

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE VALPARAISO
FACULTAD DE CIENCIAS DEL MAR Y GEOGRAFÍA
ESCUELA CIENCIAS DEL MAR
VALPARAÍSO, CHILE

“Fenología del fitoplancton en el Archipiélago Juan Fernández
(33°40'S, 78°40'W), Chile”

Trabajo de Titulación para optar al Título de Oceanógrafo

Por

Victoria Paz Salas Rojas

Valparaíso

2016

Comisión de Titulación:

Profesor Guía : Dr. Samuel Hormazábal Fritz _____

Profesor Co-Guía : Dra. Carmen Morales _____

Profesor : Dra. (c) July Corredor-Acosta _____

Profesor : Dr. Francisco Eugenio _____

AUTORIZACIÓN DE USO

Al presentar este Trabajo de Titulación como último requisito para la obtención del título de Oceanógrafo, autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente de ella. Autorizo además, reproducciones parciales o totales de este documento sólo con fines académicos.

Victoria Paz Salas Rojas

DEDICATORIA

*A mí amado bisabuelo
Orlando Nicolás Salas Paredes
Vives siempre en mi corazón*

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi familia por el apoyo incondicional en estos arduos años de estudio. Agradeciendo de manera especial a mis abuelitos, Oriana y Ramón, quienes han sido un pilar fundamental en mi vida, gracias por la dedicación, la educación, los valores y la infinita paciencia.

Agradezco también a mis queridas amigas, Daniela y Constanza, gracias por las risas, los consejos, los momentos de ocio y por estar constantemente dándome ánimos y apoyo en los momentos que más lo necesité.

Quiero agradecer también a mi profesor guía, Dr. Samuel Hormazábal, quien ha confiado plenamente en mis capacidades para llevar a cabo este trabajo de titulación, gracias por su tiempo, disposición, por aguantar mi mal genio y sobre todo por darme la oportunidad de trabajar con mi amada isla. También agradezco a la Dra. Carmen Morales y a mi compañerita Dra. (c) Andrea Corredor, quienes me recibieron con los brazos abiertos en Concepción y me entregaron las herramientas necesarias para poder desarrollar este trabajo, junto con la constante y buena disposición que tuvieron en todo momento. Gracias al Dr. Francisco Eugenio, por formar parte de mi comisión. Mis agradecimientos también son para los profesores Sergio Palma y Nelson Silva quienes, a pesar de no formar parte de mi comisión, tuvieron la voluntad de participar en parte de este proceso, gracias por sus correcciones y comentarios siempre constructivos.

Por otra parte, quisiera agradecer de todo corazón a cada uno de los integrantes del laboratorio de Oceanografía Física de la ECM, ya que todos en algún momento tuvieron la disposición de ayudarme en mis momentos de desesperación con Matlab, compartiendo sus conocimientos y resolviendo mis infinitas dudas. Agradecimientos especiales para Adrián, quien pasó de ser mi compañero de laboratorio al hombre que hoy me acompaña en todos los ámbitos de mi vida, gracias por tu amor y apoyo incondicional.

Finalmente, agradecer al Instituto Milenio de Oceanografía (IMO) y al proyecto FONDECYT 1131047 (SH), quienes financiaron este trabajo.

CONTENIDO

AUTORIZACIÓN DE USO.....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
CONTENIDO	v
RESUMEN	1
1. INTRODUCCIÓN	3
2. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DE TRABAJO	10
3. OBJETIVOS.....	10
3.1. Objetivo General.....	10
3.2. Objetivos específicos.....	10
4. MATERIALES Y MÉTODOS	11
4.1. Área de estudio.....	11
4.1.1. Subdivisión de áreas.....	11
4.2. Datos.....	12
4.3 Procesamiento de los datos	13
5. RESULTADOS.....	15
5.1. Clorofila- <i>a</i> (clo- <i>a</i>) satelital.....	15
5.1.1. Distribución espacial y temporal de clo- <i>a</i>	15
5.1.2. Series de tiempo y correlación espacial de la clo- <i>a</i>	17
5.1.3. Espectro de potencia de Wavelet para la clo- <i>a</i>	19
5.1.4. Índices fenológicos para la curva acumulada de la clo- <i>a</i>	19
5.2. Temperatura Superficial del Mar (TSM).....	25
5.2.1. Distribución espacial y temporal de TSM	25
5.2.2. Series de tiempo de TSM	26
5.2.3. Espectro de potencia de Wavelet para TSM.....	27
5.2.4. Índices fenológicos para la curva acumulada de TSM.....	27
5.3. Esfuerzo del viento (τ).....	29
5.3.1. Distribución espacial y temporal de τ	29
5.3.2. Series de tiempo de τ	31
5.3.3. Espectro de potencia de Wavelet para el τ	31
5.3.4. Índices fenológicos para la curva acumulada de τ	32
5.4. Zonas de Referencia	34
5.4.1. Series de tiempo de las variables (clo- <i>a</i> , TSM y τ).....	34

5.4.2. Espectro de potencia de Wavelet de las variables (clo- <i>a</i> , TSM y τ)	35
5.4.3. Índices fenológicos para las curvas acumuladas de las variables (clo- <i>a</i> , TSM y τ).....	36
6. DISCUSIÓN	42
6.1. Variabilidad espacial y temporal de las variables (clo- <i>a</i> , TSM y τ).....	42
6.2. Correlación espacial de la clo- <i>a</i>	43
6.3. Series de tiempo de las variables (clo- <i>a</i> , TSM y τ) alrededor de las islas y en zonas de referencia.....	43
6.4. Espectro de potencia de Wavelet de las variables (clo- <i>a</i> , TSM y τ) alrededor de las islas y en zonas de referencia.....	45
6.5. Índices fenológicos para las curvas acumuladas de las variables (clo- <i>a</i> , TSM y τ) alrededor de las islas y en zonas de referencia	46
7. CONCLUSIÓN	51
8. REFERENCIAS	52
9. ANEXOS	58
9.1. Análisis de correlación cruzada aplicado a la TSM.....	58
9.2. Tablas.....	59

RESUMEN

La fenología es una disciplina que permite estudiar ciclos tanto biológicos como de variables ambientales o procesos físicos, siendo utilizada actualmente como un indicador integrativo del cambio climático. En la caracterización del ciclo anual del fitoplancton o de la variable de interés se han establecido los siguientes indicadores fenológicos: el inicio, magnitud, final y duración total del ciclo. Para la cuantificación de dichos indicadores se han propuesto varios métodos, dentro de los cuales, el método de wavelet ha resultado ser una herramienta estadística robusta en los estudios de fenología en general.

Estudios fenológicos en las aguas oceánicas en el Pacífico suroriental (PSO) no se han realizado y resulta de un alto interés conocer esto especialmente en las zonas adyacentes a islas oceánicas ubicadas frente a la región central de Chile. Dentro del grupo de islas oceánicas frente a Chile, se encuentra el Archipiélago Juan Fernández (AJF), el cual ha causado gran interés de investigadores al ser uno de los sistemas de islas más productivos en el PSO. Las islas que conforman el AJF se ubican en zonas que están dominadas por dinámicas diferentes y que poseen distinta concentración de *clo-a*. De acuerdo a esto, se hipotetiza que la presencia de las islas que componen el Archipiélago Juan Fernández (AJF) produce un cambio significativo en la fenología del fitoplancton en las aguas adyacentes, además de un aumento en clorofila-*a* (*clo-a*), respecto de las regiones oceánicas abiertas.

El objetivo de este estudio es caracterizar la fenología del fitoplancton (en términos de *clo-a*) en las aguas adyacentes a las islas que componen el AJF, mediante la cuantificación de sus índices fenológicos, junto con la evaluación de: i) la variabilidad espacial y temporal de las series de tiempo satelitales de fitoplancton (*clo-a*), TSM y esfuerzo del viento (τ), ii) el efecto de las islas sobre las características de la fenología del fitoplancton en las aguas adyacentes y iii) la relación entre la fenología del fitoplancton con la fenología de la TSM y del esfuerzo del viento (τ) en el área de estudio. En estos análisis se utilizaron series de tiempos satelitales de *clo-a* y TSM de alta resolución espacial (1 x 1 km) y temporal (diaria) en el periodo 2002-2014, y datos diarios de viento satelital con resolución espacial de 0,31° x 0,31° en el periodo 2002-2010. Los índices fenológicos se calcularon con el análisis wavelet para series de

tiempo reconstruidas en la banda de frecuencia anual (BFA). Este método ha sido utilizado anteriormente para el cálculo de los índices fenológicos (Corredor-Acosta *et al.*, 2015).

Los resultados muestran que existe un gradiente este-oeste en las concentraciones de clo-*a* en la región de estudio, presentando los mínimos valores en verano y los máximos en invierno. No obstante, alrededor de las islas se observaron altas concentraciones de clo-*a* permanentes en el tiempo, siendo la época de primavera la que alcanzó mayores concentraciones y mayor extensión espacial, mostrando *a priori* que la presencia de estas islas modificó los valores de clo-*a* que se presentan comúnmente en zonas oceánicas. Los indicadores fenológicos fueron diferentes para RC-SC y AS, ocurriendo la fecha de inicio primero en RC-SC y posteriormente en AS (febrero-marzo y marzo-abril, respectivamente), sucediendo lo mismo con el término del ciclo, en donde las máximas amplitudes se presentaron durante agosto-octubre en RC-SC y septiembre-octubre en AS. Asimismo, se observaron diferencias en la fenología del fitoplancton de las aguas adyacentes a las islas con la de regiones más alejadas, presentando estas últimas la magnitud máxima en la temporada de invierno. En cuanto a la fenología de las variables físicas evaluadas, estas no presentaron relación con la fenología del fitoplancton en las aguas adyacentes a las islas, sugiriendo que son otros los mecanismos involucrados en modularla.

1. INTRODUCCIÓN

La fenología es la disciplina que se refiere, en primera instancia, a la sincronización de los ciclos biológicos que ocurren de forma periódica (White *et al.*, 2009). Actualmente, también hace referencia a ciclos de variables ambientales o procesos físicos (Montecinos & Gómez, 2010, Corredor-Acosta *et al.*, 2015). En particular, el estudio de la fenología del fitoplancton ha causado especial interés debido a que esta normalmente coincide con las etapas vulnerables de larvas de peces y ciclos zooplanctónicos (Koeller *et al.*, 2009), siendo la floración regular del fitoplancton un evento clave en los ecosistemas marinos al proporcionar una fuente de alimento/energía para los niveles tróficos superiores (Cushing, 1990). Asimismo, la fenología del fitoplancton es uno de los factores críticos en la estructura y funcionamiento de los ecosistemas marinos dado que, espacial o temporalmente, pueden estar acoplados o desacoplados con la fenología de los niveles tróficos superiores (Chiba *et al.*, 2012). Los estudios de la fenología del fitoplancton comúnmente se evalúan en función de la fenología o ciclos de otras variables o procesos físicos (*e.g.* temperatura, surgencia, radiación solar) para identificar los factores primordiales que pudieran alterar los ciclos regulares del fitoplancton (Racault *et al.*, 2012; Corredor-Acosta *et al.*, 2015). Hoy en día, esta disciplina es usada como un indicador integrativo del cambio climático, tanto a nivel regional como global (Hudson, 2010), permitiendo detectar cambios desencadenados en los ecosistemas pelágicos por perturbaciones en las condiciones ambientales (Racault *et al.*, 2012).

