenida a partir distintos tipos de sensores satelitales. Remote Sensing Systems proporciona mapas globales diarios de SST óptimamente interpolados (OI). El Microwave Plus Infrared (MWIR) OI product, es una interpolación de este tipo que se obtiene gracias a la combinación de información de varios satélites (Tabla 1.1), disminuyendo la cantidad de sesgos y mejorando la incertidumbre de las mediciones de SST, especialmente a latitudes superiores a 40°. Para ello combinan la capacidad de obtener datos a través de la cobertura de nubes de los radiómetros de microondas satelitales, de resolución espacial de 25 km, con la alta resolución espacial de los datos del sistema infrarrojo (9 km), entregando como resultado información diaria de la SST global a una resolución de 9 km (www.remss.com), lo que genera un completo mapa de la SST con información continua a pesar de las condiciones ambientales presentes en la zona.

Tabla 1.1: Información satélites utilizados en el Microwave Plus Infrared (MWIR) OI product.

Banda	Satélites	Cobertura	Periodo operacional
MW	TMI AMSR-E	40°N-40°S	1997-2015 2002-2011
	AMSR2 WindSat	Global	2012-presente 2003-presente
IR	Terra MODIS Aqua MODIS	Global	2000-presente 2002-presente

1.3.- Motivación de este estudio

A pesar de que numerosos autores están de acuerdo en la descripción de la dinámica básica en el Estrecho de Bransfield durante el verano austral, el origen de la Corriente de Bransfield está aún en discusión. Zhou *et al.* (2006) sugieren que la BC se propaga como una corriente de frontera oeste, pero Sangrà *et al.* (2011) y Polin *et al.* (2014) proponen que el comportamiento de la BC es similar al de una corriente de gravedad de descarga, conduciendo a la TBW en forma de una corriente costera intensa y estable, apoyada a lo largo del abrupto talud sur de las SSI. Este origen estaría de acuerdo con los resultados de García-Muñoz *et al.* (2013) y Sangrà *et al.* (2015) que, a partir de información *in-situ*, plantean la existencia en el talud norte de las SSI de un angosto frente termohalino denominado Frente de las Shetland (SF), estructura que coincide con los modelos de laboratorio presentados por Hernández-Arencibia (2013).

El análisis tanto de las imágenes de SST como de su gradiente, permitirían estudiar si la Corriente de Bransfield se comporta como una corriente de gravedad de descarga. Para ello, además de aparecer propagándose en el talud sur de las SSI, una vez que TBW comienza a entrar circulando por la Cuenca Oeste del Estrecho de Bransfield, como ya se muestra en otras campañas en la zona, debería recircular al norte de SSI

recorriendo en sentido contrario la plataforma y talud norte de SSI. Si el flujo en el talud norte de las SSI es alimentado por la BC, entonces esta señal debería aparecer con retardo y mantenerse al norte de las SSI, incluso algún tiempo después de desaparecer la BC en el Estrecho de Bransfield.

Por otro lado, a pesar que en la región se han realizado notables investigaciones científicas, especialmente en la zona del Estrecho de Bransfield, la gran mayoría de los trabajos se centran en el periodo estival, principalmente por las difíciles condiciones ambientales y la falta de capacidades logísticas necesarias para poder realizar estudios en invierno. Por ello no se conoce la variabilidad estacional del BCS, de manera que no está aún establecido el momento de la formación y desarrollo de este sistema; la evolución de los frentes hidrográficos asociados a este sistema; ni el momento de desaparición de estos frentes. También se desconoce si hay algún otro sistema de corrientes establecido durante los periodos de transición. Para ello, y dado que es un sistema de alta variabilidad en el que las estructuras mesoescalares tienen radios de tan solo decenas de metros (Chelton *et al.*, 1998), se hace necesario una amplia cobertura espacio-temporal como la que permiten las imágenes de SST.

La disponibilidad de series de datos diarios de SST durante varios años permitiría además hacer un estudio pionero de la influencia de las oscilaciones climáticas tipo ENSO en la región de estudio, que es una zona oceanográfica muy próxima al Paso Drake, pero con conexiones limitadas por la presencia de altas montañas submarinas y someros estrechos y pasos entre islas.

Las cuestiones planteadas son abordadas en el trabajo presentado, cuyos objetivos se presentan a continuación.

1.4.- Objetivos.

La finalidad de este estudio es describir la dinámica alrededor de las SSI durante todo el año, considerando incluso las variaciones interanuales. Para ello se utilizarán datos hidrográficos y la distribución de SST alrededor de las Islas Shetland del Sur entre los años 2003 y 2013. Esta distribución permitirá responder a cuestiones planteadas en este capítulo tales como el momento de establecimiento, fortalecimiento y desaparición del BCS a lo largo del año; el posible comportamiento de la Corriente de Bransfield como una corriente de gravedad, que conllevaría la recirculación de TBW al norte de las SSI; y el efecto, de eventos climatológicos externos tales como el ENSO en los patrones observados en la región.

Los principales objetivos de este trabajo son, por tanto:

- En lo relativo a la distribución de temperatura superficial del mar en un año promedio:
 - Describir la distribución de temperatura superficial del mar alrededor de las SSI a lo largo del año promedio.
 - Establecer, a partir de dicha distribución, los periodos climáticos en el año.
 - Caracterizar la variabilidad espacio-temporal de la distribución de SST durante los periodos de transición y el verano austral en un año promedio.
- En lo relativo a la dinámica alrededor de SSI durante el verano austral:
 - Identificar las masas de agua presentes alrededor de las SSI durante enero del año 2010
 - Describir la dinámica alrededor de SSI durante el verano austral a partir de datos hidrográficos y boyas lagrangianas.
 - Analizar la conexión entre la circulación al norte y al sur de las SSI. Comprobar si la circulación observada en la

plataforma y talud norte de SSI es consistente con el comportamiento de la Corriente de Bransfield como una corriente de gravedad de descarga.

- Identificar las características propias del Sistema de la Corriente de Bransfield y de la circulación al norte de SSI en las distribuciones de temperatura superficial del mar.
- Establecer criterios para identificar y seguir las zonas frontales alrededor de SSI, considerando tanto datos hidrográficos como distribuciones de SST.
- En lo relativo a la variabilidad espacio-temporal:
 - Analizar la variabilidad espacio-temporal de las estructuras frontales alrededor de SSI en diferentes escalas temporales.
 - Determinar si existen factores climáticos externos, tipo ENSO, que afecten a la señal superficial de las estructuras que se identifican alrededor de SSI, en el periodo estudiado.

1.5.- Estructura de la tesis.

En este capítulo introductorio se hace una descripción general de la región de estudio y de la dinámica básica de la misma, se explica la necesidad de la utilización de productos interpolados de datos satelitales de SST y se plantean las motivaciones del estudio y sus objetivos básicos.

En Capítulo 2 se describe con más detalle el tipo de datos utilizados, a los que se incorporan además de los datos satelitales, datos *in situ* provenientes de campañas oceanográficas propias realizadas por nuestro grupo de investigación, así como las metodologías usadas para la adquisición y/o procesamiento de la información presentada.

En el Capítulo 3 se utiliza la serie de datos diaria disponible para construir una serie diaria en un año promedio, entre enero de 2006 y diciembre

del 2011. Se utilizan imágenes de SST de este año promedio y, por tanto, una señal más suavizada, pero más representativa del comportamiento promedio, para describir la variabilidad espacio-temporal de la dinámica superficial alrededor de las SSI a escala semanal, mensual y estacional.

En el Capítulo 4 se caracteriza la dinámica alrededor de SSI durante el verano austral, a partir de datos hidrográficos obtenidos en el verano austral de 2010 alrededor de las SSI, y del seguimiento de boyas lagrangianas. La comparación de este estudio con distribuciones de SST y del módulo del gradiente de SST, permite identificar determinadas estructuras observadas en imágenes de SST, y de su gradiente, tales como frentes característicos del BCS y del límite norte de las TBW. Analizando la evolución de dichos frentes se está estudiando indirectamente la evolución de la dinámica superficial alrededor de las SSI durante el verano austral.

En el Capítulo 5 se utiliza la identificación de los frentes realizada en el Capítulo 4 para analizar la variabilidad espacio-temporal de las mismas tanto en un año promedio como en escalas interanuales entre los años 2003 y 2013. Además, se describe cómo puede estar afectando el ENSO a la dinámica alrededor de SSI.

En el Capítulo 6 se presentan las conclusiones y las líneas futuras a plantear tomando como punto de partida los resultados obtenidos en el presente trabajo.

Capítulo 2

Datos

El área de estudio se sitúa entre los 61° y 64°S y entre los 57° y 62°W, abarcando la parte sur del Paso Drake, el archipiélago de las Islas Shetland del Sur (SSI), el Estrecho de Bransfield y la Península Antártica (Figura 1.1). Para realizar este trabajo se han utilizado datos provenientes de imágenes de satélite de Temperatura Superficial del Mar (SST) y datos hidrográficos, incluyendo trayectorias de boyas lagrangianas, obtenidos en campañas oceanográficas realizadas en la región por nuestro grupo de investigación.

En este capítulo se explica la adquisición y procesamiento de los datos hidrográficos utilizados en este trabajo, así como para qué parte de esta tesis han sido necesarios (Sección 2.1). Se presenta el MEI, un índice calculado a partir de múltiples variables, que se presenta como serie temporal. Con él se pueden clasificar los eventos tipo ENSO y será el utilizado para estudiar posibles influencias de este evento en la serie de datos disponible (Sección 2.2). En el caso de las imágenes SST se explica el tipo de producto utilizado, así como las magnitudes y técnicas de análisis que se ha aplicado al producto inicialmente suministrado, en función de los objetivos a cubrir cada capítulo (Sección 2.3).

2.1 Datos hidrográficos

2.1.1 Campañas oceanográficas

Como se explica en el capítulo introductorio, muchos han sido las campañas oceanográficas y trabajos realizados en el área de estudio, pero sin la resolución espacial adecuada para describir la estructura mesoescalar de la zona. Esta situación ha variado en los últimos años con la realización de campañas oceanográficas de alta resolución espacial, cercana a las 5 mn, que han contribuido a definir el Sistema de la Corriente de Bransfield en forma más detallada. Estas campañas, realizadas por nuestro grupo de investigación, han sido CIEMAR, BREDDIES y COUPLING (Figura 2.1).

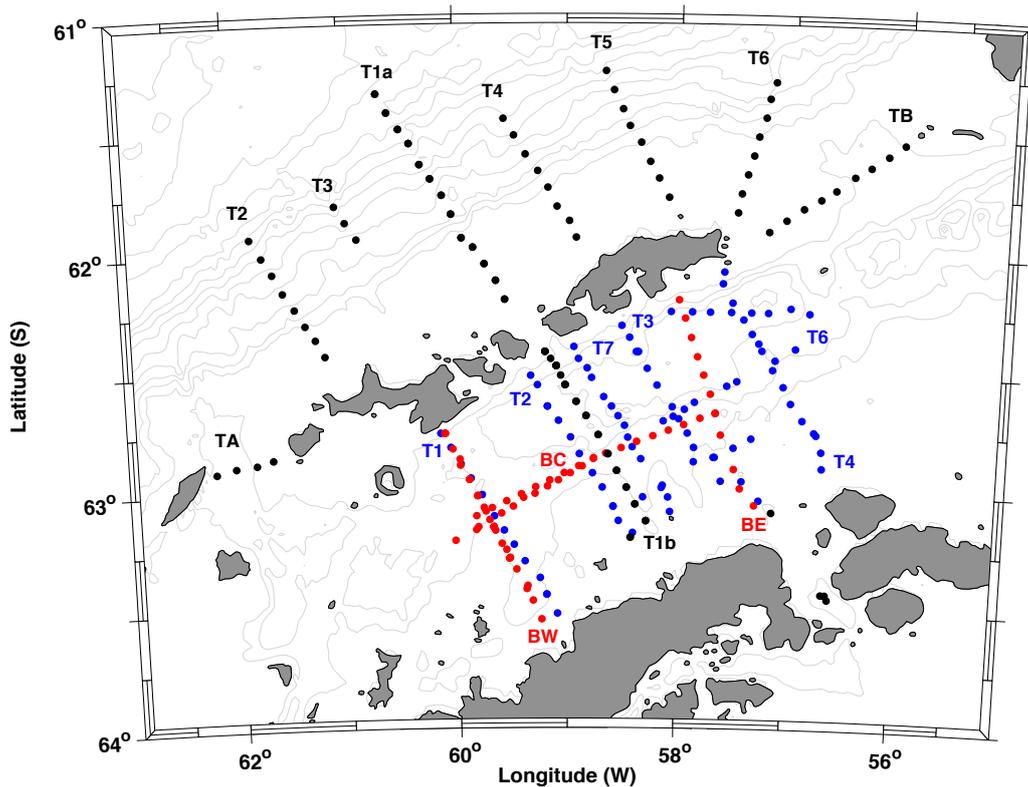


Figura 2.1: Distribución de las estaciones de la campaña CIEMAR (puntos rojos), campaña BREDDIES (puntos azules) y campaña COUPLING (puntos negros). Se muestran las isóbatas cada 500m (Smith y Sandwell, 1997).

La campaña CIEMAR 99/00 se realizó en tres zonas: Paso Drake, Estrecho de Bransfield y Estrecho de Gerlache, entre el 13 de diciembre de 1999 y el 3 de enero del 2000. Para esta tesis sólo se tendrán en cuenta las estaciones representadas por puntos rojos en la Figura 2.1, que son los realizados en el Estrecho de Bransfield. La campaña BREDDIES se desarrolló entre el 26 de diciembre del 2002 y el 21 de enero del 2003 (Vázquez *et al.*, 2007; Gordo, 1013), y en ella se mejoró la cobertura espacial dentro del Estrecho de Bransfield (Figura 2.1, azul). Con los datos obtenidos en estas dos campañas se pudieron establecer con mayor precisión los rangos de valores de las propiedades que permitían caracterizar las masas de agua presentes en el Estrecho de Bransfield (Gordo, 2013). Por otro lado, desde un punto de vista dinámico, las observaciones permitieron a Sangrà *et al.* (2011) establecer el Sistema de la Corriente Bransfield y obtener las bases observacionales para realizar simulaciones en laboratorio que permitieron describir la Corriente de Bransfield como una corriente de gravedad de descarga (Hernández-Arencibia, 2013).

Las consecuencias dinámicas derivadas del comportamiento de la Corriente de Bransfield como una corriente de gravedad conllevarían a la recirculación de agua propia del Estrecho de Bransfield por el talud norte de las SSI, tal y como también predecían las simulaciones de Hernández-Arencibia, (2013). Para intentar identificar esta dinámica se realiza la campaña oceanográfica interdisciplinar COUPLING, entre el 8 y 27 de enero del año 2010. En ella se muestrearon un total de 84 estaciones hidrográficas distribuidas en 8 transectos realizados alrededor de las SSI, con una alta resolución espacial (5 nm) entre estaciones, en la dirección perpendicular al talud (norte y sur) de las SSI (Figura 2.1, negro). Junto con el muestreo del talud norte de SSI, se realizó un transecto central desde el Paso Drake hasta la plataforma de la Península Antártica con el objetivo de intentar identificar al norte de las SSI características propias de las aguas del Estrecho de Bransfield. Los principales resultados dinámicos obtenidos durante COUPLING se detallan en Sangrà *et al.* (2015) y algunos de ellos forman parte del Capítulo 4 de esta tesis.

Además de los datos de CTD, durante la campaña COUPLING se lanzaron 5 boyas lagrangianas, 3 en el Estrecho de Bransfield y 2 al norte de las SSI. Se siguió la trayectoria de dichas boyas durante todo el periodo en el que estuvieron transmitiendo. En la Figura 2.2 se observa el lanzamiento de una boya durante la campaña COUPLING, en la que se ve la forma de la vela.



Figura 2.2: lanzamiento de boya lagrangiana durante la campaña COUPLING.

2.1.2 Procesamiento de datos hidrográficos

2.1.2.1 *Procesamiento de datos CTD*

Los datos de CIEMAR y BREDDIES fueron suministrados ya procesados, y los detalles de su procesamiento se pueden encontrar en Gordo (2013)

Los perfiles de salinidad y temperatura obtenidos durante la campaña COUPLING fueron adquiridos usando un CTD Seabird 911plus, acoplado al centro de la roseta inteligente de General Oceanics compuesta de 24 botellas oceanográficas Niskin de 12 litros (Figura 2.3a), con el que se muestreó hasta los primeros 1000 m de profundidad en mar abierto y hasta el fondo marino en la zona de plataforma y talud.

Tras un procesamiento inicial de las lecturas del CTD con el programa *seasoft*, se vio la necesidad de no considerar los datos de los primeros metros

de la columna de agua dada la alta cantidad de valores erróneos que se mostraban, que eran el resultado de las malísimas condiciones marítimas reinantes durante el muestreo. Por ello, se empezaron a considerar lecturas a partir de 10 metros de profundidad.

La salinidad se calibró a partir de la comparación de la salinidad de las muestras tomadas con las botellas Niskin en 66 estaciones, cerradas en profundidades en la capa de mezcla durante la subida de la roseta, con el correspondiente valor de salinidad registrado por el CTD en el mismo punto. Las muestras de agua fueron almacenadas en botellas oscuras, cerradas herméticamente, siguiendo las normas básicas de toma de muestras de salinidad, y fueron almacenadas en un laboratorio con temperatura estable donde, posteriormente se realizó la calibración. Esta calibración de salinidad, a bordo del BIO Hespérides, se realizó con el Portasal Guildline 8400 (Figura 2.3 b) siguiendo el manual del aparato, calibrado con agua de mar estándar IAPSO, donde cada botella de agua estándar estaba etiquetada con su cociente de conductividad (K15) y su salinidad de acuerdo con la Escala Práctica de Salinidad (PSS78). Dado que se medía la salinidad de varias estaciones a la vez, se calibraba el aparato con agua estándar antes de empezar, a mitad y al finalizar la sesión de calibración, para poder tener una estimación de la deriva. A partir de esta estimación de la deriva, se corrigió la lectura suponiendo un comportamiento lineal de la misma.

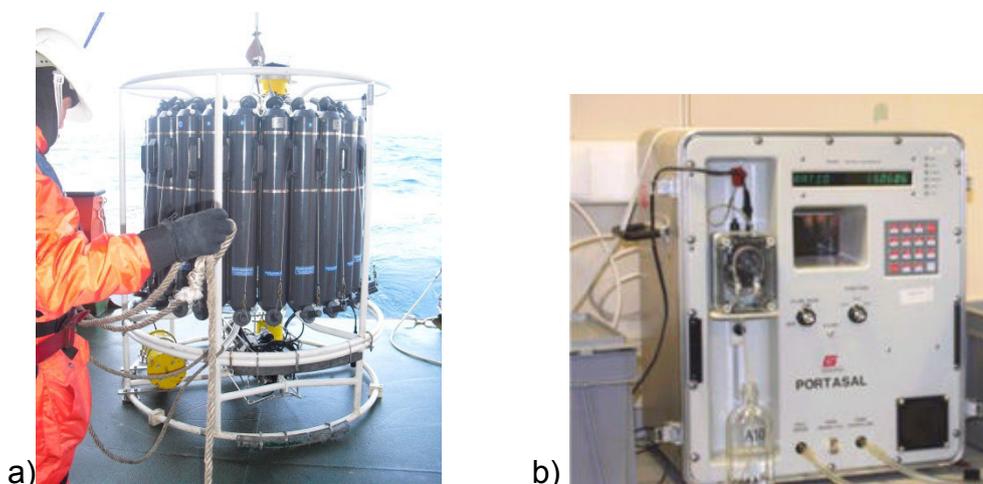


Figura 2.3: Roseta con CTD (a) y portasal Guidline 8400 (b) del BIO Hespérides utilizados en la adquisición y calibración de datos durante la campaña COUPLING.

A su vez, se realizaron 5 lecturas de cada muestra hasta obtener valores estables de la lectura. En la Tabla 2.1 se muestran el valor estable de cada muestra, los valores obtenidos para el agua estándar con los que se calculó la deriva y la salinidad corregida.

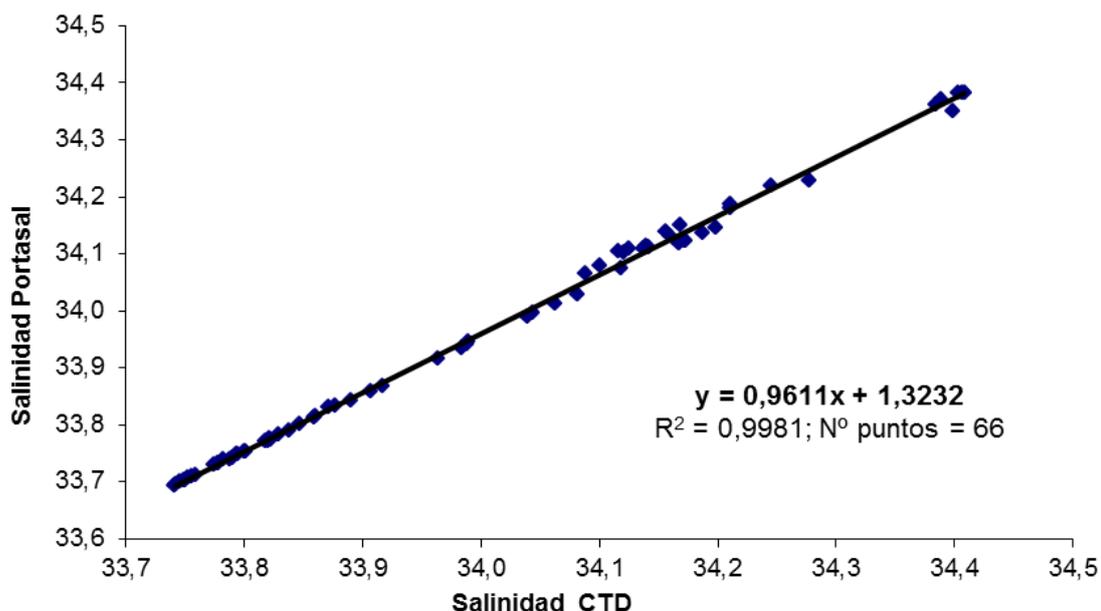


Figura 2.4: Curva de calibración para la salinidad del CTD durante la campaña COUPLING.

La calibración de los valores registrados en la salinidad del CTD se obtuvo mediante la comparación de los valores de salinidad, correspondientes a la misma estación y profundidad, dados por el CTD y por las muestras analizadas por el portasal. Los resultados indican que el sensor de conductividad del CTD funcionó correctamente, si bien la diferencia media entre sus medidas y las del portasal fue de -0.04 psu. Por ello fue necesario representar las medidas del portasal frente a las del CTD (Figura 2.4) y realizar un ajuste por mínimos cuadrados, con el que se obtuvo la recta de calibración:

$$S_{cal} = 0.966 \cdot S_{CTD} + 1.3232, \text{ con } r^2 = 0.9981$$

donde S_{CTD} es la salinidad del CTD, S_{cal} es la salinidad calibrada y r^2 es el coeficiente de correlación. Con esta calibración se obtiene una precisión final

de 0.003 psu en las medidas de salinidad obtenidas con el CTD, una vez aplicada esta curva de calibración, siguiendo los requerimientos WOCE (1998).

Tabla 2.1: Salinidad corregida (PSU) de las muestras en estación.

SESIÓN 1				SESIÓN 2			
Estación	Salinidad Estable	Deriva	Salinidad corregida	Estación	Salinidad Estable	deriva	Salinidad corregida
Estándar 1	34.998	0.000	34.998	Estándar 1	34.999	0.000	34.999
1	34.180	0.001	34.181	69	33.733	0.000	33.733
2	34.108	0.002	34.110	71	33.703	0.000	33.703
3	34.110	0.002	34.112	73	33.697	0.000	33.697
4	34.110	0.003	34.113	72	33.748	0.000	33.748
5	34.107	0.004	34.111	70	33.708	0.000	33.708
6	34.135	0.005	34.140	68	33.712	0.000	33.712
7	34.127	0.005	34.132	66	33.695	0.000	33.695
8	34.182	0.006	34.188	67	33.703	0.000	33.703
9	34.213	0.007	34.220	64	33.844	0.000	33.844
10	34.355	0.008	34.363	65	33.750	0.001	33.749
11	34.374	0.008	34.382	62	33.834	0.001	33.833
12	34.374	0.009	34.383	63	34.076	0.001	34.075
13	34.055	0.010	34.065	54	33.783	0.001	33.782
14	34.068	0.011	34.079	61	33.997	0.001	33.996
15	34.091	0.011	34.102	60	33.936	0.001	33.935
16	34.096	0.012	34.108	58	33.731	0.001	33.730
17	34.137	0.013	34.150	57	33.755	0.001	33.754
18	34.092	0.014	34.106	Estándar 2	35.000	0.001	34.999
19	34.369	0.014	34.383	55	33.860	0.001	33.859
21	34.355	0.015	34.370	56	33.812	0.001	33.811
Estándar 2	35.014	0.016	34.998	53	33.776	0.002	33.774
22	34.366	0.016	34.350	52	33.801	0.002	33.799
25	34.246	0.016	34.230	51	33.754	0.002	33.752
26	33.957	0.016	33.941	50	33.831	0.002	33.829
124	33.932	0.017	33.916	49	34.029	0.002	34.027
27	33.962	0.017	33.945	48	34.012	0.002	34.010
28	33.886	0.017	33.869	47	33.990	0.003	33.987
29	33.832	0.017	33.815	46	34.119	0.003	34.116
30	33.760	0.017	33.743	41	34.124	0.003	34.121
31	33.756	0.017	33.739	40	34.137	0.003	34.134
32	33.790	0.017	33.773	74	33.710	0.003	33.707
33	33.789	0.017	33.772	75	33.700	0.004	33.696
34	33.758	0.018	33.741	76	33.732	0.004	33.728
35	33.792	0.018	33.774	Estándar 3	35.003	0.004	34.999
36	33.808	0.018	33.790				
37	34.165	0.018	34.147				
38	34.141	0.018	34.123				
Estándar 3	35.016	0.018	34.998				

2.1.2.2 Procesamiento Boyas Lagrangianas.

Para este trabajo se han utilizado las trayectorias de las boyas 63 de la campaña BREDDIES (Figura 2.5, línea roja), y las boyas 63 (línea azul) y 68 (línea negra) de la campaña COUPLING.

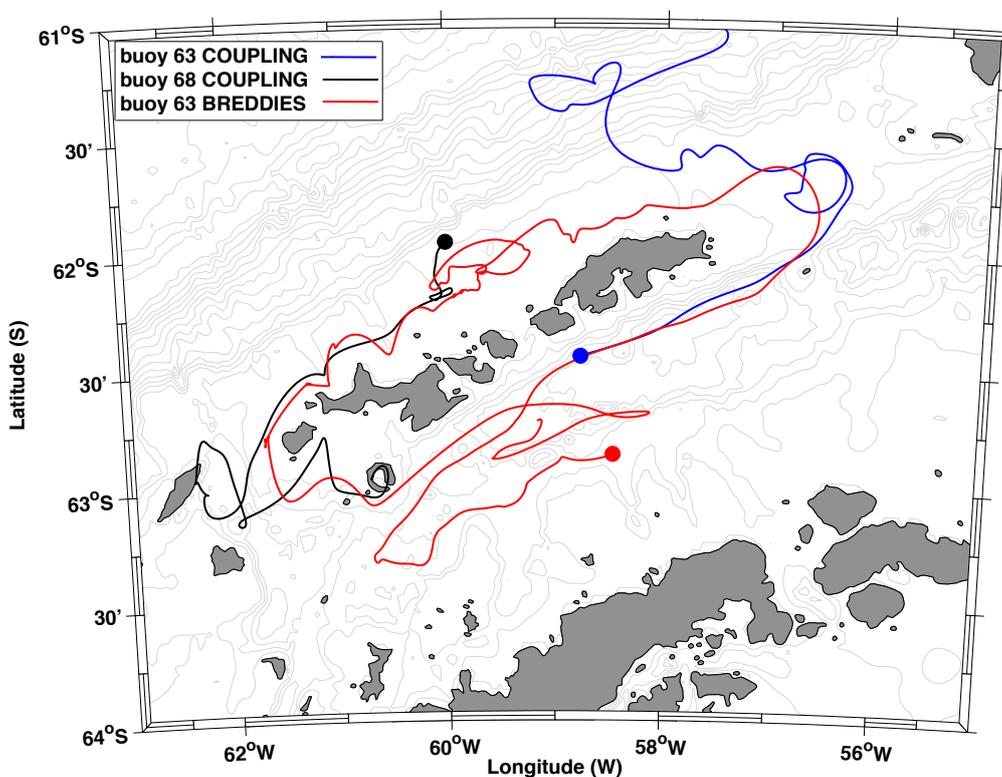


Figura 2.5: Posición de lanzamiento y trayectorias de las boyas lanzadas en las campañas BREDDIES (línea roja) y COUPLING (líneas azul y negra). Se muestran las isóbatas cada 300m (Smith y Sandwell, 1997).

Los derivadores utilizados fueron flotadores esféricos superficiales y dragas Holey-Sock centradas a 100 m para la campaña BREDDIES (enero 2003) y 50 m para la campaña COUPLING (enero 2010). La profundidad de vela fue elegida para que las boyas circularan bajo la capa de Ekman evitando la contaminación generada por el viento (Figura 2.5).

Para eliminar las oscilaciones inerciales y de marea se aplicó un filtro pasabaja de 36 horas a la trayectoria de los derivadores. Cada boya fue rastreada por el sistema Argos y sistemas de localización DCLS cada 1-2 hr con una imprecisión menor de 500 m (Polin *et al.*, 2014).

2.1.3 Finalidad de los datos hidrográficos

Los datos hidrográficos provenientes de las campañas CIEMAR y BREDDIES se utilizan en esta tesis para superponerlos a los datos obtenidos en el transecto central de COUPLING e identificar en el mismo la presencia de agua procedente del Estrecho de Bransfield en el talud norte de las SSI.

Por otro lado, el establecimiento de las características del Sistema de la Corriente de Bransfield (Sangrà *et al.*, 2011), a partir de los datos obtenidos en CIEMAR y BREDDIES, permiten obtener criterios de identificación tanto de la dinámica de BCS como del Frente Peninsular en las secciones realizadas durante COUPLING y en las distribuciones de SST.

Con los datos hidrográficos de todos los transectos de COUPLING, se han identificado las masas de agua presentes al norte de las SSI y se ha puesto de manifiesto la presencia de un frente subsuperficial del que se hablará en el Capítulo 4. Este frente representa el límite norte de la presencia de las aguas procedentes del Estrecho de Bransfield al norte de las SSI, y los datos han permitido establecer criterios para su seguimiento a partir de imágenes SST.

Con el fin de tener evidencias observacionales de la circulación superficial alrededor de las SSI durante todo el Verano Austral, y no únicamente durante el periodo de muestreo de las campañas, así como poder corroborar la recirculación de la Corriente de Bransfield alrededor de las SSI, en este trabajo, se utiliza la información entregada por tres boyas lagrangianas, una lanzada la campaña COUPLING y otras dos lanzadas en la campaña BREDDIES (Figura 2.5).

2.2 Índice Multivariado ENSO (MEI).

El Índice multivariado ENSO (MEI) es una serie de tiempo adquirida de la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). El MEI se obtiene a través de seis variables sobre el océano Pacífico tropical ecuatorial: Presión del nivel del mar, componentes del viento superficial zonal y meridional, temperatura superficial del mar, temperatura superficial del aire y la fracción total de la nubosidad. Dado su carácter multivariado, este índice, en comparación con otros existentes, representa de la mejor forma el fenómeno ENSO (Wolter y Timlin, 2011).

En él se definen los eventos ENSO como cinco periodos de tres meses consecutivos de anomalías por encima de 0.5°C durante El Niño y de -0.5°C para La Niña y su fuerza se describe como: débil, si esta anomalía durante al menos tres periodos de tres meses consecutivos esta entre 0.5° y 0.9°C ; moderada, si su anomalía esta entre 1.0° - 1.4°C ; y fuerte, si supera los 1.5°C .

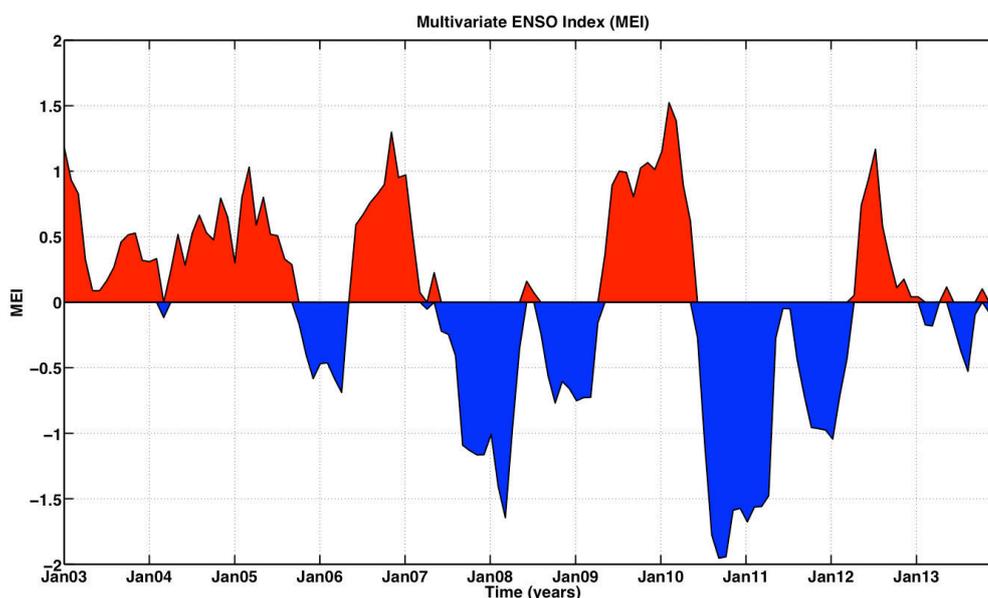


Figura 2.6: Índice multivariado del ENSO a partir de enero 2003 a diciembre del 2013. El Niño (fase positiva) en roja, La Niña (fase negativa) en azul.

La Figura 2.6 presenta el MEI durante el periodo de estudio, mostrando los respectivos eventos El Niño / La Niña en función a sus puntos fuertes. En el

periodo analizado durante este trabajo (de enero de 2003 a diciembre de 2013) sólo tienen lugar eventos moderados y débiles de El Niño / La Niña.

2.3 Imágenes SST

2.3.1 Productos SST utilizados

Para este trabajo se han utilizado imágenes satelitales de SST proporcionadas por Remote Sensing System (OI SST product; www.ssmi.com) que combina observaciones satelitales tomadas mediante sensores microondas e infrarrojos.