Los indicadores fenológicos que permiten caracterizar el ciclo anual del fitoplancton o de la variable de interés son: inicio, magnitud, final y duración total de un ciclo (Fig.1) (Platt *et al.*, 2009; Cole *et al.*, 2012; Racault *et al.*, 2012). En la cuantificación de dichos indicadores se han propuesto varios métodos, entre los cuales actualmente destacan aquellos enfocados en identificar el inicio del periodo anual de floraciones fitoplanctónicas: a) el método umbral, que identifica la fecha de ocurrencia de un valor umbral que refleja el inicio del ciclo de incremento de las concentraciones de clorofila-*a* (clo-*a*) u otra variable de interés. Normalmente se utiliza el valor de la mediana anual o climatológica y se identifica la fecha de inicio como el primer punto en la secuencia temporal en que los niveles de clo-*a* alcanzan un determinado porcentaje

por encima de la mediana. Un problema asociado a este método es que existe un posible error en la identificación de floraciones secundarias como primarias, lo cual se puede resolver a través del desplazamiento de la serie de tiempo para comenzar cerca de una temporada de floración estimada (Siegel *et al.*, 2002; Henson *et al.*, 2006; Thomalla *et al.*, 2011); b) el método de la suma acumulada, basado en la construcción de una curva con valores acumulados sucesivamente para la variable de interés e identifica la fecha de inicio de la floración como el tiempo en el cual la curva sobrepasa un determinado porcentaje de la clo-*a* total (Greve *et al.*, 2005; Brody *et al.*, 2013). Las fechas de inicio de la floración identificadas con el método de suma acumulada, a diferencia del método umbral, son sensibles a los valores umbrales utilizados (Brody *et al.*, 2013); y c) el método de tasa de cambio, se basa en la descomposición en las principales frecuencias de variabilidad de la serie de tiempo original de la clo-*a* mediante el análisis armónico de la transformada rápida de Fourier y/o el ajuste de un modelo a los datos para suavizar la serie (White *et al.*, 2009, Brody *et al.*, 2013). Para este método, se establece el periodo productivo anual al identificar los máximos de la reconstrucción que estén separados entre ellos aproximadamente ocho meses y se estima el inicio del periodo desde el punto de más rápido aumento de la variable a estudiar en una serie de tiempo. Tiene la ventaja de no ser sensible a la fecha de inicio de la serie de tiempo o a la temporada en que se produce la floración principal (Brody *et al.*, 2013).

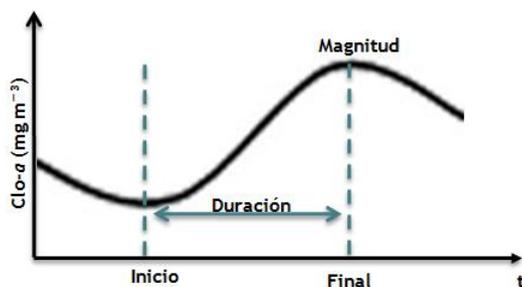


Figura 1. Esquema de los indicadores fenológicos que permiten caracterizar el ciclo anual del fitoplancton o de la variable de interés.

Recientemente, se ha propuesto aplicar el método “wavelet” como una herramienta estadística en los estudios fenológicos en general. Es un método robusto, ya que permite la descomposición de las series de tiempo con respecto a dos variables independientes, el tiempo y la frecuencia o escala, permitiendo detectar los modos dominantes de variabilidad y cómo estos modos varían en el tiempo (Torrence & Compo, 1998; Hudson, 2010). Este método es altamente ventajoso cuando se trata de series de tiempo que cambian su comportamiento periódico (*e.g.* no son estacionarias),

como es el caso de comunidades fitoplanctónicas (Winder & Cloern, 2010). Este método fue recientemente usado en estudios de fenología del fitoplancton en la zona costera de la región centro-sur de Chile (Corredor-Acosta *et al.*, 2015) permitiendo identificar los distintos componentes que caracterizan la fenología: inicio, término, duración y magnitud.

El desarrollo de estudios de fenología aplicados a fitoplancton en sistemas marinos y haciendo uso de datos obtenidos a través de sensoramiento remoto, han introducido un nuevo impulso en esta disciplina (Lavigne *et al.*, 2013). A diferencia de la recolección de datos *in situ* de fitoplancton, el uso de datos satelitales ha resultado altamente ventajoso debido a que provee una alta resolución espacial (1 km o menos) y temporal (diaria) (Platt *et al.*, 2009; Cole *et al.*, 2012; Racault *et al.*, 2012). Por esta razón, la aproximación satelital se ha convertido en una herramienta valiosa para la detección de la fenología del fitoplancton (Chiba *et al.*, 2012, Cole *et al.*, 2012; Brody *et al.*, 2013). Sin embargo, esta aproximación presenta como desventajas la falta de resolución vertical en caso que se trate de máximos subsuperficiales y la contaminación de la señal (Winder & Cloern, 2010; Corredor-Acosta *et al.*, 2015).

Una de las aplicaciones fundamentales de los datos satelitales es la construcción de series de tiempo que permiten observar la evolución temporal de procesos ecológicos desde escala diaria a interanuales o mayores (Platt *et al.*, 2009). No obstante, en estudios de fenología es importante detectar si existen o no brechas en los datos satelitales y seleccionar un método que permita rellenar tales brechas y, con ello, evitar afectar la identificación de los índices fenológicos por la presencia de períodos relativamente largos con datos faltantes (Cole *et al.*, 2012). La interpolación puede ser efectiva cuando se aplica a brechas pequeñas, sin embargo, es inexacta y con frecuencia subestima la variabilidad real (Cole *et al.*, 2012). Interpolación en el tiempo y el espacio ha resultado ser lo más recomendado (Winder & Cloern, 2010; Corredor-Acosta *et al.*, 2015), para lo cual, se ha desarrollado un método basado en funciones ortogonales empíricas (DINEOF; Alvera-Azcaráte *et al.*, 2005). Este método ha sido aplicado en estudios de fitoplancton basados en series de tiempo satelitales para la región del Pacífico suroriental (Correa-Ramírez *et al.*, 2012; Andrade *et al.*, 2014; Corredor-Acosta *et al.*, 2015).

En Chile, son escasos los estudios sobre fenología aplicada a variables o procesos oceanográficos o ecológicos y se han enfocado en la zona costera frente a la región centro-sur de Chile. Montecinos & Gómez (2010) describieron la fenología de la surgencia costera, en términos de transporte zonal de Ekman, para la región centro-sur de Chile (35- 41°S) durante el periodo comprendido entre 1999 y 2008, usando datos *in situ* y satelitales de viento. De acuerdo a sus resultados, los periodos de menor duración e intensidad en la temporada de surgencia ocurren durante los eventos El Niño, mientras que temporadas de surgencia de mayor duración e intensidad ocurren en eventos La Niña. Por otra parte, Corredor-Acosta *et al.* (2015) evaluaron la fenología del fitoplancton (clo-*a* satelital) y su asociación con la de otras variables ambientales, incluyendo la temperatura superficial del mar (TSM), radiación fotosintéticamente activa (PAR) y transporte zonal de Ekman (ZET) en la zona costera en la región centro-sur de Chile (35-38°S). Sus resultados mostraron que la fenología del fitoplancton presenta un ciclo anual marcado, con magnitudes máximas en el periodo de primavera-verano, así como ocurrió con la fenología de PAR y ZET. En términos del acoplamiento biológico con los forzantes físicos, el inicio del periodo productivo del fitoplancton se acopló al inicio de ZET y PAR cuando se usaron los cálculos con todas las frecuencias excepto la sinóptica (16-1024 d). Se encontraron variaciones latitudinales en la fenología del fitoplancton y se sugirió que se debería a la variabilidad espacial en la surgencia costera, cambios en la batimetría y/o en la orientación de la línea de costa.

Estudios fenológicos en las aguas oceánicas en el Pacífico suroriental no se han realizado y resulta de un alto interés conocerlas especialmente en las zonas adyacentes a islas oceánicas ubicadas frente a la región central de Chile, dado sus especiales características y por estar consideradas como áreas altamente vulnerables (Poulin, 2006). Entre el grupo de islas oceánicas frente a Chile, se encuentra el Archipiélago Juan Fernández (AJF), compuesto por las islas Robinson Crusoe (RC), Santa Clara (SC) y Alejandro Selkirk (AS). Este archipiélago ha despertado el interés de investigadores y ONG's, al ser uno de los sistemas de islas más productivos en el Pacífico suroriental con una alta biomasa biológica y biodiversidad terrestre y marina (Pequeño & Saez, 2000; Retamal & Arana, 2000; Rodríguez-Ruiz *et al.*, 2014). Asimismo, fue declarado Parque Nacional (1935), y luego obtuvo la categoría de Reserva Mundial de la Biósfera desde 1977 (UNESCO, 2011). Sin embargo, el nivel de

conocimiento actual sobre los procesos y la variabilidad oceanográfica más relevante, así como la estructura de comunidades pelágicas-planctónicas y los niveles de producción primaria en las aguas alrededor de las islas es deficiente.

Sobre comunidades fitoplanctónicas en el AJF, lo que se conoce se refiere principalmente a distribuciones de *clo-a*. Pizarro *et al.* (2006), encontraron que en la época primaveral, las concentraciones *in situ* de *clo-a* en la capa superficial de las islas RC y AS alcanzaron valores de $\sim 0,5 \text{ mg m}^{-3}$ y $\sim 0,3 \text{ mg m}^{-3}$, respectivamente, mientras que en la capa subsuperficial se observaron valores máximos cercanos a 2 mg m^{-3} en AS y 1 mg m^{-3} en RC. Por otra parte, Andrade *et al.* (2012, 2014), utilizando datos satelitales de *clo-a*, además de la TSM, nivel del mar y magnitud del viento, caracterizaron el ciclo anual de la *clo-a* y su variabilidad espacio-temporal, y el efecto masa de isla (EMI), en la región del AJF.

Andrade *et al.* (2012) identificaron dos máximos anuales, uno en invierno y otro en primavera. El primero se atribuyó a la propagación de remolinos de mesoescala provenientes de la costa continental, que según Correa-Ramirez *et al.* (2007) pueden transportar altos valores de *clo-a* hasta la zona del AJF. El máximo primaveral, fue atribuido a la ocurrencia de procesos locales alrededor de las islas que inciden en incrementos de *clo-a* por EMI (Andrade *et al.*, 2014). En las regiones oceánicas como tal, solo se ha identificado un máximo anual durante invierno (Yuras *et al.*, 2005). Por otra parte, Andrade *et al.* (2012) observaron una diferencia espacial en la ubicación de mayores concentraciones de *clo-a*, en el lado sur-oeste en el caso de RC-SC y en lado oeste en AS. Por ello, los autores sugieren que las islas presentan diferencias en los forzantes físicos que dominan la variabilidad espacial del fitoplancton.

El AJF se encuentra bajo la influencia del sistema de corrientes de borde oriental de Chile-Perú (Fig. 2a), caracterizado por ser altamente dinámico y complejo, con la frecuente presencia de meandros, filamentos y remolinos de mesoescala (Silva, 1985; Hormazábal *et al.*, 2004; Fuenzalida *et al.*, 2007). Este sistema, es conocido también como Sistema de la Corriente Humboldt (SCH), el flujo que se dirige hacia el norte, se divide en una rama costera y otra oceánica, mientras que hacia el sur en la capa superficial fluye la Contracorriente del Perú (CCP), ubicada entre 78° y 80°W y en la

capa subsuperficial la Corriente Subsuperficial Perú-Chile (CSSPC) (Fuenzalida *et al.*, 2007). En el SCH, la división zonal de la clo-*a* satelital es como sigue (Correa-Ramirez *et al.*, 2012): i) Zona Costera (ZC), ubicada en los primeros 100 km desde la costa; ii) Zona de Transición Costera (ZTC), que abarca la zona comprendida desde los 100 km desde la costa hasta aproximadamente 80°W, y iii) Zona Oceánica (ZO), que se extiende entre 80° y 90°W (Fig. 2b). De acuerdo a esta división, las islas que componen el AJF estarían ubicadas en zonas diferentes, con las islas RC y SC en la ZTC mientras que la isla AS se localiza en la ZO (Andrade *et al.*, 2012). Así, el conjunto RC-SC se encuentra en una zona con moderadas concentraciones de clo-*a* (0,3-1 mg m⁻³), asociada a la influencia de actividad de mesoescala en la región centro-sur de Chile (Correa-Ramirez *et al.*, 2007, 2012), mientras que la isla AS se encuentra en una zona con concentraciones de clo-*a* <0,1 mg m⁻³ u oligotróficas (Correa-Ramirez *et al.*, 2012).

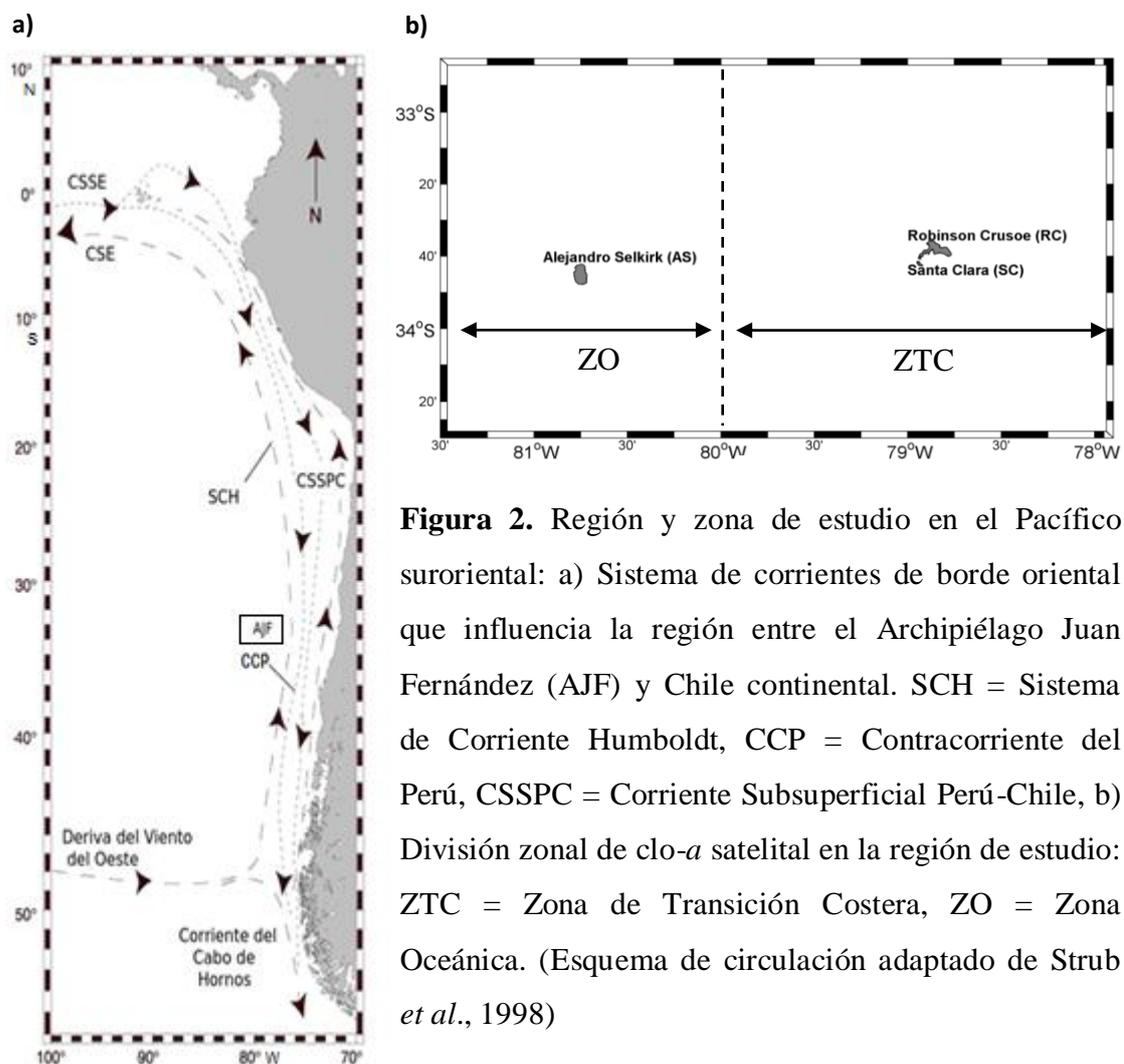


Figura 2. Región y zona de estudio en el Pacífico suroriental: a) Sistema de corrientes de borde oriental que influencia la región entre el Archipiélago Juan Fernández (AJF) y Chile continental. SCH = Sistema de Corriente Humboldt, CCP = Contracorriente del Perú, CSSPC = Corriente Subsuperficial Perú-Chile, b) División zonal de clo-*a* satelital en la región de estudio: ZTC = Zona de Transición Costera, ZO = Zona Oceánica. (Esquema de circulación adaptado de Strub *et al.*, 1998)

Las características oceanográficas de las aguas adyacentes a las islas que conforman el AJF han sido analizadas en varios cruceros oceanográficos (Crucero Juan Fernández I, II y III). En ellos se ha observado una distribución uniforme de la TSM, con valores máximos de 17,8°C en primavera, época en la cual aun no se ha formado la termoclina, y de 19,0°C en otoño, época en que aparece una capa de mezcla que alcanza hasta 50 m de profundidad, seguida de una termoclina débil (Silva & Sievers, 1973). Neshyba & Silva (1985), mostraron que la TSM posee un marcado ciclo anual, con temperaturas >18°C durante los meses de verano (enero-marzo) y < 13°C durante invierno (julio-septiembre). Los vientos son predominantemente del sur durante todo el año, sobre todo en verano, mientras que en invierno, a pesar que el viento sur es de mayor intensidad que en verano, se ha observado una dirección variable la cual es frecuentemente alterada por el relieve y topografía de las islas (Hajek & Espinoza, 1987).

Dada la importancia de la productividad primaria observada alrededor de las islas, que sostiene una alta biodiversidad e importantes actividades pesqueras, surge la necesidad de comprender cómo es la fenología del fitoplancton en esta región, junto con la fenología de variables físicas como la temperatura superficial del mar y el esfuerzo del viento. De acuerdo a esto, el presente estudio tiene como objetivo principal caracterizar la fenología del fitoplancton, en términos de *clo-a*, en las aguas adyacentes al AJF.

2. FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS DE TRABAJO

La presencia de las islas que componen el Archipiélago Juan Fernández (AJF) produce un cambio significativo en la fenología del fitoplancton en las aguas adyacentes, además de un aumento en clorofila-*a* (clo-*a*), respecto de las regiones oceánicas abiertas.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

- Caracterizar la fenología del fitoplancton en las aguas adyacentes a las islas que componen el Archipiélago Juan Fernández.

3.2. Objetivos específicos

- Caracterizar la variabilidad espacial y temporal de las series de tiempo satelitales de fitoplancton (clo-*a*), TSM y esfuerzo del viento (τ) en la región del AJF.
- Describir los componentes de la fenología de la clorofila-*a*, TSM y esfuerzo del viento en Robinson Crusoe-Santa Clara y en Alejandro Selkirk.
- Evaluar si existe un efecto de las islas del AJF sobre las características de la fenología del fitoplancton en las aguas adyacentes.
- Determinar la relación entre la fenología del fitoplancton con la fenología de la TSM y del esfuerzo del viento (τ) en el área de estudio.

4. MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Área de estudio

La zona de estudio corresponde a la región oceánica que rodea el AJF, el cual pertenece al cordón submarino de Juan Fernández, conformado por tres islas (RC, SC y AS), ubicado frente a la zona central de Chile ($33^{\circ}40'S$, $78^{\circ}40'W$), aproximadamente a 675 km del Puerto de San Antonio, perteneciente a la región de Valparaíso (Fig. 3).

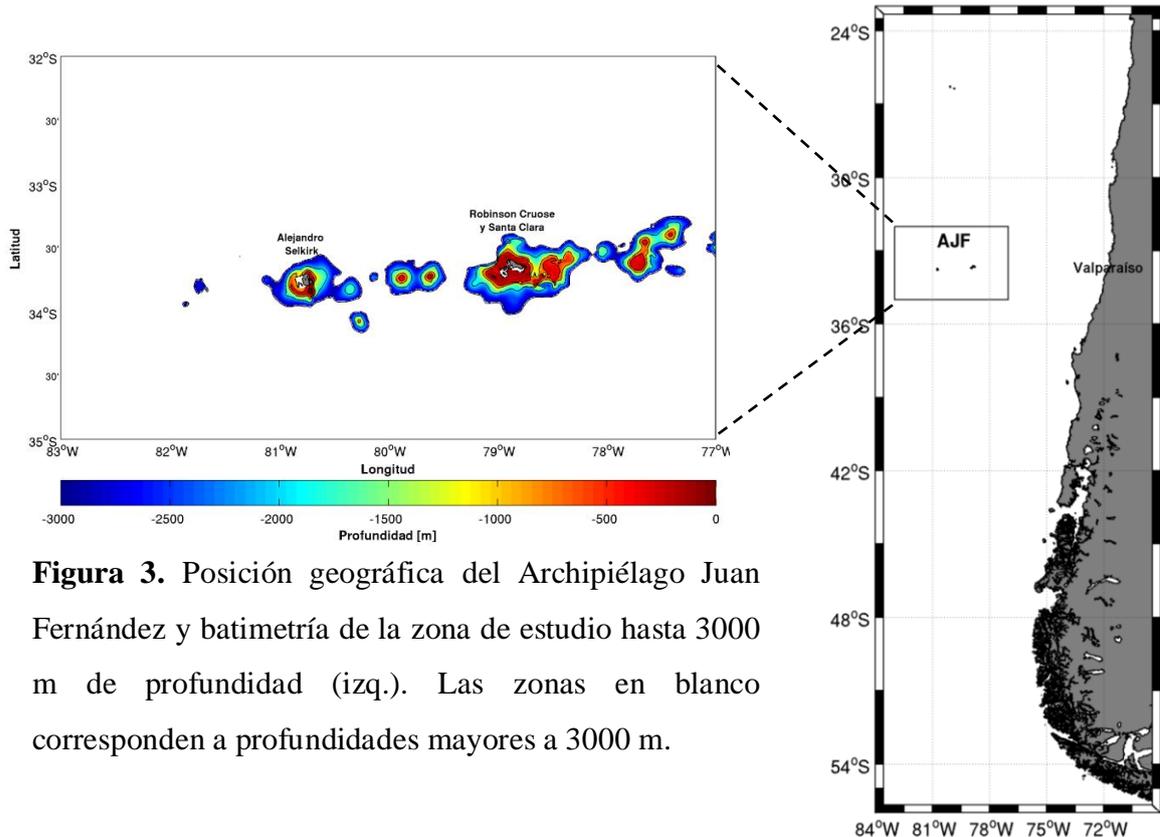


Figura 3. Posición geográfica del Archipiélago Juan Fernández y batimetría de la zona de estudio hasta 3000 m de profundidad (izq.). Las zonas en blanco corresponden a profundidades mayores a 3000 m.

4.1.1. Subdivisión de áreas

Las islas se trabajaron de forma separada. Para esto, siguiendo la metodología utilizada por Andrade *et al.* (2012), se consideró como una sola isla a RC y SC (RC-SC), debido a su cercanía (separadas por un canal de 1 km) y, por otro lado, la isla AS, ubicada ~90 millas náuticas al oeste de RC-SC. Además, se evaluaron zonas de referencia para ambas islas, las que se ubicaron a la misma longitud que estas a un grado de latitud más al norte, con dimensiones de 1° de longitud x $0,5^{\circ}$ de latitud. De acuerdo a Correa-Ramirez *et al.* (2012), las islas con sus respectivas zonas de referencia se encuentran en zonas del PSO que presentan dinámicas diferentes, la isla RC-SC se ubica en la ZTC mientras que AS en la ZO. Lo mismo sucedió con las zonas de

referencia para cada isla, las cuales se denominaron Zona de Referencia-1 (ZR-1) y Zona de Referencia-2 (ZR-2) para RC-SC y AS, respectivamente. Las regiones estudiadas, tanto alrededor de las islas como en las zonas de referencia, se muestran en la Figura 4.