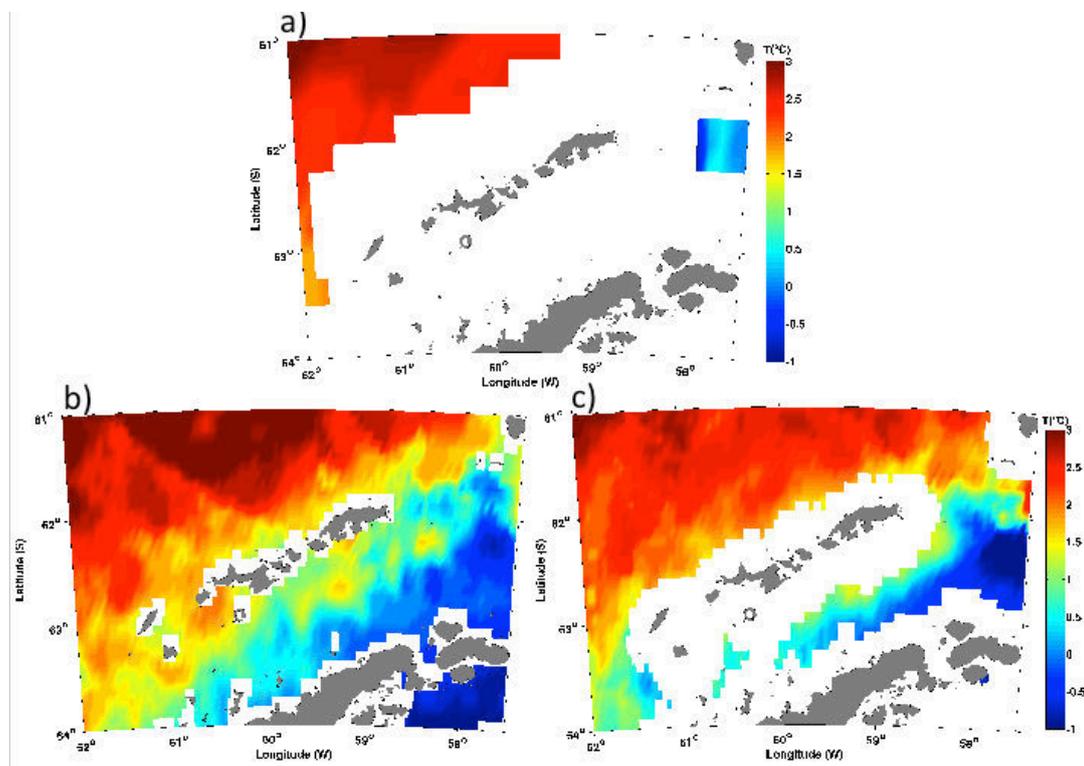


Figura 2.7: Observaciones satelitales correspondientes al 15 de abril del 2006 en el área de estudio dónde a) utiliza sólo sensor microondas, b) OI SST product versión “V03.0” y c) OI SST product versión “V04.0”.

Los sensores microondas tienen la capacidad de traspasar la cobertura de nubes, pero sus radiómetros son de baja resolución (25 km), impidiendo

resolver estructuras mesoescalares o señales frontales en la zona de estudio (Figura 2.7a). En cambio los radiómetros infrarrojos tienen alta resolución espacial, pero no puede atravesar la cobertura nubosa (Wentz *et al.*, 2000), lo que genera sesgos en la información. La combinación de ambos sensores permite disponer de datos a una resolución temporal diaria y una resolución espacial de 9 km. Para ello, este producto entrega en sus imágenes el resultado de las interpolaciones de datos que provienen de diferentes satélites (TMI, AMSR-E, WinsSAT, Terra MODIS, Aqua MODIS), de manera que la información obtenida tiene una cobertura espacial de 4096 x 2048 puntos cubriendo la tierra en su totalidad, con una resolución espacial de 9 km (Figura 2.7b). Esta información es fiable y consistente con una adecuada resolución espacial y temporal (Reynolds *et al.*, 2005).

Los archivos diarios de SST utilizados en este trabajo corresponden a 2 versiones de OI SST product:

- La versión “V03.0”, que debido a su resolución costera, es ideal para identificar todas las estructuras superficiales del BCS en las diferentes variantes estacionales de su señal (Figura 2.7b) Esta versión sólo está disponible desde enero de 2006 a diciembre de 2011, por lo que no sería adecuada para análisis temporales a mayor escala.
- La versión “V04.0” abarca un mayor espacio temporal (2003-2013), no obstante con ella se pierde resolución en la zona de estudio (Figura 2.7b). Esta versión se puede utilizar en la región de estudio para intentar analizar la influencia de variaciones climáticas en las proximidades de SSI en escalas temporales mayores de las que permite V03.0, pero en zonas más alejadas de la costa.

Los datos de ambas versiones fueron visualizados utilizando el archivo de lectura entregado en la misma base de datos de donde fueron extraídas las imágenes de satélite, www.ssmi.com.

2.3.2 Tratamiento realizado a las imágenes de SST

2.3.2.1 Extracción de las imágenes

Los archivos de SST de este producto, son datos binarios que constan de tres conjuntos de datos de 2 dimensiones:

- Valor de SST para un día determinado.
- Estimación del error en la interpolación.
- Información del dato enmascarado.

Dentro de esta matriz de datos se identifican valores específicos que sobrepasan los espectros de temperatura (datos enmascarados) y que corresponden a zonas donde existe hielo marino, pérdida de datos o tierra, con los códigos que se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2: Valores específicos que no corresponde a valores de SST.

Código	Significado
252	Hielo marino
254	Sin dato
255	Masa terrestre

La base de datos se organiza en una matriz de 4096 columnas y 2048 filas, con el primer dato centrado en 0.044°E y 89.956°S (-89.956°). A partir de esta posición inicial se localiza el rango celdas en las que se encuentra la región de estudio teniendo en cuenta que:

$$longitud(^{\circ}) = dx x_{cell} - \frac{dx}{2} \quad ; \quad latitud(^{\circ}) = dy y_{cell} - \left(90 + \frac{dy}{2} \right)$$

donde, $dx = \frac{360}{4096}$, $dy = \frac{180}{2048}$, x_{cell} e y_{cell} son respectivamente la columna y la fila de la matriz de datos en la que se encuentran la longitud y la latitud solicitada. Así se obtiene el rango de celdas en las que se encuentra la región de estudio.

El conjunto de datos de SST utilizado en esta tesis fue construido a partir de los datos diarios entregados en ambas versiones de OI SST product, con el fin de tener una serie de tiempo diaria y consistente, con la que poder realizar una estimación de distribución característica de SST alrededor de las SSI, y una identificación de los patrones espacio-temporales de la variabilidad y conexiones existentes. Se utilizaron algoritmos estándares en el tratamiento de las imágenes de temperatura resumidos por Wentz *et al.* (2000), que eliminan los pixeles defectuosos, valores nulos y los pixeles que exceden (alto/bajo) los valores previos a nuestro análisis.

Diferentes autores han comprobado que esta base de datos es idónea y coherente para realizar trabajos de desarrollo científico, destacando que esta información es apta para el empleo de la SST como medio de investigación (Jiang *et al.*, 2005, Iwasaki *et al.*, 2008) y que, de acuerdo a los objetivos y características de la zona de estudio, esta base de datos es apta para cubrir los objetivos de esta tesis

2.3.2.2 *Diagramas de Hovmöller*

Para analizar la variabilidad temporal en determinadas zonas alrededor de las SSI y relacionar esta información con la información oceanográfica disponible, se construyen dos transectos eligiendo celdas de datos SST alineadas en dirección norte-sur, lo más próximas posible a transectos hidrográficos realizados alrededor de SSI.

En estos transectos se han obtenido diagramas de Hovmöller. Estos diagramas se utilizan habitualmente para analizar la variabilidad temporal de algún parámetro en una determinada región. Aunque típicamente uno de los ejes suele representar la latitud o longitud de los puntos estudiados y el otro eje el tiempo, en este caso, la inclinación de los transectos hace que en el eje vertical del diagrama represente la distancia respecto a la primera estación del transecto, mientras que el eje horizontal se muestre el tiempo. En el Capítulo 3 se explicará en más detalle su aplicación en la región de estudio.

2.3.2.3 Gradientes de SST

Uno de los métodos más habituales a la hora de estudiar la variabilidad espacial de SST es obtener los gradientes de SST. Utilizando un criterio similar a Dong *et al.* (2006b), se analizan en este trabajo variaciones espaciales horizontales de la temperatura a partir del módulo del gradiente de SST, definido como:

$$|\nabla T| = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)^2}$$

donde T es la temperatura obtenida a partir de los datos de SST y las direcciones x e y las zonales y meridionales respectivamente. Con este análisis de variabilidad espacial se podrán identificar frentes que luego se podrán relacionar con zonas frontales asociadas al Sistema de Corrientes de Bransfield.

Además de trabajar con el módulo del gradiente en toda la región de estudio, se ha calculado el gradiente de SST de la media diaria del periodo 2006-2011 a lo largo de los transectos elegidos para realizar el diagrama de Hovmöller. Una vez obtenidos estos gradientes, se han realizado también diagramas de Hovmöller de dichos gradientes, que también serán analizados en el Capítulo 3.

2.3.2.4 Anomalía de SST

Con el fin de comparar el valor medio de la señal mensual de SST en el periodo 2003-2013 para el píxel correspondiente a cada frente hidrográfico y de este modo representar su variación respecto al valor medio durante el periodo de estudio, a los datos de SST se les calcula su anomalía de temperatura (SSTA).

$$SSTA = SST - \overline{SST}$$

,dónde SST corresponde al valor mensual de SST y \overline{SST} corresponde a la media total entre los años 2003 y 2013.

2.3.2.5 Correlación de SST

Para cuantificar la intensidad de relación lineal entre las dos señales de los frentes hidrográficos en el periodo de estudio, se aplicó el coeficiente de correlación lineal de Pearson (r), cuyo valor oscila entre -1 y 1.

$$r = \frac{Cov(X,Y)}{S_x S_y} = \frac{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X}) * (Y_t - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2} * \sqrt{\sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2}}$$

dónde x e y son los valores de las dos señales que se quieren comparar. Si el coeficiente r se aproxima a 1, la correlación es lineal y directa y si r se aproxima a -1 la correlación tiende a ser linealmente inversa

2.3.2.6 Transformada de Wavelet

La transformada Wavelet es un análisis de procesos no estacionarios y que involucran diversas escalas de variabilidad. Se trata de funciones que transforman una serie temporal en una nueva variable que depende del tiempo y la frecuencia. Aunque es cierto que el análisis de Fourier es una opción tradicional, éste no puede discriminar si la periodicidad ha sido continua o no durante todo el periodo de estudio. En cambio, la transformada Wavelet, al expandir la serie temporal en una nueva serie que depende del tiempo y la frecuencia, permite localizar periodicidades intermitentes y el momento en donde estuvieron activas.

En el cálculo de la transformada de Wavelet se utiliza un onda madre y dentro de la literatura la onda madre más utilizada en estudios similares al de este trabajo es la onda “Morlet”, que consiste en una onda plana, modulada por una gaussiana, y que se define como:

$$\Psi_o(\eta) = \pi^{-\frac{1}{4}} e^{i\omega_o \eta} e^{-\left(\frac{1}{2}\right)\eta^2}$$

donde, ω_o es la frecuencia (adimensional) y η es el tiempo (adimensional). ω_o se relaciona con la escala de tiempo deseada, o sea, a mayor valor de ω_o , mayor será la resolución de la frecuencia que domina, pero menor será la

resolución temporal, por lo mismo se considera que un $\omega_0=6$ es un valor adecuado para un equilibrio entre ambas escalas (Grisnted *et al.*, 2004).

Para que la escala de la transformada Wavelet sea comparable, se aplica una normalización a esta onda madre. En el caso de una transformada Wavelet discreta, la onda madre normalizada tiene la expresión:

$$\Psi \left[(n'-n) \frac{\delta t}{s} \right] = \left(\frac{\delta t}{s} \right)^{\frac{1}{2}} \Psi_0 \left[(n'-n) \frac{\delta t}{s} \right]$$

donde s es el cuantificación para cambiar de escala y n es el parámetro de traslación.

Como se trabaja con una serie temporal constante, se define transformada de Wavelet $W_n(s)$ al producto interno de la función Wavelet con la serie temporal original,

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} X_{n'} \Psi^* \left[(n'-n) \frac{\delta t}{s} \right]$$

donde el asterisco expresa el complejo conjugado

El espectro de energía (EEW), es la potencia relativa a una escala y tiempo determinado, permitiéndonos visualizar a través de su representación gráfica las oscilaciones predominantes en las series de SST a diferentes escalas y periodos y se define como:

$$EEW_n(s) = |W_n(s)|^2$$

Un cono de influencia delimita las zonas que presentan efectos de borde, que por lo general se observan en los extremos de la serie.

Este análisis Wavelet se va a aplicar a series de SST para identificar las diferentes escalas de variabilidad temporal y la posible relación con variabilidad interanuales que se han observado en la región tales como la influencia del ENSO.

2.3.3 Finalidad de los datos SST

- Imágenes satelitales versión “V03.0” OI SST product.

Por su alta resolución próxima a costa se han utilizado cerca de 2200 imágenes de satélite de SST de la versión “V03.0” OI SST product, con resolución diaria, correspondientes al periodo 2006-2011, entre los 61° y 64°S y entre los 57° y 62°W, cubriendo: el Estrecho de Bransfield y sus conexiones con el Mar de Bellingshausen y el Mar de Weddell; SSI; y la parte sur del Paso Drake. La resolución espacial de este producto es cercana al radio de deformación de Rossby para la región ($1 R_d \approx 10 \text{ km}$; Chelton *et al.*, 1998), por lo que es capaz de resolver la dinámica mesoescalar en la zona de estudio.

Se utilizarán estas imágenes para describir la distribución de SST característica alrededor de las SSI en diferentes escalas temporales; relacionar esta distribución con el Sistema de Corrientes de Bransfield; e identificar patrones al norte de SSI que permitan despejar dudas acerca del comportamiento de la Corriente de Bransfield como una corriente de gravedad de descarga.

- Imágenes satelitales versión “V04.0” OI SST product.

Aunque la resolución de este producto próxima a costa es peor que la versión “V03.0” (Figura 2.7), la longitud de la serie temporal es mucho mayor que la del producto anterior. Por ello, una vez identificadas las posiciones medias de los píxeles que corresponden a los frentes hidrográficos, se han procesado cerca de 4000 imágenes satelitales correspondientes a la versión “V04.0” OI SST product con el fin de poder determinar en un periodo de 11 años como factores climáticos pueden afectar a la distribución SST en la zona. Para dicho análisis se ha utilizado un análisis Wavelet.

El análisis Wavelet se realizó para la señal de los dos frentes hidrográficos superficiales detectados en el Sistema de Bransfield, considerándose la serie temporal desde el 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013, las cuales se promediaron cada 15 días siguiendo la

metodología propuesta por Torrence y Compo (1998) con el fin de identificar las oscilaciones más significativas y poder comparar sus apariciones con la presencia del Fenómeno El Niño / La Niña y cómo esto afecta a la señal de dichas estructuras.

Capítulo 3

Temperatura superficial del mar alrededor de las SSI

En este capítulo se realizará un análisis de la distribución y variabilidad de la SST alrededor de las SSI con una resolución espacio-temporal no realizada hasta el momento en los estudios de la zona consultados. Para esto se utilizaron observaciones satelitales diarias entre el 1 de enero del 2006 hasta el 31 de diciembre del 2011, con una resolución espacial de 9 km en la versión V03.0 del producto OI SST, cuyas características ya han sido comentadas en el Capítulo 2.

Dada la falta de estudios previos de este tipo, se realizaron promedios a distintas escalas temporales para analizar las estructuras más persistentes en la región. La mayor parte de las descripciones presentadas en este capítulo están realizadas sobre lo que se denominará año promedio. Este año promedio es una distribución diaria obtenida promediando, en cada celda, los datos de SST del día en cuestión desde el año 2006 hasta el año 2011. Esta distribución suavizada, en la que se eliminan las variaciones interanuales, es la utilizada para describir la distribución de la SST alrededor de las SSI (Sección 3.1) y en la que se ha estudiado la variabilidad espacio-temporal de la misma a distintas

escalas intra-anales (Secciones 3.2 a 3.5). En la Sección 3.6 se sintetizan los rasgos más notables de la distribución de SST alrededor de SSI.

3.1 Distribución anual promedio.

Como primer acercamiento a la variabilidad de la SST, se representa la distribución media de la SST obtenida a partir del promedio de la SST en la región de estudio entre el 1 de enero del 2006 y el 31 de diciembre del 2011 (Figura 3.1).

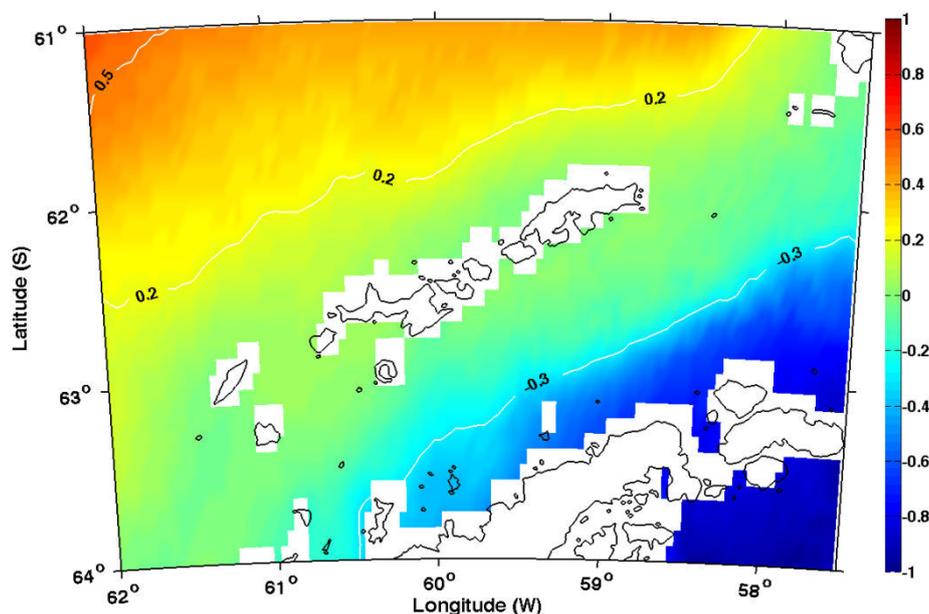


Figura 3.1: Distribución media de SST para un año promedio. En blanco se señala la posición de las isoterma -0.3° , 0.2° y 0.5° °C.

La Figura 3.1 entrega una primera visión de las características más importantes que se presentan alrededor de las SSI. Debido a que la variación de SST en la zona de estudio es tan amplia durante el año, el promedio general resultante presenta rangos de temperatura inferiores a los registros de temperatura superficial obtenidos en campañas oceanográficas realizadas en la región durante el verano austral, especialmente alrededor de las SSI y en el Paso Drake.

En la distribución superficial de la SST se observa un aumento de temperatura en sentido meridional con una distribución en bandas paralela a las SSI, localizándose el rango de temperaturas más bajas ($T < -0.2^{\circ}\text{C}$) en el extremo suroeste de la zona de estudio, sector que está directamente influenciado por las aguas provenientes del Mar de Weddell, específicamente, sobre la plataforma oeste de la Península Antártica y hasta el Estrecho de Gerlache. En cambio, en el extremo noroeste de la Figura 3.1, se observan los mayores registros de SST promedio ($T > 0.5^{\circ}\text{C}$), los cuales se asocian a la presencia de aguas relativamente cálidas pertenecientes al Paso Drake.

En el Estrecho de Bransfield se observa una clara estructura frontal que separa las frías aguas que se encuentran al sur del Estrecho ($T > 0.5^{\circ}\text{C}$) de las aguas relativamente más cálidas de la sección norte del estrecho. El rango de temperatura que presentan estas aguas es similar al observado sobre la plataforma norte de las SSI, en el Estrecho de Boyd, en el Estrecho de Gerlache y en las aguas que provienen del Mar de Bellingshausen.

Finalmente, entre la plataforma norte de las SSI y el Paso Drake se observa un segundo frente hidrográfico, el cual separa las aguas cálidas del Paso Drake de las que están más al sur. Este frente se sitúa en la misma ubicación que se le da a BdyACC y al CWB (García *et al.*, 2002; Tomzack y Godfrey 2013) descritos en el Capítulo 1.

La forma de esta distribución de SST en el Estrecho de Bransfield es similar a la obtenida durante el verano austral a través de datos hidrográficos (Figura 1.5), aunque los valores de temperatura durante esa época son mucho mayores que los mostrados en esta distribución promedio. Todo ello indica que a pesar de la alta variabilidad temporal y espacial de la zona, esta tipo de distribución es dominante.

3.2 Distribución mensual promedio.

Las condiciones climáticas extremas que se dan en las altas latitudes son responsables de la alta variabilidad a la que está sometida el área de estudio. Para entender el motivo por el cual en la imagen anual promedio de la SST (Figura 3.1) aparecen patrones similares a los obtenidos durante un mes de campaña oceanográfica en el verano austral, se analiza las distribuciones mensuales promedio, obtenidas de las distribuciones diarias en el año promedio, que se muestran de la Figura 3.2 a la Figura 3.5. En todas ellas se utiliza una única escala de color acorde a los valores extremos obtenidos en la distribución de SST para la región.

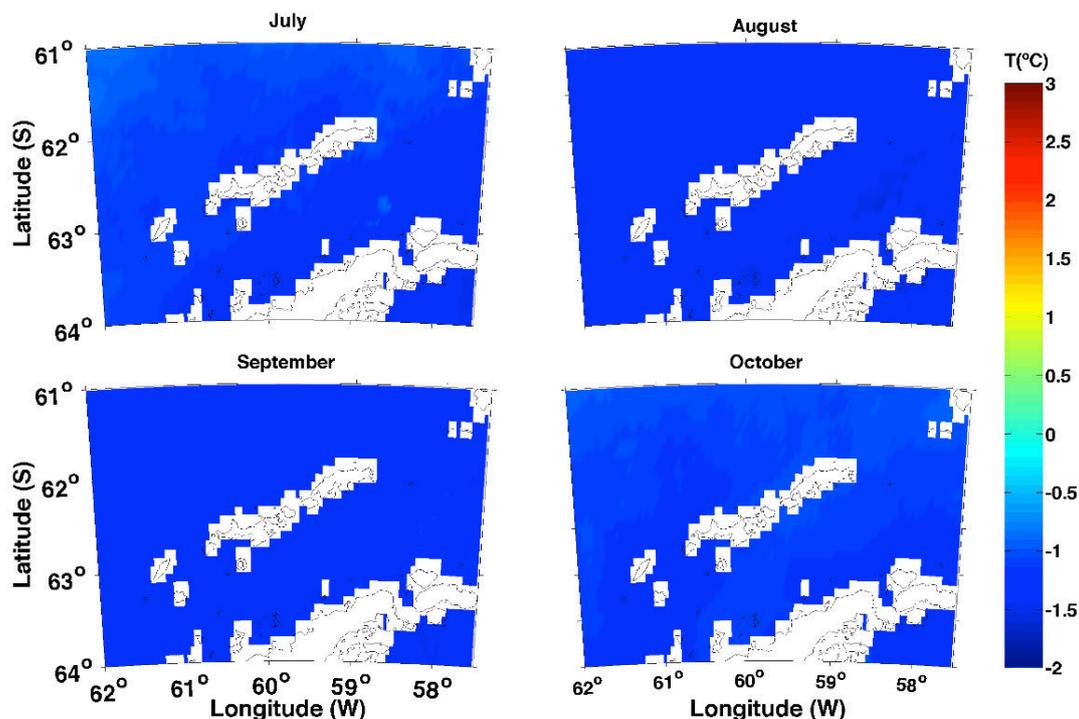


Figura 3.2: Distribución de la SST media para los meses de julio, agosto, septiembre y octubre entre los años 2006 y 2011.

Desde julio hasta octubre (Figura 3.2), la variabilidad de la SST es prácticamente nula, con registros de agua muy fría (menores a 0°C) y una distribución altamente homogénea. Esta uniformidad superficial es característica del Agua Invernal, agua típica en zonas donde existe la formación de la plataforma de hielo marino (Sievers y Nowlin, 1984; Zhou *et al*

2013). Los patrones de la Figura 3.1 no muestran similitud alguna con el comportamiento observado en la zona durante estos 4 meses, aunque sí parecen conservarse las características del Mar de Weddell, en el extremo suroriental de la zona.

En noviembre se registran valores promedios de -0.5° a 0°C (Figura 3.3a) debido a que agua algo más cálida procedente del Paso Drake comienza a avanzar hacia el Estrecho de Bransfield, dejando restringidas las aguas más frías a la plataforma norte de la Península Antártica. En diciembre (Figura 3.3b), el aumento de la insolación sobre la región hace que la temperatura promedio aumente en 1°C , aumento notable teniendo en cuenta los rangos de temperaturas propias de la región. El frente hidrográfico que empieza a aparecer en noviembre, coincide con el límite superficial de influencia del Mar de Weddell en el Estrecho de Bransfield, y se mantiene e intensifica en Diciembre (Figura 3.3b, isoterma de 0°C). Este frente sí aparece en la imagen anual promedio de la Figura 3.1

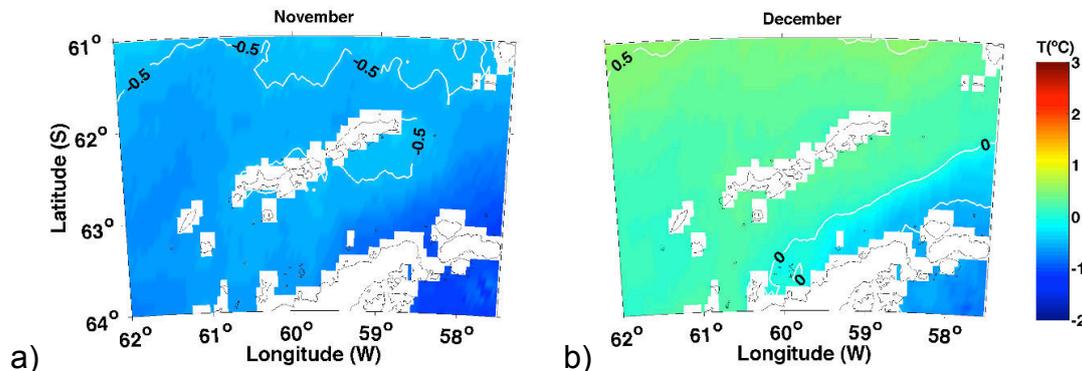


Figura 3.3: Distribución de la SST media en los meses de noviembre (a) y diciembre (b), entre los años 2006 y 2011. En blanco se señala la posición de las isothermas -0.5° , 0°C y 0.5°C .

A partir de enero (Figura 3.4a) la insolación estival hace que la temperatura superficial vaya aumentando de forma más notoria. No obstante, este aumento no es uniforme y aparece una importante variabilidad espacial, mostrando un patrón a bandas similar al descrito en la Figura 3.1, con las

zonas más cálidas próximas al Paso Drake, las más frías próximas a la Península Antártica y con temperaturas intermedias alrededor de las SSI.

En enero el agua cálida sigue avanzando hacia latitudes mayores, ocupando cada vez un área mayor en el Estrecho de Bransfield, limitando el agua fría proveniente del mar de Weddell al extremo de la Península Antártica próxima a la cuenca oriental del Estrecho, señalada en la Figura 3.4 por las isotermas 0 y 0.5°C. En el Paso Drake la temperatura es próxima a 2°C, mientras que BdyACC-CBW se identifica con la isoterma de 1.5°C. El agua procedente del mar de Bellighausen tiene características similares a las aguas que rodean a las SSI, e incluso a la que se observan entre SSI e Isla Elefante, con temperaturas entre 0.5 y 1.5°C.

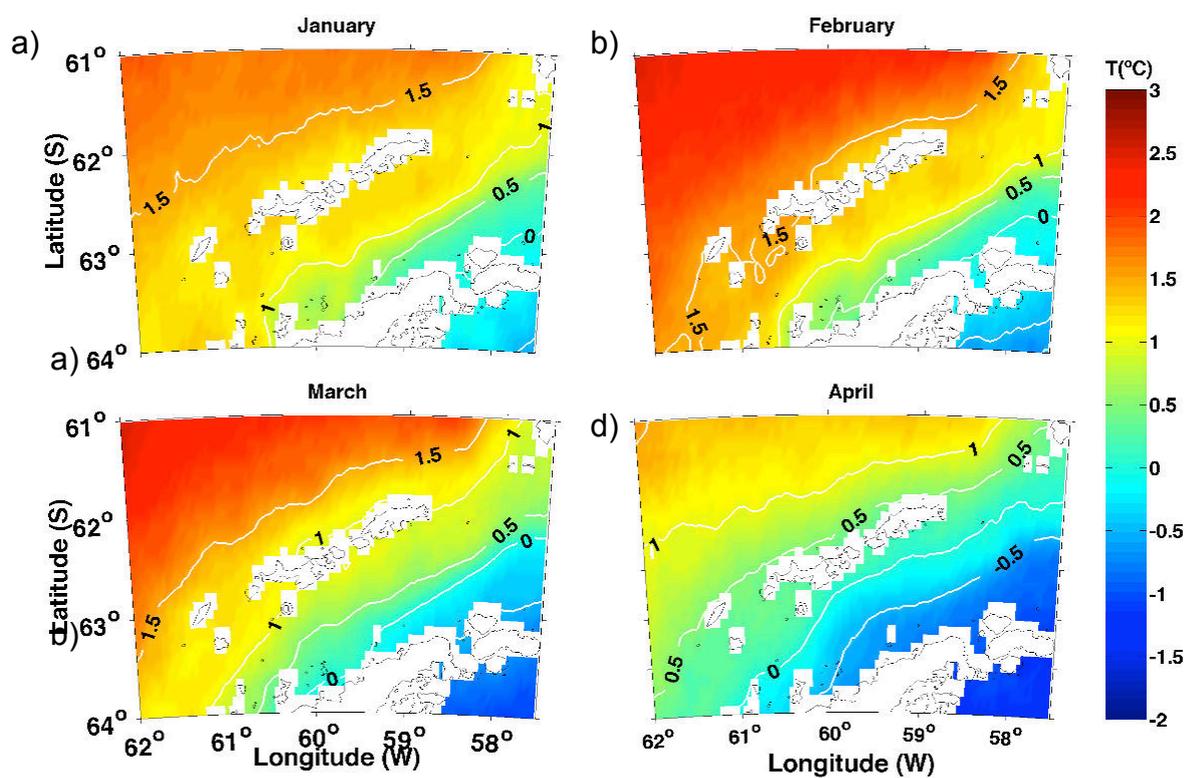


Figura 3.4: Distribución de la SST media para los meses de enero (a), febrero (b), marzo (c) y abril (d), entre 2006 y 2011. En blanco se señala la posición de las isotermas -0.5°, 0°, 0.5°, 1.0° y 1.5 °C.

En la imagen mensual promedio del mes de febrero (Figura 3.4b), la temperatura en las zonas próximas al Paso Drake alcanzan los 2.5°C. El agua más fría sigue restringida en la parte sur del Estrecho de Bransfield, especialmente en las cuencas Central y Oriental, próximas a la plataforma de la Península Antártica. El agua cálida del Paso Drake llega a su máxima posición latitudinal, quedándose al norte de las SSI, mientras que en el margen occidental llega más al sur, sin cubrir la Cuenca Oeste de Bransfield, ni el Estrecho de Boyd. En el mes de febrero se observa que a pesar de ser momento de máxima expansión del agua procedente del Paso Drake, el Estrecho de Bransfield queda protegido de su llegada directa, posiblemente debido a la somera batimetría en la cuenca oeste ya indicada en el Capítulo 1. Por lo tanto, el agua que ocupa la mayor parte de Estrecho de Bransfield posiblemente provenga de aguas del Mar de Bellingshausen, el cual, ingresa a esta región a través de estrechos y pasos entre islas muy próximos a la Península Antártica, cuyo punto de entrada en la región de estudio sería el Estrecho de Gerlache.

Resulta significativo para los objetivos de este trabajo que, a pesar de la máxima extensión hacia sur del agua correspondiente al Paso Drake, entre las SSI e Isla Elefante, y en el talud norte las islas más orientales de las SSI se observe agua de características similares a las del Estrecho de Bransfield. Esto nos da el primer indicio que las aguas del Estrecho de Bransfield podrían estar recirculando alrededor de las SSI, incorporándose por el Estrecho de Boyd, bloqueando la llegada de aguas más cálidas provenientes del norte. Como puede verse en esta imagen promedio, las aguas de temperaturas comprendidas entre 0.5 y 1.5°C están presentes en una estrecha franja que cubre gran parte del Estrecho de Bransfield y parte de la plataforma norte de las SSI. De hecho, en el Estrecho de Bransfield la temperatura supera levemente los 1°C, a excepción de las aguas aledañas a la Península Antártica, registros que coinciden con estudios realizados en ese periodo de tiempo por otros autores (García *et al*, 1994; López *et al*, 1999; Vázquez *et al*, 2007).

En el mes de marzo (Figura 3.4c) la extensión de esta agua hacia el sur es menor, especialmente en el margen oeste de la región de estudio, aunque

las temperaturas en el Paso Drake siguen siendo similares a las del mes de febrero. Las aguas más frías avanzan hacia el norte, siempre próximas a la Península Antártica, hacia la cuenca oeste del Estrecho de Bransfield, llegando incluso al Estrecho de Gerlache. Este hecho posiblemente limita la llegada del agua de Bellingshausen al talud sur de las SSI y empieza a observarse en dicha zona agua con temperatura entre 0.5 y 1°C. No obstante, entre las SSI e Isla Elefante y en la plataforma norte de las SSI sigue observándose agua con temperaturas entre 1 y 1.5°C similares a las que se presentan durante el mes de febrero en el Estrecho de Bransfield.

En el mes de abril (Figura 3.4d), la temperatura en toda el área de estudio ha disminuido 0.5°C. El agua más fría procedente del Mar de Weddell consigue ocupar la mayor parte del Estrecho de Bransfield con temperaturas entre -0.5 y 0°C. Alrededor de las SSI el agua presenta temperaturas entre 0 y 0.5°C. A pesar de todo ello, aún hay una alta variabilidad espacial, con patrones a bandas y marcadas diferencias entre las aguas muy frías en el margen suroriental y las aguas relativamente más cálidas en el extremo noroccidental.

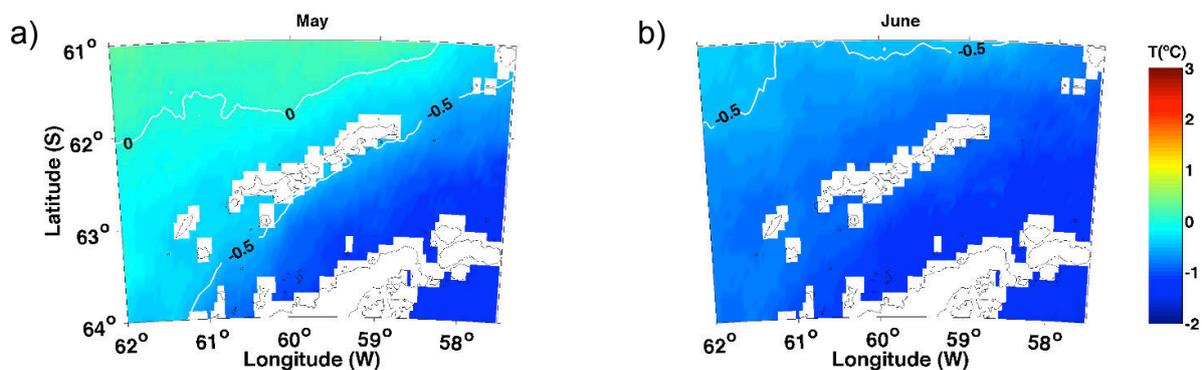


Figura 3.5: Distribución de la SST media en los meses de mayo (a) y junio (b), entre 2006 y 2011. En blanco se señala la posición de las isoterms -0.5°, 0° y 0.5°C.

En el mes de mayo (Figura 3.5a), el enfriamiento es más evidente y las temperaturas superficiales son cercanas a 0°C, presentando cierta variabilidad espacial, especialmente en el margen norte de la región de estudio. El agua

procedente del Mar de Weddell ocupa superficialmente casi todo el Estrecho de Bransfield. En el mes de junio (Figura 3.5b) las temperaturas descienden a valores menores a 0°C, en una situación próxima a la homogenización superficial de la temperatura, que llegará en julio (Figura 3.2a).