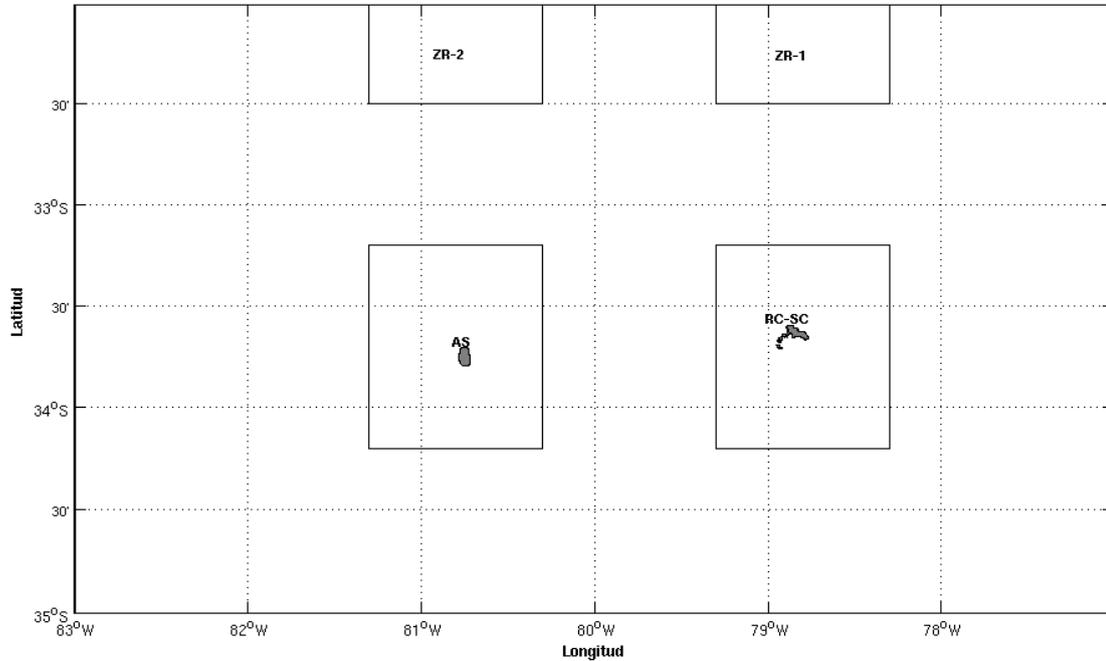


Figura 4. Región de estudio para el conjunto de islas RC-SC, isla AS y sus respectivas zonas de referencia. ZR-1 = Zona de Referencia-1, ZR-2 = Zona Referencia-2.

4.2. Datos

Para cuantificar los índices fenológicos del fitoplancton y caracterizar el ciclo anual de la *clo-a* en el AJF, se utilizaron 12 años de información satelital de *clo-a*, para el período comprendido entre el 19 de julio de 2002 y el 25 de marzo de 2014. Los datos diarios de *clo-a* con resolución espacial de 1 km fueron obtenidos desde el producto L2 de la misión MODISAqua (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) e interpolados con el método DINEOF (Data Interpolating Empirical Orthogonal Function) en el Laboratorio de Oceanografía Física de la PUCV. Datos diarios de TSM con la misma longitud de tiempo que la *clo-a* y una resolución espacial de 0,011° (latitud) x 0,011° (longitud), fueron obtenidos del producto Multiscale Ultrahigh Resolution (MUR) L4 del proyecto Group for High Resolution Sea Surface Temperature (GHRSSST), que basa su análisis en observaciones de varios instrumentos, incluyendo el Advanced Microwave Scanning Radiometer-EOS (AMSRE) de la NASA, el Moderate Resolution

Imaging Spectroradiometer (MODIS) de las plataformas Aqua y Terra de la NASA, y observaciones *in situ* del proyecto iQuam de la NOAA (<http://mur.jpl.nasa.gov>). Datos de viento cada 6 horas, con resolución espacial de $0,31^\circ$ (latitud) x $0,31^\circ$ (longitud), para el periodo comprendido entre el 19 de julio de 2002 y el 31 de diciembre de 2010, fueron obtenidos del producto Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) de la NOAA (<http://rda.ucar.edu/datasets/ds093.0/>).

4.3 Procesamiento de los datos

En la región de estudio, se realizó la climatología para la *clo-a*, TSM y τ . Se confeccionaron series de tiempo de *clo-a* promediada en el área comprendida entre 0 y 5 km alrededor de RC-SC y AS. Estas fueron correlacionadas espacialmente con series de tiempo de *clo-a* de todos los píxeles a lo largo de la región estudiada. Luego, se confeccionaron series de tiempo de *clo-a* promediada sobre distintas zonas alrededor de las islas: i) 0 y 5 km, ii) 5 y 10 km, iii) 10 y 25 km y iv) 25 y 50 km. Con estas series de tiempo se evaluó la extensión espacial de la variabilidad de la *clo-a*. Posteriormente, las series de tiempo fueron normalizadas y se les aplicó un análisis wavelet siguiendo la metodología de Torrence & Compo (1998), utilizando la wavelet madre de Morlet y, el método de Montecarlo para obtener los niveles de significancia estadística (95% de confianza). Se reconstruyeron las series de tiempo de *clo-a* en la banda de frecuencia que concentró la mayor energía o varianza. En este sentido, la Banda de Frecuencia Anual (BFA, 254-512 días) fue la más significativa. Una vez obtenidas las series reconstruidas, siguiendo la metodología de Corredor-Acosta *et al.* (2015), se realizaron curvas acumuladas de la variable en términos de un año fenológico, es decir, empezando el 1 de noviembre del año N al 31 de octubre del año N+1, para resolver de mejor manera las fechas de inicio y término de las variables trabajadas y, junto con ello, la duración y magnitud máxima acumulada. Posteriormente, se determinaron los índices fenológicos (inicio, fin, duración y magnitud) para todas las series de tiempo en la banda de frecuencia escogida (BFA).

Se confeccionaron series de tiempo de TSM para las mismas zonas evaluadas en el caso de la *clo-a*. No obstante, debido a que las series de tiempo en las distintas zonas alrededor de las islas no presentaron mayores diferencias en cuanto a la estadística descriptiva, se aplicó una correlación cruzada a la serie de tiempo comprendida entre 0

y 5 km con las series de tiempo más externas, determinando estadísticamente la similitud entre ellas. El análisis de correlación cruzada aplicado mostró valores de $r > 0.99$ para un rezago de cero días en todos los casos, y valores de $r > 0,9$ para rezagos de 20 días (ver Anexo). Por tanto, se decidió trabajar con el área más próxima a las islas (0 y 5 km). Se analizaron las series de tiempo de TSM de la misma manera que la *clo-a*, para obtener los índices fenológicos para la curva acumulada de la TSM. El esfuerzo del viento (τ), se calculó siguiendo la metodología de Large & Pond (1980), el cual entrega valores distintos de coeficiente de arrastre para diferentes rangos de velocidad del viento. Posteriormente, para realizar la fenología de esta variable, no se procedió de la misma forma que en el caso de la *clo-a* y la TSM en cuanto a las zonas evaluadas, debido a que la resolución espacial del viento satelital es menor ($0,31^\circ \times 0,31^\circ$). Por tanto, se seleccionaron pixeles cercanos a las islas, escogiendo una grilla de 4x3 pixeles para cada una, de manera que el área evaluada esté dentro del rango de 0 y 50 km alrededor de las islas. Las series de tiempo de τ fueron filtradas mediante una ventana rectangular de 5 pesos para quitar la variabilidad de alta frecuencia. Posteriormente, se realizó el mismo procedimiento aplicado a las variables anteriores.

Las zonas de referencia se ubicaron $\sim 1^\circ$ al norte de la zona de estudio de cada isla. En ambas zonas se aplicó el procedimiento anterior para cada variable y se comparó de manera descriptiva con la fenología de las variables alrededor de las islas.

5. RESULTADOS

5.1. Clorofila-*a* (clo-*a*) satelital

5.1.1. Distribución espacial y temporal de clo-*a*

La clo-*a* en la región de estudio promediada temporalmente, entre julio de 2002 y marzo de 2014, presentó los mayores valores en las aguas más próximas a las costas de las islas, alcanzando concentraciones $>0,4 \text{ mg m}^{-3}$. En RC-SC los valores más altos se observaron en el sector sur de la isla, mientras que en AS se presentaron en el sector oeste (Fig. 5). Además, la clo-*a* presentó una disminución zonal en dirección este-oeste, con valores $>0,25 \text{ mg m}^{-3}$ hasta 79°W y concentraciones $<0,2 \text{ mg m}^{-3}$ a partir de 80°W .

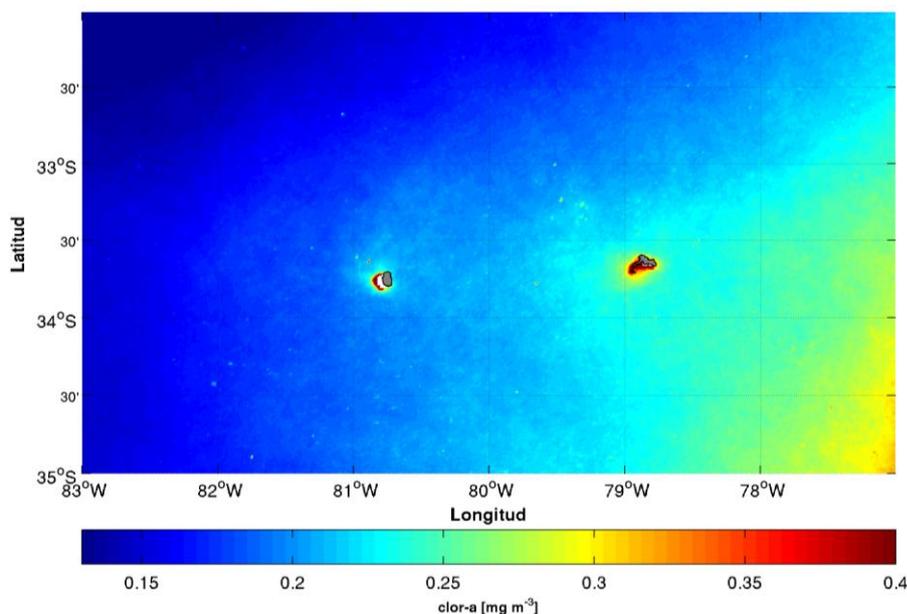


Figura 5. Distribución espacial de clo-*a* para la región alrededor del AJF promediada temporalmente entre julio de 2002 y marzo de 2014.