Por tanto, el patrón a bandas que aparece entre enero y abril (Figura 3.4) es tan intenso que se marca en el promedio anual (Figura 3.1), aunque con temperaturas mucho más baja debido a la bajas y homogéneas desde julio hasta noviembre.

3.3 Periodos climáticos y distribución estacional media.

El análisis del comportamiento mensual medio demuestra la alta variabilidad temporal de las estructuras y dinámicas que se desarrollan en el Estrecho de Bransfield y alrededor de las SSI, pasando de épocas con aguas muy frías, en las que se observa una alta homogenización superficial, a épocas con aguas relativamente más cálidas y una alta heterogeneidad superficial, con la presencia clara de frentes térmicos. Éste debe ser un comportamiento recurrente en la región, dado que tiene una señal muy clara en el promedio mensual que se ha realizado considerando un periodo de 6 años, entre 2006 y 2011.

El patrón mensual discutido en el apartado anterior, en el que se ha tenido en cuenta la distribución de SST y la variabilidad espacial observada, permite elegir 4 periodos climáticos a lo largo del año, que son los que se utilizarán durante esta tesis. Estos periodos son:

- **Periodo frío**, al que denominaremos en la tesis **Invierno Austral**, y que comprende los meses de julio, agosto, septiembre y octubre.
- **Período cálido**, al que denominaremos en la tesis **Verano Austral**, y que comprende los meses de enero, febrero, marzo y abril.

- **Período de transición invierno-verano**, al que denominaremos *Primavera Austral*, y que comprende los meses de noviembre y diciembre.
- **Período de transición verano-invierno**, al que denominaremos *Otoño Austral*, y que comprende los meses de mayo y junio.

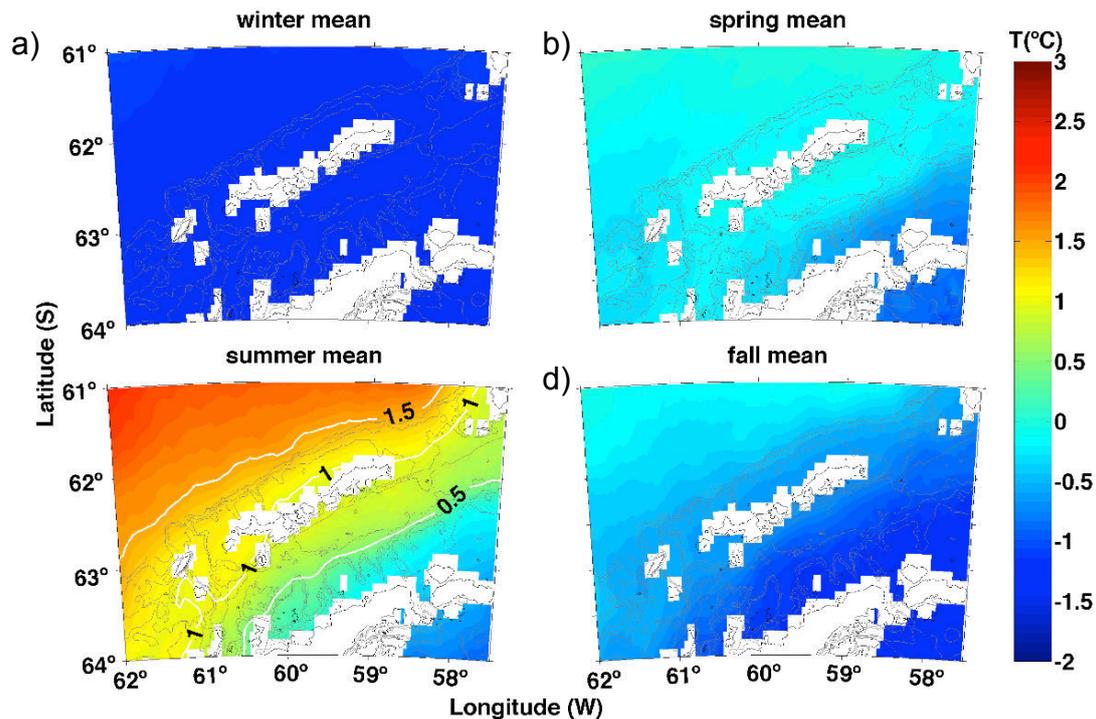


Figura 3.6: Distribución media SST de invierno (a), primavera (b), verano (c) y otoño (d) entre los años 2006 y 2011. Estas imágenes promedio se han realizado considerando la identificación de periodos que se indica en el texto. En blanco se señala la posición de las isotermas 0.5°, 1.0° y 1.5 °C.

Los patrones característicos de estos cuatro periodos se muestran en la Figura 3.6. Además, se ha calculado el módulo del gradiente de SST en las imágenes estacionales promedio, para cuantificar la variabilidad espacial, siguiendo el procedimiento explicado en el Capítulo 2. El módulo del gradiente únicamente se refiere a variaciones espaciales de la SST, de manera que regiones con altas temperaturas pero uniformemente distribuidas darán valores bajos o nulos del módulo del gradiente de SST. Los valores altos en la Figura 3.7, marcan la posición de los frentes térmicos y el módulo de gradiente de

SST máximo es de $0.14^{\circ}\text{C}/\text{km}$. La forma de determinar el módulo del gradiente hace que estas imágenes presenten un área blanqueada alrededor de la costa mayor que las imágenes de distribución de SST.

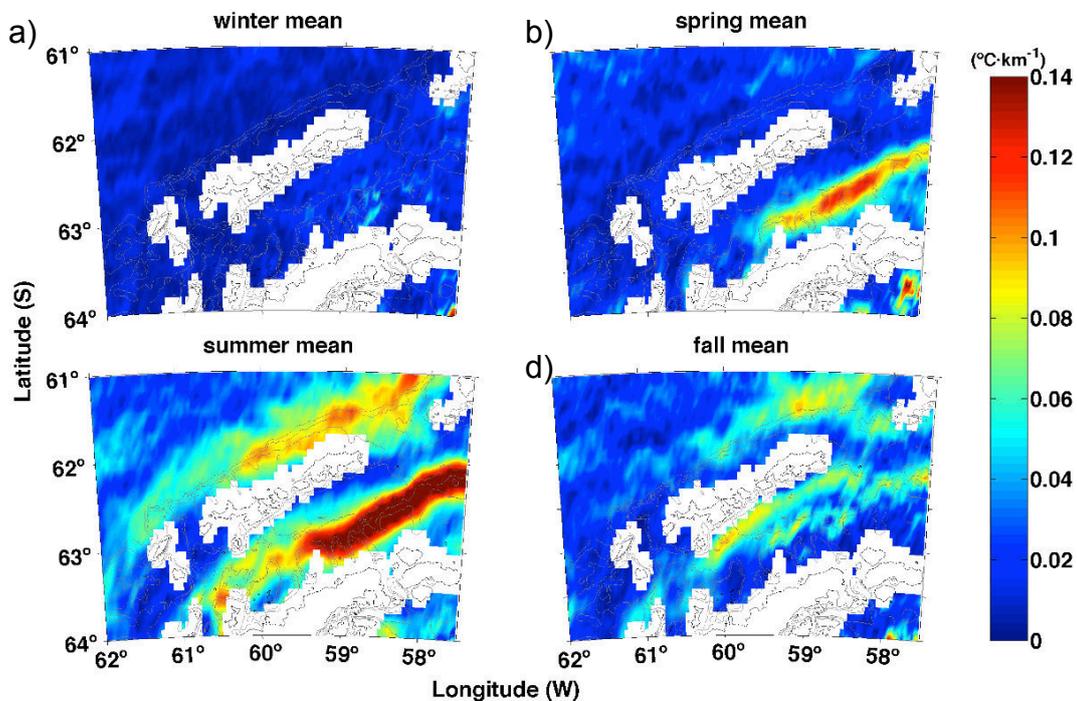


Figura 3.7: Distribución media del módulo del gradiente SST durante el invierno (a), primavera (b), verano(c) y otoño (d), entre los años 2006 y 2011.

Durante el Invierno Austral (periodo frío - Figura 3.6a), que siguiendo el criterio establecido, cubre los meses de julio, agosto, septiembre y octubre, se presenta una temperatura promedio de -1.5°C , con una aparentemente alta homogeneidad horizontal en toda la zona de estudio. Esta homogeneidad queda clara en la Figura 3.7a, en la que los valores del módulo del gradiente son próximos a 0. Así puede decirse, que durante el Invierno Austral la temperatura media está en torno a los -1.5°C y no se observa superficialmente ninguna estructura térmica.

Durante la Primavera Austral (Figura 3.6b), la insolación empieza a aumentar y aparecen los primeros indicios del calentamiento superficial. En la zona norte de las SSI la temperatura está entre los 0° y 0.5°C y no es observa,

a priori, diferencia con la temperatura de las aguas en el talud sur de SSI. No obstante, en la zona suroriental del Estrecho de Bransfield, próxima al Mar de Weddell permanecen las aguas más frías. A pesar de la pequeña diferencia de temperaturas, dado que el calentamiento aún es mínimo, la señal en el módulo del gradiente de SST es clara (Figura 3.7b), indicando la presencia de un frente térmico entre las aguas superficiales pertenecientes al Estrecho de Bransfield y las provenientes del Mar de Weddell.

Durante el Verano Austral, cuando la insolación es prácticamente continua, se alcanzan las mayores temperaturas en la región (Figura 3.6), pero las restricciones batimétricas al oeste del Estrecho de Bransfield, al norte de las SSI, así como la proximidad del Mar de Weddell por el sur, impiden a las aguas más cálidas del Paso Drake invadir la región de estudio al completo. En el Estrecho de Bransfield se presentan temperaturas medias menores a 1°C y al norte del archipiélago las temperaturas son superiores a 1°C (Figura 3.6c). El módulo del gradiente (Figura 3.7c) muestra la presencia de dichas estructuras frontales, con una intensificación del frente térmico en el Estrecho de Bransfield. Trabajos hidrográficos en la zona realizados durante el Verano Austral describieron dicho frente térmico entre las aguas procedentes del mar de Bellingshausen y aguas procedentes del Mar de Weddell, denominándolo Frente Peninsular (Sangrà *et al.*, 2011). La variabilidad descrita durante los meses del verano en la sección anterior y mostrada en la Figura 3.4, es la que permite asociar los altos valores del módulo del gradiente que aparecen en la Cuenca Oeste del Estrecho del Bransfield (Figura 1.1, WB), y que llegan hasta del Estrecho del Gerlache, con el desplazamiento del Frente Peninsular hacia el oeste, acercándose cada vez más al eje del estrecho y a las SSI a medida que avanza el verano.

Sobre la plataforma y talud norte de las SSI, especialmente en las islas orientales y centrales del archipiélago, y al norte del paso entre la Isla Rey Jorge e Isla Elefante, aparece también una zona de altos valores del módulo del gradiente (Figura 3.7c). Su ubicación coincide con la posición de máximo acercamiento de la isoterma 1.5°C durante el mes de febrero (Figura 3.4b). Este frente ha sido denominado por García-Muñoz *et al.* (2013) y por Sangrà *et*

al. (2015) como Frente de las Shetland, que puede coincidir con la posición del BydCC-CBW, pero que en la región de estudio ha sido diferenciado por delimitar la posición más septentrional de las aguas TBW que circulaban por el Estrecho de Bransfield.

Durante el Otoño Austral la insolación va disminuyendo, con la consiguiente disminución de la SST en toda la región de estudio (Figura 3.6d), de manera que se presenta una aparente homogenización al norte de SSI y la invasión del agua procedente del Mar de Weddell sobre gran parte de Estrecho de Bransfield. Las temperaturas en ambos lados del archipiélago disminuyen a valores medios cercanos a los 0°C. Las estructuras frontales que aparecían en el módulo del gradiente durante el verano se hacen menos nítidas (Figura 3.7d), lo que demuestra que el sistema, cada vez más frío, se está homogeneizando, aunque aún sin lograrlo fehacientemente, al menos en la imagen promedio, siguen presentes.

De la misma manera que fue necesario un estudio mes a mes para conocer en qué época aparecía realmente la estructura a bandas observada de la distribución media anual de la SST, establecer el momento de la aparición de estructuras frontales tales como el Frente Peninsular o el Frente de las Shetland a partir del módulo del gradiente medio por periodos climáticos puede llevar a confusión. Dadas las bajas temperaturas y una mayor homogenización durante el mes de noviembre, la imagen promedio de la SST y del módulo del gradiente de SST durante la Primavera Austral está más condicionada por lo que haya ocurrido durante algunas semanas de diciembre que por el conjunto de los dos meses de este periodo, de manera que la señal del Frente Peninsular que aparecía durante la primavera (Figura 3.7b) podría no ser una característica propia de todo este periodo. De la misma forma, los frentes que aún aparecen en el módulo del gradiente durante el promedio de otoño (Figura 3.7d) podrían corresponder a una presencia importante de los mismos durante algunas semanas de mayo (Figura 3.5a), ya que el enfriamiento y la homogenización durante el mes de junio afectaría en las estructuras remarcables del otoño.

Una vez conocidas las estructuras más importantes y sus periodos de observación, debemos realizar un estudio más pormenorizado de la distribución de SST durante los periodos de transición con el objetivo de identificar el momento de aparición y desaparición de los frentes térmicos que se muestran en los módulos de gradiente de SST.

3.4 Variabilidad espacio-temporal durante los periodos de transición.

En las secciones anteriores se ha puesto de manifiesto una variabilidad temporal de la SST de la región a escalas muy distintas dentro del año promedio. Durante los 4 meses del invierno la distribución mensual media (Figura 3.2) coincide con la distribución media para el invierno (Figura 3.6a) y el módulo del gradiente de SST tiene valores próximos a cero (Figura 3.7a), dando cuenta de la altísima homogeneidad superficial en la distribución de SST.

Durante los 2 meses de la Primavera Austral, la distribución mensual media cambia mucho (Figura 3.3). En noviembre, aunque el agua sigue registrando valores fríos, se pierde parte de la homogenización, pero en diciembre el agua ha aumentado en algunas partes su temperatura en casi 1°C y se hacen más notorios los frentes térmicos. Debido a las bajas temperaturas y a la aún importante homogeneidad de noviembre, la distribución promedio de la primavera está dominada por la distribución de diciembre (Figura 3.6b). Así, en la distribución del módulo del gradiente de SST de la primavera (Figura 3.7 b) aparece un frente térmico (Frente Peninsular) en la cuencas Centrales y Este del Estrecho de Bransfield (Figura 1.1, CB y EB) que apenas aparece en la distribución media de SST de noviembre (Figura 3.3a). Esto lleva a pensar que durante la primavera, la variabilidad media en la región ocurre a escalas temporales inferiores a un mes. En este caso es importante determinar el momento en el que aparece la señal del frente señalado en la imagen del módulo del gradiente de SST ya que puede corresponder con el Frente Peninsular y su aparición podría estar relacionada con el momento en el que se

establece el Sistema de la Corriente de Bransfield, definido por Sangrà *et al.* (2011). Para que coincida con el Frente Peninsular, el agua relativamente más cálida debe tener características de TBW.

Al obtener la media semanal de la SST durante el mes de diciembre y las dos primeras semanas de enero (Figura 3.8), se observa una variabilidad en aumento. Durante las dos primeras semanas del mes de diciembre, la distribución de SST es más homogénea, pero en la última quincena del mes de diciembre, su variabilidad espacial aumenta de una semana a otra, pareciéndose cada vez más a la estructura altamente variable que se presenta en el mes de enero (Figura 3.4a).

En la distribución semanal media de la Figura 3.8 se puede observar que durante el mes de diciembre hay semanalmente un aumento gradual de 0.5°C , asociado al aporte de calor desde la atmósfera. Este aumento no es uniforme y la alta variabilidad espacial que empieza a observarse en la segunda quincena de diciembre refleja patrones característicos de la dinámica que empieza a aparecer de forma superficial y sub-superficialmente en la región (Sangrà *et al.*, 2011). El Frente Peninsular, que se observa en las cuencas Central y Este del Estrecho de Bransfield, en puntos próximos a la Península Antártica, se va haciendo más notable a medida que el agua más cálida entra por el Estrecho de Gerlache y comienza a ocupar la Cuenca Oeste del Estrecho de Bransfield y el talud sur de las SSI. Esto sucede en las dos últimas semanas del mes de diciembre (Figura 3.8c y d), de manera que la clara señal mostrada en el módulo del gradiente para la Primavera Austral refleja una situación que se da únicamente en la última quincena de diciembre.

De igual manera, la imagen promedio del Otoño Austral (Figura 3.6d), aparece más influenciada por la distribución promedio del mes de mayo que por la del mes de junio (Figura 3.5). Esto es debido a que la imagen de mayo muestra una mayor heterogeneidad y temperaturas algo más altas. Dado que las temperaturas durante el otoño son más bajas, la diferencia de SST es más difícilmente observable. No obstante, el módulo del gradiente de SST del otoño (Figura 3.7d) muestra gradientes de cierta importancia en el talud sur de las

SSI y la plataforma y talud norte de la isla Rey Jorge y en el paso entre la isla Rey Jorge e isla Elefante. La variabilidad observada en el módulo del gradiente parece suceder en escalas inferiores a un mes, de forma inversa a como sucede en el mes de diciembre.

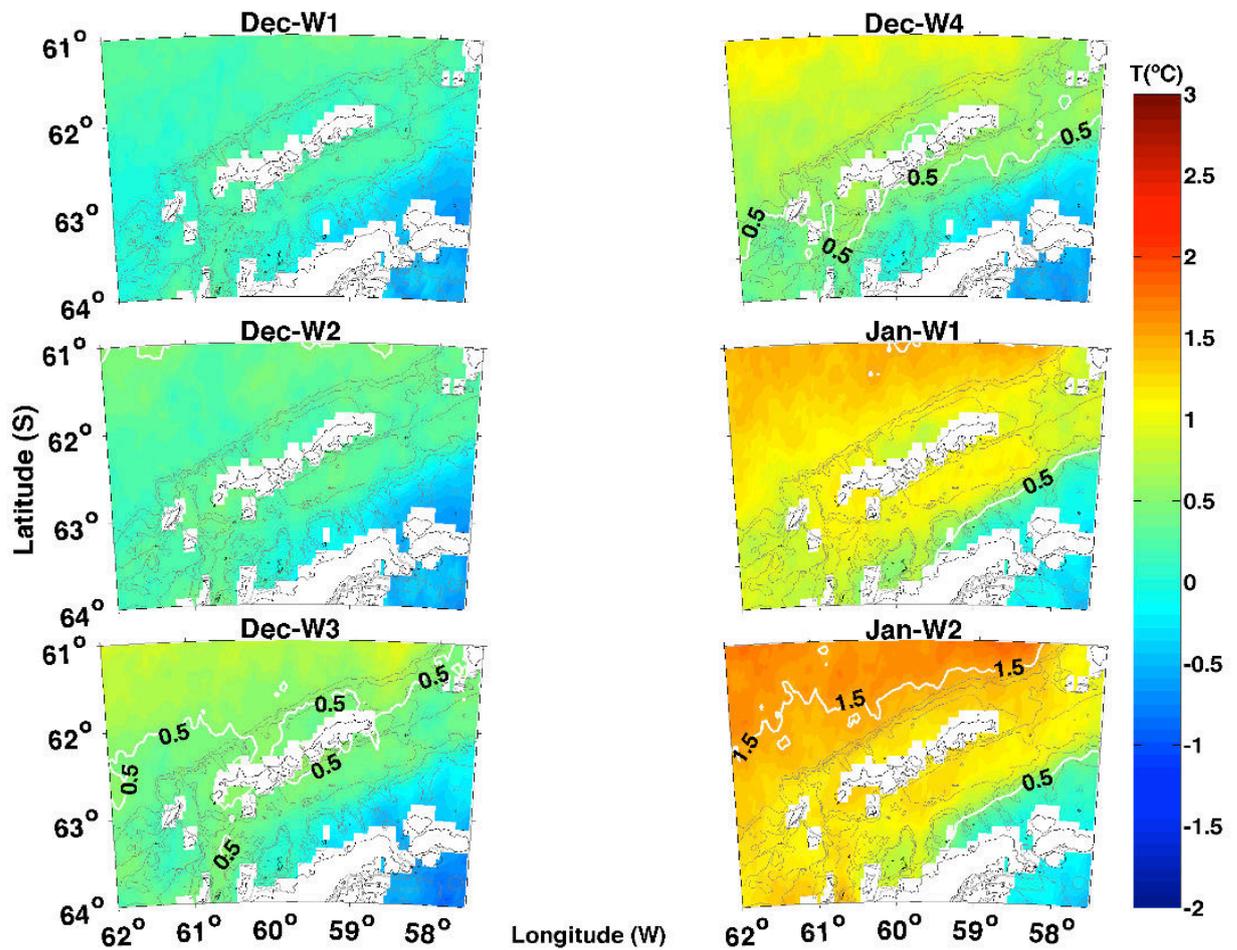


Figura 3.8: SST semanal media en los meses de diciembre y enero. Dec-W1 indica semana 1 del mes de diciembre. En blanco se señala la posición de las isothermas 0.5, 1.0 y 1.5 °C

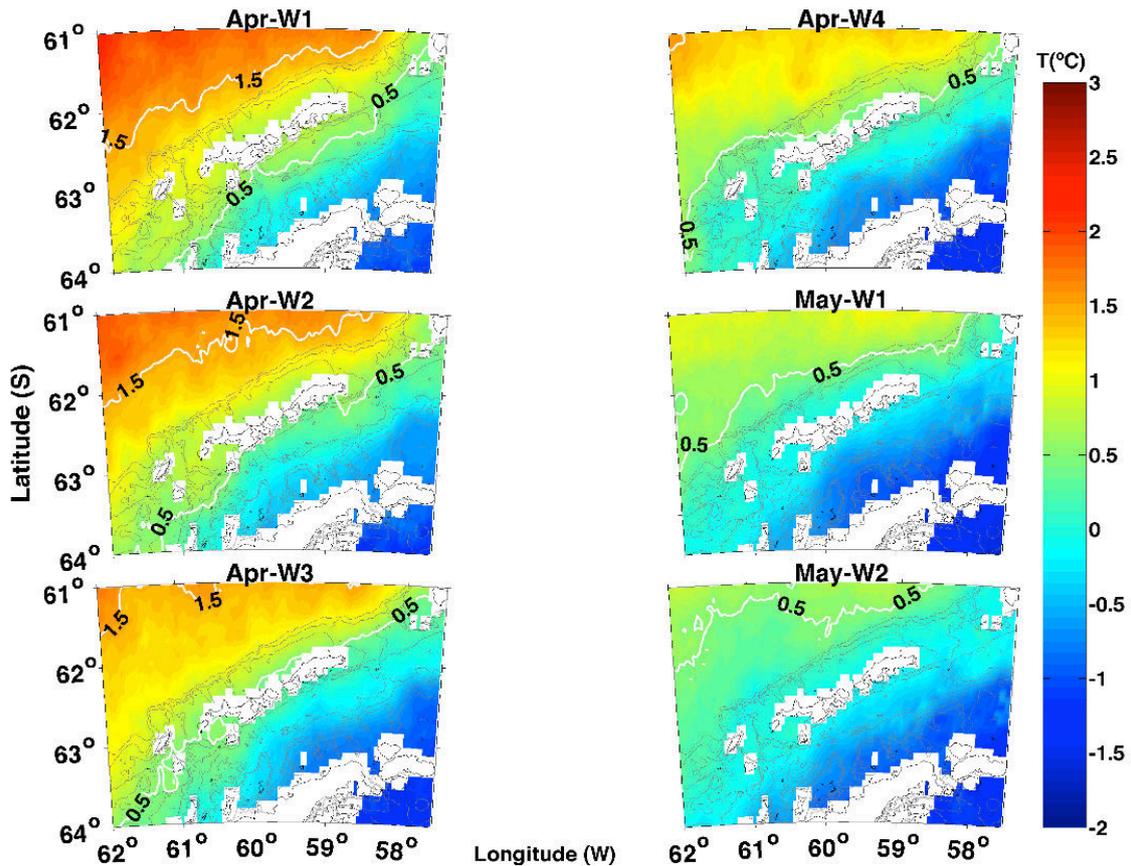


Figura 3.9: SST semanal media de los meses medios de abril y mayo. Apr-W1 indica semana 1 del mes de abril. En blanco se señala la posición de las isotermas 0.5, 1.0 y 1.5 °C

Las distribuciones de las últimas semanas de abril (Figura 3.9a y b) muestran el gradual enfriamiento general de la región y el avance del agua fría con influencia del Mar de Weddell hasta cubrir la mayor parte del Estrecho de Bransfield. Superficialmente se observa una disminución gradual de la temperatura en casi 1°C en toda el área de análisis, lo que genera que desaparezca superficialmente la conexión de las aguas que provienen del Mar de Bellingshausen con el Estrecho de Bransfield, de manera que en la primera quincena de mayo el agua algo más cálida en el Estrecho de Bransfield quedaba restringida al talud sur de las SSI, ya que la influencia de las aguas que se originan en el Mar de Weddell es cada vez más dominante hasta abarcar toda la zona que corresponde al Estrecho de Bransfield. Por el contrario, en la plataforma norte de las SSI aún se sigue observando agua más

cálida, de características similares a las que semanas antes se encontraban en el talud sur de las SSI. A partir de la tercera semana de mayo la distribución de SST, tanto en el Estrecho de Bransfield como en la plataforma norte de las SSI, ya es dominada por aguas más frías y las estructuras frontales similares a las comentadas anteriormente como el Frente Peninsular y el Frente de las Shetland dejan de ser observables.

Estas dos figuras (Figuras 3.8 y 3.9) demuestran que durante los periodos de transición hay escalas de variabilidad espacial y temporal muy distintas, pudiendo tener periodos de variabilidad de una semana o menos en las fechas más próximas al Verano Austral y periodos de un mes o más para fechas próximas al Invierno Austral. Esto refleja características propias del paso entre el homogéneo y frío Invierno Austral y el heterogéneo y variable Verano Austral.

3.5 Variabilidad espacio-temporal durante el Verano Austral.

Al contrario de lo observado durante los periodos de transición, la distribución media de SST durante el verano (Figura 3.6c), refleja estructuras que se ponen de manifiesto durante todos los meses de este periodo (Figura 3.4) y que tienen un claro reflejo en el módulo del gradiente de SST (Figura 3.7c). No obstante, la intensidad de estas estructuras es muy distinta en los promedios mensuales, además, durante los periodos de transición se han puesto de manifiesto escalas de variación semanales en las fechas más próximas al comienzo y tras la finalización del Verano Austral.

Esta variabilidad queda clara en la Figura 3.10, donde la distribución para la segunda semana de cada uno de los meses del Verano Austral es diferente a la distribución media de cada mes (Figura 3.4), de manera que debe existir una variabilidad en escalas inferiores a un mes. No obstante, la evolución de las estructuras muestra la progresión semanal de la SST en el periodo del Verano Austral, con un aumento progresivo y consistente de la SST

desde las primeras semanas de enero hasta al menos mediados del mes de abril, similar a la ya comentada al analizar las distribuciones mensuales medias durante dicho periodo.

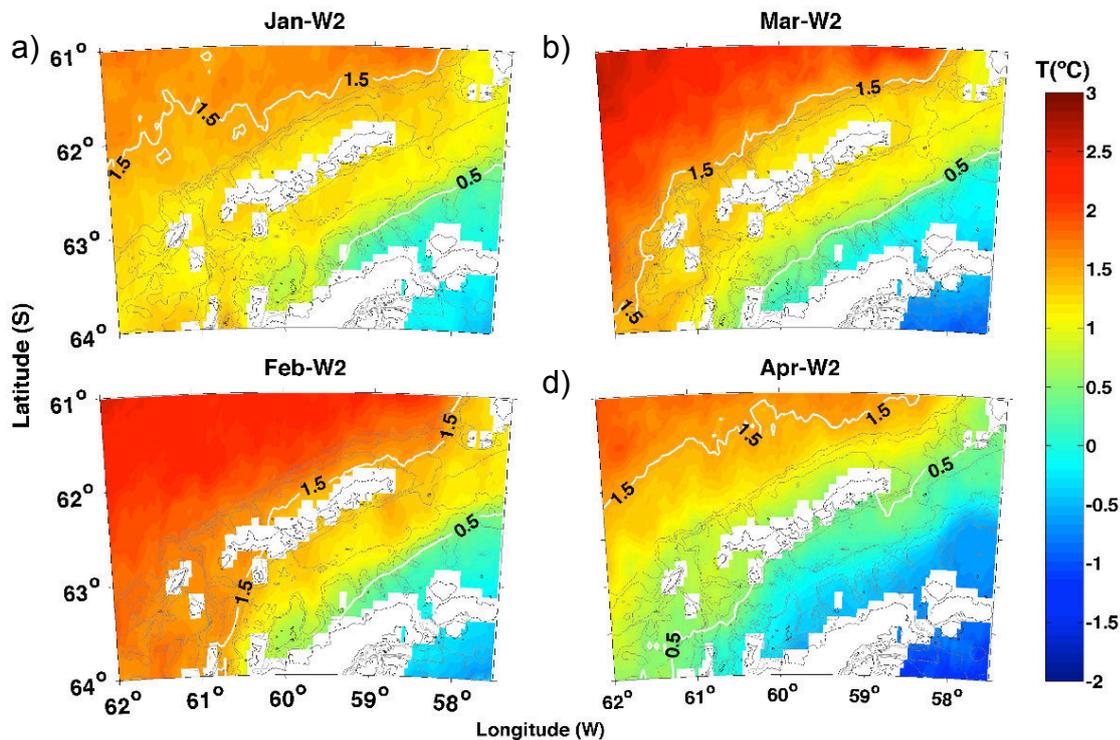


Figura 3.10: SST semanal media de la segunda semanas de enero (a), febrero (b), marzo (c) y abril (d) año promedio total. En blanco se señala la posición de las isotermas 0.5, 1.0 y 1.5 °C.

Sin embargo, es importante intentar identificar las escalas de variabilidad temporal durante el Verano Austral, ya que están relacionadas con la variabilidad en la dinámica de la región. En la Figura 3.11 se observan variaciones diarias en las distribuciones de SST en los meses centrales del Verano Austral, específicamente, en la semana 2 de los meses de febrero y marzo. Cabe remarcar que la alta variabilidad del sistema en todo el análisis de este capítulo, se ha realizado sobre una señal muy suavizada, ya que los registros son un promedio de las señales diarias durante un periodo de 6 años. Por tanto, todas las estructuras y variabilidades aquí mostradas no están afectadas de la variabilidad interanual por el promedio realizado.

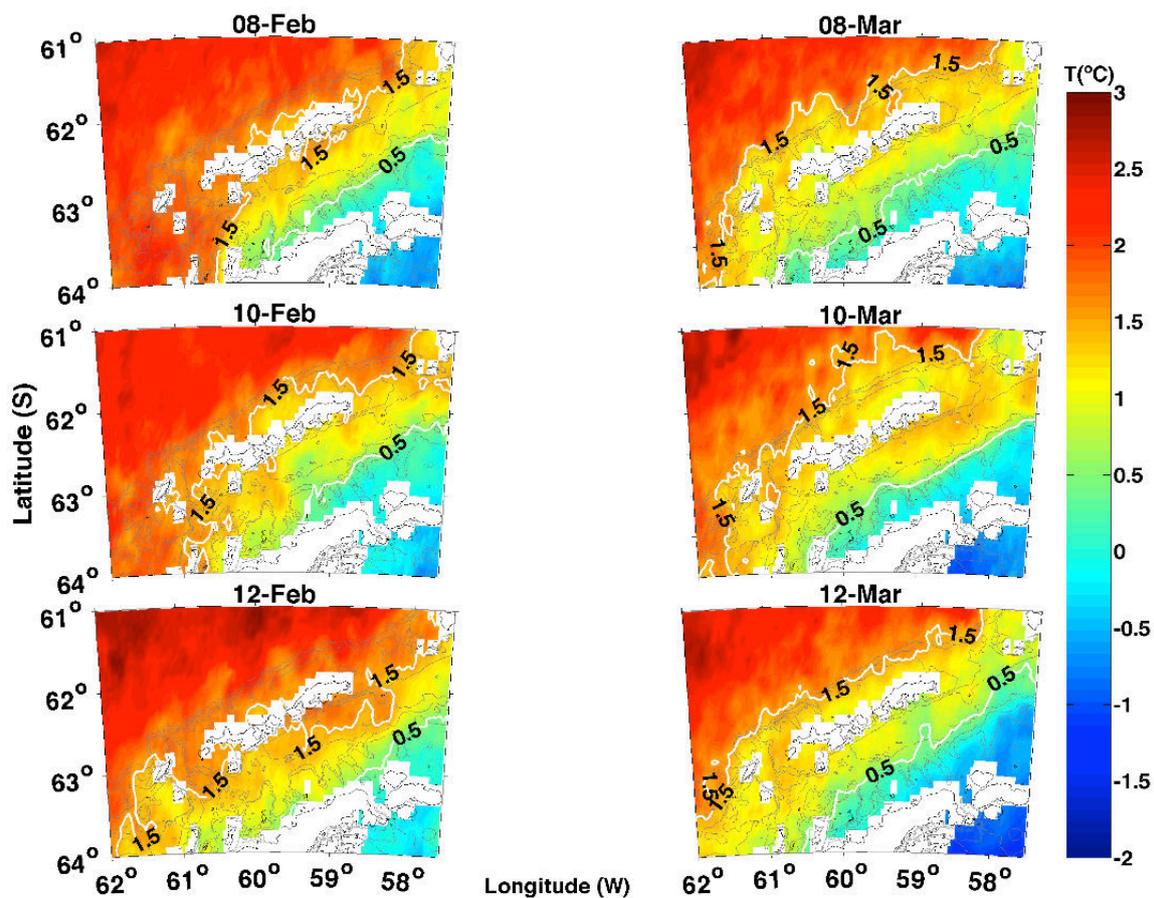


Figura 3.11: SST diaria media en la segunda semana de los meses de febrero y marzo, entre 2006 y 2011. En blanco se señala la posición de las isothermas 0.5, 1.0 y 1.5 °C

El patrón durante el Verano Austral (Figura 3.6) es tan intenso que, a pesar de la homogeneidad durante los 4 meses del invierno y la poca variación en los periodos de transición, su estructura se refleja en los resultados de la media anual de SST (Figura 3.1). Esa distribución estival media aparece en los meses del Verano Austral, aunque condicionado por la distribución mensual media de febrero (Figura 3.12 a) y ésta, a su vez, es similar a la semana 2 del mes de febrero, donde parece que las estructuras hidrográficas de la región de estudio están plenamente desarrolladas (Figura 3.12b).

Con la descripción de la se dispone hasta el momento se puede conjeturar que durante los cuatro meses del Verano Austral las estructuras hidrográficas superficiales alrededor de las SSI y en el Estrecho de Bransfield

alcanzan su máximo desarrollo e intensidad. El ciclo natural de la SST a lo largo del año polar es bastante característico: las aguas superficiales se calientan por la absorción de la radiación solar generando un proceso estructural superficial que se puede observar a simple vista. En ese estado se pueden desarrollar dinámicas en la región, que quedan registradas en un patrón de distribución de SST a bandas, orientado paralelamente a las SSI.

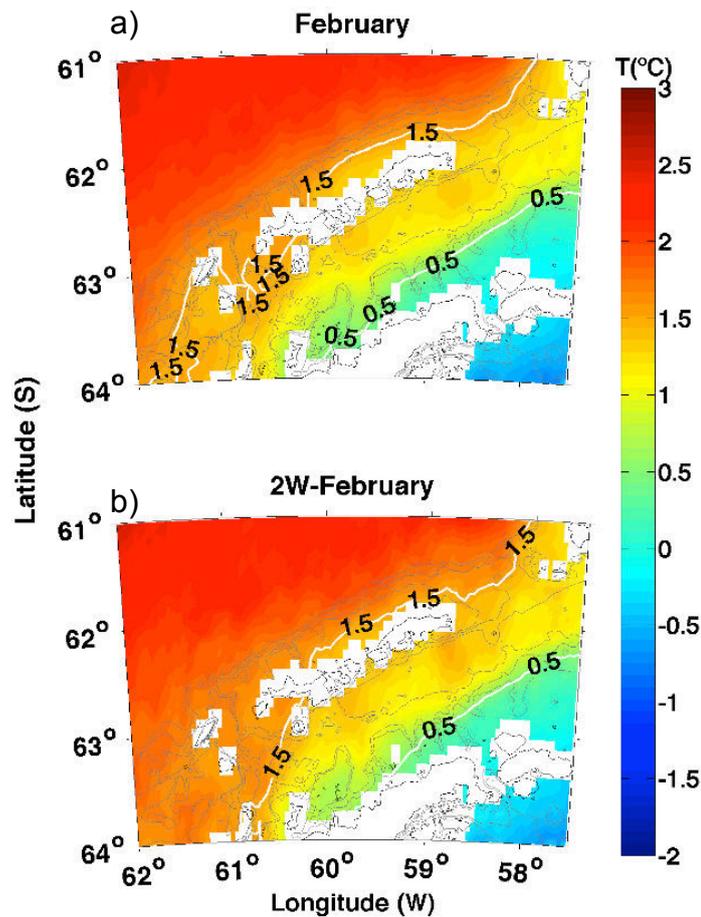


Figura 3.12: Distribución media de SST anual (a), mes de febrero (b), durante la segunda semana del mes. En blanco se señala la posición de las isothermas 0.5, 1.0 y 1.5°C.

A comienzos de este periodo sólo se observa esta agua en el talud sur de SSI, mientras que a mediados y finales del Verano Austral los valores de SST alrededor de SSI son similares. Terminado el verano, el agua fría va acercándose al talud sur de SSI, de manera que el agua cálida del tipo TBW sólo queda al norte de SSI.

3.6 Rasgos más notables de la distribución de SST alrededor de las SSI.

Como se ha descrito en los puntos anteriores, hay ciertas zonas en la región de estudio donde puede existir una variabilidad de más de 3°C entre su periodo más frío y el más cálido, mientras que hay otras donde la variación anual no pasa de 1.5°C. Esta diferencia de la variación es muy importante dado que el rango de valores de SST a lo largo del año en la región está entre 3°C y -1.8°C.

Las condiciones climáticas extremas de la región hacen que haya prácticamente 6 meses de temperaturas superficiales muy frías y una alta homogeneidad superficial. Durante los cuatros meses de invierno todo la región está ocupada con agua invernal de temperaturas en torno a -1.5°C, y una homogenización tan alta que el módulo del gradiente de SST es prácticamente nulo, de manera que no hay estructuras térmicas apreciables superficialmente durante esta época (Figuras 3.6a y 3.7a). En el módulo del gradiente promedio de los periodos de transición (Figuras 3.7b y d) aparecen ciertas estructuras frontales, aunque la situación es muy distinta dentro de cada periodo de transición. En los meses más próximos al invierno, noviembre en primavera (Figura 3.3a) y junio en otoño (Figura 3.5b), casi toda la región tiene aguas entre -0.5°C y -1°C, de manera que toda la región está cubierta con aguas frías y homogéneas, no reflejando la presencia de estructura alguna. Aun así, se observa diferencia entre las dos distribuciones promedios de los periodos de transición en el tamaño de la zona invadida por agua más fría, lo cual es coherente con las diferentes situaciones climáticas.

Dentro de los periodos de transición, durante el mes más próximo (diciembre o mayo) al Verano Austral la variabilidad se empieza a hacer más importante, de manera que las estructuras que se muestran en el módulo del gradiente de SST en la primavera y el otoño (Figuras 3.7b y d) reflejan la variabilidad que aparece realmente en sólo 2 o 3 semanas de los meses de diciembre (Figura 3.8) y mayo (Figura 3.9).

En el Verano Austral, las intensas estructuras que aparecen en el módulo del gradiente (Figura 3.7c) se muestran en todas las escalas temporales presentadas (media mensual, Figura 3.4; media semanal, Figura 3.8e y f; media diaria, Figura 3.11). No obstante, la intensidad y ubicación de estas estructuras van variando a lo largo del verano. En la primera semana de enero las temperaturas inferiores se ubican cercanas a la Península Antártica (-0.5°C), las aguas con temperaturas intermedias se sitúan alrededor de las SSI y las más cálidas en latitudes superiores de la plataforma norte de las SSI ($>1.5^{\circ}\text{C}$), valores que tienen un rango de variación superior a 1.5°C en menos de 2 meses. Esta misma variabilidad se refleja en múltiples trabajos hidrográficos realizados en la zona, en los que dependiendo de la fecha que se han realizado las campañas se obtienen unos rangos de valores u otros (López *et al.*, 1994; Gordo, 2013), y donde también pueden estar apareciendo variaciones interanuales que en este capítulo han sido filtrados.

Toda la descripción de la evolución de la temperatura superficial del mar, mostrada hasta ahora, indica que las Islas Shetland del Sur se ubican en la zona de transición entre las aguas frías que provienen del Mar de Weddell, las relativamente más cálidas provenientes del Mar de Bellingshausen y del Paso Drake. Esto, junto con la disposición geográfica, permite la existencia de marcados gradientes térmicos en pocos kilómetros, que se generan en un corto periodo. Bibliográficamente estos frentes hidrográficos se encuentran descritos durante el Verano Austral como el Frente Peninsular y el Frente de las Shetland. El primero formaría parte del Sistema de la Corriente de Bransfield, descrito por Sangrá *et al.* (2011), mientras que el segundo representa el límite septentrional de la Corriente de Bransfield que recircula al norte de SSI, apoyada sobre la plataforma y talud norte de las SSI en dirección suroeste (García-Muñoz, 2013; Sangrá *et al.*, 2015). El Frente Peninsular aparece en las distribuciones de SST al final del invierno, en las últimas semanas de diciembre, marcando el establecimiento del BCS. Algo más tarde, a principios de enero, aparece el Frente de las Shetland, que podría estar dando cuenta de la llegada de TBW al norte de SSI conducida por la recirculación de la Corriente de Bransfield. Estos frentes se intensifican y desplazan a medida que

avanza el verano, para comenzar a debilitarse al finalizar este periodo. Su registro en las figuras presentadas en este capítulo, en la que se muestran distribuciones promedio en un periodo de 6 años, dan cuenta de que forman parte de la dinámica característica de la región durante el Verano Austral (ver video adjunto).

En el próximo capítulo se hará una descripción detallada de la dinámica alrededor de las SSI a partir de los datos hidrográficos obtenidos en la campaña COUPLING durante el verano austral del año 2010, en los que están basadas las descripciones bibliográficas del Frente de las Shetland antes mencionadas. Es en ese capítulo donde se identificarán las masas de agua presentes alrededor de las SSI y la posible conexión de la dinámica en el talud norte de las SSI con el BCS.

Capítulo 4

Dinámica alrededor de las Islas Shetland del Sur durante el Verano Austral

Las observaciones previas de las campañas multidisciplinares CIEMAR y BREDDIES, realizadas a una alta resolución espacial en el Estrecho de Bransfield (5mn), establecieron la presencia de un sistema circulatorio característico, el Sistema de la Corriente del Bransfield (BCS), íntimamente conectado al comportamiento de la Corriente de Bransfield como una corriente de gravedad de descarga. El agua menos densa, TBW; se propaga como una corriente de gravedad de descarga sobre la más densa, TWW; apoyándose en el talud sur de las SSI en forma de chorro baroclino originado la Corriente del Bransfield (Sangrà *et al.*, 2011). Estudios de laboratorio simulan este comportamiento como corriente de gravedad de descarga. Además también muestran que cuando la cabeza de la corriente de gravedad alcanza el extremo oriental de las SSI se produce primero su recirculación alrededor de un remolino anticiclónico y después continua por la vertiente norte las SSI (Hernández-Arencibia, 2013). Unos de los principales objetivos de este capítulo es mostrar evidencias observacionales de esta recirculación y por lo tanto

apoyar la hipótesis del comportamiento de la Corriente del Bransfield como una corriente de gravedad de descarga.

Zhou *et al.* (2006) proponen que la Corriente de Bransfield es una corriente de frontera oeste, mientras que, tal como indicado más arriba, Sangrà *et al.* (2011) plantean que la Corriente de Bransfield se comporta como una corriente de gravedad de descarga. A este respecto, el diseño de la campaña COUPLING se orientó en determinar cómo recircula la Corriente del Bransfield en ambos extremos y en la vertiente norte de las SSI y si lo hacía en forma de corriente de gravedad de descarga. De esta forma se realizaron una serie de transectos alrededor de las SSI, siendo el muestro más intenso en la cara norte y en los extremos de las SSI (Figura 4.1). A este respecto, se analizará con detalle el transecto central que atraviesa las SSI por el paso las islas Robert y Nelson, abarcando la zona norte (Figura 4.1, T1a) y sur (Figura 4.1, T1b) del archipiélago. Las condiciones presentadas durante el Verano Austral en el Capítulo 3 demuestran que dentro del sistema que rodea a las SSI existe un patrón estival básico de distribución de SST que presenta 2 zonas diferenciadas alrededor de las SSI.

La primera zona es la región del Estrecho de Bransfield, ubicada entre el talud sur de las SSI y la Península Antártica. En ella, ocupando el tercio sur del Estrecho de Bransfield hay una región de bajas temperaturas, mientras que en los dos tercios restantes del Estrecho de Bransfield se observa agua cálida y menos salina. Los estudios en la zona indican que el agua fría es TWW, masa de agua baja en temperaturas y salina originada en el Mar de Weddell, cuya temperatura superficial, dependiendo del año, oscila entre 0.2 y -0.6°C (Gordo, 2013) y circula hacia el oeste a lo largo de la Península Antártica. Por el contrario, el agua de mayor temperatura es TBW, agua cálida y menos salina proveniente del Mar de Bellingshausen, que ingresa a través de los estrechos de Gerlache y Boyd, fluyendo hacia el noreste del Estrecho de Bransfield apoyada en el talud sur de las SSI. Según Gordo (2013) los valores máximos de temperatura que presenta el TBW en superficie pueden oscilar entre los 1.5 y 1.8°C, aunque en algunas estaciones muy próximas a la costa puede llegar a 2.5°C. En esta región Sangrà *et al.* (2011) definen el Sistema de la Corriente de

Bransfield, descrito en detalle, en lo relativo a la identificación de masas de agua y a la ubicación de las distintas componentes del BCS a lo largo del Estrecho de Bransfield, descrito también por Gordo (2013).

La segunda zona es la plataforma y talud norte de las SSI. Trabajos recientes (García-Muñoz *et al.*, 2013; Sangrà *et al.*, 2014) identifican la presencia en esta zona de TBW, cuya presencia se asocia al posible comportamiento de la Corriente de Bransfield como una corriente de gravedad, lo cual le obligaría a continuar propagándose rodeando las SSI al encontrarse en el extremo nororiental del archipiélago, tal y como se muestra en las simulaciones de laboratorio de Hernández-Arencibia (2013). Estos trabajos están basados en los resultados obtenidos en el transecto central realizado durante la campaña COUPLING (Figura 4.1, T1a y T1b). A lo largo de este capítulo se utilizará todo el muestreo realizado durante la campaña COUPLING para describir la dinámica alrededor de las SSI durante el Verano Austral. Parte de los resultados presentados en este capítulo han sido publicados en Sangrà *et al.* (2015).

Como primer paso en la Sección 4.1 se identificarán las masas de agua al sur y al norte de las SSI. A continuación se caracterizará el BCS prestando especial atención a la señal de la recirculación de la Corriente del Bransfield en los datos hidrográficos (sección 4.2). Se verá, que tal como predicen los experimentos de laboratorio la Corriente del Bransfield recircula primero a través de un remolino anticiclónico y después a lo largo de la vertiente norte de las SSI. En la sección 4.3 se analizará la trayectoria de una serie de boyas que apoyan el anterior patrón de recirculación. En la Sección 4.4 se correlacionará la señal *in situ* de los frentes asociados a dicha circulación y la SST con el objetivo de investigar en el Capítulo 5 la variabilidad del sistema a partir de colecciones imágenes SST. Finalmente en la sección 4.5 se sintetizarán las observaciones.

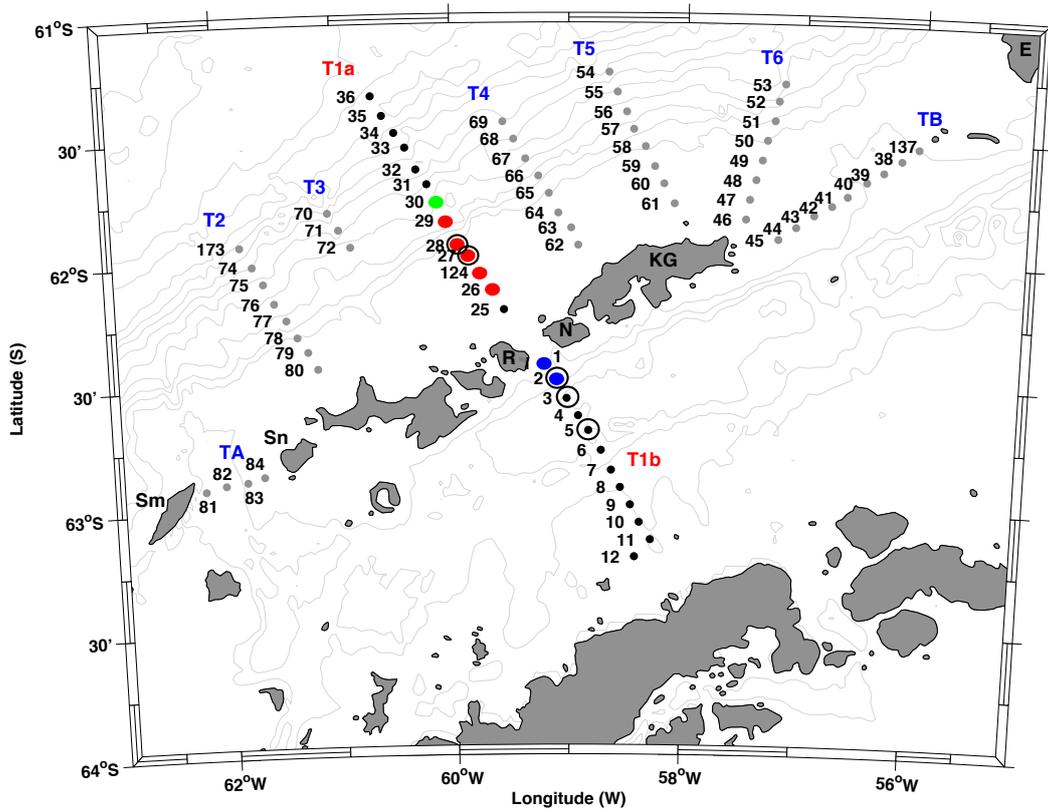


Figura 4.1: Mapa estaciones CTD de la campaña COUPLING. Se utiliza el mismo código de color para las estaciones que el presentado en el diagrama θ -S. T1a y T1b representa la parte norte y parte sur, respectivamente, del transecto central. 7 transectos perpendiculares a SSI cubriendo los márgenes oriental (TB), occidental (TA) y en el norte (desde T2 hasta T6) de las SSI. Se indica el nombre de las Islas del archipiélago con siglas (Sm: Isla Smith; Sn: Isla Snow; R: Isla Robert; N: Isla Nelson; KG: Isla Rey Jorge; E: Isla Elefante). Con el símbolo O se representan el punto de lanzamiento de cada una de las 5 boyas lanzadas en la campaña COUPLING.

4.1 Masas de agua.

Las condiciones presentadas durante el Verano Austral en el Capítulo 3 demuestran que dentro del sistema que rodea a las SSI existe un patrón estival básico de distribución de SST que presenta 2 zonas diferenciadas alrededor de las SSI, que corresponden a la región del Estrecho de Bransfield, ubicada entre el talud sur de las SSI y la Península Antártica: y la segunda zona es la plataforma y talud norte de las SSI, ambas explicadas previamente en la introducción de este capítulo.

Zhou *et al.* (2006) proponen que la Corriente de Bransfield es una corriente de frontera oeste, mientras que Sangrà *et al.* (2011) plantean que la Corriente de Bransfield se comporta como una corriente de gravedad de descarga. Para analizar cuál de las dos hipótesis es correcta nuestro grupo de investigación diseña y realiza la campaña interdisciplinar COUPLING alrededor de las SSI (Figura 4.1). Se plantea un transecto central que atraviesa las SSI por el paso las Islas Robert y Nelson, abarcando la zona norte (Figura 4.1, T1a) y sur (Figura 4.1, T1b) del archipiélago. El transecto T1b, que cubre desde el talud sur de SSI hasta la Península Antártica, tiene una posición próxima a transectos realizados durante las campañas CIEMAR y BREDDIES en épocas similares (Capítulo 2), por lo que la dinámica de la zona y las masas de agua presentes ya son conocidas y pueden ser comparadas con lo que se encuentre al norte, en T1a, intentando analizar posibles conexiones.

El diagrama θ -S realizado a partir de los datos hidrográficos adquiridos durante la campaña COUPLING se presenta en la Figura 4.2. En gris se representan los valores de todas las estaciones CTD muestreadas. Se remarcan estaciones en el transecto central, a través de las SSI, siguiendo el mismo código de color ya utilizado en la Figura 4.1, en las siguientes estaciones: en azul, las estaciones 1 y 2, que están sobre el talud sur de las SSI, y por las que debe pasar TBW; en rojo: estaciones sobre la plataforma y talud norte de las SSI, con una profundidad inferior a 300m (de la 26 a la 28); y en verde estaciones próximas a las anteriores pero con una profundidad mayor de 300m.

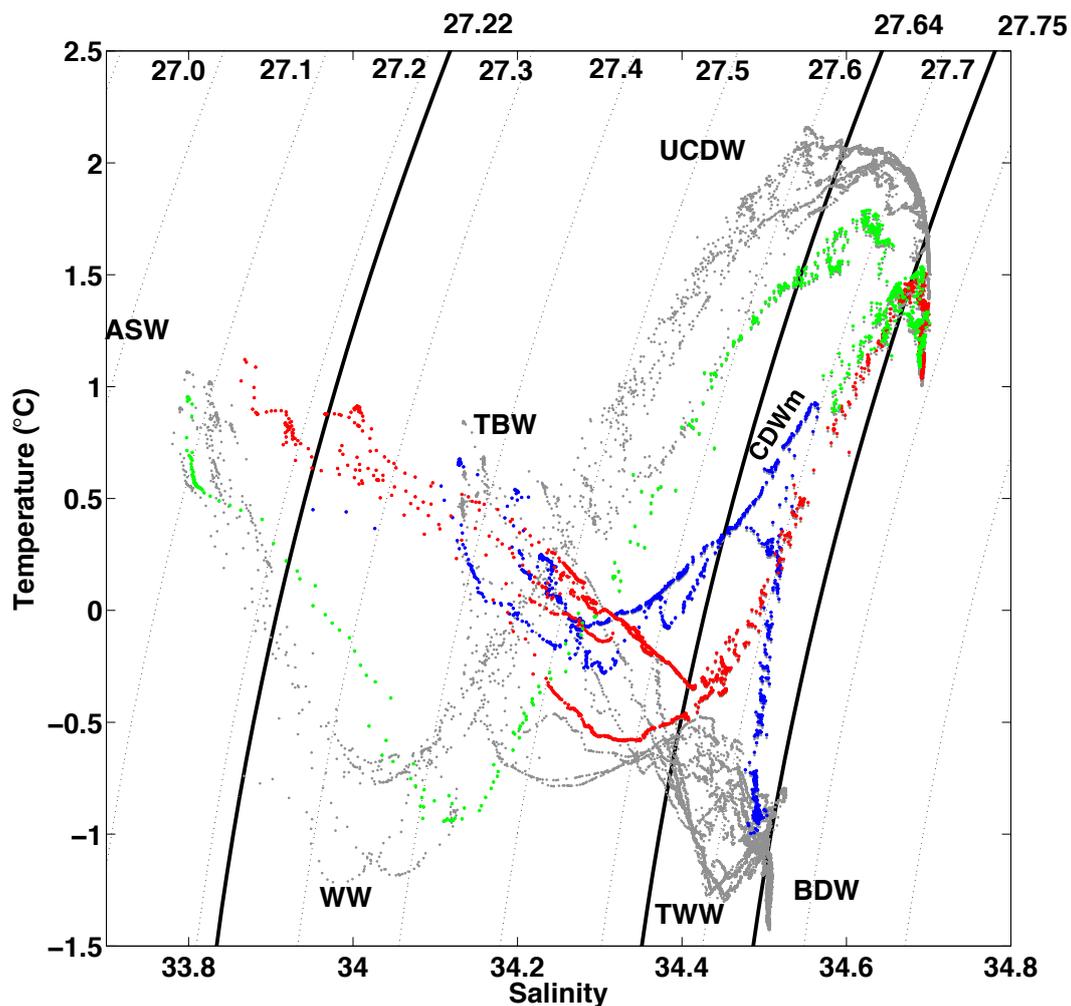


Figura 4.2: Diagrama θ -S del transecto central. TBW, Agua Transicional zonal con influencia del Mar de Bellingshausen; TWW, Agua Transicional zonal con influencia del Mar de Weddell; WW, Agua Invernal; ASW; Agua Superficial Antártica; UCDW, fracción Superior del Agua Profunda Circumpolar; CDWm, Agua Profunda Circumpolar modificada; y BDW, Agua Profunda de Bransfield. Las líneas negras son las isopícnas de 27.22, 27.64 y 27.75 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$.

Al observar el diagrama θ -S (Figura 4.2) se ponen de manifiesto claras diferencias entre las estaciones al norte y al sur de SSI, ya que en las primeras aparecen ASW, WW, TBW y UCDW; mientras que en las segundas aparecen TBW, TWW, CDWm y BDW. A su vez, en las estaciones ubicadas en el Estrecho de Bransfield, muestran diferencias entre las que están sobre el talud (en azul), con TBW en superficie y CDWm a mayores profundidades; y las que

se encuentran más al sur que tienen en superficie TBW, en capas subsuperficiales TWW y en capas más profundas BDW. Aunque no se diferencian en este diagrama, las estaciones próximas a la Península Antártica ya no presentan en superficie TBW y prácticamente toda la columna está ocupada por TWW. De igual manera, al norte de las SSI hay diferencias entre las estaciones con profundidades máximas de 300m y las más septentrionales. En las estaciones más someras aparece ASW en superficie y TBW subsuperficialmente, salvo en estaciones muy costeras, donde toda la columna es TBW. En estaciones con una profundidad mayor de 300m sigue apareciendo ASW, pero sub-superficialmente aparece la fría WW, y debajo de ésta la cálida UCDW. Los valores obtenidos durante la campaña para las distintas variables son similares a los que se encuentran en la bibliografía de la zona (Siersvers, 1982; Speer *et al.*, 2000; Gordo, 2013).

A pesar de las diferencias descritas a ambos lados de las SSI, a lo largo de cada transecto (T1a y T1b), se pone de manifiesto la importante presencia de TBW alrededor de SSI, ya sea en la plataforma y talud norte (Figura 4.2, puntos rojos) como en el talud sur (Figura 4.2, puntos azul). Dadas las características orográficas de la región, la presencia de TBW al norte se podría explicar únicamente por la recirculación de la Corriente de Bransfield al llegar al extremo nororiental de las SSI.

4.2 Circulación alrededor de las SSI a partir de datos hidrográficos.

Para el objetivo de este trabajo sólo se muestra la distribución de las distintas propiedades en los 300 primeros metros de la columna de agua. Se recurrirá en numerosas ocasiones a la identificación de masas de agua realizadas en la sección anterior para comprender el origen de las aguas que se ven afectadas por la dinámica descrita.

Dado que la experiencia del grupo en el Estrecho de Bransfield permite una rápida identificación de los patrones característicos que indican el desarrollo del BCS al sur de las SSI, se comenzará con el estudio de la dinámica en descripción de la parte sur (T1b) del transecto central realizado, atravesando el Estrecho de Bransfield, desde el talud sur de las SSI hasta la Península Antártica. Una vez establecida la dinámica en el Estrecho de Bransfield, se continuará con el análisis descriptivo de la dinámica al norte de las SSI, analizando en detalle el transecto norte (T1a) del mismo transecto central, de manera que se pueda ver en una sola sección la dinámica al norte y al sur de las SSI para después combinar ambos (Figura 4.3). Ello permitirá identificar la ruta de la TBW y por tanto la ruta de la Corriente de Bransfield

4.2.1 Circulación en el Estrecho de Bransfield.

Trabajos previos en la zona, y coherentes con los propios resultados, muestran que la isopicna $27.64 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ establece el límite entre el TBW y el TWW (Figura 4.2), de manera que las estaciones con TBW tiene una anomalía de la densidad potencial menor que $27.5 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, mientras que las estaciones con TWW tienen una anomalía de la densidad potencial mayor a 27.64 kg m^{-3} . Siguiendo este criterio, en las distribuciones de θ , S y γ_θ de la zona sur de las SSI (Figura 4.3, panel derecho), que corresponden a las aguas pertenecientes al Estrecho de Bransfield, se observa la presencia de dos masas de agua, la TWW y TBW. En los primeros 100 m de la columna de agua, estos perfiles muestran la presencia de TWW en la zona más próxima a la Península Antártica, con bajas θ ($T < -0.5 \text{ }^\circ\text{C}$), altas salinidades ($S > 34.4$) y altas anomalías de densidad potencial ($\gamma_\theta > 27.64 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$). A profundidades mayores de 100m, esta masa de agua, ocupa la mayor parte del Estrecho de Bransfield hasta estaciones próximas al talud sur de la ISS. En cambio el TBW, menos densa, se distribuye en forma de cuña sobre el TWW, donde en los primeros 80 m de profundidad, abarca casi tres cuartas partes del Estrecho de Bransfield, con θ más elevadas que TWW ($T > 0^\circ\text{C}$), pero con salinidades y densidades potenciales inferiores ($S < 34.4$ y $\gamma_\theta < 27.6 \text{ kg/m}^3$, respectivamente). Esta

distribución cambia sobre el talud sur de las SSI, donde TBW ocupa los primeros 250-300m de la columna de agua (Figura 4.3, panel derecho). En esta zona, debajo de TBW y con $\gamma_\theta > 27.64 \text{ kg/m}^3$ se identifica CDWm, como un núcleo profundo de agua relativamente más cálida.

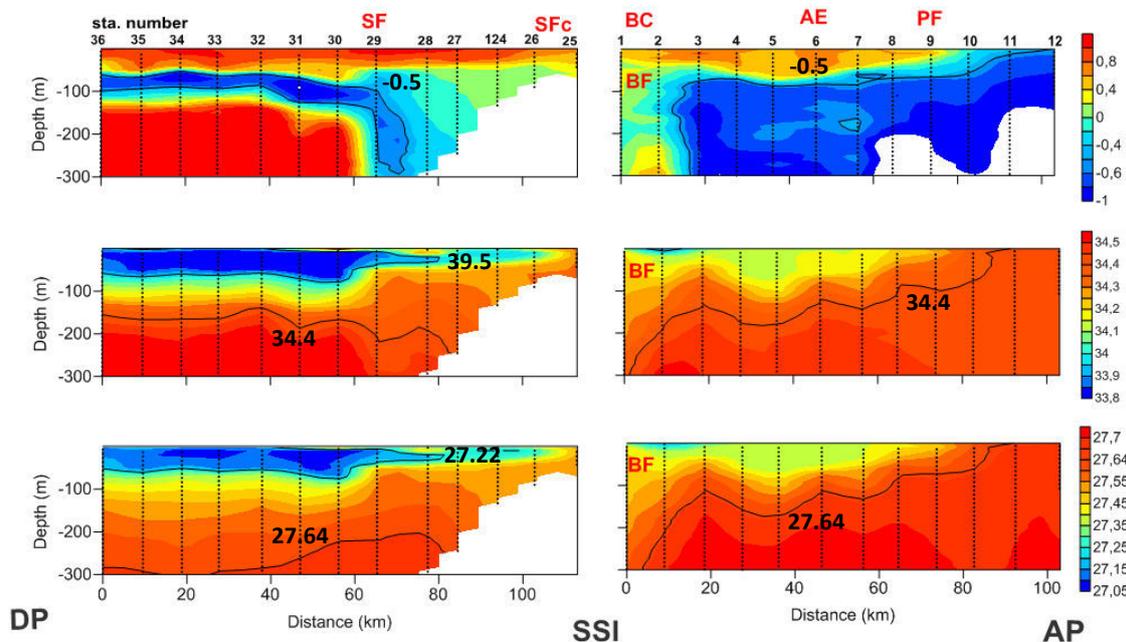


Figura 4.3: Distribución vertical de θ ($^{\circ}\text{C}$), S y anomalía de densidad potencial ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$) en todo el transecto central de la campaña COUPLING. DP: Paso Drake; SSI: islas Shetland del Sur; AP: Península Antártica.

En la Figura 4.3 se pueden reconocer dos zonas frontales. La primera está centrada en la estación 9, que representan el límite superficial entre el TBW y TWW y que se denomina en la bibliografía como Frente Peninsular (Sangrà *et al.*, 2011). Dadas las características térmicas de estas dos masas de agua, este frente debe ser fácilmente observable en distribuciones de SST. La segunda es una zona frontal subsuperficial entre las mismas masas de agua, conocido como Frente de Bransfield y localizado sobre el talud sur de las SSI entre las estaciones 1 a 3 (Sangrà *et al.*, 2011). Este frente es dinámicamente muy diferente al PF, y está asociado a la Corriente del Bransfield, chorro baroclino relativamente estrecho ($\sim 20 \text{ km}$) y profundo ($\sim 400 \text{ m}$) la cual circula en dirección noreste apoyada sobre el talud sur del las SSI transportando TBW hacia el noreste (Niiler *et al.*, 1991; Zhou *et al.*, 2002,

Poulin *et al.*, 2014). Las velocidades estimadas para la Corriente de Bransfield durante COUPLING fueron de $300.3\text{-}500.5\text{ cm}\cdot\text{s}^{-1}$ (Poulin *et al.*, 2014)

En el transecto T1b aparecen todas las componentes del Sistema de la Corriente de Bransfield definidas por Sangrà *et al.* (2011), que son: el Frente Peninsular, centrado en la estación 9; el Frente de Bransfield y la Corriente de Bransfield asociada, apoyada sobre el talud sur de SSI, entre las estaciones 1 y 3; un sistema de remolinos anticiclónicos (Figura 4.3, AE) en la extensión superficial de TBW desde el Frente de Bransfield hasta el Frente Peninsular, entre las estaciones 3 y 9 (Figura 4.3, AE); y CDWm situada apoyada al talud sur de SSI, debajo de TBW y en un rango de densidades similar a TWW.

Superficialmente en la Figura 4.3, entre las estaciones 1 y 2, se observa una pequeña anomalía en la tendencia de las isolíneas de las distintas variables, que podrían estar indicando la posible entrada de agua del norte por el canal existente entre Isla Robert e Isla Nelson (RN). Este tipo de anomalías también fueron observadas en otras campañas por Gordo (2013), asociándoles el mismo origen.

4.2.2 Recirculación de la Corriente de Bransfield.

A la hora de identificar las masas de aguas en ambos lados de las SSI se observó con claridad la presencia de TBW en la vertiente norte de las SSI. Ello parece indicar que está recirculado transportada por la Corriente del Bransfield. El objetivo de esta sección es determinar la ruta del TBW y su asociación con la Corriente de Bransfield.

En la Figura 4.3 (panel izquierdo), la zona norte de las SSI presenta varias particularidades que la distinguen y que la hacen única, porque se observa el aislamiento respecto a la circulación del Sistema Circumpolar en estaciones con una profundidad menor a 300m. En estas estaciones sobre el talud norte se observan similitudes con las características de las aguas en el talud sur que podrían indicar la existencia de una conexión entre ambas zonas.

En las estaciones más septentrionales del transecto T1a, al norte de las SSI, se observa un comportamiento similar al referido anteriormente y se pueden identificar otras masas de aguas, ya descritas previamente por otros autores: Superficialmente se encuentra ASW; entre los 50 y 150 m de profundidad aparece la fría WW, con $T < 0^{\circ}\text{C}$ y bajos valores de salinidad (Sievers y Nowlin, 1988); y debajo de ésta, la relativamente cálida UDCW ($T_{\text{max}} \approx 2^{\circ}\text{C}$). Entre las estaciones 29 y 30 se observa claramente la presencia de un frente termohalino que limita las anteriores masas de agua circumpolares con el TBW que ocupa el talud y la plataforma de las SSI. Notar que la temperatura y densidad se autocompensa dando lugar a un somero frente en densidad. Este frente es la señal de la BdyACC (Orsi *et al.*, 1995) que separa aguas circumpolares de aguas de plataforma. Asimismo la presencia de TBW hace que los gradientes meridionales se intensifique dando lugar a que la señal de la BdyACC tenga carácter de frente de submesoscala (~ 10 km). Debido a esta peculiaridad se denominará como Frente de las Shetland (SF), representando el límite meridional del TBW al norte de las SSI. La presencia de TBW en las estaciones de plataforma y talud ponen de manifiesto su recirculación desde el Estrecho de Bransfield hacia la vertiente norte de la SSI en el interior del Paso de Drake. Tal como fue analizado en el diagrama Theta-S (Fig. 4.2) y en la actual sección, estas estaciones son de la sta29 a la sta25. Al ubicarse ASW sobre el TBW, superficialmente el TBW sólo podrá ser identificada en las estaciones costeras (SFc; Figura 4.3) infraestimando la posición del SF en distribuciones de temperatura superficial. Además, el hecho de que los rangos de temperatura superficial de ASW y TBW sean tan parecidos complicará la identificación de este frente en distribuciones térmicas.

Para precisar la ruta del TBW se describirá su señal en salinidad en lugar de densidad ya que UCDW y TBW comparten rangos de densidad (Figura 4.4). En las secciones de salinidad al norte de las SSI se observa el patrón básico comentado para el transecto central T1b, desde el margen nororiental (T6) hasta el suroccidental (T2), donde se observa la presencia de TBW ($S > 34.00$) en estaciones con una profundidad menor de 300m. En estaciones más profundas deja de aparecer TBW y aparece una estructura

similar a la del norte del transecto T1a, con ASW, WW y UCDW. En el extremo oriental (Figura 4.4, TB), entre la Isla Rey Jorge e Isla Elefante, se observa la presencia de un remolino anticiclónico y el dominio absoluto en el paso de aguas con características de TBW, tal y como predecían los experimentos de laboratorio de corrientes de gravedad con parámetros ajustados a SSI realizados por Hernández-Arencibia (2013). En el margen occidental (Figura 4.4, TA), ASW y el WW cubren los primeros 50-75m de agua en todo el transecto, mientras que TBW se localiza subsuperficialmente, por debajo de estas masas de agua, y hasta los 275-300m y muy próxima a la isla Snow. Debajo de ésta, se detecta el UCDW apoyado en el margen derecho del estrecho, el cual, pudiera estar alimentando los núcleos de CDW que se observan en el estrecho de Bransfield (Gordo, 2013).