Estacionalmente, la clo-*a* presentó concentraciones bajas asociadas a la temporada de verano con valores $<0,2 \text{ mg m}^{-3}$ en gran parte de la región de estudio, exceptuando las aguas inmediatamente adyacentes a las islas en donde se observaron concentraciones entre $0,25$ y $0,4 \text{ mg m}^{-3}$, principalmente en el sector sur de RC-SC y en el sector oeste de AS (Fig. 6a). Junto con lo anterior, también se observaron concentraciones de clo-*a* $>0,25 \text{ mg m}^{-3}$ al sureste del área estudiada. En otoño, se observó un incremento progresivo de la clo-*a* en dirección noroeste, alcanzando

concentraciones de clo-*a* >0,3 y 0,2 mg m⁻³ hasta 78° y 80° W, respectivamente (Fig. 6b). Mientras que alrededor de las islas, las concentraciones de clo-*a* se mantuvieron superiores a las aguas más alejadas de estas (>0,35 mg m⁻³). Por otra parte, en invierno, concentraciones de clo-*a* >0,2 mg m⁻³ cubrieron cerca de la mitad de la región de estudio hasta ~81° W, quedando ambas islas rodeadas por aguas con alto contenido de clo-*a* en relación a las aguas oligotróficas características de las regiones oceánicas (<0,1 mg m⁻³). Al igual que en las estaciones de verano y otoño, permanecieron concentraciones >0,35 mg m⁻³ en las zonas más próximas a las islas, nuevamente hacia el sector sur y oeste de RC-SC y AS, respectivamente (Fig. 6c). Por último, en primavera se observó una disminución en la concentración de clo-*a* en la región de estudio. No obstante, alrededor de las islas esta aumentó, tanto en concentración (clo-*a* >0,4 mg m⁻³) como en el espacio, expandiéndose lejos de las costas insulares, hacia el suroeste RC-SC y oeste de AS (Fig. 6d).

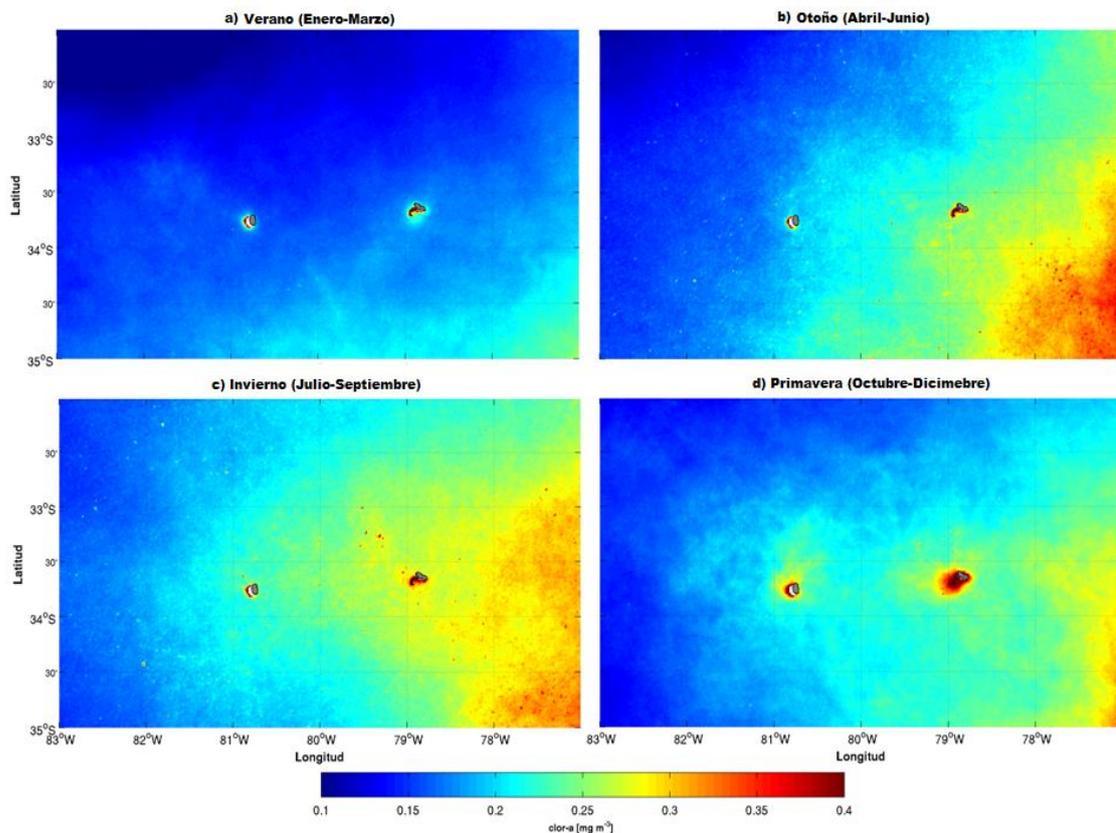


Figura 6. Climatología estacional de clo-*a* para el periodo comprendido entre 2002 y 2014: a) Verano (Enero-Marzo), b) Otoño (Abril-Junio), c) Invierno (Julio-Agosto) y d) Primavera (Octubre-Diciembre).

5.1.2. Series de tiempo y correlación espacial de la clo-a

Al evaluar el comportamiento temporal de la clo-a entre 0 y 5 km alrededor de las islas, estas no presentaron una señal definida en la frecuencia anual. No obstante, presentaron máximos marcados, haciendo notar que en ciertos periodos del año se producen aumentos de clo-a, con diferente magnitud entre un año y otro (Fig. 7). RC-SC presentó en promedio una concentración de $0,34 \text{ mg m}^{-3}$. Las concentraciones de clo-a se mantuvieron por debajo de 1 mg m^{-3} , con valores máximos que bordearon entre $0,8$ y $0,9 \text{ mg m}^{-3}$, asociados principalmente a la segunda mitad de cada año (Fig. 7a). AS en cambio, presentó concentraciones de clo-a de menor magnitud que las encontradas en RC-SC, con un promedio de $0,29 \text{ mg m}^{-3}$. Los valores máximos de clo-a observados estuvieron entre $0,5$ y $0,6 \text{ mg m}^{-3}$, exceptuando los años 2007, 2008 y 2010, en donde las concentraciones de clo-a se mantuvieron más bajas, entre $\sim 0,3$ y $0,4 \text{ mg m}^{-3}$ (Fig. 7b). En general, las amplitudes máximas para ambas islas se encontraron asociadas a los meses del año correspondientes a invierno-primavera. Además, en algunos años, se observaron máximos secundarios asociados al período de otoño-invierno.

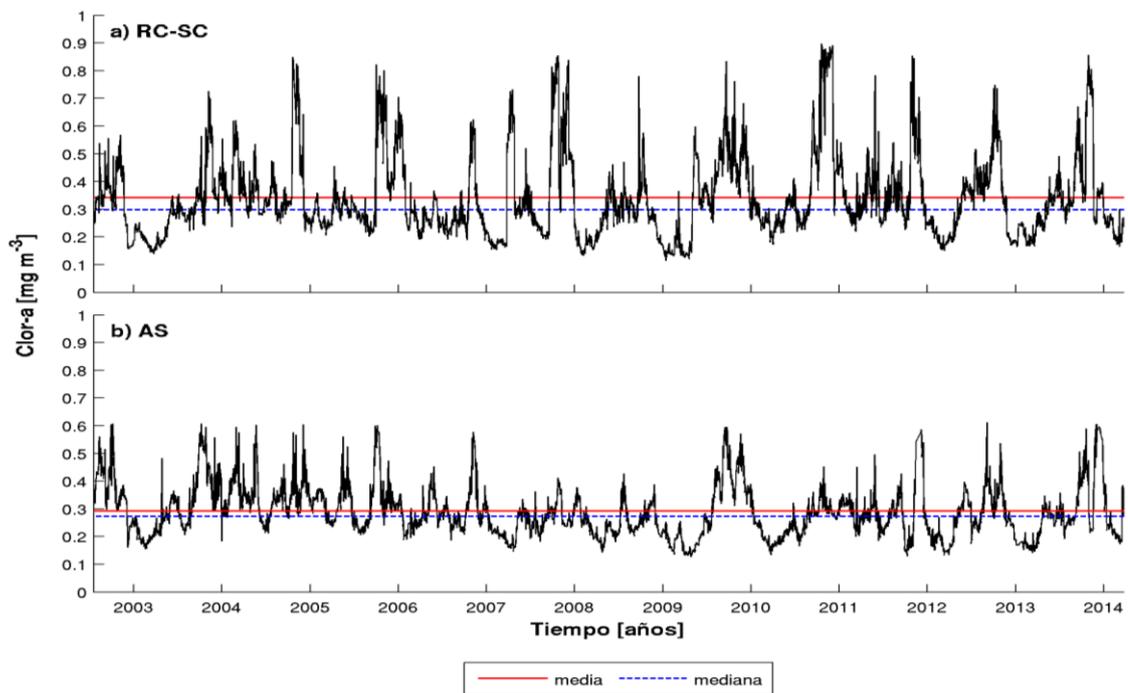


Figura 7. Series de tiempo de clo-a entre 0 y 5 km alrededor de las islas; a) isla RC-SC y b) isla AS. Las líneas continuas rojas indican la media y las segmentadas azules la mediana para cada serie de tiempo.

La correlación de las series de tiempo anteriormente descritas con las series de tiempo de todos los píxeles a lo largo de la región de estudio mostraron para RC-SC valores de $r > 0,5$ limitados a las cercanías de sus costas, extendiéndose predominantemente en dirección noroeste, mientras que, el contorno de $r = 0,4$ abarcó un área mayor, aun así, se mantuvo limitada a las cercanías de de RC-SC, aproximadamente hasta una distancia de 20 km lejos de costa (Fig. 8a). En cuanto a la isla AS, los contornos de $r = 0,5$ y $r = 0,4$ abarcaron un área cerca de tres veces mayor que la comprendida en la correlación realizada para RC-SC, observándose una mayor extensión en el plano norte-sur. Los valores de $r > 0,5$ se encontraron hasta una distancia de aproximadamente 20 km alejados de la costa de AS, mientras que valores de $r > 0,4$ se encontraron a distancias que bordearon los 50 km costa afuera (Fig. 8b). En términos generales, valores de $r > 0,6$ se encontraron asociados a las zonas más cercanas a las islas y, a medida que se evaluaron zonas más alejadas, la correlación de las series de tiempo fue disminuyendo.

En cuanto a las series de tiempo realizadas para ambas islas entre 0 y 5 km, 5 y 10 km, 10 y 25 km y 25 y 50 km, se observó que la concentración de clo-*a* disminuyó a medida que se evaluaron zonas más alejadas de las costas insulares (Fig.9). Además, no presentaron definida la señal anual, debido a que durante un mismo año se distinguieron varios picos de diferentes amplitudes. Para RC-SC, las series de tiempo a partir de 5 km costa afuera mostraron un decaimiento en la concentración de clo-*a*, con valores que no superaron $0,5 \text{ mg m}^{-3}$ y con promedios y medianas relativamente similares entre ellas, bastante diferente a lo presentado en los primeros 5 km alrededor de la isla (Fig. 9a-d). En cuanto a AS, todas las series de tiempo para esta isla presentaron menor concentración de clo-*a* que la encontrada en RC-SC. Por otro lado, al igual que en RC-SC, las series de tiempo a partir de 5 km costa afuera fueron muy similares entre sí, no existiendo una gran variación en el promedio y mediana obtenidos, oscilando todos entorno a $0,2 \text{ mg m}^{-3}$ (Fig. 9e-h).

En la Tabla 1 de los Anexos se muestra la estadística descriptiva de clo-*a* para ambas islas obtenida de las series de tiempo de las diferentes zonas evaluadas para el periodo de estudio comprendido entre el 19 de julio de 2002 y 25 de marzo de 2014.