La inclinación de las isohalinas e isopicnas mostradas en las Figuras 4.3 y 4.4 indican que la TBW presenta un flujo geostrofico que circula apoyado en el talud, tanto al norte como al sur de las SSI. Al sur de las SSI el flujo es más intenso, con velocidades de 30 a 50 cm/s (Poulin *et al.*, 2014) y dirigido hacia el noreste. Por el contrario, en el talud norte de las SSI, el flujo asociado a TBW es menos intenso, con velocidades máximas de 7cm/s (Sangrà *et al.*, 2015), en dirección suroeste, con estos máximos de velocidad entre las estaciones 124 y 29 del transecto T1a, localizados entre los 75 y 200 m de profundidad. Sin embargo el flujo más superficial, al norte del SF, y asociado al ASW y WW, muestra un sentido de propagación hacia el noreste, contrapuesto al observado en el talud y asociado a TBW. La cizalla de velocidades que se genera puede dar lugar a inestabilidades en esa región.

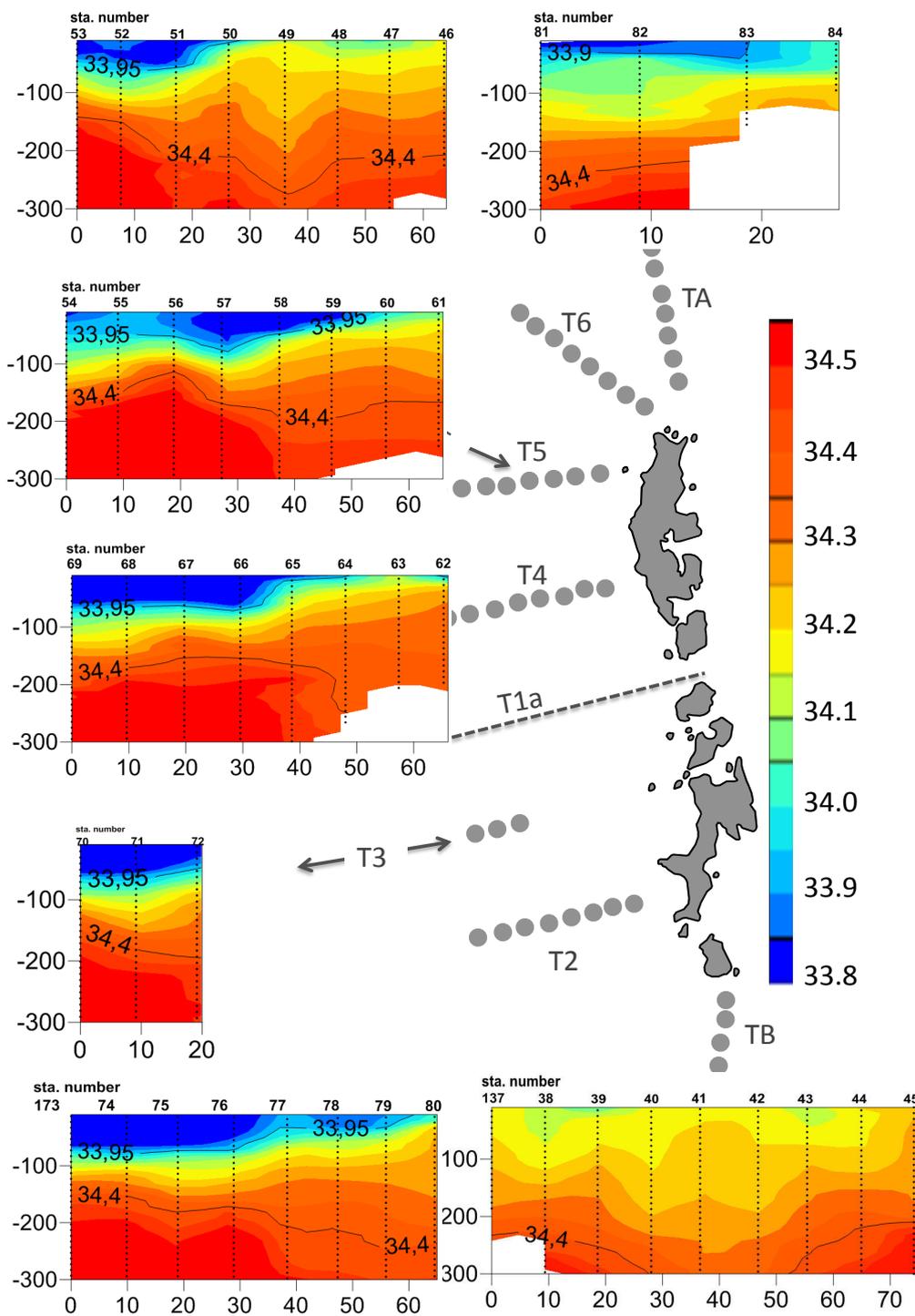


Figura 4.4: Sección vertical de salinidad, de los primeros 300m de la columna de agua, en los distintos transectos en la zona norte de las SSI realizados durante la Campaña COUPLING.

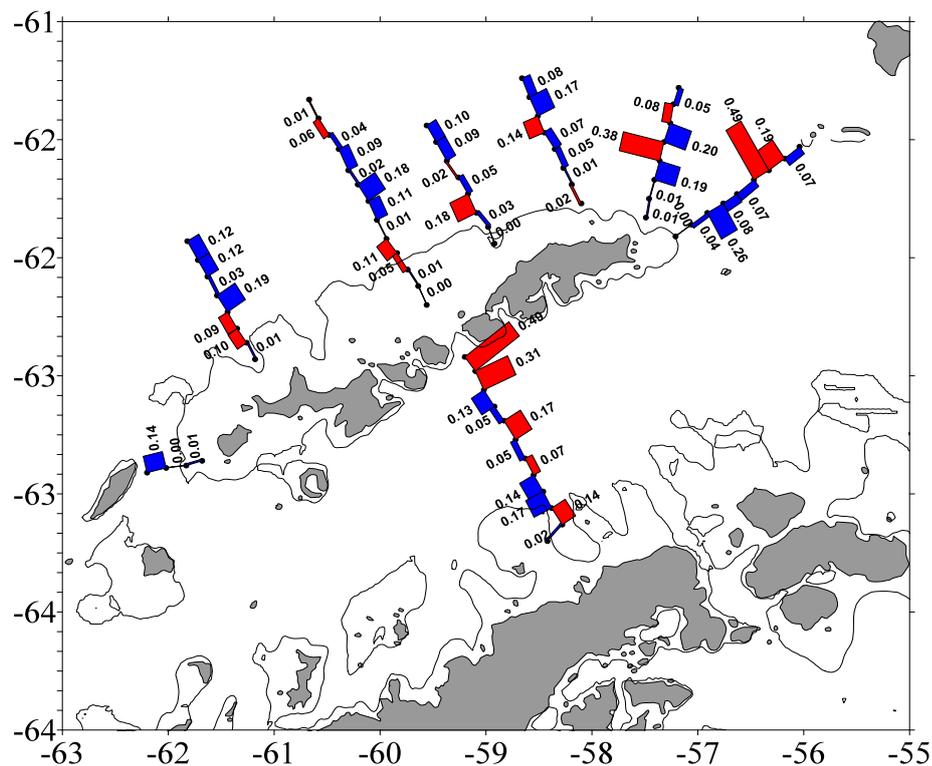


Figura 4.5: Transporte geostrofico en Sv, relativo a 500 dbar, obtenido durante la campaña COUPLING. Se marca la isóbata de 200m como límite de la plataforma (tomada de Sangrà *et al.*, 2015)

El transporte geostrofico relativo a 500 dbar obtenido durante la campaña COUPLING presentado en la Figura 4.5, muestra a grandes rasgos el comportamiento del flujo descrito a partir del análisis de la Figura 4.4. En el talud sur de las SSI el transporte geostrofico es mucho más intenso que al norte, y se pone de manifiesto la presencia de estructuras mesoescalares en T1b. Se marca también el intenso remolino anticiclónico entre la isla Rey Jorge e isla Elefante y se observa que cómo al norte, en las zonas de mayor anchura de plataforma, aparece un flujo hacia el suroeste apoyado sobre la plataforma, flujo menor que en el talud sur, pero de valor importante en estaciones con una profundidad algo mayor de 200m. El flujo en el Estrecho de Boyd es muy poco intenso y no parece indicar la existencia de flujo volviendo al Estrecho de Bransfield, sin embargo, estos valores no son fiables dado que deben estar dentro del rango de incertidumbre de la medida. De esta forma el análisis de

las anteriores secciones y los transportes indican que cuando la Corriente de Bransfield llega al extremo oriental de las SSI, primero recircula a través de un remolino anticiclónico y, después, parte del TBW sigue recirculando por la vertiente norte de las SSI.

4.3 Circulación alrededor de las SSI a partir de boyas lagrangianas.

La circulación descrita anteriormente, muestra que aguas con característica de TBW se localizan tanto en el Estrecho de Bransfield como en toda la plataforma de las SSI. Esta masa de agua circula en el Estrecho de Bransfield en dirección noreste, apoyada en el talud sur de las SSI, hasta llegar al paso existente entre la Isla Rey Jorge e Isla Elefante, para luego recircular en dirección contraria por la plataforma y talud norte de las SSI, siendo su frontera norte el Frente de las Shetland. Sin embargo, esta descripción no termina de aclarar si el TBW que se observa en la zona norte de las SSI vuelve a su punto de origen, ya sea atravesando entre las propias islas del archipiélago de las Shetland y/o por el Estrecho de Boyd, o si sigue propagándose por el norte hacia el suroeste. El seguimiento de boyas lagrangianas soltadas durante la campaña puede ayudar a aclarar esta cuestión. Por otro lado, las boyas fueron lanzadas durante la campaña, a principios del Verano Austral, pero pueden ser seguidas durante meses, por lo que aportan información adicional sobre la dinámica durante todo el periodo de seguimiento.

La Figura 4.6, muestra las trayectorias de tres boyas lagrangianas lanzadas en el Estrecho de Bransfield, en la zona de la Corriente de Bransfield, pero en campañas distintas. La roja (boya 58) se tiró durante el proyecto BREDDIES, dragada a 100m, mientras que la azul (boya 63) se lanzó durante el proyecto COUPLING y estaba dragada a 50m. Además se presenta en negro (boya 68) la trayectoria de una boya soltada al norte de SSI durante COUPLING, también con una vela a 50 m. La profundidad de vela fue elegida

para que las boyas circularan por debajo de la capa de Ekman, evitando la contaminación generada por el viento. Los números sobre las trayectorias muestran los días transcurridos desde el lanzamiento de cada boya siguiendo el mismo código de color que con las trayectorias. Dichas trayectorias se han superpuesto al promedio estival de la temperatura superficial del mar entre los años 2006 y 2011, donde se marcaron en blanco las isotermas de 0.5°C y de 1.5°C, y en gris las isóbatas de 100, 300, 500 y 1000 m. A pesar de tratarse de un promedio de 6 años, la ubicación de SF y PF obtenida con los datos hidrográficos coincide con la posición de estas isotermas en cada transecto, y en el caso de SF, es próxima a la batimétrica de 300 m.

La circulación descrita en el apartado anterior es corroborada al analizar la trayectoria de las boyas (Figura 4.6). La trayectoria trazada por la boya 63 (línea azul; Figura 4.6), se inicia una vez que alcanza el talud sur de las SSI (día 9; Figura 4.6), siendo arrastrada por la Corriente de Bransfield, dos semanas después cambia de dirección para ser dirigida entre la Isla Rey Jorge e Isla Elefante, trazando en este paso un remolino anticiclónico, remolino muestreado hidrográficamente en el transecto TB (Figura 4.4), con un periodo de rotación de 5 días y con velocidades orbitales máximas de 40-50 cm/s. Posteriormente, esta boya circula por el talud noreste de las SSI, donde coincide con la zona más estrecha de la plataforma norte de las SSI. Cuando se realizó T6 en esa zona se observó que en esa sección que a 50 m de profundidad había WW (Figura 4.4, T6), por lo que en ese momento la boya no está siendo arrastrada por TBW y en el día 35 desde su lanzamiento abandona la plataforma norte de las SSI con dirección norte para luego seguir con rumbo hacia el oeste.

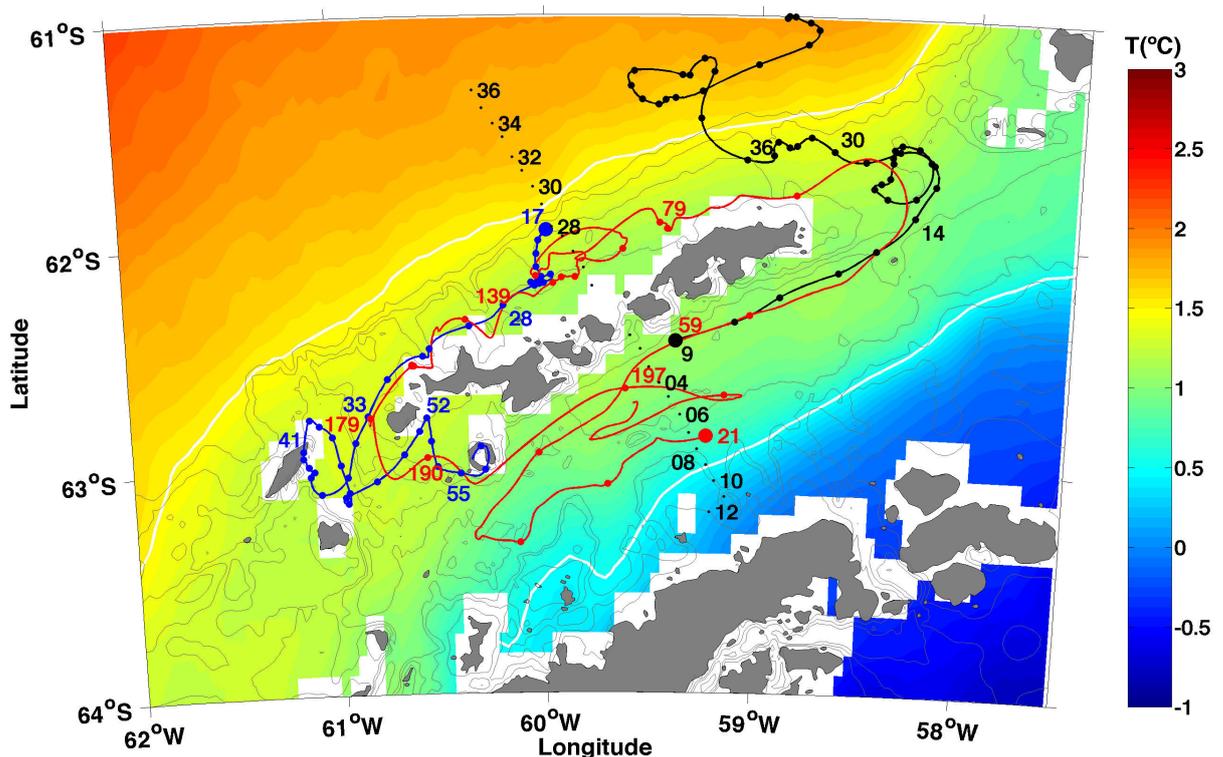


Figura 4.6: Trayectoria de derivadores lanzados durante la campaña BREDDIES (rojo, dragada a 100m) y COUPLING (azul y negro, dragadas a 50m). Se superpone el promedio estival de SST (2006 a 2011); líneas blancas: isotermas de 0.5 y 1.5°C; líneas grises: isóbatas de -100 a -1000 m; R: isla Robert; N: isla Nelson.

Por su parte, la boya 58 (Figura 4.6, línea roja), lanzada y lastrada a 100m de profundidad durante BREDDIES en zonas próximas al PF, mantiene la misma trayectoria que tuvo la boya 63 en la Corriente de Bransfield, recirculando luego entre la Isla Rey Jorge e Isla Elefante, sobre la plataforma de la Isla Rey Jorge. Durante todo su recorrido en el norte de las SSI se mantiene entre las batimétricas de 200 y 300m hasta llegar al Estrecho de Boyd (Figura 4.6, día 179), por donde retorna al Estrecho de Bransfield. La boya 68 (Figura 4.6, línea negra), después de una cierta inestabilidad inicial, muestra un comportamiento de circulación al norte de las SSI similar a la boya 58, desviándose por el Estrecho de Boyd hasta acceder al Estrecho de Bransfield, donde quedó atrapada en Isla Decepción. Esta similitud muestra no sólo el carácter recurrente de esta recirculación alrededor de SSI las durante el Verano Austral, dado que las boyas fueron lanzados en distintos años, sino

también, su presencia a lo largo de todo el verano, ya que la boya 58 se lanzó a finales de diciembre de 2009 y volvió al Estrecho de Bransfield 6 meses más tarde. En ese momento ya no debe haber TBW en dicha zona (Zhou et al., 2013), por lo que no puede desarrollarse el BCS, lo que justifica que tras su reentrada en el Estrecho deje de circular apoyada en el talud sur de SSI y se desplace por el centro del Estrecho hacia el noreste.

Respecto a los tiempos y periodos de cada boya y su relación con el sistema, podemos analizar que la Corriente de Bransfield es intensa y estable en toda su columna porque a pesar de las diferentes profundidades de lastre (50 y 100m) la trayectoria y tiempo de circulación de ambas boyas es similar. Sin embargo, en la zona norte de las SSI, la corriente es más lenta e inestable, de igual manera a lo mostrado por los transportes geostroficados (Figura 4.5).

En la Figura 4.6 las trayectorias de las boyas que recirculan alrededor de las SSI, lo hacen entre la ubicación de las isoterms de 0.5 y 1.5°C, en la distribución temperatura superficial del mar del Verano Austral promedio entre los años 2006 y 2011. Esto indica que estas isoterms pueden utilizarse para delimitar la presencia de TBW alrededor de las SSI, y que las condiciones presentes en la plataforma norte de las SSI son el resultado de una recirculación la Corriente de Bransfield, siendo un patrón recurrente durante el Verano Austral.

4.4 Identificación y evolución de las zonas frontales alrededor de las SSI.

Una vez establecida la circulación alrededor de SSI durante el Verano Austral de 2010, en la que TBW está limitada al norte por SF y al sur por PF, se pretende establecer algún límite térmico para poder seguir este sistema recirculatorio a lo largo del tiempo, a partir de distribuciones de SST.

Con el fin de poder determinar este límite se reproducen las figuras originales del trabajo de Gordo (2013), que corresponden a los diagramas θ -S obtenidos en el Estrecho de Bransfield durante la campaña CIEMAR (Figura 4.7a) y durante la campaña BREDDIES fase 1 y 3 (Figura 4.7b), ambas campañas realizadas a comienzos del Verano Austral en diciembre del año 1999 y en diciembre-enero del año 2003 respectivamente. Se marcan isopícnas 27.64, 27.75 y 27.81 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, que marcan el límite entre las masas de agua TBW / TWW, TWW / TBW y BDW / BBW, respectivamente. Las temperaturas máximas alcanzadas por TBW han sido muy distintas durante las distintas campañas. Mientras que en COUPLING las temperaturas máximas estuvieron próximas a 1°C (Figura 4.2), durante CIEMAR fueron de 1.5°C (Figura 4.7a) y durante BREDDIES próximas a 2.5°C (Figura 4.7b). A pesar de ello, los rangos de anomalía de la densidad potencial establecidos como delimitantes de TBW siguen siendo válidos.

La comparación de los diagramas expuestos en las Figuras 4.2 y 4.7 parecen mostrar que durante CIEMAR, en diciembre de 1999, se tuvo una situación climática intermedia a la acontecida en el año 2010, durante la campaña COUPLING, con temperaturas superficiales muy frías, y BREDDIES, durante el año 2003, con temperaturas superficiales mucho más cálidas. En la campaña CIEMAR, que es la situación intermedia, 1.5°C podría ser establecida como la isoterma límite superior del TBW y la utilización de esta isoterma durante la campaña COUPLING (Figura 4.6) también dio buenos resultados. Por lo tanto, se elegirá la isoterma 1.5°C próxima al talud norte de SSI para marcar la posición del SF en distribuciones medias de temperatura superficial del mar. En esta zona esa isoterma debe estar próxima a la isóbata de 300m durante el Verano Austral.

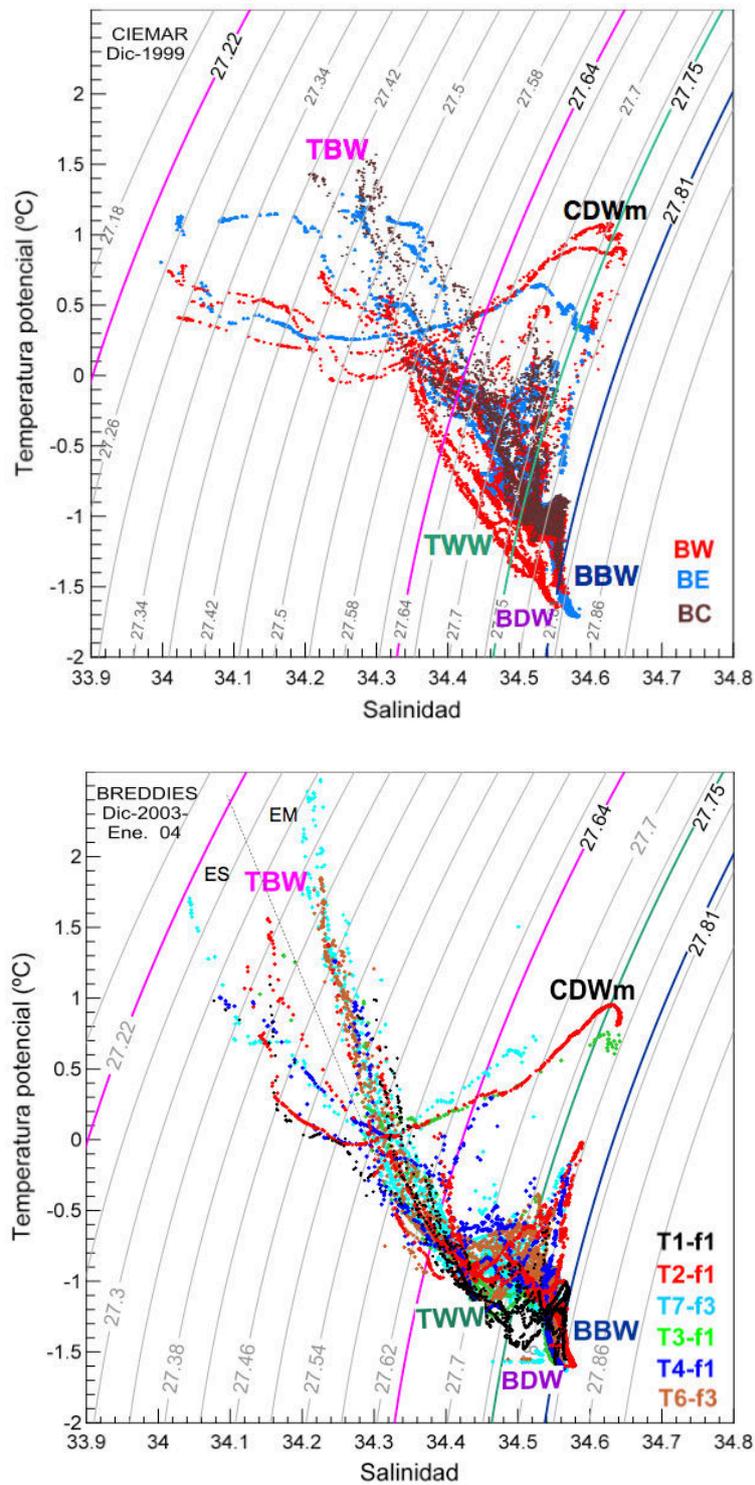


Figura 4.7: Diagramas θ -S en las campañas CIEMAR y BREDDIES, extraídos de Gordo (2013).

Para determinar la temperatura límite con la que marcar el PF hay que analizar en los diagramas θ -S cuál es la máxima temperatura alcanzada TWW en superficie, y ésta debe ser la máxima que tenga TWW sobre la isopicna de $27.64 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$. Utilizando el diagrama de la campaña CIEMAR (Figura 4.7a) se puede establecer la isoterma 0.5°C como identificador de la ubicación del PF en distribuciones de SST. Esto es consistente también con lo mostrado en la Figura 4.6 durante la campaña COUPLING.

Si bien en el Capítulo 3 ya se realizó la descripción general de la distribución de la SST alrededor de las SSI a lo largo del año promedio, la posibilidad de disponer de datos hidrográficos permite contrastar la descripción aportada por los mismos, con la obtenida a partir de distribuciones de SST en las fechas de la campaña COUPLING. En el caso de que se vea como una descripción válida, el seguimiento de las distribuciones de SST permitirá analizar los periodos en que nacen, se desarrollan y desaparecen las señales superficiales de PF y SF durante el Verano Austral del año 2010. No obstante, las bajas temperaturas superficiales que, aparentemente, hubo durante 2010 pueden dificultar la identificación de las estructuras frontales.

4.4.1 Distribución de SST durante la campaña COUPLING.

La campaña COUPLING se llevó a cabo entre el 8 y 26 de enero del año 2010. En la Figura 4.8 se representa la SST semanal media y su respectivo módulo de gradiente para las semanas 2, 3 y 4 de enero del año 2010, mismo periodo en que se realizó la campaña COUPLING, así como la distribución promedio de ambas variables durante la campaña.

En las distribuciones semanales promedio de SST de las distintas semanas de enero de 2010 (Figura 4.8) se muestra el PF claramente establecido desde el comienzo de la campaña. En el Estrecho de Bransfield el agua no supera la temperatura de 1°C y la isoterma de 0.5°C delimita la extensión en el estrecho de TBW, que se encuentra con TWW en esa posición. Los máximos valores del módulo del gradiente de SST se dan también en la

posición del SF. En las distribuciones presentadas, salvo en la semana 3, se observa agua relativamente más cálida en la Cuenca Oeste de Bransfield, entre los Estrechos de Boyd y Gerlache, y que empiezan a aparecer en el talud sur y, en menor medida, en el talud norte de las SSI. Es en la cuarta semana cuando empieza a ser más notoria la estructura a bandas, con agua de similares características alrededor de las SSI. Durante todo el periodo el PF tiene una señal importante en el módulo del gradiente de SST, pero hasta la cuarta semana no empieza a aparecer cierta estructura frontal al este y al norte de la plataforma de las SSI. En el periodo representado no se alcanzan los 1.5°C elegidos como marca de SF dadas las bajas temperaturas del periodo y se tendría que ubicar a través de la isóbata de 300m. Además, también aparece en esa última semana un intenso gradiente entre Rey Jorge e Isla Elefante, que podría identificarse como el remolino muestreado en TB y trazado por la boya 63 (Fig. 4.6).

En esta situación el PF está bien desarrollado y alejado del Estrecho de Gerlache, permitiendo la llegada de TBW al Estrecho de Bransfield. Sin embargo, esta situación cambia en la tercera semana, con un intenso enfriamiento superficial, que hace que agua con temperaturas menores de 0.5°C invadan la Cuenca Oeste y el Estrecho de Gerlache, pudiendo debilitar el BCS que ya parece haberse establecido en la semana 2, y que, de hecho fue identificado al analizar la variabilidad en T1a. También la distribución del módulo del gradiente de la semana 3 refleja este comportamiento anómalo en la Cuenca Oeste del Estrecho de Bransfield, con la aparición de variaciones espaciales que no aparecen ni en la semana posterior ni en la previa. Durante la semana 3 hubo un fuerte temporal en la región que hizo que el barco tuviese que buscar refugio y posiblemente la distribución observada en la semana 3 sea un reflejo de esta situación climatológica anómala.

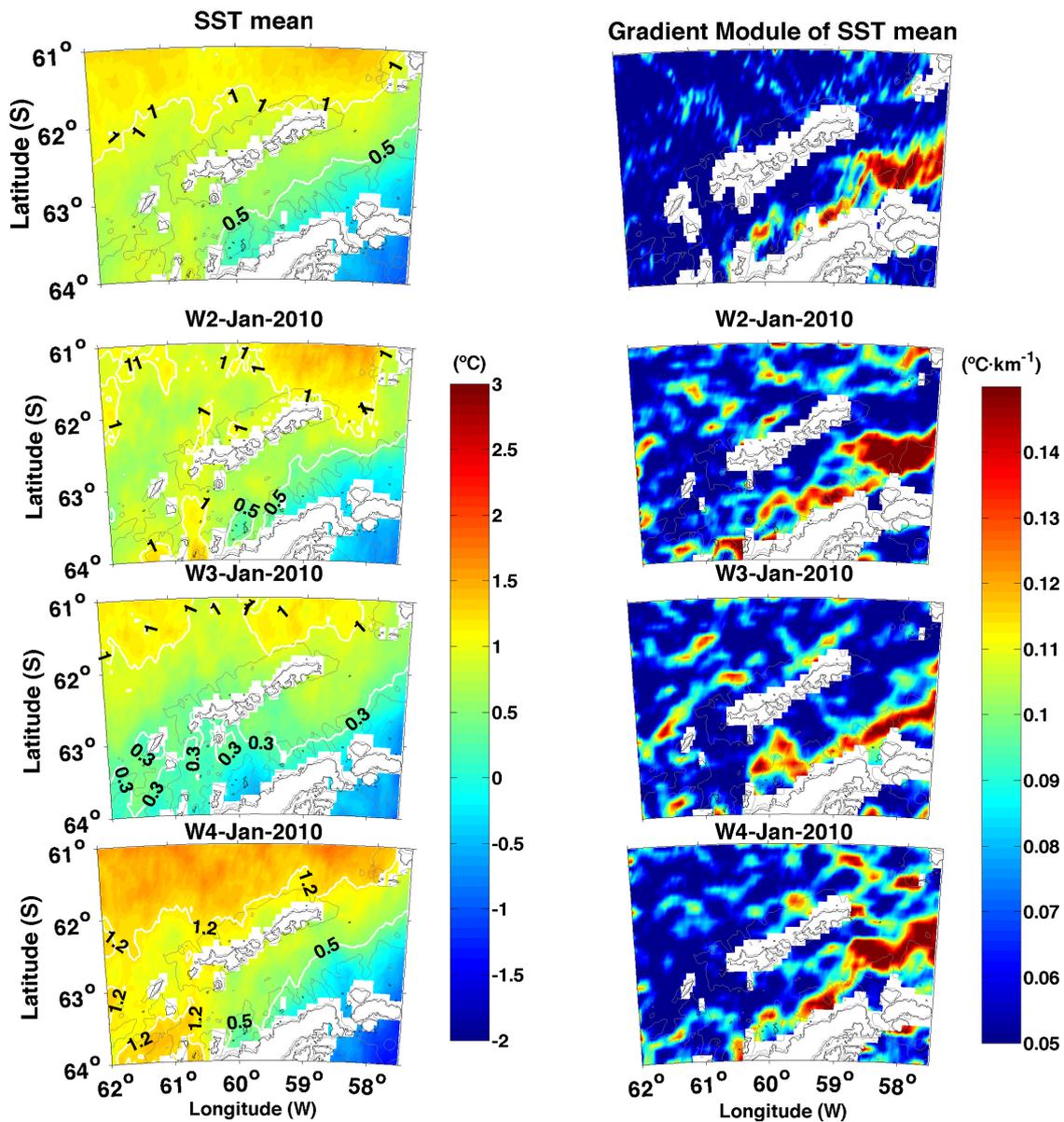


Figura 4.8: SST semanal media y módulo de gradiente de SST para las semanas 2, 3 y 4 de enero del año 2010 y la distribución promedio de ambas magnitudes durante dicho periodo. En blanco se señala la posición de las isotermas 0.3, 0.5, 1.0 y 1.5 °C. Se superpone la isóbata de 300m.

La distribución de SST durante la 2ª semana de enero es coherente con lo mostrado por los datos hidrográficos, con un PF bien desarrollado y agua de características semejantes al norte y al sur de las SSI. No sabemos hasta qué punto el enfriamiento superficial de la tercera semana pueda haber afectado al sistema, pero durante la cuarta semana el BCS parece estar restablecido.

4.4.2 Evolución de las estructuras frontales alrededor de SSI durante 2010.

En el apartado anterior, se han utilizado la distribución de SST y el módulo de gradiente de SST durante la campaña COUPLING para comprobar que mediante estas distribuciones se puede identificar la señal del PF y SF, que según los datos hidrográficos se habían desarrollado.

Esta comprobación permite extender el análisis de las distribuciones de SST y gradiente de SST a lo largo del año 2010 para intentar establecer, fuera del periodo de campaña, la época de establecimiento, máximo desarrollo y desaparición de ambos frentes hidrográficos en el año 2010.

Tras el análisis de las imágenes de SST promediadas semanalmente durante todo el periodo de estudio, se ha elegido la isoterma de 0.5°C para identificar la posición del PF, pero cabe destacar que esta posición e isoterma depende del periodo que se describa.

En el caso de la campaña COUPLING, en la última semana de diciembre no parece haber empezado a establecerse aún el PF (Figura 4.9). En gran parte del Estrecho de Bransfield la temperatura supera los 0°C, pero no los 1°C y se empieza a distinguir el ingreso de agua proveniente del Mar de Bellingshausen. Asociado a esta entrada hay inestabilidades en la Cuenca Oeste que se ponen de manifiesto en el módulo del gradiente de SST. La isoterma de 0.1°C coincide con la franja térmica que se observa en su módulo de gradiente (Figura 4.9). Dicha franja aumenta considerablemente en la primera semana de enero, abarcando gran parte del estrecho de Bransfield, paralela a la Península Antártica. En esa semana la SST del Estrecho supera en su gran mayoría 1°C, alcanzando la plataforma este de la isla Rey Jorge y la isoterma de 0.5°C coincide con la posición del máximo gradiente térmico.

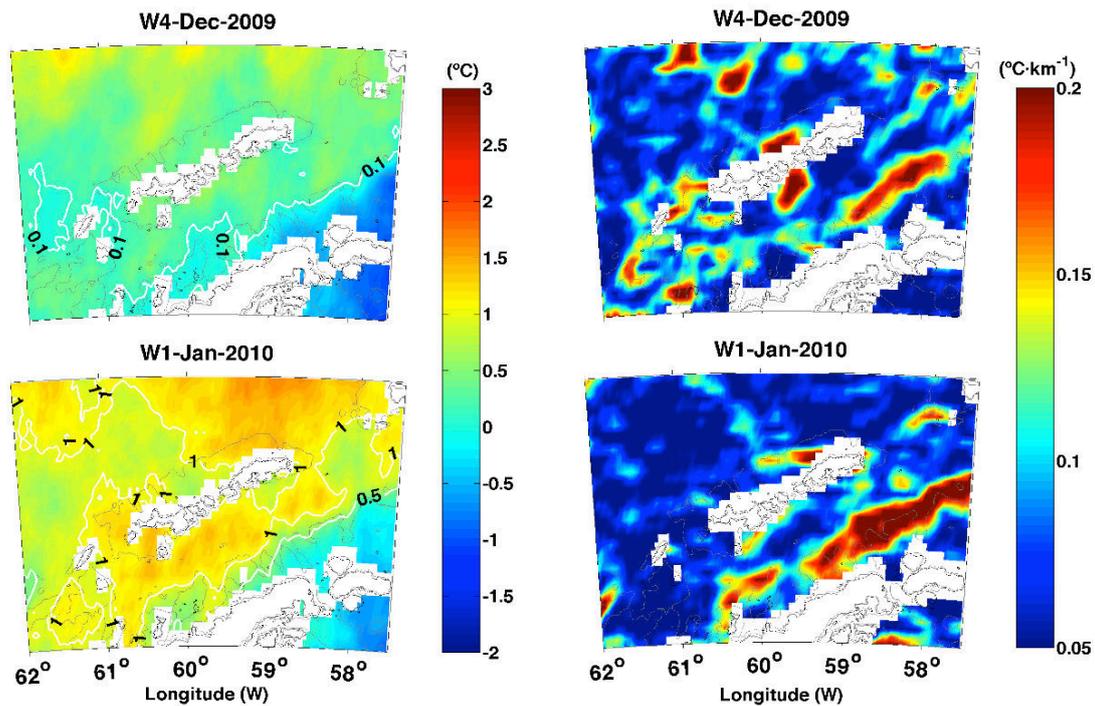


Figura 4.9: SST semanal media y módulo del gradiente de SST para las semana 4 de diciembre del año 2009 y la semana 1 de enero del año 2010. En blanco se señala la posición de las isothermas 0.1, 0.5 y 1°C según corresponda. Se marca en gris la isóbata de 300m.