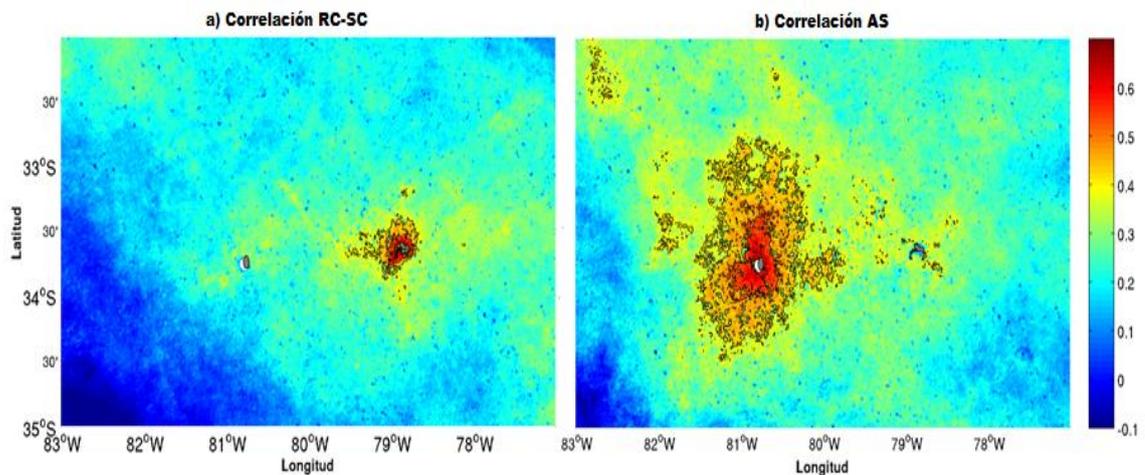


Figura 8. Correlación espacial de las series de tiempo de todos los pixeles y las series de tiempo entre 0 y 5 km alrededor islas, con contornos de $r = 0,5$ y $r = 0,4$. a) Correlación RC-SC y b) correlación AS.

5.1.3. Espectro de potencia de Wavelet para la clo-a

En cuanto al poder espectral de Wavelet, las mayores densidades espectrales se centraron en las bandas de frecuencia anual (BFA, 254-512 días) y sobre esta en ambas islas. Las bandas de frecuencia estacional (~90 días) e intraestacional (~45 días) también mostraron valores de varianza elevados en algunos años, sobre todo para la región entre 0 y 5 km alrededor de las islas. La densidad espectral disminuyó en las bandas de alta frecuencia a medida que se evaluó una zona más alejada de las islas (Fig. 10a-d y 11a-d, para RC-SC y AS, respectivamente). Por otro lado, al observar el espectro global de Wavelet, las bandas que acumularon mayor energía para ambas islas se encontraron asociadas a la BFA disminuyendo a medida que se evaluaron zonas más alejadas de las islas. (Fig. 10e-h y 11e-h, para RC-SC y AS, respectivamente). Además en todos los casos, el promedio temporal de la varianza fue mayor en RC-SC.

5.1.4. Índices fenológicos para la curva acumulada de la clo-a

Los índices fenológicos promedio para la curva acumulada de clo-a en las distintas zonas evaluadas alrededor de RC-SC y AS son representados en la Figura 12. En ambos casos, el inicio del periodo productivo comenzó antes (en términos de un año fenológico) en las regiones más alejadas de las islas y, por tanto, también finalizaron antes, con una duración relativamente similar, cercana a los 6 meses en cada caso.

Además, en todas las zonas evaluadas, el inicio del periodo productivo se observó primero en RC-SC y, a continuación, en AS. Por otra parte, la magnitud máxima acumulada, en general, tendió a aumentar hacia regiones más alejadas de las islas.

Con respecto a RC-SC, entre 0 y 5 km, el inicio del período productivo se produjo dentro de la tercera semana de marzo, finalizando la segunda semana de octubre, con duración de 6,5 meses y acumulación máxima de clo-*a* de 0,73 mg m⁻³ (Fig. 12a). Al evaluar la zona comprendida entre 5 y 10 km, el inicio se produjo a mediados de marzo, mientras que el término tomó lugar dentro de la tercera semana de septiembre, tuvo una duración total de 6,2 meses y una magnitud máxima acumulada de 0,69 mg m⁻³ (Fig.12b). Entre 10 y 25 km, el inicio se presentó a mediados de febrero y el término dentro de la tercera semana de agosto, teniendo una duración cercana a los 6 meses, en donde la clo-*a* alcanzó una magnitud acumulada de 0,71 mg m⁻³ (Fig. 12c). Por último, para la región evaluada entre 25 y 50 km, el inicio y el término del periodo productivo tomó lugar los primeros días de febrero y agosto, respectivamente. La duración se mantuvo igual que la región evaluada entre 10 y 25 km, no obstante, la clo-*a* alcanzó una magnitud máxima acumulada mayor que el resto de las regiones con un valor de 0,80 mg m⁻³ (Fig. 12d).

En cuanto a la isla AS, la región entre 0 y 5 km presentó el inicio del periodo productivo dentro de la última semana de marzo y el término se produjo en la tercera semana de octubre cuando la clo-*a* alcanzó un máximo acumulado de 0,67 mg m⁻³, teniendo una duración de 6,5 meses (Fig. 12e). La región entre 5 y 10 km alrededor de la isla presentó el inicio dentro de la tercera semana de marzo, finalizando la última semana de septiembre, con una magnitud de clo-*a* acumulada de 0,74 mg m⁻³ y duración de 6,3 meses (Fig. 12f). Al evaluar la región comprendida entre 10 y 25 km, el inicio y el término del periodo productivo tomaron lugar dentro de la segunda semana de marzo y septiembre, respectivamente. La duración fue de 6,2 meses y la clo-*a* alcanzó una magnitud máxima acumulada de 0,76 mg m⁻³ (Fig.12g). Finalmente, en la región más externa a la isla, entre 25 y 50 km, el inicio se presentó a fines de febrero y el término a comienzos de septiembre. En este caso, tanto la duración como la magnitud máxima acumulada de clo-*a* fue igual a la región entre 10 y 25 km (Fig. 12h).

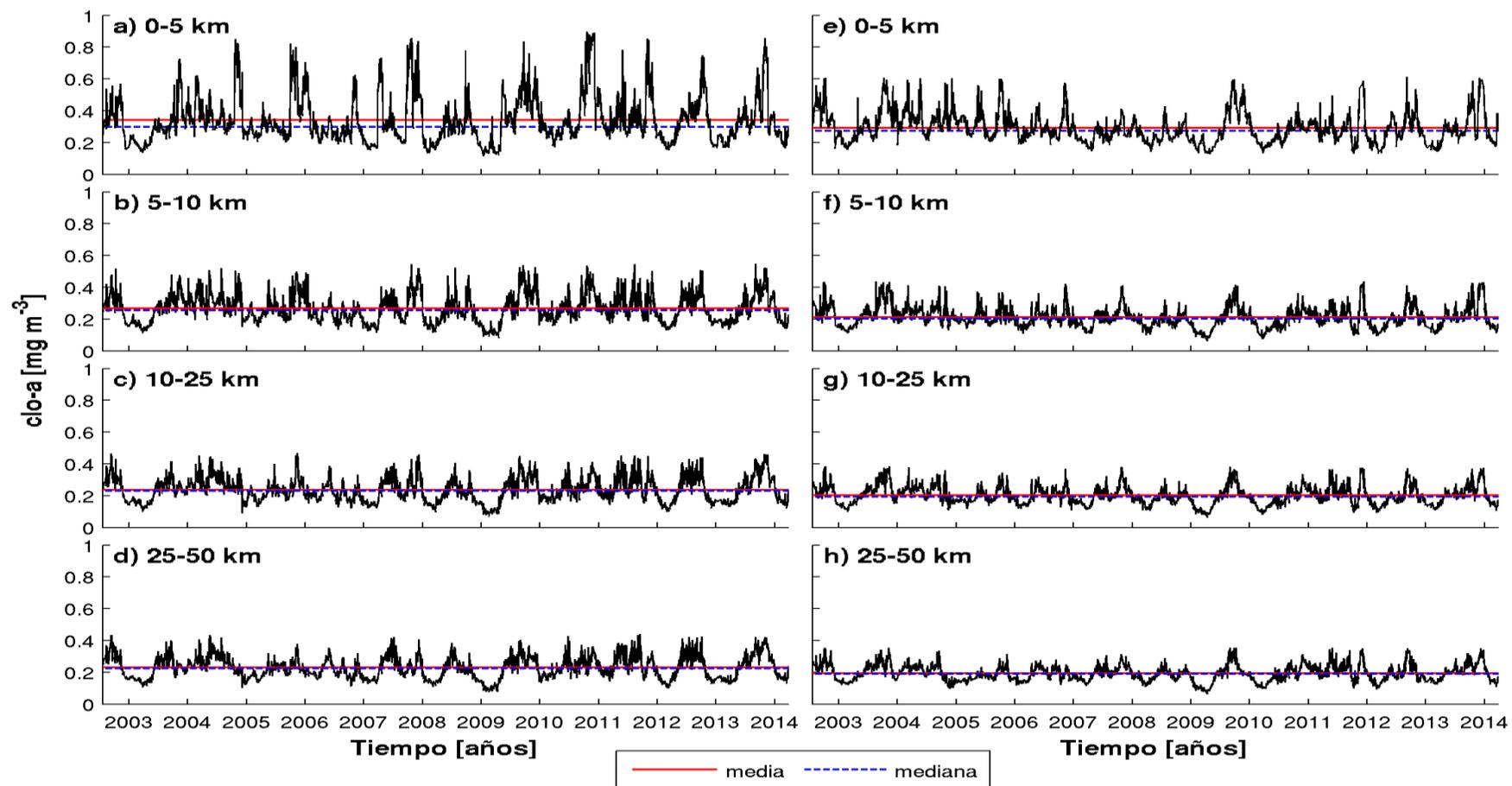


Figura 9. Series de tiempo de clo-*a* a partir del 19 de julio de 2002 y el 25 de marzo de 2014, para todas las secciones evaluadas alrededor de las islas (0 y 5 km, 5 y 10 km, 10 y 25 km, y 25 y 50 km). A la izquierda: islas RC-SC (a-d). A la derecha: isla AS (e-h). Las líneas continuas rojas indican la media, y las líneas segmentadas azules la mediana para cada serie de tiempo.