De acuerdo al análisis realizado en el Capítulo 3 para un año promedio, a mediados/finales de febrero se espera el máximo desarrollo del BCS, y coincide con momento en que el PF avanza entre las cuencas oeste y central del Estrecho de Bransfield hasta alcanzar su posición más próxima a la Península Antártica. A partir de mediados de marzo la posición del PF debería comenzar a retroceder, acercando su posición al talud sur de las SSI y en abril el TWW ya debería haber invadido todo el Estrecho de Bransfield y alrededor de las SSI sólo quedaría agua con temperaturas menores a 0.5°C y una débil señal del PF. Las bajas temperaturas reinantes durante la campaña COUPLING pueden modificar este patrón.

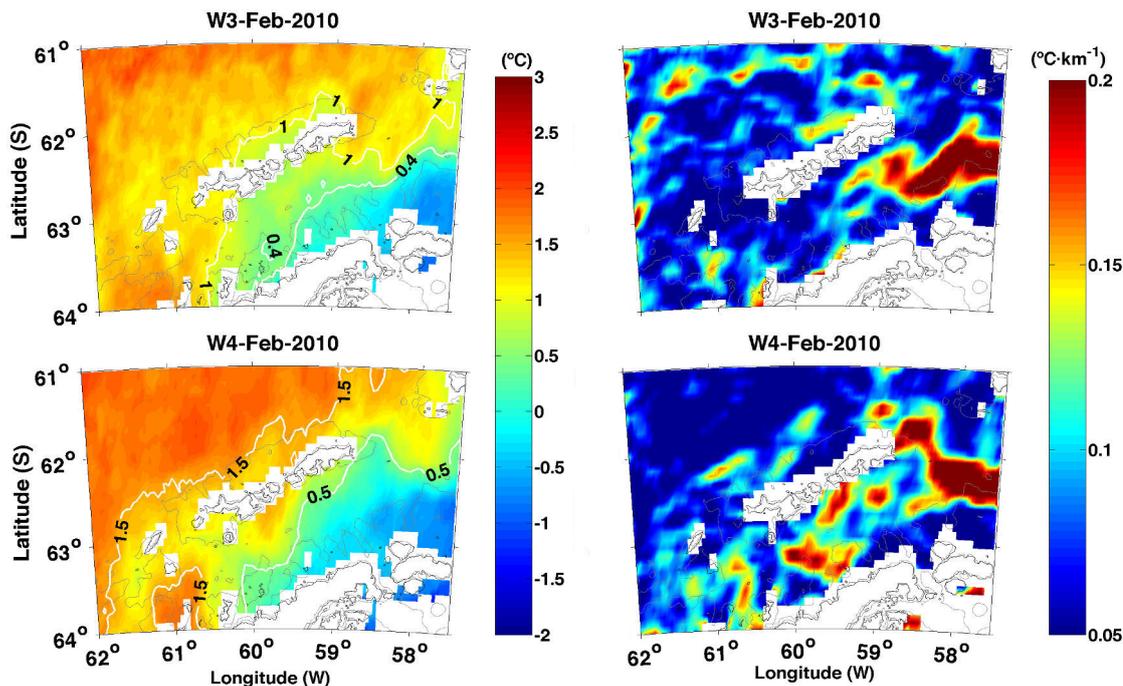


Figura 4.10: SST y módulo del gradiente de SST semanales medios para las semanas 3 y 4 de febrero 2010. En blanco se señala la posición de las isothermas 0.4, 0.5, 1 y 1.5°C según corresponda. Línea gris: -300m.

En la Figura 4.10 se representa la SST y el módulo de gradiente de SST semanales medios, para las semanas 3 y 4 de febrero, en pleno Verano Austral. La situación observada es la esperada, con una clara estructura térmica a bandas alineadas a SSI, y el PF es su posición más próxima a la Península Antártica, con una presencia superficial del TWW mínima. No obstante, el gradiente térmico asociado a la presencia de PF ocurre en isothermas menores a 0.5°C. Esta menor temperatura puede ser debido al mayor enfriamiento superficial durante 2010.

A pesar de la señal en el módulo del gradiente de SST (Figura 4.10), la distribución de SST muestra que desde principios de mayo todo el Estrecho de Bransfield está ocupado por agua muy fría, de manera que estos gradientes ya no están relacionados con la presencia del PF.

En la relativo a la segunda estructura frontal, el SF, las masas de agua entre las que se desarrolla, ASW y TBW, tienen rangos de temperaturas

similares de manera que resulta más difícil identificar el SF a partir de imágenes SST. Las bajas temperaturas presentes durante el verano de 2010 puede dificultar aún más esta identificación.

En la Figura 4.9, se observa que en la cuarta semana de diciembre del año 2009 aparece un gradiente térmico sobre la isóbata de 300m entre la isla Nelson e isla Robert, y aunque es ese periodo empieza a aumentar la SST en el Estrecho de Bransfield, la temperatura aún no es representativa de TBW, ni se ha desarrollado aún el PF. En la primera semana de enero, una vez desarrollado el PF, podría llegar a desarrollarse el SF y, de hecho, aparece un gradiente térmico al norte de la isla Rey Jorge. No obstante, la distribución de SST en esa zona parece indicar que el gradiente observado está más relacionado con la variabilidad al norte del archipiélago que a la recirculación de TBW. A partir de la segunda semana de enero se observa en la Figura 4.8 la señal del SF, asociada a la recirculación de TBW. Sigue apareciendo durante febrero (Figura 4.10), si bien con una señal muy poco intensa. A pesar de volver a mostrar intensos gradiente al norte de las SSI durante mayo (Figura 4.11), la distribución de SST muestra que esos valores del gradiente ya no están asociados a la presencia de TBW en la plataforma norte de las SSI.

A partir de las distribuciones de SST y gradiente de SST se ha podido establecer la aparición de PF en la primera semana de enero del año 2010, aunque con temperaturas menores de 0.5°C . El PF está plenamente desarrollada a mitad del verano, y ya no muestra señales a principio de mayo. Sin embargo, las bajas temperaturas durante 2010 hacen que sea muy difícil identificar el SF a partir del módulo del gradiente. Aún así, en la segunda semana de enero parece que ya se ha formado. Entre la tercera y cuarta semana de enero, cuando se muestrea la plataforma norte de las SSI en la campaña COUPLING, los datos hidrográficos mostraron que ya se había formado, mientras que en mayo ya no se observa señal del SF.

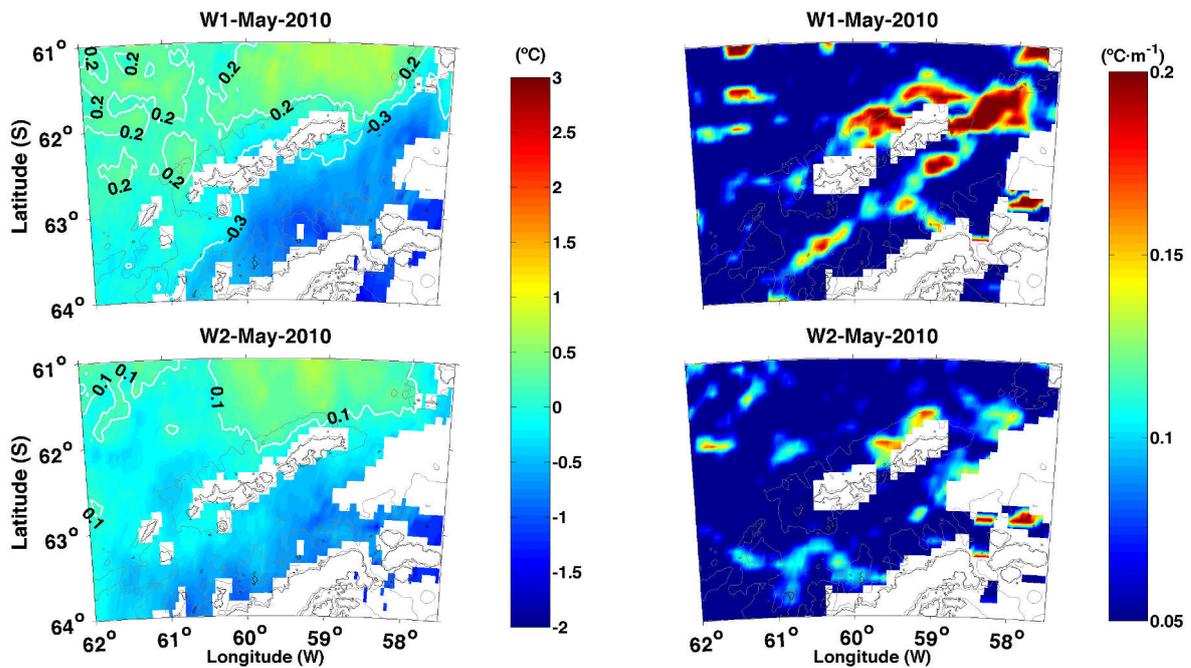


Figura 4.11: SST y módulo de gradiente de SST semanales medios para la semanas 1 y 2 de mayo del año 2010. En blanco se señala la posición de las isothermas -0.3, 0.1 y 0.2°C según corresponda. En gris la batimetría de 300m

En el próximo capítulo se expondrán metodologías que permiten analizar en mayor detalle la variabilidad espacio-temporal de las zonas frontales en distintas escalas temporales.

4.5 Características más notables de la dinámica alrededor de las SSI durante el Verano Austral.

A partir de los datos hidrográficos se observa que en enero de 2010 aparecen las distintas componentes de BCS en el Estrecho de Bransfield, con la presencia de TBW, TWW y CDWm en el trayecto T1b, los frentes PF y BF, la Corriente de Bransfield y remolinos anticiclónicos entre PF y BF. La velocidad de la Corriente de Bransfield está entre 30 y 50 cm/s.

En el margen oriental de SSI la corriente recircula y aparece un remolino anticiclónico asociado a dicha recirculación tal y como predecían los modelos de laboratorio de corrientes de gravedad de descarga en las SSI.

En las secciones al norte de las SSI aparecen masas de agua típicas del Paso Drake tales como ASW, WW y UCDW, pero además, en estaciones sobre la plataforma y talud norte aparece TBW, dónde la extensión más septentrional de TBW se marca por el SF. TBW recircula en la plataforma norte de las SSI hacia el suroeste, con velocidades máximas de 7 cm/s. Este movimiento al norte es más lento e inestable que el mostrado por TBW al sur, mientras circulaba en la Corriente de Bransfield. Las boyas muestran que TBW vuelve a ingresar en el Estrecho de Bransfield a través de Estrecho de Boyd.

La dinámica superficial en el Estrecho de Bransfield pre y post época estival se refleja en las distribuciones de SST mostradas de la Figuras 4.9 a 4.11. Tras la época invernal el agua que presenta temperaturas superiores a los $-0,5^{\circ}\text{C}$ comienza a ocupar la zona sur del Paso del Drake y el Estrecho de Bransfield. Esta agua a finales de enero y mediados de febrero queda restringida al margen más noroccidental de la Península Antártica, en una región próxima al Mar de Weddell, periodo en que superficialmente la mayor parte del Estrecho de Bransfield está ocupado por las cálidas TBW. Esta dinámica tan marcada entre el dominio superficial de la cálida TBW y la fría TWW genera la clara identificación, dentro del Estrecho de Bransfield, del Frente Peninsular (PF), el cual aparece en la primera semana de enero. En este periodo se observa el calentamiento superficial progresivo de toda el área de estudio, a su vez que, el agua con características de TBW ya recircula sobre la plataforma norte de las SSI. Esta recirculación está fuertemente influenciada por la orografía de la zona ya que TBW circula, al igual que en lado sur, apoyada en el talud, de manera que el SF aparece en estaciones al norte con una profundidad máxima de 300m.

A pesar de no distinguirse tan claramente la señal del SF como la de PF, gradientes sobre la isóbata de 300m son visibles durante toda la época estival, especialmente en la zona de la isla Nelson y Rey Jorge. La primera señal

térmica de este frente tiene un retraso de una semana en comparación con el PF, lo que nos indica que el SF se origina por la recirculación del TBW en el sistema.

La dinámica descrita en este capítulo demuestra que la Corriente de Bransfield tiene su origen en una corriente de gravedad de descarga que se genera cuando TBW puede entrar al Estrecho de Bransfield, debido al retroceso del TWW a zonas más próximas a la Península Antártica. El agua menos densa, TBW, se propaga apoyada al talud sur de las SSI y cuando llega a su extremo nororiental sigue recirculando apoyada al talud, de manera que termina rodeando las SSI, por lo que su dinámica esté influenciada por la batimetría de la zona. Estas evidencias van contra la teoría de Zhou *et al.* (2006), que proponen que la Corriente de Bransfield es una corriente de frontera oeste.

La dinámica expuesta se sintetiza en el esquema mostrado en la Figura 4.12. En dicho esquema se marca la ruta de entrada de TBW y TWW al Estrecho de Bransfield, la ubicación del PF a mediados del verano, la posición del SF siguiendo la batimetría de 300m, el remolino anticiclónico asociado a la recirculación al este de Rey Jorge, la Corriente de Bransfield (BC) y la recirculación de la Corriente de Bransfield (BC-r).

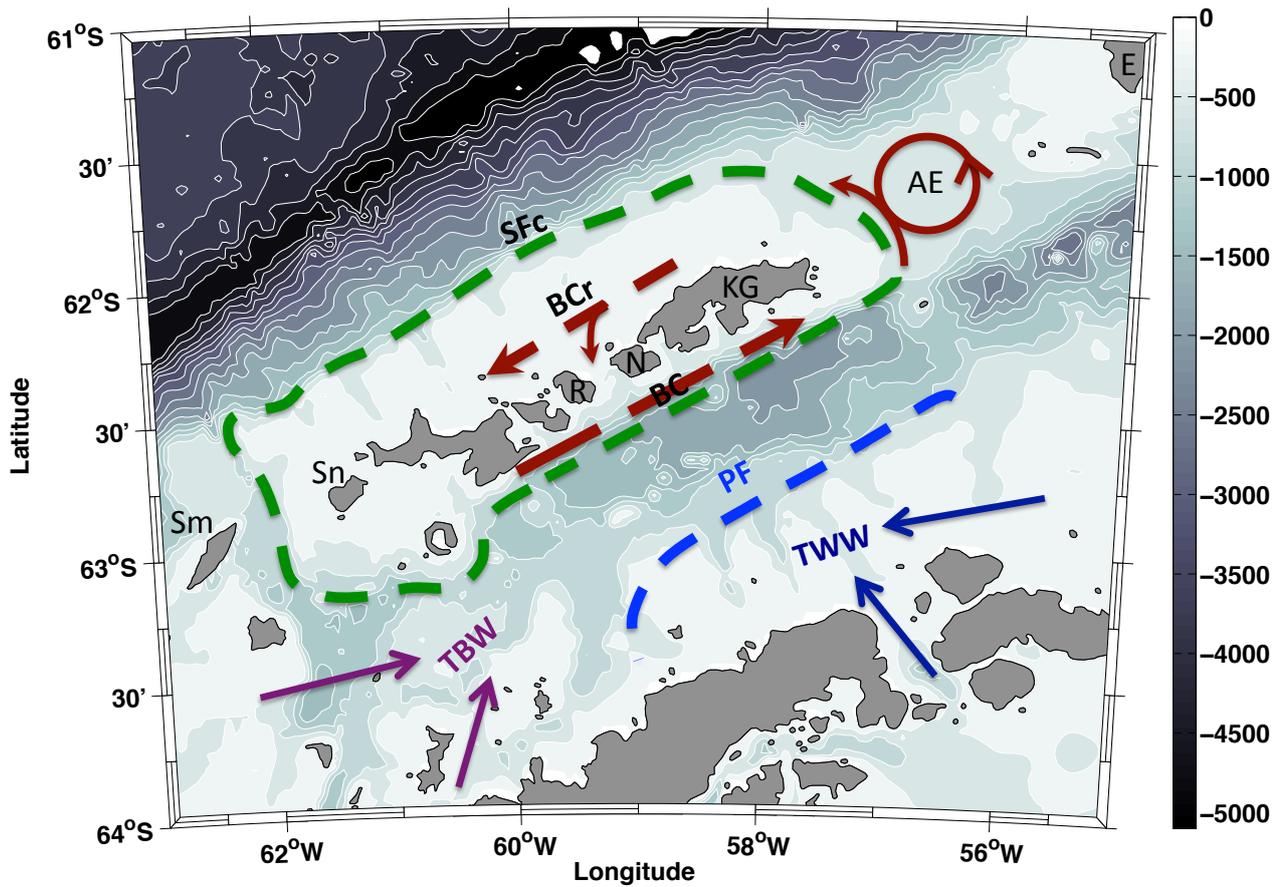


Figura 4.12: Esquema de circulación del Sistema de la Corriente de Bransfield.
 Sm: isla Smith; Sn: isla Snow; R: isla Robert; N: isla Nelson; KG: isla Rey Jorge; E: isla Elefante; isóbatas cada 300m entre 0 y 5100m.

Capítulo 5

Variabilidad alrededor de las SSI. Influencia del ENSO

En los Capítulos 3 y 4 se ha analizado tanto la variabilidad de la distribución de SST durante un año promedio como durante el Verano Austral del año 2010, estableciendo las características principales de la evolución del Sistema de la Corriente de Bransfield y su relación con el desarrollo del PF y SF. La identificación de PF y SF realizada en el Capítulo 4 estableció que, de acuerdo a la distribución en el año promedio de SST, la isoterma superficial de 0.5°C puede ser utilizada para establecer la posición del PF, mientras que la isoterma de 1.5°C, junto con la isóbata de 300m, pueden usarse para la posición promedio del SF.

A pesar que en el Verano Austral del año 2010, las temperaturas fueron más bajas que la media de SST (Capítulo 4), el desarrollo y evolución del BCS, y los frentes hidrográficos asociados mostraron un patrón semejante al descrito en el año promedio (Capítulo 3), aunque con el desarrollo del BCS una semana más tarde, en la primera semana de enero.

Tal como se describió en el anterior Capítulo el establecimiento del PF y SF viene ligado al comportamiento de la Corriente de Bransfield como una corriente de gravedad de descarga durante la época estival. La señal de estas componentes y otras del BCS es recurrente durante el verano austral tal como lo demuestran los datos de las campañas CIEMAR, BREDDIES Y COUPLING (Sangrà *et al.*, 2011, 2014). La colección de datos SST obtenidos por sensores combinados de microondas e infrarrojos permitirá estudiar por vez primera la variabilidad interanual de este sistema a través de la huella que dejan en este campo el PF y SF. Asimismo la dinámica del Océano Austral tiene una estrecha relación con variaciones climáticas globales tipo ENSO (Liu *et al.*, 2004; Turner, 2004) por lo que es necesario realizar un análisis del comportamiento de la variabilidad interanual del PF y SF para determinar si este fenómeno genera alguna influencia en estos frentes hidrográficos y, por lo tanto, en el BCS.

En este Capítulo se hará uso de la metodología explicada en la Sección 5.1 para identificar y seguir la señal del PF y SF sobre transectos perpendiculares a las SSI, construidos a partir de la elección de los píxeles adecuados en distribuciones de SST. Se analizará la variabilidad espacio-temporal de los frentes sobre estos transectos, en un año promedio, obtenidos con la versión OI SST V03.0 (Secciones 5.2 y 5.3). Luego se procederá a un estudio de la variabilidad interanual de estas estructuras frontales utilizando el rango completo de datos disponibles, entre enero de 2003 y diciembre de 2013, con la versión OI SST V04.0 (Sección 5.4), y se analizará su posible relación con oscilaciones climáticas tipo ENSO (Sección 5.5). Finalmente se expondrán los resultados más relevantes del capítulo (Sección 5.6).

5.1 Metodología para el análisis de la variabilidad espacio-temporal alrededor de las SSI.

Hasta ahora los análisis de variabilidad expuestos en esta tesis se han realizado a partir del análisis de la evolución de determinadas estructuras al comparar visualmente distribuciones espaciales de SST o módulo de gradiente de SST. No obstante, es necesario diseñar una metodología que permita realizar un análisis objetivo de dicha variabilidad.

Para evaluar las condiciones de la señal de los frentes hidrográficos se utilizaron los datos de SST derivados a partir de Remote Sensing System (OI SST product V03.0) entre los años 2006-2011. Estos datos han sido extraídos de la base de datos siguiendo el procedimiento expuesto en el Capítulo 2.

La variabilidad de los frentes alrededor de las SSI se ha estudiado sobre dos transectos, TC y TE, ambos desde el Paso Drake hasta la Península Antártica. El transecto TC considera los píxeles de la información satelital más próximos al transecto hidrográfico de la Campaña COUPLING, incluyendo el paso por el canal que separa la isla Nelson e isla Robert (Figura 5.1). El transecto TE se construye con píxeles en el margen oriental de las SSI, en una posición próxima al transecto T5 de la campaña COUPLING (Figura 4.1), y a transectos de las campañas CIEMAR y BREDDIES (BE y T4 respectivamente; Figura 2.1). Se eligió éste por su localización al norte de las SSI, pero justo en la zona de comienzo de la recirculación, y con un cambio en la anchura de la plataforma, que parece puede generar que parte del flujo se dirija hacia latitudes más septentrionales (Figura 4.6). A partir de estos transectos se puede observar la variabilidad temporal y espacial de ambos frentes alrededor de las SSI.

En este trabajo se analizarán diagramas Hovmöller de series temporales de SST y de gradiente de SST a lo largo del transecto para estudiar la variabilidad espacio-temporal de las estructuras frontales. Los diagramas de Hovmöller permiten analizar en un mismo gráfico las variaciones espacio-

temporales y suelen construirse poniendo en un eje la escala de tiempo y en el otro eje latitudes o longitudes. Como en los capítulos anteriores se ha puesto de manifiesto el desplazamiento de los frentes hidrográficos, acercándose o alejándose de las SSI, se ha optado por realizar diagramas Hovmöller con la escala temporal en el eje horizontal y la distancia respecto al primer píxel que se tome en cada transecto en el eje vertical.

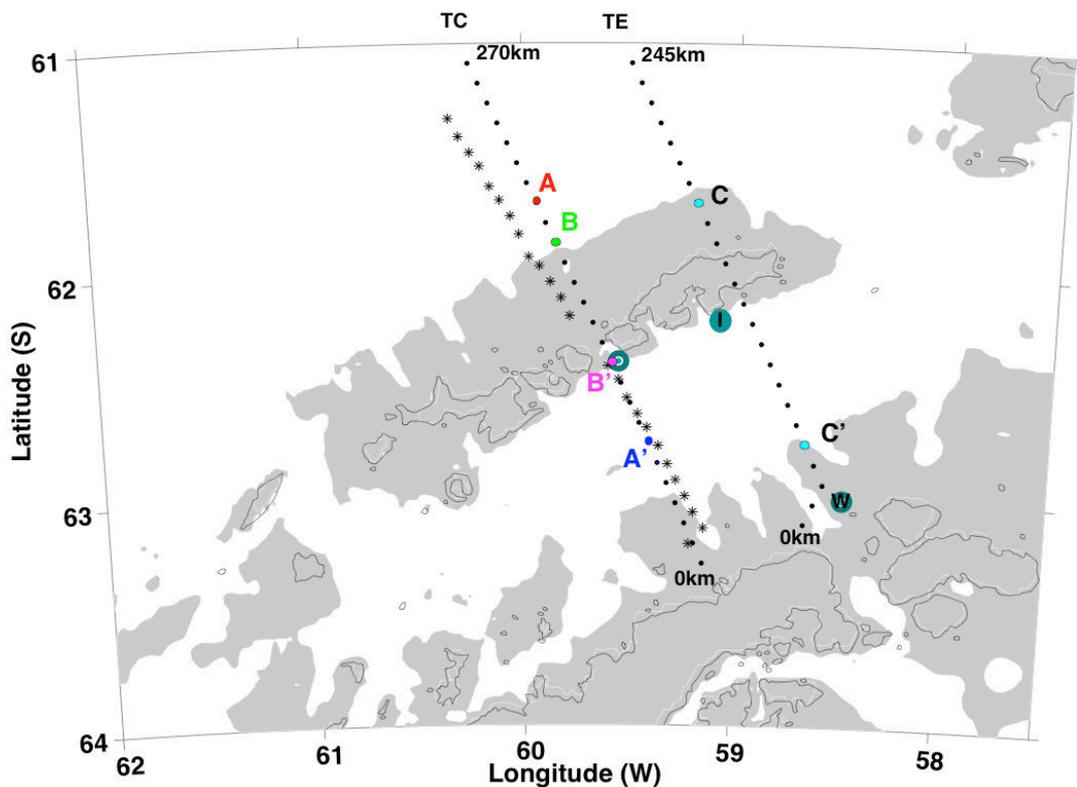


Figura 5.1: Localización de los transectos y puntos tomados para el análisis de variabilidad (ver explicación en el texto).

A partir de los diagramas Hovmöller del gradiente a lo largo de cada transecto, se han detectado las posiciones donde en algún momento del Verano Austral se obtienen los valores máximos de gradiente. Los puntos A', B' y C' mostrados en la Figura 5.1 han sido seleccionados para el seguimiento del PF, mientras que para el seguimiento del SF se han elegido los puntos A, B y C.

A lo largo del año hay momentos de relativamente altos valores del gradiente que están relacionados con inestabilidades asociadas al calentamiento o enfriamiento de la zona, y no al desarrollo del BCS. Para distinguir estos periodos e identificar la presencia del TBW en el Estrecho de Bransfield, se ha representado la diferencia de SST a lo largo del año entre dos puntos del Estrecho de Bransfield, uno permanentemente ocupado por TWW, el punto W, y otro en el que cuando el BCS está desarrollado está ocupado por TBW, el punto I (Figura 5.1).

Además del análisis de la variabilidad en el año promedio, se estudia la variabilidad interanual a través de los datos de SST derivados a partir de Remote Sensing System (OI SST product V04.0) entre los años 2003 y 2013, generando series temporales quincenales de distintas variables para las posiciones A (SF) y A' (PF) del transecto TC. Los periodos de variabilidad más significativos se han obtenido utilizando Transformada Wavelet (WT). Además se ha explorado la influencia de la Oscilación Sur El Niño/Niña (ENSO) en el desarrollo y ubicación de los frentes, relacionando series temporales de distintas variables con la serie temporal de datos mensuales de MEI (Capítulo 2), entre el 1 de enero del 2003 y el 31 de diciembre del 2013.

5.2 Variabilidad y gradientes SST alrededor de las SSI en un año promedio.

Los diagramas Hovmöller de SST se han obtenido calculando el promedio diario de dicha variable en cada píxel de los transectos TC (Figura 5.2a) y TE (Figura 5.3a), entre el año 2006 y 2011, construyendo así diagramas Hovmöller de SST diarios en el año promedio. Sobre estos valores promediados de SST se calculó el gradiente de SST a lo largo de cada transecto (Figuras 5.2b y 5.3b). En las figuras presentadas para el año promedio se ha comenzado por septiembre para mostrar de forma centrada el periodo de mayor variabilidad.

Las representaciones de la SST (Figura 5.2a y 5.3a) de ambos transectos muestran las siguientes similitudes:

- Un comportamiento estacional similar, con las máximas temperaturas en el Verano Austral y mínimas en el Invierno Austral.
- A pesar de los altos valores de temperatura que se observan durante el verano, hay un leve decaimiento latitudinal de los mismos, ubicándose los registros superiores en la sección norte del transecto, indicando la influencia Circumpolar ($T > 2^{\circ}\text{C}$). En cambio, al sur de los transectos la influencia del TWW genera que las temperaturas sean menores ($T < 0^{\circ}\text{C}$).
- En los alrededores de las SSI, en las latitudes centrales de los diagramas, el patrón de la distribución de temperatura es similar en ambas partes del archipiélago, como reflejo del establecimiento del BCS y de la recirculación del TBW alrededor de las SSI.
- En ambos transectos el calentamiento del agua superficial ocurre durante la última semana de noviembre y en el mes de diciembre sin diferencias latitudinales en la región de estudio.
- La llegada de agua fría es mucho más gradual, comenzando a principio de abril en las posiciones más meridionales del transecto y avanzado mayo en las posiciones más septentrionales. Esto motivará un desplazamiento de la posición de las zonas frontales a medida que se acerca el final del verano.
- Aunque aparece un leve calentamiento en las zonas más próximas a la Península Antártica de ambos transectos, prácticamente durante todo el año están ocupadas por agua con características de TBW.

La similitud de las aguas sobre el talud sur y la plataforma norte de las SSI queda clara tanto en los valores similares de SST como en los bajos valores del gradiente de SST a lo largo del ambos transecto durante el verano (Figura 5.2 y 5.3).

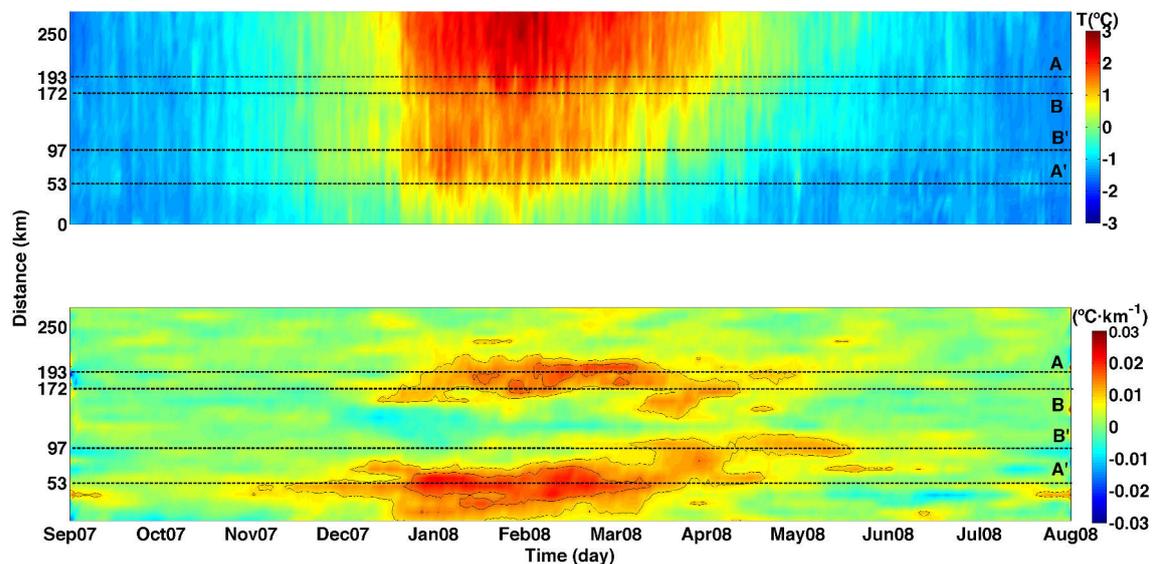


Figura 5.2: Diagramas de Hovmöller del patrón diario medio de la SST y del gradiente de la SST a lo largo del transecto TC.

Los frentes hidrográficos quedan patentes en la representación del gradiente de SST a lo largo del transecto. Cabe destacar la diferencia de esta magnitud con respecto a los gradientes utilizados en capítulos anteriores, en los que se mostraba el módulo del gradiente total. Los mostrados en este apartado son un orden de magnitud inferior a los de capítulos anteriores porque se han calculado a partir de la SST ya promediada. Al comparar la Figura 5.2 con la Figura 4.3, se presenta una coincidencia entre la ubicación de la señal de los frentes en el transecto central de la campaña COUPLING y la aportada por el gradiente de SST a lo largo de TC en esas mismas fechas.

En los gradientes de SST a lo largo de TC (Figura 5.2a) muestra que la posición del PF (máximos valores del gradiente al sur de las SSI) varía, centrada en A' (53 km) durante el verano austral. A finales del Verano Austral su posición va cambiando gradualmente hacia el norte, indicándonos el avance de la TWW superficialmente en el Estrecho de Bransfield, asociado a la disminución típica de temperatura debido al enfriamiento superficial

colocándose en B' (97 km) al final del verano. No obstante, durante el Verano Austral el valor máximo se mantiene en una posición casi constante (A'). La extensión latitudinal del frente está asociada a la marca del campo de remolinos anticiclónicos que suelen generarse próximos al PF. Estas características coinciden con las descripciones temporales del comportamiento de la SST (Figura 3.4) en el año promedio y demuestra la influencia de la TWW sobre la formación y posición de PF en sus diferentes periodos de permanencia.

Los gradientes correspondientes al SF también muestran inestabilidades a su alrededor que pueden estar asociadas a las inestabilidades del SF, ya observadas en la trayectoria de las boyas lanzadas en las campañas BREDDIES y COUPLING (Figura 4.6). Estas inestabilidades se asocian a la recirculación de la Corriente de Bransfield con su posible generación de un remolino anticiclónico al Oeste de la Isla Rey George (Figura 4.6) y a las inestabilidades propias de la región (no asociadas al BCS) y próximas al Paso Drake.

La serie temporal de SST y de su gradiente a lo largo de TC mostrada en la Figura 5.2 pone de nuevo de manifiesto como SF y PF delimita la extensión norte y sur, respectivamente, del TBW alrededor de las SSI.

La señal de los frentes en TE (Figura 5.3) muestra diferencias respecto a lo observado en TC, mostrando una variabilidad espacial propia en el mismo periodo. En lo relativo al PF los valores altos de gradiente se mantienen en la posición C' (43 km), debido a que la TWW se mantiene constante en esa zona durante el periodo cálido (diciembre-abril) y sólo a finales de marzo su señal se estrecha, alcanzando la posición más cercana a las SSI. Además, los máximos valores de gradiente asociados a PF son mayores en TE que en TC.

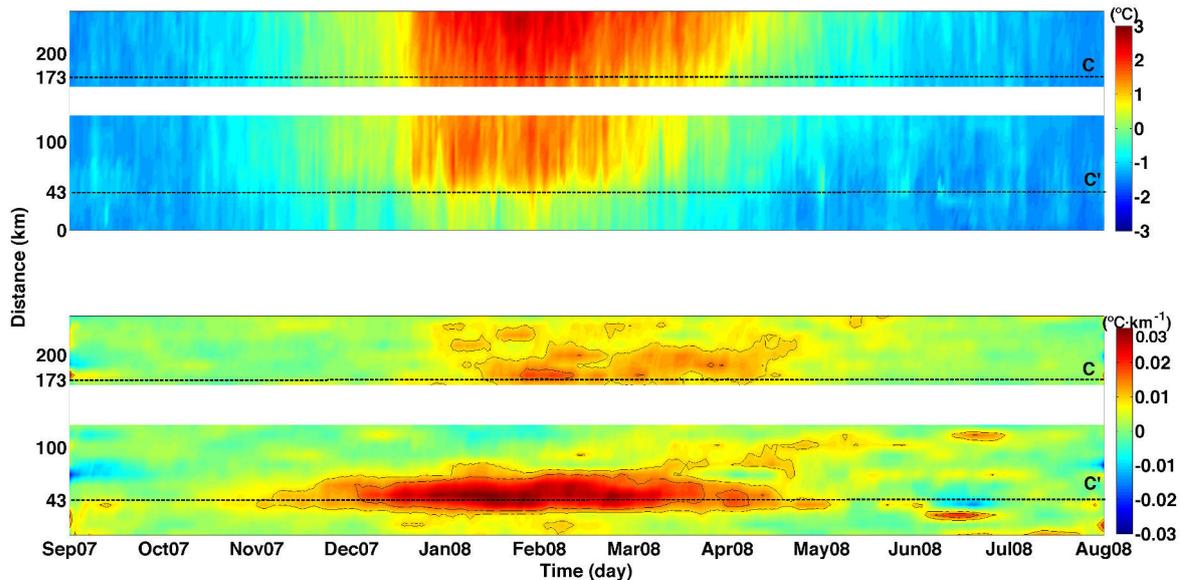


Figura 5.3: Diagramas de Hovmöller del patrón diario medio de la SST y del gradiente de la SST a lo largo del transecto TE.