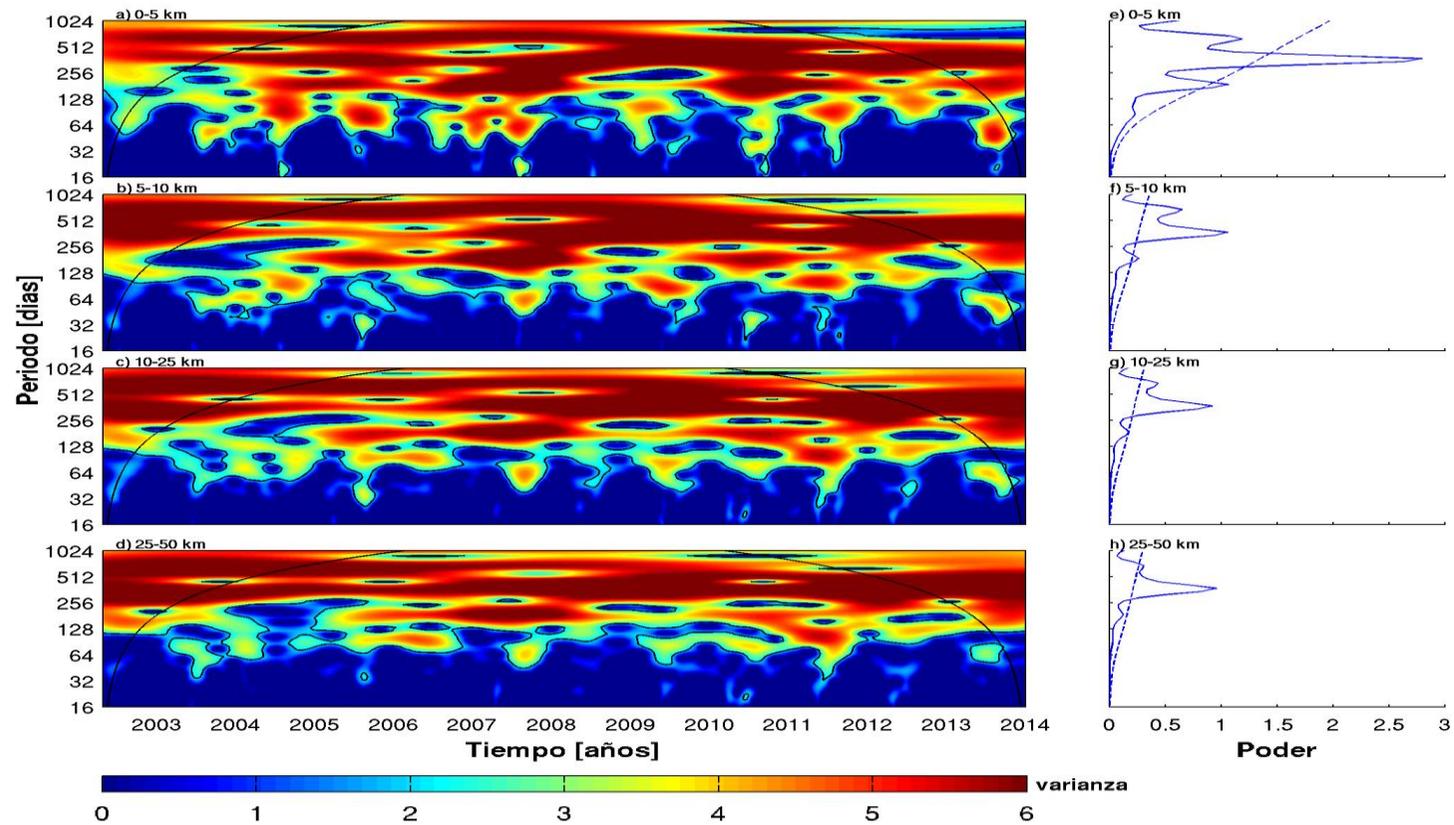


Figura 10.a-d) Espectro de potencia de Wavelet de clo-*a* para todas las zonas evaluadas alrededor de RC-SC. Las líneas de contornos de color muestran las frecuencias en las que la variabilidad tiene un nivel de significancia del 95% de acuerdo a 1000 iteraciones del método de Monte Carlo. La línea negra delgada es el cono de influencia, fuera del cual los efectos de borde se vuelven importantes. e-h) Espectro global de Wavelet, para todas las zonas evaluadas alrededor de RC-SC. La línea punteada indica que todo lo que está por encima es significativo.

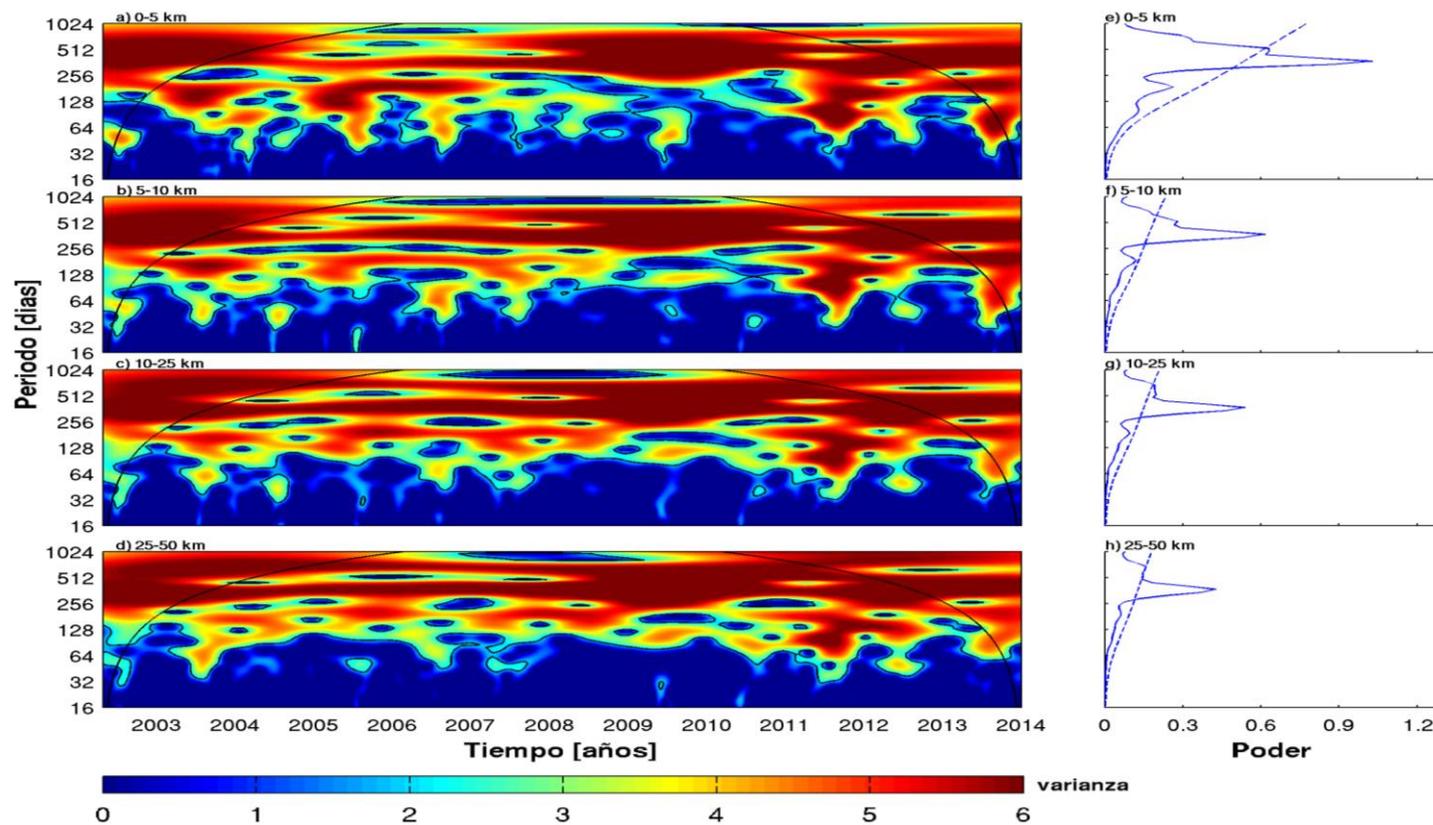


Figura 11. a-d) Espectro de potencia de Wavelet de clo- a para todas las zonas evaluadas alrededor de AS. Las líneas de contornos de color muestran las frecuencias en las que la variabilidad tiene un nivel de significancia del 95% de acuerdo a 1000 iteraciones del método de Monte Carlo. La línea negra delgada es el cono de influencia, fuera del cual los efectos de borde se vuelven importantes. e-h) Espectro global de Wavelet, para todas las zonas evaluadas alrededor de AS. La línea punteada indica que todo lo que está por encima es significativo.

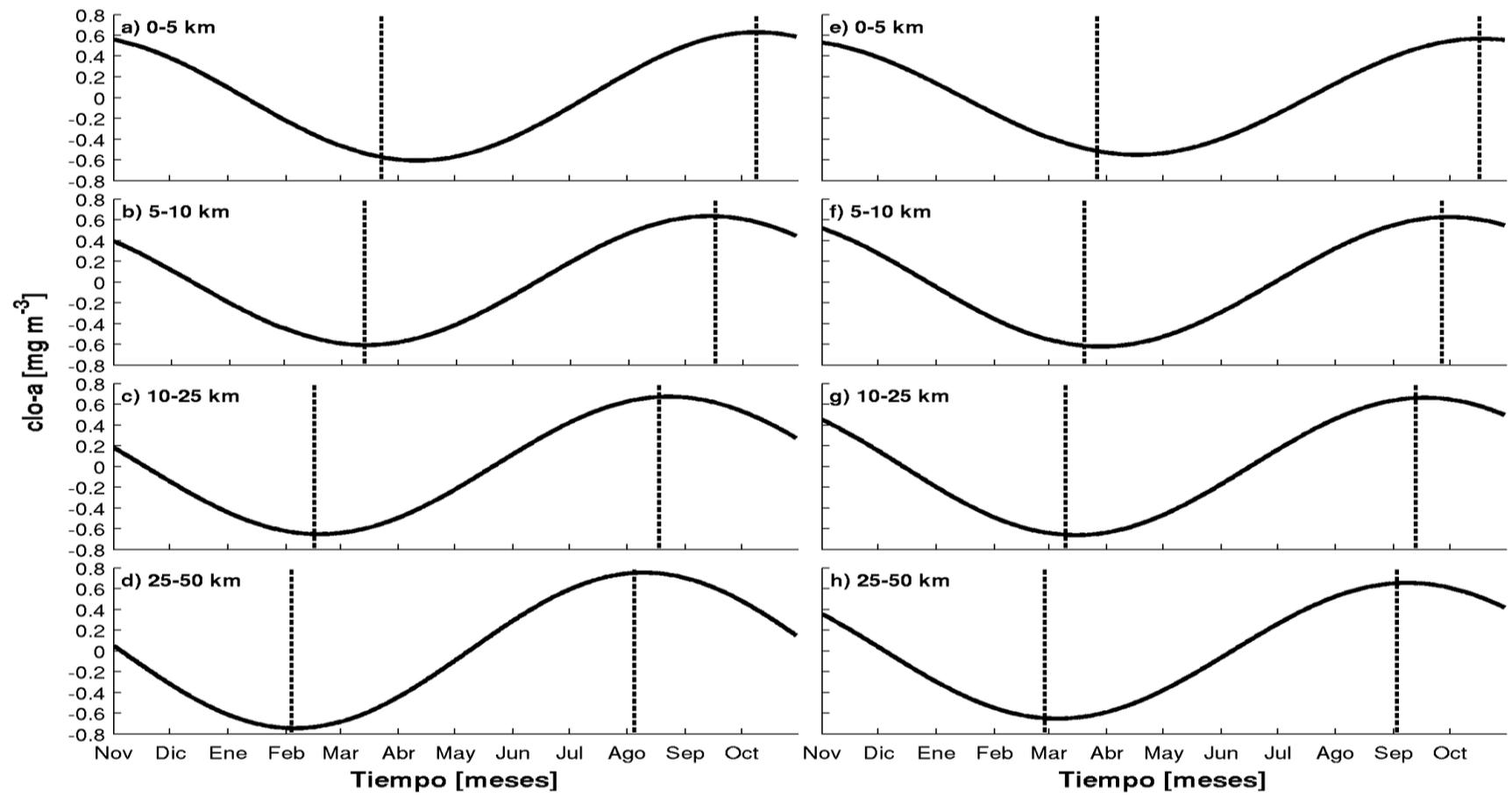


Figura 12. Curvas fenológicas de clo-a para todas las zonas evaluadas alrededor de las islas. Las líneas punteadas negras indican el inicio y el final del ciclo fenológico utilizando la reconstrucción en la BFA. A la izquierda: islas RC-SC (a-d); a la derecha: isla AS (e-h). En la Tabla 2 de los Anexos se muestra en detalle los índices fenológicos para cada una de las regiones evaluadas en ambas islas.

5.2. Temperatura Superficial del Mar (TSM)

5.2.1. Distribución espacial y temporal de TSM

La TSM promedio entre julio de 2002 y marzo de 2014, mostró valores mínimos ($\sim 16^{\circ}\text{C}$) hacia el sureste de la región de estudio, aumentando gradualmente en dirección noroeste hasta alcanzar temperaturas cercanas a 18°C (Fig. 13). En cuanto a la TSM alrededor de las islas, RC-SC presentó temperaturas entre $16,5$ y 17°C aproximadamente, mientras que en AS fueron mayores, con valores que oscilaron aproximadamente entre 17 y $17,5^{\circ}\text{C}$.