Al norte de las SSI, el gradiente a través de TC (Figura 5.2) también muestra un acercamiento de la señal del SF hacia las SSI en el mes de abril, posiblemente producido por el debilitamiento de la recirculación al desaparecer la Corriente de Bransfield. En esa época SF está ubicada por debajo de la posición B (Figura 5.2), aunque durante mayo el máximo valor del gradiente en esa zona vuelve a estar centrado en B. Esta oscilación del gradiente en B se refleja en la Figura 5.4b, y podría ser explicado por la vuelta al norte del agua más cálida que habría pasado por RN una vez debilitada la Corriente de Bransfield.

En lo relativo al SF, el transecto TE pasa por una región en la que la plataforma norte es más estrecha. En esta zona la boya 63 de COUPLING (Figura 4.6), tras mostrar mucha inestabilidad en su trayectoria, no llegó a incorporarse a la recirculación al norte de las SSI. Ello puede motivar los valores más bajos en los gradientes que se observan en TE, en la posición C (43 km, Figura 5.3), si se comparan con los obtenidos en TC (Figura 5.2, posiciones A y B). Por ello, el estudio del SF resulta más adecuado hacerlo sobre TC.

5.3 Establecimiento y desaparición del SF y PF.

Determinar el establecimiento y desaparición de los gradientes térmicos asociados a PF y SF permite tener una evidencia sobre la recirculación del TBW alrededor de las SSI. Esto, apoyado con las descripciones realizadas en los capítulos anteriores, permite establecer que la Corriente de Bransfield circula apoyada en el talud sur de las SSI, hasta la isla Rey Jorge, para recircular por el talud norte de las SSI.

Cuando el gradiente de temperatura SST entre el punto I sea ocupado por TBW, y el W (Figura 5.1) sea ocupado por TWW, permitirá identificar el establecimiento de la Corriente del Bransfield (Figura 5.4a). Durante los meses del invierno la diferencia entre ambos puntos es menor a 0.25°C . La diferencia va aumentando durante los periodos de transición y a mediados del Verano Austral, entre febrero y marzo, cuando el BCS está en su pleno desarrollo, esta diferencia es máxima, llegando a 1.25°C en el año promedio. A principios de febrero se obtiene un primer máximo, que comienza a decaer hasta que a partir de la segunda quincena de febrero, cuando comienza un segundo aumento de la diferencia de temperaturas, siendo máxima a principios de marzo con valores próximos a 1.5°C . A partir de ese periodo comienza a decaer hasta que a principios de abril, cuando ya parece que no está la Corriente de Bransfield, se observa un cambio de tendencia, con la llegada de agua relativamente más fría. A partir de mediados de abril comienza un descenso continuo de la temperatura hasta valores próximos a cero a partir de mediados de julio y hasta octubre. En el transecto T1b se han observado anomalías (Capítulo 4) que podrían ser compatibles con la recirculación de TBW superficial por el paso entre la isla Robert e isla Nelson. Esta entrada adicional de agua cálida en el Estrecho, proveniente del talud norte de las SSI y podría explicar ciertos patrones observados en la serie temporal de las diferencia de SST y del gradiente de SST a lo largo de TC.

Dado que el objetivo de este apartado es la identificación del establecimiento y desaparición del SF y PF, en la Figura 5.4b se representa la serie temporal del patrón medio diario, durante el año promedio, del gradiente

de SST a lo largo del transecto TC en los puntos A'(azul, PF₁ verano), B(verde, SF) y B' (rojo, PF₂ otoño). Se ha elegido B en lugar de A por representar el punto de valor de máximo gradiente en los periodos de transición, periodo en los que previsiblemente se establecerán o desaparecerán el PF y SF.

En enero el gradiente de SST en A' (PF) comienza a tener valores mayores de 0.01°C/km (Figura 5.4b), pero en B (SF) no aparecen valores similares del gradiente de SST hasta 10 días más tarde. Este establecimiento del PF ocurre cuando la diferencia de temperaturas entre I y W es próxima a 1°C (0.88°C, Figura 5.4a). La velocidad de la Corriente de Bransfield reportada, entre 30 y 50 cm/s (Gordo, 2013; Poulin *et al.*, 2014), junto con el paso por regiones de inestabilidad en la recirculación, son compatibles con la llegada del TBW al norte de las SSI entre 7 y 10 días después de haberse presentado en el Estrecho de Bransfield. A partir de ese momento, según las observaciones ya discutidas, el BCS empieza a desarrollarse.

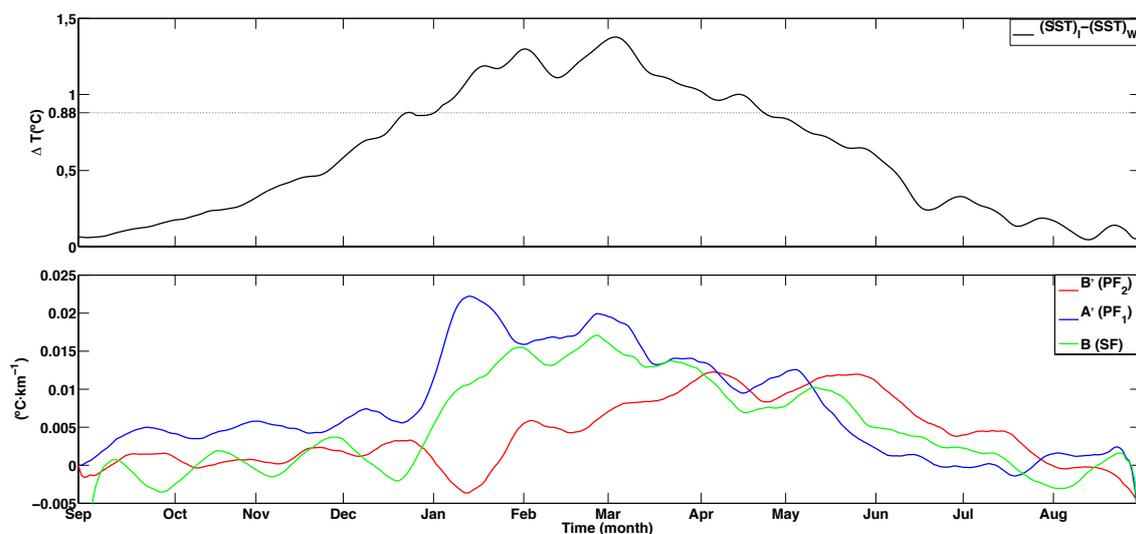


Figura 5.4: Serie temporal del patrón medio diario durante un año promedio del periodo de estudio de a) la diferencia de SST entre I y W; y b) del gradiente de SST a lo largo de TC en A'(azul), B(verde) y B' (rojo)

El desfase en la desaparición de ambos frentes en la serie temporal de SST es más difícil de analizar, dado que desde mediados de abril los gradientes en A' están más relacionados con el avance del TWW más fría sobre el transecto TC (Figura 5.2a), que con gradientes asociados a la

presencia del PF. Esto se pone de manifiesto también en la Figura 5.3, con la ausencia de agua cálida en estaciones próximas a dicho talud en TE a partir de abril, lo que parece indicar que la Corriente de Bransfield no está presente en la zona a partir de esa fecha, cortando la posibilidad de recirculación. A partir de mediados de abril los gradientes en todos los puntos analizados sólo representan la llegada de agua cada vez más fría generada por la llegada del periodo invernal, con gradientes prácticamente nulos a partir de julio.

Los bajos valores de gradientes observados entre las señales de PF y SF en el transecto TC y TE durante todo el año (Figuras 5.2 y 5.3), demuestra que a pesar de que el TBW y la Corriente de Bransfield sólo se presentan en el periodo estival, ambas son estructuras estables dentro del sistema y su extensión horizontal en el transecto TC y TE varía según el periodo observado. El patrón presentado por ambos frentes muestra que la extensión horizontal de TBW sobre el transecto TC (Figura 5.2) es máxima entre los meses de enero y febrero, abarcando una gran extensión del Estrecho de Bransfield. Durante marzo PF va acercándose al talud sur de SSI y, en abril ya TWW ha llegado a esta ubicación, haciendo desaparecer el PF. Al actuar el archipiélago como barrera orográfica, el enfriamiento superficial de la zona norte no empieza hasta finales de abril, cuando deja de llegar la TBW que quedaba recirculando.

Una vez analizada la variabilidad del sistema en un año promedio, en el que se ha visto la vinculación entre el desarrollo del BCS y la aparición de SF y PF, se va a analizar la variabilidad durante todo el periodo de tiempo disponible para identificar patrones de variabilidad interanuales.

5.4 Variabilidad de zonas frontales entre el año 2003 y 2013.

A partir de este apartado se evaluarán las variabilidad interanual de la señal de los frentes hidrográficos a través de los datos de SST y del gradiente de SST derivados del producto Remote Sensing System (OI SST product V04.0) entre enero de 2003 y diciembre de 2013 (Figura 5.1). En este caso se

ha utilizado como punto representativo de SF la posición A' dado que era el punto en el que se obtenían los máximos valores del gradiente durante el Verano Austral del año promedio y está en una ubicación no afectada por la menor resolución espacial cerca de costa de la V04.0 del OI SST (Figura 2.7)

Las series diarias la SST, entre el 1 de enero del 2003 y el 31 de diciembre del 2013 (Figura 5.5), para el SF (A) y PF (A') muestran la forma oscilante asociada al ciclo de calor radiacional de la zona, con sesgos durante el periodo de invierno, que por la ubicación de los frentes son mayores en PF que en SF. Las series tienen forma de dientes de sierra, con el aumento brusco de temperatura limitado a 4 meses, mientras que la disminución de temperatura sucede durante un periodo mayor.

En la Figura 5.5 se ven diferencias interanuales, con una distribución desigual y años más cálidos que otros para ambas series. El valor mínimo y máximo para cada representación fue de -1.8°C y 4.2°C para el SF (Figura 5.5a) y para el PF estos valores fueron -1.8°C y 2.85°C (Figura 5.5b) donde ambos frentes hidrográficos mantienen un comportamiento similar, pero con un desfase de temperatura de 1.35°C . Esta diferencia indica, que a pesar de pertenecer a un mismo sistema y que su correlación sea fuerte ($r=0.84$), la influencia del medio que las rodea afecta la dinámica de estos dos patrones. SF es más cálido por su limitación norte con el sistema circumpolar, mientras que el PF es más frío por la fuerte influencia que tiene desde el sur con las frías aguas del mar de Weddell.

Se marcan las isotermas 0.5°C y 1.5°C , que habíamos elegido en capítulos previos como localizadores de los frentes para el año promedio. En el PF, donde es más fácil identificar TBW, se observa que esta elección es válida durante todo el periodo analizado, aunque probablemente los valores delimitadores durante 2010 deben ser más bajos. Incluso en esta situación, a priori menos favorable al desarrollo de BCS, los datos hidrográficos (Capítulo 4) indicaron que se desarrolló, con velocidades en la Corriente de Bransfield similares a las obtenidas en otras campañas más cálidas (p.e. BREDDIES, 2003).

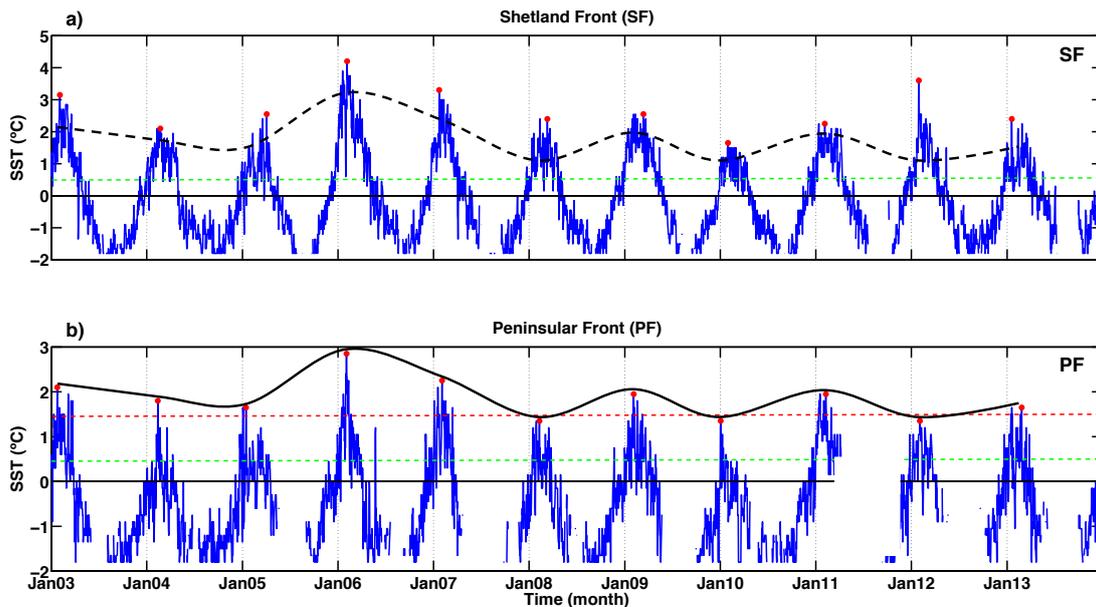


Figura 5.5: Serie temporal de la SST para (a) Frente de las Shetland y (b) Frente Peninsular entre el 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013; puntos rojos marcan el máximo de SST para cada año.

Por las características de las masas de agua involucradas es difícil saber, en el SF, si los valores máximos de SST representan a aguas TBW o a aguas cálidas del Paso Drake. No obstante, el máximo valor de TBW debe coincidir con el máximo valor registrado en PF, donde sólo están la fría TWW y la cálida TBW. Dado que esta misma agua es la que debe estar llegando al norte, para identificar la presencia de TBW, se ha superpuesto a la serie temporal en B, la envolvente del máximo de temperatura de TBW en A'.

Los resultados obtenidos en la Figura 5.5, durante el periodo comprendido entre enero de 2003 y diciembre de 2011, registran periodos con altas variabilidades (enero de 2006 y 2007) y periodos de baja variabilidad (enero de 2010). Estos resultados, comparados con las mismas fechas que se presentan en la Figura 5.6, demuestran que los resultados obtenidos son válidos como descripción de una situación promedio. A esto se le suma que los altos valores que se alcanzan en SST en ambos frentes deben estar relacionados con épocas en las que el TBW también alcanzó mayores registros superficiales de temperatura.

La representación del módulo del gradiente de SST de la Figura 5.6, presenta un comportamiento similar a la SST (Figura 5.5), dónde los máximos valores para ambas señales se registran en el Verano Austral y los mínimos en el Invierno Austral. Aquí sí se observan valores máximos del módulo del gradiente de hasta casi $0.3^{\circ}\text{C}/\text{km}$. En esta serie también se observan los desfases en el establecimiento de los dos frentes.

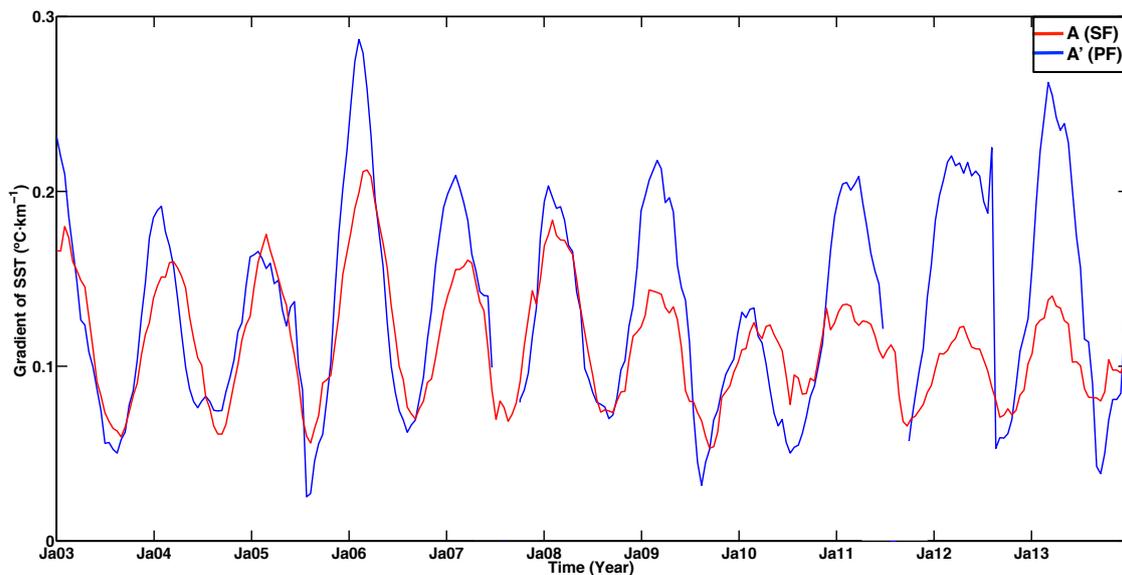


Figura 5.6: Series de tiempo para el gradiente quincenal de SST de las señales (a) Frente de las Shetland y (b) Frente Peninsular entre el 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013.

Observacionalmente ya se ha puesto de manifiesto que la temperatura superficial de esta masa de agua puede tomar diferentes valores máximos (Figura 4.7). La campaña CIEMAR se realizó en el Verano Austral del año 2000, mientras que la campaña BREDDIES se realizó en el verano austral del año 2003. En la segunda campaña llegaron a registrarse valores superficiales de TBW de 2.5°C , que también se reflejan la Figura 5.5a. En COUPLING, realizada en el Verano Austral del año 2010, se obtuvieron valores superficiales más bajos de TBW que en las otras campañas, que se refleja también en la SST de ese verano tal y como muestra la Figura 5.4.

Como conclusión, definir a las isotermas de 0.5 y 1.5°C como indicador superficial de PF y SF, respectivamente, es adecuada como estimación media, pero para estudios detallados de la variabilidad hay que tener en cuenta el rango relativamente alto de variación de la temperatura superficial del TBW. Esto también debería ser tenido en cuenta también a la hora de establecer los rangos característicos de propiedades físicas asociadas a cada masa de agua en la región.

5.5 Influencia ENSO.

El sistema climático presenta variabilidades tanto en el tiempo como en el espacio. La identificación de esta variación en altas latitudes es esencial para entender el clima global, ya que los cambios a escalas decadales y/o interanuales en el Océano Austral pueden afectar al clima en todo el planeta y esto se debe principalmente a la interconexión con los Océanos Pacífico, Atlántico e Índico.

La Oscilación Sur El Niño (ENSO) es una anomalía de la SST presente en todo el Pacífico Tropical Oriental (Figura 5.6). Este fenómeno tiene una clara relación con la subsecuente oscilación global y su relación con las variaciones climáticas a escala global que provocan los cambios de la SST a una misma escala (White y Cayan, 2000). Para clasificar los eventos tipo El Niño, según la National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), la SST debe permanecer por encima de 0.5°C durante al menos 3 meses en toda la región Niño 3.4 (Figura 5.7). Se considera un evento moderado cuando sus lecturas se mantienen igual o superior a 1°C y un evento fuerte tendría un valor de 1.5°C o mayor. Existen ocasiones en que se utiliza el término “condiciones de El Niño” para registros que han llegado al umbral de El Niño, pero no se les considera evento de El Niño porque no ha durado el tiempo suficiente (Bunge y Clarke, 2009). El concepto de La Niña es similar a las premisas utilizadas en El Niño, pero de forma inversa.

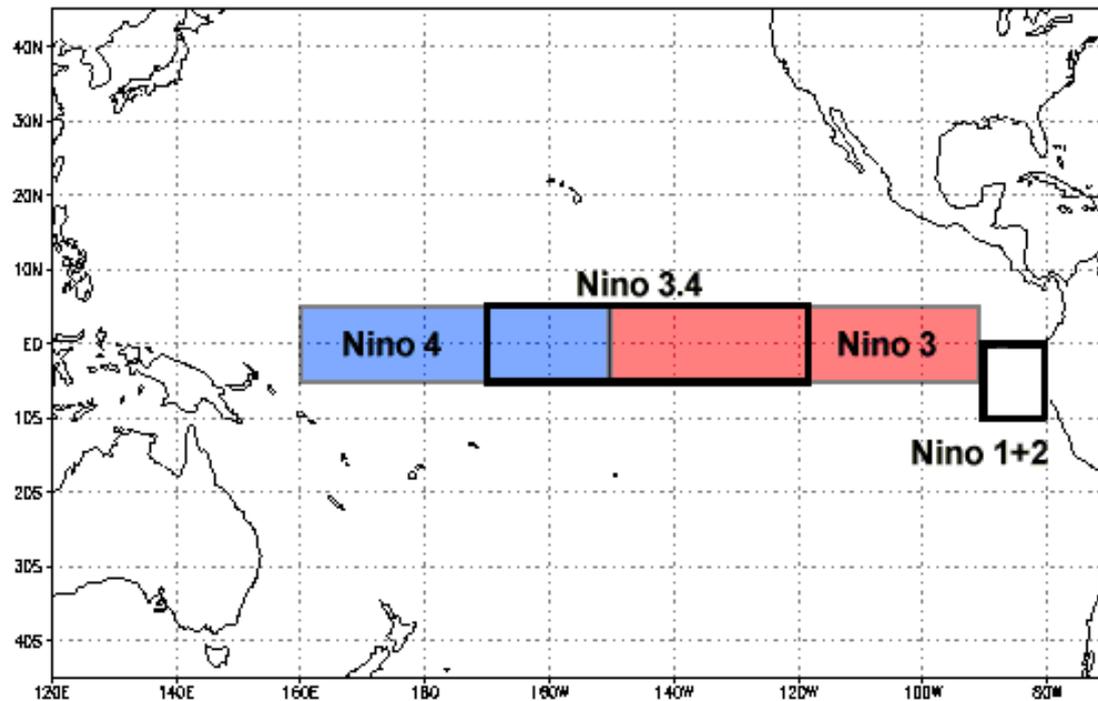


Figura 5.7: Región este-central ecuatorial del océano Pacífico; línea negra indica la región Niño 3.4 (<http://www.nea.gov.sg/>).

La variabilidad climática presente en el Océano Austral (especialmente Niño 3.4) y su relación con las variaciones globales, en este caso con el ENSO, es estudiada desde hace muchos años. Turner (2004) demuestra la conexión existente entre el sistema atmósfera-océano de la zona Pacífico Tropical con las altas latitudes del Hemisferio Sur. Principalmente la conexión entre zonas polares con el ENSO se ha realizado a través del estudio del comportamiento de la variación de formación y derretimiento del hielo marino, como de su extensión y variabilidad intermensual o interanualmente (Carleton, 2003; Haragonzo, 2000; Gloersen, 1995). Dentro de todos estos trabajos, destaca el realizado por Yuan y Martinson (2000), que encuentran que la mayor variación temporal de la extensión de hielo marino (2-5 años) se produce en el Mar de Bellinghausen y el Mar de Weddel. Cuando la plataforma de hielo marino es la menos extensa, existe manifestación del ENSO (Liu *et al.*, 2004) y el trabajo realizado por Venegas *et al.* (2001) concluye que la señal del ENSO se manifiesta principalmente en la zona Pacífico Oriental.

Por otro lado, Loeb *et al.*, (2009) proponen un mecanismo de ajuste donde los fuertes cambios atmosféricos afectan en el comportamiento natural de la SST y esta típica dependencia afectaría a todo el modelo de circulación de la zona de estudio. Por otro lado, Delworth *et al.* (1993) sugiere que las variaciones multidecadales en el espacio y tiempo, como las oscilaciones irregulares del comportamiento termohalino pueden ser forzados por las variabilidades atmosféricas. Esto genera un patrón en la SST en el que el océano como respuesta pasiva a éste (Saravanan y McWilliams, 1998).

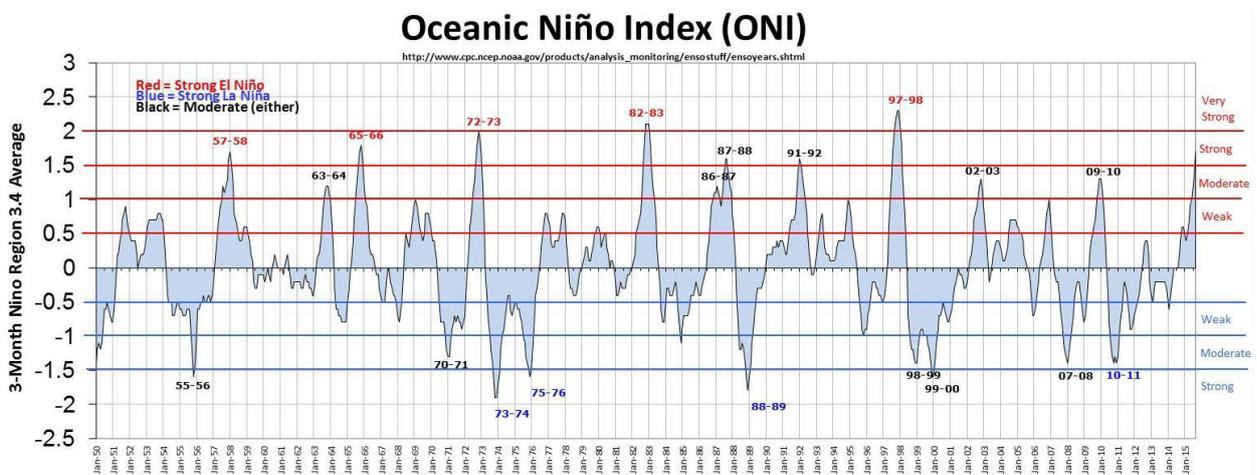


Figura 5.8: Índice oceánico Niño entre 1950 y 2015

La identificación y caracterización de los estados dominantes del ENSO y su teleconexión con las condiciones de las SST en latitudes altas, es esencial para entender las variaciones en la señal del PF y SF. Por esto mismo, en esta sección se realiza un análisis de la conexión existente entre el ENSO y ambas señales frontales. Aún en la zona Niño 3.4 se utilizan distintos índices, y además de utilizar distintos parámetros, están obtenidos promediando a distintas escalas y hay que tenerlo en cuenta cuando se quieren analizar comportamientos en determinados meses. Nuestro estudio se basa en la clasificación de los eventos ENSO utilizando MEI (capítulo 2), pero también es habitual encontrar trabajos (Null, 2012) en los que se utiliza el índice ONI (Oceanic Niño Index), basado únicamente en promedios de tres meses de la anomalía de SST en la región Niño 3.4 (Figura 5.8). MEI se obtiene

promediando valores bimensuales de 6 variables, también en Niño 4.4. Ambos índices parecen mostrar grandes similitudes, aunque difieren en la intensidad del evento y en el comienzo y finalización del mismo.

Para evaluar las condiciones de la señal de los frentes hidrográficos se han generado series temporales quincenales de la anomalía de SST para las posiciones A y A' del transecto TC. A estas series se ha superpuesto la serie de datos mensuales de MEI en el periodo que comprende el 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013 (Figura 2.7). se ha utilizado el índice MEI por ser el que más parámetros tiene en cuenta para la clasificación de los eventos ENSO.

En este apartado también se utilizará el método de la Transformada Wavelet (WT), junto con series temporales y análisis Hovmöller, con el fin de explorar en un espacio delimitado la relación entre la presencia de la señal de los frentes hidrográficos Peninsular y de las Shetland, con la Oscilación Sur El Niño/Niña (ENSO).

5.5.1 Influencia en la temperatura superficial del mar y en su gradiente.

Los mayores registros de SST para ambos frentes ocurre en los veranos del año 2006 y 2007, mientras que el año con menores temperaturas máximas fue el año 2010 (Figura 5.5). En cualquier caso, las variaciones en SST máxima parecen mayores en el SF que en PF. Los índices de ENSO (MEI u ONI) muestran (Figura 2.7 o 5.8) en enero del 2006 La Niña moderado, mientras que en enero del 2007 se presentó un evento El Niño moderado. En enero del año 2010 vuelve a presentarse El Niño moderado más intenso que el del 2007.

En la Figura 5.9 se muestra la comparación entre el promedio semanal de la Anomalía de SST entre el PF, SF y el Índice Multivariado de El Niño (MEI) durante el periodo estudiado. Las anomalías de SST se han obtenido como el

valor mensual de SST menos el valor mensual promedio entre 2003 y 2013. El índice de correlación (r) entre el ENSO (representado por MEI) y ambos frentes es de 0.05 para el PF y de 0.6 para el SF. Esto demuestra que el PF no parece estar afectado por las oscilaciones ENSO, mientras que SF si puede mostrar ciertos efectos. La correlación entre ambos frentes es mucho mayor (0.84) que la mostrada por cualquiera de ellos con MEI.

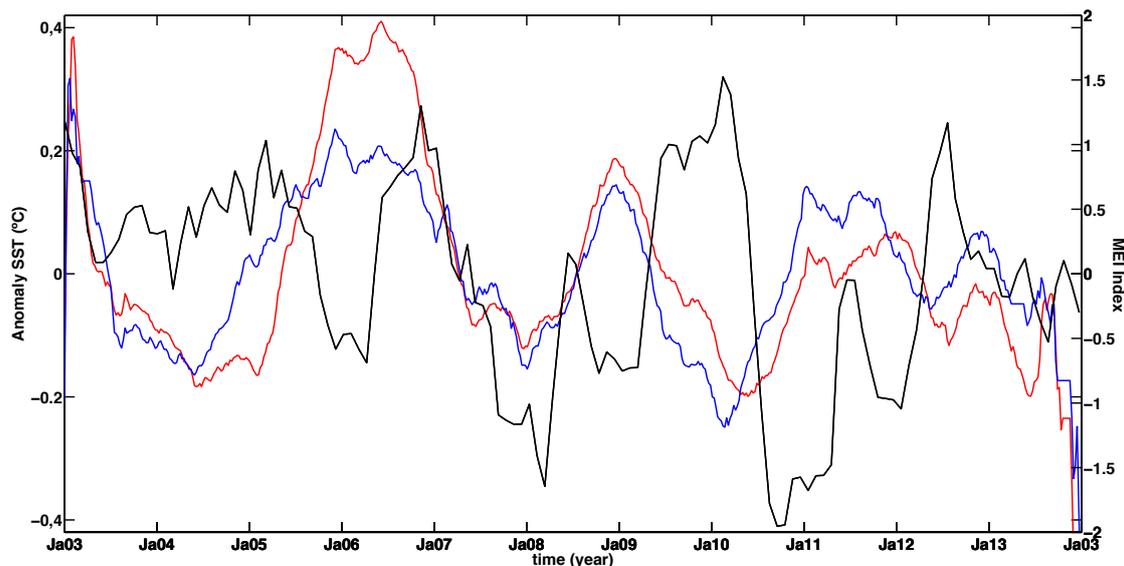


Figura 5.9: Anomalías de SST del Frente de las Shetland (línea roja), Frente Peninsular (línea azul) e Índice MEI (línea negra) entre el 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013. Se resalta los años de eventos El niño/Niña moderados.

A pesar de estos bajos índices de correlación, en situaciones sin eventos ENSO ($MEI \leq 0.5$) las anomalías de SST en ambos frentes se mantienen próximas a cero (Figura 5.9). Sin embargo, MEI débiles (entre 0.5 y 1) o moderados (entre 1 y 1.5) llevan asociados anomalías de la SST en la posición de las zonas frontales, con un cierto desfase. En la Figura 5.9 se observa que evento Niño (enero 2004-enero 2006) genera un enfriamiento. La Niña de 2006 lleva al aumento de temperatura de 2006. No obstante, la respuesta del sistema a El Niño de 2007 y La Niña de 2008 es más lenta, a pesar de que ambos son moderados. El Niño más intenso en el periodo de estudio se da en 2010 y el sistema responde mostrando las temperaturas más bajas de todo el

periodo, aunque La Niña de 2011 le hace recuperar el valor medio. En este caso el sistema no responde con un intenso calentamiento como sucedió en La Niña 2006 a pesar de que la intensidad de este evento fue inferior a la de 2011. El Niño de 2013 podría ser el responsable del enfriamiento que se empieza a observar a partir de esta fecha.

La variabilidad interanual también se observa en el diagrama Hovmöller de SST y del módulo del gradiente de SST diarios en TC (Figuras 5.10a y 5.10b respectivamente) para el periodo entre el 1 de enero del 2003 y el 31 de diciembre del 2013. La resolución espacial de los datos de SST derivados a partir de Remote Sensing System (OI SST product V04.0) cerca a costa es baja, quedando muy poca señal alrededor de SSI y en el Estrecho de Bransfield, por lo que sólo se analizara el efecto al norte de SSI. Además se identifica el punto en el que ocurre el máximo gradiente y se representa indicando su distancia respecto a la primera estación de TC (Figura 5.10c).

El diagrama de Hovmöller de SST (Figura 5.10a) muestra como el comportamiento mostrado en A (punto que hemos tomado como representativo del SF en verano) en la Figura 5.5 es común en todos los puntos del transecto al norte de SSI. El verano más cálido durante el periodo ha sido el de 2006, seguido de los veranos de 2003 y 2007. El verano más frío fue el de 2010, seguido de los veranos de 2013 y 2005. Durante el verano de 2011, aunque las temperaturas fueron intermedias, se mantuvieron constantes durante gran parte del periodo. Los mayores gradientes (Figura 5.10b) ocurren generalmente en los años de mayor SST, observándose en el verano de 2007 y 2003. No obstante aparecen valores relativamente altos en veranos menos cálidos, como el 2005 o el 2013. Por otro lado, mientras en los primeros años del periodo los mayores valores del gradiente se ubicaban próximos al talud norte de SSI, incluso en años más fríos como el 2005, en los últimos años del periodo el gradiente no tiene una señal tan intensa y los máximos relativos se localizan a lo largo de todo el transecto norte.

La posición del máximo de gradiente de SST de la figura 5.10c muestra que en evento El Niño moderado (2007 y 2010) coinciden con los años en que

el máximo de gradiente se encuentra más alejado de las SSI (214-215km), en cambio cuando hay evento La Niña moderada, El Niño débil o no hay evento registrado, el máximo de gradiente se ubica entre los 190 a 195 km, distancia que coincide con la posición estimada del SF en el en la Figura 5.2 (193km). No obstante, como ya se ha comentado en este trabajo, resulta muy difícil identificar la posición del SF a partir del máximo del gradiente en caso de veranos fríos, ya que la temperatura de ASW y la temperatura superficial de TBW son muy parecidas. La campaña hidrográfica realiza en 2010 daba la ubicación del SF en A, más al sur de lo que se obtiene con este análisis del máximo de gradiente.

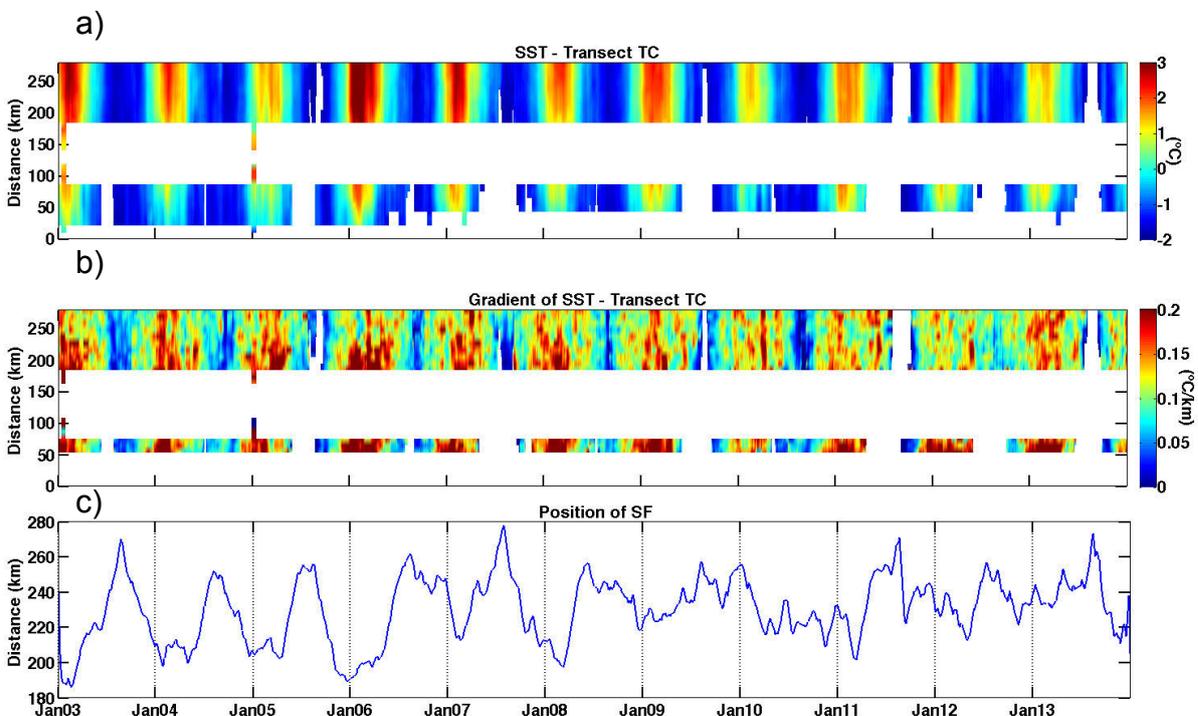


Figura 5.10: (a)Diagrama Hovmöller del SST diario del transecto TC; (b)Diagrama Hovmöller del gradiente diario del transecto TC; (c) posición en distancia del valor máximo de gradiente de SST al norte de las SSI para el periodo 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013.

Aunque la posición de los frentes hidrográficos cambie en el tiempo (Figura 5.5 y 5.10) a consecuencia de la influencia externa del calentamiento o enfriamiento superficial generado por ENSO, la metodología utilizada puede no

estar representando bien en las series temporales la ubicación del SF en años fríos, lo que puede estar impidiendo encontrar una mayor relación entre la dinámica del SF y eventos ENSO.

5.5.2 Periodos de variabilidad dominantes en la distribución SST entre 2003 y 2013.

De acuerdo al apartado anterior, la señal de los frentes hidrográficos se ve afectada por las influencia externa de eventos climáticos de gran envergadura, en este caso el fenómeno del Niño/Niña moderado, pero para identificar los periodos de importante variabilidad de la señal del SF, en este apartado, se emplea el análisis del espectro de la potencia de Wavelet (Figura 5.11).

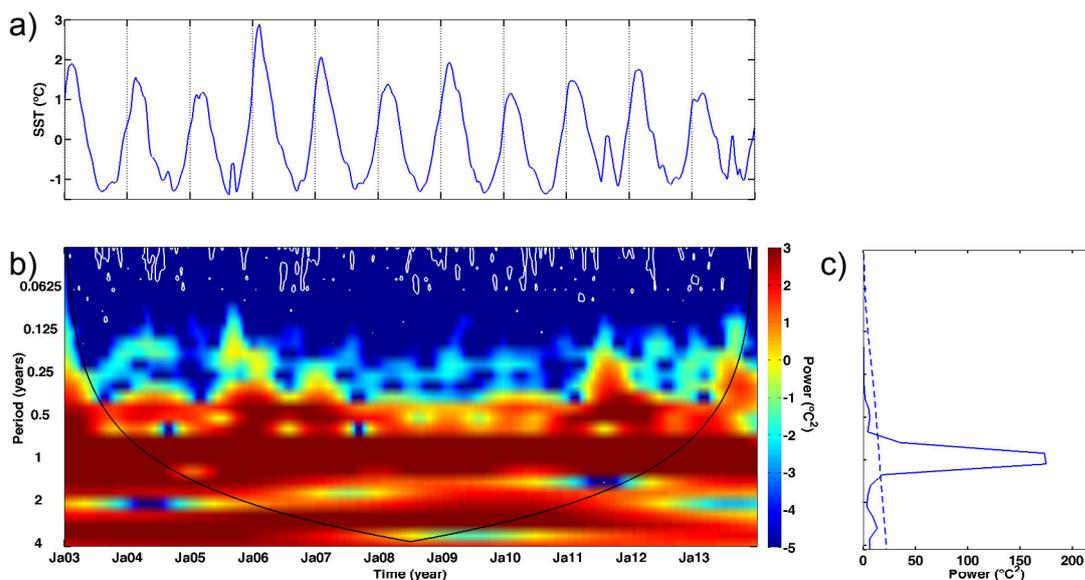


Figura 5.11: a) Serie de tiempo quincenal de la SST para la señal de SF; b) espectro de potencia Wavelet, el arco negro delimita el como de influencia de la señal (COI); y c) es el espectro global de ondas para el espectro de potencia Wavelet. En el periodo del 1 de enero del 2003 hasta el 31 de diciembre del 2013.

La espectro Wavelet de la Figura 5.11b, muestra en el eje horizontal el rango de años analizados y en el eje vertical la escala el periodo en el que se quiere conocer si la señal es predominante o no. La potencia se representa en escala de color y los colores rojos corresponden a periodos de mayor potencia

a diferentes escalas de tiempo. En la Figura 5.11c se representa el espectro Wavelet global para todo el periodo de tiempo. Tanto en 5.11b como en 5.11c se muestra que la variabilidad dominante está en escalas superiores a los 4 meses, con potencias máximas centradas en 0.5, 1 y 3 años. El ciclo dominante es el de 1 año, con potencial máximas en todo el periodo analizado. La señal de 3 años, que también parece tener un peso importante sólo aparece en el cono de influencia entre 2007 y 2010 (episodios de El Niño moderado). Se necesitaría una serie mayor de datos para poder analizar este efecto, que podría explicar relaciones que no quedan claras en el análisis de la influencia del ENSO en el desarrollo de las zonas frontales a lo largo del capítulo. La escala de 6 meses (0.5 años) se muestra muy importante entre en los años 2006 y 2007, y también entre 2011 y 2012.

A partir del espectro Wavelet global (Figura 5.11b), es evidente que los periodo dominantes en la variabilidad de la señal de SST se concentran alrededor de los ciclos anuales y bianuales, siendo la señal anual la más alta. Esto sugiere que los eventos tipo ENSO no muestran un impacto significativo en el rango temporal estudiado. No obstante, la señal de 3 años coincide con dos eventos El Niño moderado que mostraron los periodos con menor gradiente de SST durante el verano austral. No se identificó ninguna relación significativa con eventos La Niña moderada y débil, ni con El Niño débil durante el periodo de estudio. Sería necesario disponer de una serie temporal más larga para poder decir con certeza si hay influencias significativas entre los eventos ENSO y la distribución SST en la región de estudio.

5.6 Principales características de la variabilidad de las estructuras frontales en las SSI y de la influencia del ENSO.

Los diagramas de Hövmoller de SST y del gradiente de SST a lo largo de determinados transectos alrededor de SSI muestran un comportamiento similar al obtenido en los capítulos anteriores para un año promedio. El

establecimiento del PF entre la última semana de diciembre y la primera de enero; el establecimiento del SF entre una semana y diez días más tarde; el máximo desarrollo de las estructuras entre febrero y marzo y la desaparición de las mismas entre mediados y finales de abril.

En el año promedio se observó que en transectos en la Cuenca Central de Bransfield el PF se formaba a principios del verano en posiciones muy próximas a la Península Antártica, posición que mantenía hasta mediados del verano. Cuando el verano iba terminando el PF se iba acercando al talud sur de SSI. Sin embargo, en el transecto más oriental, la posición del PF se mantenían constante prácticamente durante todo el periodo en el que existía.

El SF se veía más claro en el transecto TC, que estaba sobre una zona de mayor anchura de plataforma. El SF se colocaba más próximo a la plataforma de las SSI, al comienzo de su desarrollo y cuando ya iba a desaparecer, pero durante el verano se mantenía algo más alejado, en una ubicación que coincidía con la isóbata de 300m.

Entre ambos frentes se marcaba agua de características compatibles con TBW y los bajos valores del gradiente a lo largo del transecto indicaban la homogeneidad de las aguas al norte y sur de SSI durante el verano austral. Todo lo anterior refuerza la teoría de que la BC es una corriente de gravedad de descarga, ya definida por Sangrà *et al.* (2011, 2015).

En el análisis de la variabilidad interanual se constata un comportamiento similar al ya descrito para el año promedio, aunque con valores de temperatura superficial de TBW que pueden oscilar entre 2.5°C en enero de 2006 y poco más de 1°C en enero de 2010. Además de esta diferencia en la SST, los gradientes de SST también muestran variabilidad interanual, pero que no impiden el desarrollo del BCS. De manera que la BC, además de circular como una corriente de gravedad alrededor de las SSI, se desarrolla de forma recurrente durante el verano austral, independientemente de las oscilaciones dinámicas interanuales. Esto permite definir el BCS y sus

frentes asociados como la Corriente de Gravedad de Bransfield (Sangrà *et al.*, 2015)

Aunque hay ciertos indicios de que la distribución de la SST de las aguas que rodean a las SSI se ve afectada por eventos ENSO de moderada importancia, los efectos de ENSO débiles no han podido ser establecidos. Se necesita disponer de una serie temporal mayor para poder analizar de forma más rigurosa la posible conexión entre la variabilidad en la SST en la región y los eventos ENSO. Además, el criterio de máximo gradiente parece no representar bien la ubicación del SF en veranos fríos y sería necesario pensar otra metodología con la que poder abordar los estudios de la variabilidad de las zonas frontales.

No ha sido nombrado en este trabajo una oscilación atmosférica propia del Océano Antártico, la Oscilación Antártica (AAO), que es una oscilación no estacional en la circulación de la troposfera con anomalía de la presión de un signo sobre el continente antártico y anomalías de signo opuesto centradas entre 40° y 50° S. Esta oscilación también se conoce como Southern Annular Mode (SAM). Aunque esta oscilación pudiera estar también influenciada por el ENSO, está sobre la región de estudio y posiblemente su uso nos ayude a encontrar justificaciones a la variabilidad interanual observada.

Capítulo 6

Conclusiones, líneas futuras y difusión de resultados.

6.1 Conclusiones

A continuación se exponen las conclusiones obtenidas en este trabajo:

1. La colección de imágenes de datos combinados de infrarrojo y microondas ha permitido establecer por vez primera el ciclo estacional de la SST en la región. La superficie del mar en la zona que rodea a las Islas Shetland del Sur presenta una homogeneidad inferior a los 0°C en invierno. En cambio, en verano se empiezan a establecer gradientes y las temperaturas máximas superficiales oscilan los 3-4°C. Se han definido 4 periodos característicos de la zona:
 - Invierno Austral, periodo frío que comprende los meses de julio, agosto, septiembre y octubre. Superficialmente el WW domina el área de estudio con temperaturas cercanas a -1.5°C, por lo que no existen señales de alguna estructura hidrográfica debido a la gran homogenización presente.

- Primavera Austral, período de transición invierno-verano, comprende los meses de noviembre y diciembre. Marca el inicio de la señal de las regiones frontales asociadas al BCS en los gradientes de SST.
 - Verano Austral, período cálido, comprende los meses de enero, febrero, marzo y abril. Gran heterogeneidad de las SST lo que se corresponde con el BCS plenamente establecido. Se aprecia que la intensidad y ubicación de las estructuras frontales ligadas a este van variando a lo largo de este periodo.
 - Otoño Austral, período de transición verano-invierno, comprende los meses de mayo y junio. Presenta una variabilidad de sólo 2 o 3 semanas de los meses de mayo y representa al periodo en el que la señal del SCB y frentes ligados empiezan a decaer para desaparecer en invierno.
2. La distribución de masas de agua alrededor de las SSI, a partir de datos hidrográficos tomados en enero del año 2010, pone de manifiesto claras diferencias entre las estaciones al norte y al sur de las SSI. En las primeras aparecen masas de agua propias del Paso Drake (ASW, WW, y UCDW), mientras que en las segundas aparecen las masas de agua típicas del Estrecho de Bransfield (TBW, TWW, CDWm y BDW), aunque con valores superficiales inferiores a los reportados para la zona en otras campañas realizadas en la misma época. Sin embargo, la alta resolución del muestreo realizado ha puesto de manifiesto la presencia de TBW apoyada en la plataforma y talud norte de las SSI, a lo largo de todas las estaciones el norte, este y oeste del archipiélago. Estos datos hidrográficos son la evidencia de la generación del Frente de las Shetland, definido como el límite más septentrional de TBW al norte de SSI.
3. A partir de datos in situ se ha podido establecer el patrón de la circulación de la Corriente del Bransfield y la ruta del TBW transportada por ésta alrededor de las SSI. Durante el verano austral de 2010 vuelven

a aparecer en el Estrecho de Bransfield todas las componentes del Sistema de la Corriente de Bransfield identificadas en campañas anteriores, demostrando que es un sistema de circulación que se desarrolla de forma recurrente durante el verano austral en el Estrecho de Bransfield. Se ha identificado que cuando la Corriente de Bransfield alcanza el extremo oriental de las SSI recircula primero, a través de un remolino anticiclónico, y después, hacia el suroeste a lo largo de la vertiente norte de las SSI. Esta ruta es idéntica a la observada en simulaciones de laboratorio para una corriente de gravedad de descarga. Todo lo mostrado indica que el comportamiento de la Corriente del Bransfield responde al de una corriente de gravedad de descarga.

4. Se ha podido establecer por vez primera el patrón de variabilidad anual del BCS a través de las señales del Frente Peninsular y el Frente de las Shetland en la colección de imágenes SST, utilizando tanto la distribución de SST como el módulo del gradiente de SST. Una primera e importante conclusión es que el BCS es estacional observándose tan sólo durante el verano austral. En invierno no aparece ninguna zona frontal y las pequeñas variabilidades que aparecen en la primavera y el otoño australes no pueden asociarse al establecimiento de dichos frentes. Una segunda es que se ha observado que existe un retardo de una semana entre el establecimiento del Frente Peninsular al sur de las SSI y el Frente de las Shetland al norte. Este puede responder al periodo de arranque del BCS incluyendo la recirculación al norte de la SSI de la TBW. De igual manera, se observa un retardo también de una semana en la desaparición del Frente de las Shetland respecto a la desaparición del Frente Peninsular. Todas estas circunstancias apoyan la hipótesis de comportamiento del BCS y sus frentes asociados como un sistema de corriente de gravedad.
5. Al igual que para la variabilidad estacional, la colección de imágenes de datos satelitales combinados de sensores de infrarrojo y microondas ha

permitido establecer por vez primera la variabilidad interanual de la distribución de SST en el BCS. El ciclo estacional comentado más arriba (punto 1) se repite a largo de los años, aunque se alternan periodos cálidos (año 2006) y periodos fríos (año 2010). El gradiente quincenal de SST de las señales del Frente de las Shetland y Frente Peninsular muestra que el BCS es más activo en los años cálidos, como el 2006, y aparecen menos activos durante los años más fríos, como el 2010. No obstante, los resultados de la campaña oceanográfica realizada en 2010 mostraron un BCS y un Frente de las Shetland bien desarrollados, por lo que se debe ser cuidadoso en el seguimiento de las estructuras frontales durante periodos fríos ya que posiblemente se estén infraestimando dichas estructuras.

6. La repetición en el ciclo estacional de SST y en sus gradientes asociados, de la señal de los frentes vinculados al BCS, indican que el BCS es una estructura recurrente durante el verano austral, que se desarrolla en situaciones climáticas interanuales muy diferentes.

7. Entre los años 2003 y 2013, los registros de MEI en la región EL NIÑO 3.4 indican que sólo hubo eventos ENSO, tanto El Niño como La Niña, moderados o débiles. Se comprobó que sólo bajo la presencia de eventos ENSO moderados aparecían anomalías en la distribución de SST alrededor de SSI, efectos que no aparecían durante eventos ENSO débiles. Sin embargo, también se observó que eventos ENSO moderados similares producían anomalías distintas. El análisis Wavelet mostró una variabilidad importante en periodos de tres años en épocas en las que ocurrieron Niño moderado, sin embargo la falta de una serie temporal mayor impide corroborar esta dependencia en el rango de años estudiado. Por lo tanto, se necesita disponer de una serie temporal mayor para poder analizar de forma más rigurosa la posible conexión entre la variabilidad en la SST en la región y los eventos ENSO.

6.2 Líneas futuras

A raíz del trabajo realizado se han podido resolver gran parte de las cuestiones planteadas inicialmente, pero quedan aún algunas sin resolver y se han abierto otras. Por ello, las líneas futuras que nos planteamos son:

- Plantear campañas oceanográficas con un muestreo más detallado en las zonas de recirculación, para analizar los posibles efectos del cambio de batimetría.
- Muestrear mejor la Cuenca Este de Bransfield, incluyendo transectos al este de los realizados en BREDDIES para analizar cómo pueden estar afectando la forma de esta cuenca a la circulación en la región.
- Realizar un análisis más detallado de la zona que rodea a las SSI en el periodo de invierno y en los periodos de transición, con el fin de poder establecerlos mecanismos de disparo del BCS. Para ello es necesario utilizar instrumentación que permita una mejor cobertura temporal, especialmente bajo condiciones climatológicas adversas para el muestreo de diferentes parámetros oceanográficos, tales como la utilización de Glider, anclajes, etc.
- Búsqueda en bases de datos de registros continuos de temperatura superficial del mar en la región de estudio, suministrados tanto por barco oceanográficos como buques de ocasión. Con ellos se puede complementar la información satelital disponible.
- Búsqueda de productos satelitales de una mejor cobertura satelital, tanto temporal como espacial para poder determinar con mayor precisión la variabilidad superficial existente en la zona. La nueva versión del producto que estábamos utilizando, aunque mejoró la cobertura temporal, disminuyó la cobertura espacial alrededor de SSI, en una zona con estructuras mesoescalares en el rango de resolución espacial del mejor de los sensores.

- La serie temporal de la que se dispone no es suficientemente larga y se necesita disponer de una serie temporal mayor para poder analizar de forma más rigurosa la posible conexión entre la variabilidad en la SST en la región y los eventos ENSO.
- Buscar la correlación entre la variabilidad observada en las anomalías de SST entre 2003 y 2013 y la Southern Annular Mode (SAM), para ver si parte de la variabilidad interanual no explicada por el ENSO puede estar relacionada con esta anomalía más local.
- El criterio de máximo gradiente parece no representar bien la ubicación del SF en veranos fríos y sería necesario pensar otra metodología con la que poder abordar los estudios de la variabilidad de las zonas frontales durante estos periodos.

6.3 Difusión de resultados

Los resultados obtenidos en esta tesis han sido publicados en numerosos congresos nacionales e internacionales, y han sido o están siendo utilizados para 2 publicaciones en el campo de la oceanografía física:

- *Variabilidad de la SST alrededor de SSI*: Este artículo está aún en fase de preparación y en él se pretenden presentar los resultados relativos a la descripción y la variabilidad de la SST en la región, que ya de por sí es un trabajo novedoso. No obstante, los resultados obtenidos en las diferentes campañas hidrográficas realizadas por el grupo en la región permiten vincular la visión de la dinámica de la región con su reflejo en la distribución de la SST.
- *La Corriente de Gravedad de Bransfield*: En este trabajo se combinan los resultados obtenidos a partir de la descripción hidrográfica con los experimentos de Bransfield para demostrar que el BCS y sus frentes asociados, tanto al norte como al sur de SSI, hacen que se pueda

definir todo el sistema de circulación alrededor de SSI como la Corriente de Gravedad de Bransfield. La referencia de este trabajo es:

- Sangrà, P., Hernández-Arencibia, M., Marrero-Díaz, A., Stegner, A., Salinas-Núñez, C., Aguiar-González, B., Henríquez-Pastene, C. (2015) The Bransfield Gravity Current, Deep Sea Research, part I (enviado)

Además, los resultados hidrográficos obtenidos en el transecto central de COUPLING han sido utilizados en distintos trabajos multidisciplinares:

García-Muñoz, C., López-Urrutia, A., Lubian, L.M., García, C.M., Hernandez-Leon, S., (2013). A comparison of primary production models in an area of high mesoscale variability (South Shetland Islands, Antarctica). *Journal of Sea Research*, 83, 30-39

Sangra, P., García-Muñoz, C., García, CM., Marrero-Díaz, A., Sobrino, C., Mourino-Carballido, B., Aguiar-González, B., Henríquez-Pastene, C., Rodríguez-Santana, A., Lubian, LM., Hernández-Arencibia, M., Hernández-León, S., Vázquez, E., Estrada-Allis, S. (2014). Coupling between upper ocean layer variability and size-fractionated, phytoplankton in a non-nutrient-limited environment. *Marine Ecology Progress Series*, 499, 35-46.

Teira, E., Mourino-Carballido, B., Martínez-García, S., Sobrino, C., Ameneiro, J., Hernández-León, S., Vázquez, E. (2012). Primary production and bacterial carbon metabolism around South Shetland Islands in the Southern Ocean. *Deep-Sea Research Part I- Oceanographic Research Papers*, 69, 70-81.

Bibliografía

Abbott, M. R., Richman, J. G., Letelier, R. M., & Bartlett, J. S. (2000). The spring bloom in the Antarctic Polar Frontal Zone as observed from a mesoscale array of bio-optical sensors. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 47(15), 3285-3314.

Charrassin, J. B., Hindell, M., Rintoul, S. R., Roquet, F., Sokolov, S., Biuw, M., & Guinet, C. (2008). Southern Ocean frontal structure and sea-ice formation rates revealed by elephant seals. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105(33), 11634-11639.

Chelton, D. B., Deszoeke, R. A., Schlax, M. G., El Naggar, K., & Siwertz, N. (1998). Geographical variability of the first baroclinic Rossby radius of deformation. *Journal of Physical Oceanography*, 28(3), 433-460.

Clowes, A. J. (1934). *Hydrology of the Bransfield Strait* (Vol. 9). University Press.

Delworth, T., S. Manabe, and R. J. Stouffer (1993), Interdecadal variations of the thermohaline circulation in a coupled ocean-atmosphere model, *J. Climatology.*, 6, 1993 – 2011.

Dong, S., Gille, S. T., Sprintall, J., & Gentemann, C. (2006). Validation of the Advanced Microwave Scanning Radiometer for the Earth Observing

System (AMSR-E) sea surface temperature in the Southern Ocean. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 111(C4).

Dong, S., Sprintall, J., & Gille, S. T. (2006). Location of the Antarctic polar front from AMSR-E satellite sea surface temperature measurements. *Journal of Physical Oceanography*, 36(11), 2075-2089.

Donlon, C. J., Minnett, P. J., Gentemann, C., Nightingale, T. J., Barton, I. J., Ward, B., & Murray, M. J. (2002). Toward improved validation of satellite sea surface skin temperature measurements for climate research. *Journal of Climate*, 15(4), 353-369.

Donlon, C., Rayner, N., Robinson, I., Poulter, D. J. S., Casey, K. S., Vazquez-Cuervo, J., & Kawamura, H. (2007). The global ocean data assimilation experiment high-resolution sea surface temperature pilot project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 88(8), 1197-1213.

Garcia, M. A., Castro, C. G., Rios, A. F., Doval, M. D., Rosón, G., Gomis, D., & López, O. (2002). Water masses and distribution of physico-chemical properties in the Western Bransfield Strait and Gerlache Strait during Austral summer 1995/96. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(4), 585-602.

Garcia, M. A., López, O., Sospedra, J., Espino, M., Gracia, V., Morrison, G., ... & Arcilla, A. S. (1994, September). Mesoscale variability in the Bransfield Strait region (Antarctica) during Austral summer. In *Annales Geophysicae* (Vol. 12, No. 9, pp. 856-867). Springer-Verlag.

García-Muñoz, C., Lubián, L. M., García, C. M., Marrero-Díaz, Á., Sangrà, P., & Vernet, M. (2013). A mesoscale study of phytoplankton assemblages around the South Shetland Islands (Antarctica). *Polar biology*, 36(8), 1107-1123.

- Gentemann, C. L., Donlon, C. J., Stuart-Menteth, A., & Wentz, F. J. (2003). Diurnal signals in satellite sea surface temperature measurements. *Geophysical Research Letters*, 30(3).
- Gloersen, P., (1995). Modulation of hemispheric sea-ice cover by ENSO events, *Nature*, 373, 503 – 506.
- Gordo Rojas, M. C. (2013). Sistema de la Corriente del Bransfield, SCB (Antártida). Tesis Docotral por la ULPGC.
- Gordon, A. L., & Nowlin Jr, W. D. (1978). The basin waters of the Bransfield Strait. *Journal of Physical Oceanography*, 8(2), 258-264.
- Gràcia, E., Canals, M., Farràn, M. L., Sorribas, J., & Pallàs, R. (1997). Central and eastern Bransfield basins (Antarctica) from high-resolution swath-bathymetry data. *Antarctic Science*, 9(02), 168-180.
- Grinsted, A., Moore, J. C., & Jevrejeva, S. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series. *Nonlinear processes in geophysics*, 11(5/6), 561-566.
- Halpern, D. (2011). Sea Surface Temperature For Numerical Weather Prediction. CGMS-39 IOC-WP-01.
- Harangozo, S. A., (2000). A search for ENSO teleconnections in the west Antarctic Peninsula climate in austral winter, *Int. J. Climatol.*, 20, 663 – 679.
- Hare, J. A., Wuenschel, M. J., & Kimball, M. E. (2012). Projecting range limits with coupled thermal tolerance-climate change models: an example based on gray snapper (*Lutjanus griseus*) along the US east coast.
- Hernández-Arencibia, M. (2013). Estudio Experimental del Sistema de la Corriente de Bransfield. Tesis Docotral por la ULPGC.

-
- Holm-Hansen, O., & Mitchell, B. G. (1991). Spatial and temporal distribution of phytoplankton and primary production in the western Bransfield Strait region. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, 38(8), 961-980.
- Holm-Hansen, O., Naganobu, M., Kawaguchi, S., Kameda, T., Krasovski, I., Tchernyshkov, P., ... & Hewes, C. D. (2004). Factors influencing the distribution, biomass, and productivity of phytoplankton in the Scotia Sea and adjoining waters. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(12), 1333-1350.
- Iwasaki, S., Kubota, M., & Tomita, H. (2008). Inter-comparison and evaluation of global sea surface temperature products. *International Journal of Remote Sensing*, 29(21), 6263-6280.
- Jiang, C., Cronin, M. F., Kelly, K. A., & Thompson, L. (2005). Evaluation of a hybrid satellite-and NWP-based turbulent heat flux product using Tropical Atmosphere-Ocean (TAO) buoys. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 110(C9).
- Liu, J., Curry, J. A., & Martinson, D. G. (2004). Interpretation of recent Antarctic sea ice variability. *Geophysical Research Letters*, 31(2).
- Loeb, V. J., Hofmann, E. E., Klinck, J. M., Holm-Hansen, O., & White, W. B. (2009). ENSO and variability of the Antarctic Peninsula pelagic marine ecosystem. *Antarctic Science*, 21(02), 135-148.
- López, O., García, M. A., & Arcilla, A. S. (1994, September). Tidal and residual currents in the Bransfield Strait, Antarctica. *Annales Geophysicae* (Vol. 12, No. 9, pp. 887-902). Springer-Verlag.
- López, O., Garcia, M. A., Gomis, D., Rojas, P., Sospedra, J., & Sánchez-Arcilla, A. (1999). Hydrographic and hydrodynamic characteristics of the eastern

basin of the Bransfield Strait (Antarctica). *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 46(10), 1755-1778.

Masqué, P., Isla, E., Sanchez-Cabeza, J. A., Palanques, A., Bruach, J. M., Puig, P., & Guillén, J. (2002). Sediment accumulation rates and carbon fluxes to bottom sediments at the Western Bransfield Strait (Antarctica). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 49(4), 921-933.

Monaldo, F. M., Sikora, T. D., Babin, S. M., & Sterner, R. E. (1997). Satellite imagery of sea surface temperature cooling in the wake of Hurricane Edouard (1996). *Monthly Weather Review*, 125(10), 2716-2721.

Morozov, E. G. (2007, August). Currents in Bransfield Strait. In *Doklady Earth Sciences* (Vol. 415, No. 2, pp. 984-986). MAIK Nauka/Interperiodica.

NOAA NOAA/OAR/ESRL PSD. Multivariate ENSO Index (MEI). disponible online: <http://www.esrl.noaa.gov/psd/enso/mei/> (acceso: julio 2015).

Null J. 2012. *Historic Oceanic Niño Index (ONI) & El Niño Winter & Spring Impacts on United States Weather Patterns*. California: Golden Gate Weather Services.

Orsi, A. H., Whitworth, T., & Nowlin, W. D. (1995). On the meridional extent and fronts of the Antarctic Circumpolar Current. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 42(5), 641-673.

Platnick, S., King, M. D., Ackerman, S., Menzel, W. P., Baum, B., Riédi, J. C., & Frey, R. (2003). The MODIS cloud products: Algorithms and examples from Terra. *Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions*, 41(2), 459-473.

Pörtner, H. O. (2002). Climate variations and the physiological basis of temperature dependent biogeography: systemic to molecular hierarchy of

thermal tolerance in animals. *Comparative Biochemistry and Physiology Part A: Molecular & Integrative Physiology*, 132(4), 739-761.

Poulin, F. J., Stegner, A., Hernández-Arencibia, M., Marrero-Díaz, A., & Sangrà, P. (2014). Steep shelf stabilization of the coastal Bransfield Current: Linear stability analysis. *Journal of Physical Oceanography*, 44(2), 714-732.

Rakusa, S. S. (1996). Spatial and seasonal variability of temperature and salinity in Bransfield Strait and Admiralty Bay, Antarctica. *Polish Polar Research*, 17, 29-42.

Remote Sensing System. Disponible online: <http://www.remss.com/missions/ssmi> (acceso: febrero 2015)

Reynolds, R. W., Zhang, H. M., Smith, T. M., Gentemann, C. L., & Wentz, F. (2005). Impacts of in situ and additional satellite data on the accuracy of a sea-surface temperature analysis for climate. *International journal of climatology*, 25(7), 857-864.

Sangrà, P., Hernández-Arencibia, M., Marrero-Díaz, A., Stegner, A., Salinas-Núñez, C., Aguiar-González, B., Henríquez-Pastene, C. (2015) The Bransfield Gravity Current, *Deep Sea Research*, part I (enviado)

Sangrà, P., García-Muñoz, C., García, CM., Marrero-Díaz, A., Sobrino, C., Mourino-Carballido, B., Aguiar-González, B., Henríquez-Pastene, C., Rodríguez-Santana, A., Lubian, LM., Hernández-Arencibia, M., Hernández-León, S., Vázquez, E., Estrada-Allis, S. (2014). Coupling between upper ocean layer variability and size-fractionated, phytoplankton in a non-nutrient-limited environment. *Marine Ecology Progress Series*, 499, 35-46.

Sangrà, P., Gordo, C., Hernández-Arencibia, M., Marrero-Díaz, A., Rodríguez-Santana, A., Stegner, A., ... & Pichon, T. (2011). The Bransfield current

system. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 58(4), 390-402.

Saravanan, R., and J. C. McWilliams, 1998: Advective ocean–atmosphere interaction: An analytical stochastic model with implications for decadal variability. *J. Climate*, 11, 165–188.

Sievers, H. (1982). Descripción de las condiciones oceanográficas físicas, como apoyo al estudio de la distribución y comportamiento del krill. Instituto Antártico Chileno. Serie Científica, 28, 87-136.

Sievers, H. A., & Nowlin, W. D. (1984). The stratification and water masses at Drake Passage. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 89(C6), 10489-10514.

Silva, N. (1986). Oceanografía Química de las aguas del estrecho de Bransfield: Compuestos micronutrientes (SIBEX-FASE II, Chile). Instituto Antártico Chileno. Serie Científica, 35, 31-61.

Smith, W. H., & Sandwell, D. T. (1997). Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277(5334), 1956-1962.

Speer, K., Rintoul, S. R., & Sloyan, B. (2000). The diabatic Deacon Cell*. *Journal of physical oceanography*, 30(12), 3212-3222.

Tokarczyk, R. (1987). Classification of water masses in the Bransfield Strait and southern part of the Drake Passage using a method of statistical multidimensional analysis.

Tomczak, M., & Godfrey, J. S. (2013). *Regional oceanography: an introduction*. Elsevier.

-
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(1), 61-78.
- Turner, J. (2004), The El Niño–southern oscillation and Antarctica. *Int. J. Climatology.*, 24: 1–31. doi: 10.1002/joc.965
- Vázquez, E., Ameneiro, J., Putzeys, S., Gordo, C., & Sangrà, P. (2007). Distribution of meroplankton communities in the Bransfield Strait, Antarctica. *Marine Ecology Progress Series*, 338, 119-129.
- Venegas, S. A., Drinkwater, M. R., & Shaffer, G. (2001). Coupled oscillations in Antarctic sea ice and atmosphere in the South Pacific sector. *Geophysical Research Letters*, 28(17), 3301-3304.
- Wentz, F. J., Gentemann, C., Smith, D., & Chelton, D. (2000). Satellite measurements of sea surface temperature through clouds. *Science*, 288(5467), 847-850.
- White, W. B., & Cayan, D. R. (2000). A global El Niño-Southern Oscillation wave in surface temperature and pressure and its interdecadal modulation from 1900 to 1997. *Journal of Geophysical Research: Oceans* (1978–2012), 105(C5), 11223-11242.
- WOCE, World Ocean Circulation Experiment Implementation Plan. Vol I. Detailed Requirements, 1998. WCRP-11, (WMO/TD-N° 242). IOC, SCOR.
- Wolter, K.; Timlin, M.S. (2011). El Niño/Southern Oscillation behaviour since 1871 as diagnosed in an extended multivariate ENSO index (MEI.ext). *Int. J. Climatology*, 31, 1074–1087.
- Wylie, D., Jackson, D. L., Menzel, W. P., & Bates, J. J. (2005). Trends in global cloud cover in two decades of HIRS observations. *Journal of climate*, 18(15), 3021-3031.

- Yuan, X., and D. G. Martinson, (2000) Antarctic sea ice extent variability and its global connectivity, *J. Clim.*, 13, 1697 – 1717.
- Zhou, M., Niiler, P. P., & Hu, J. H. (2002). Surface currents in the Bransfield and Gerlache Straits, Antarctica. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 49(2), 267-280.
- Zhou, M., Niiler, P. P., Zhu, Y., & Dorland, R. D. (2006). The Western Boundary Current in the Bransfield Strait, Antarctica. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 53(7), 1244-1252.
- Zhou, M., Zhu, Y., Measures, C. I., Hatta, M., Charette, M. A., Gille, S. T., & Mitchell, B. G. (2013). Winter mesoscale circulation on the shelf slope region of the southern Drake Passage. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 90, 4-14.