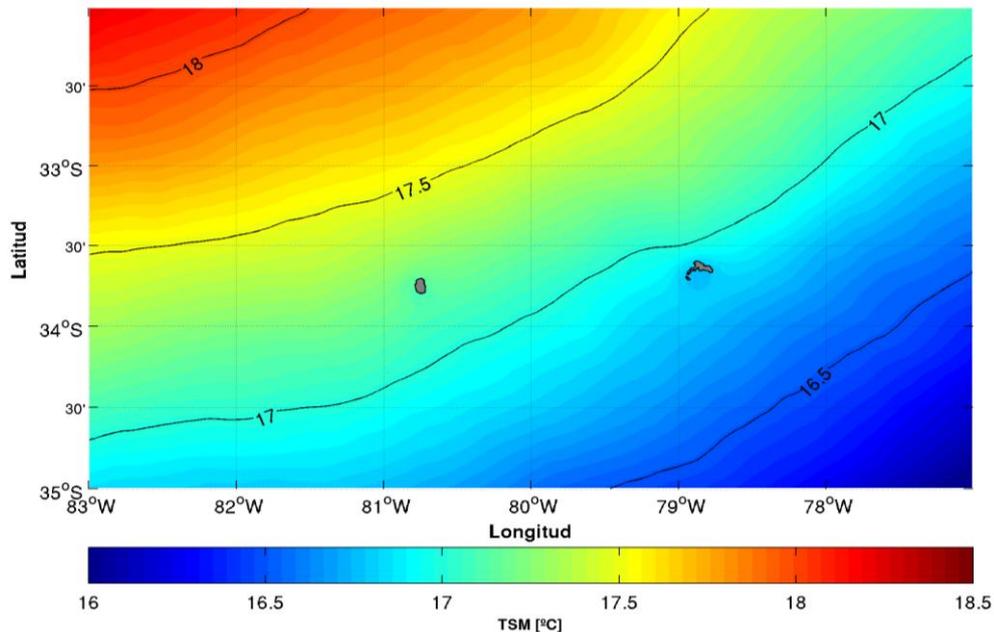


Figura 13. Distribución espacial de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) de la región de estudio, promediada para el periodo entre 2002 y 2014.

Estacionalmente, en todos los casos se observaron mayores temperaturas hacia el noroeste, mientras que las más bajas se encontraron en el sector sureste de la región de estudio, por ende, en todos los casos, RC-SC mostró menores temperaturas que AS (Fig. 14). Los meses de verano tuvieron temperaturas superficiales que fluctuaron aproximadamente entre 17 a $19,5^{\circ}\text{C}$ (Fig.14a). En otoño, fue el periodo del año en el cual se presentaron las mayores temperaturas de la región, en un rango que fluctuó entre 18 a 21°C (Fig.14b). En invierno, la TSM desciende drásticamente, a valores entre 15 a 17°C aproximadamente (Fig. 14c). No obstante, la estación primaveral presentó las menores temperaturas, con valores menores a 16°C (Fig.14d).

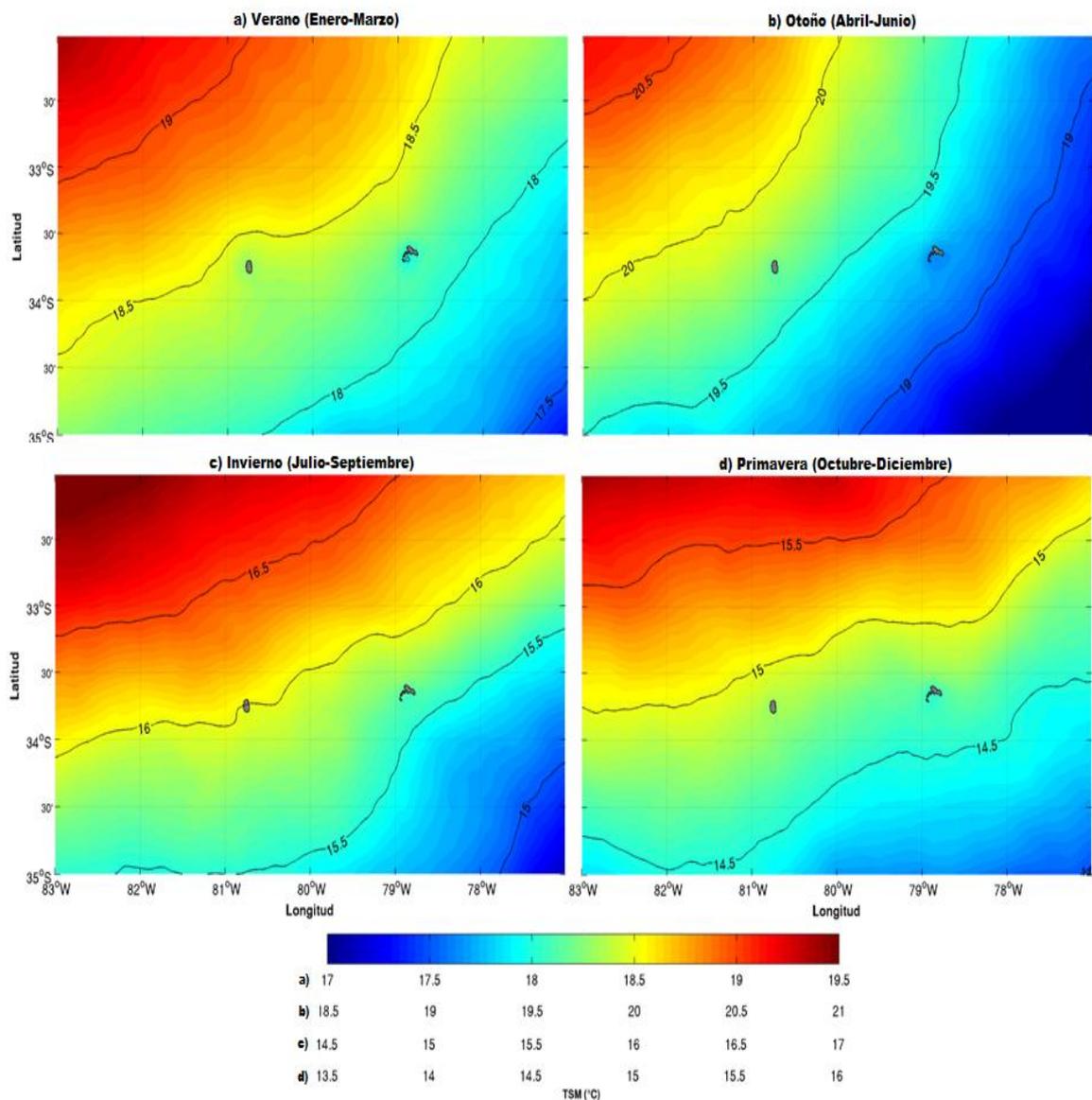


Figura 14. Climatología estacional de TSM: a) verano (Enero-Marzo), b) otoño (Abril-Junio), c) invierno (Julio-Septiembre) y d) primavera (Octubre-Diciembre). La barra de colores es igual en todos los casos, no obstante, la escala usada es diferente, la cual se indica debajo de la barra para cada estación del año.

5.2.2. Series de tiempo de TSM

Las series de tiempo de TSM mostraron la señal anual fuertemente marcada, con valores de temperatura máximos en verano-otoño y mínimos durante invierno-primavera (Fig. 15). En general, ambas series de tiempo tuvieron un comportamiento similar, no obstante, AS presentó temperaturas relativamente más elevadas que RC-SC,

tanto en verano como en invierno. El conjunto de islas RC-SC tuvo una TSM promedio de 16,9°C, mientras que de 17,2°C en AS. Por otra parte, en la mayoría de los años de estudio, RC-SC sobrepasó los 20°C en el periodo de verano-otoño, sólo durante los años comprendidos entre 2004 a 2005 y 2010 a 2011 las temperaturas máximas fueron de menor magnitud. En tanto que, AS en todos los periodos alcanzó valores mayores o iguales a 20°C alcanzando un máximo cercano a 22°C durante 2008 y 2012. En cuanto a las temperaturas del periodo invierno-primavera, en ambas islas se observaron valores próximos a 14°C, siendo el año 2007 la época más fría, alcanzando 12,8 y 13°C para RC-SC y AS, respectivamente. En la Tabla 3 de los Anexos se presenta la estadística descriptiva de la TSM para el periodo comprendido entre 2002 y 2014.

5.2.3. Espectro de potencia de Wavelet para TSM

El espectro de potencia de Wavelet para la TSM en ambas islas (Fig. 16a-b), mostró la mayor densidad espectral centrada únicamente en la banda de frecuencia anual (BFA, 254-540 d). El espectro global de Wavelet, presentó para AS mayor valor de densidad espectral que RC-SC (Fig. 16c-d).

5.2.4. Índices fenológicos para la curva acumulada de TSM

Los índices fenológicos para la curva acumulada de TSM en ambas islas (Fig. 17) se presentaron de manera diferente a lo observado en la fenología para la clo-a, debido a que la magnitud máxima alcanzada, correspondiente al término del ciclo, se ubicó antes que el inicio (de acuerdo al año fenológico escogido en este estudio). En consecuencia, el índice para el inicio observado está representando el comienzo del ciclo respectivo al año siguiente, mientras que el índice para el final del ciclo corresponde al año anterior. De acuerdo a esto, ambas islas mostraron el inicio del año fenológico a mediados de octubre, mientras que el término ocurrió a mediados de abril, en donde alcanzaron una temperatura máxima acumulada de 1,3°C y una duración total de 6 meses.

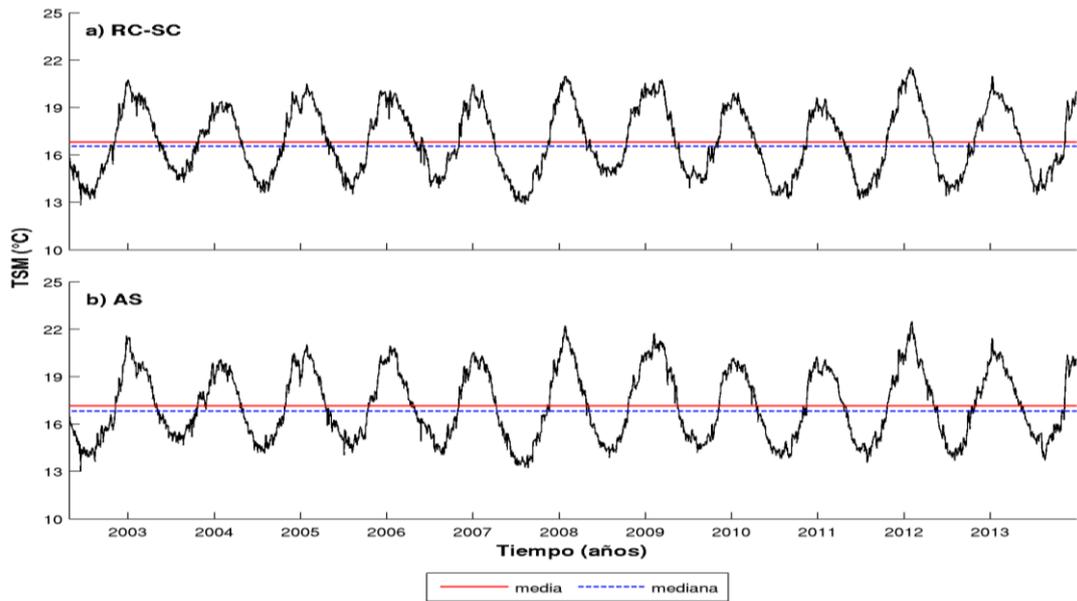


Figura 15. Series de tiempo de Temperatura Superficial del Mar (TSM) para el periodo de estudio comprendido entre 2002 y 2014: a) RC-SC y b) AS. Las líneas continuas rojas indican la media y las segmentadas azules la mediana para cada serie de tiempo.

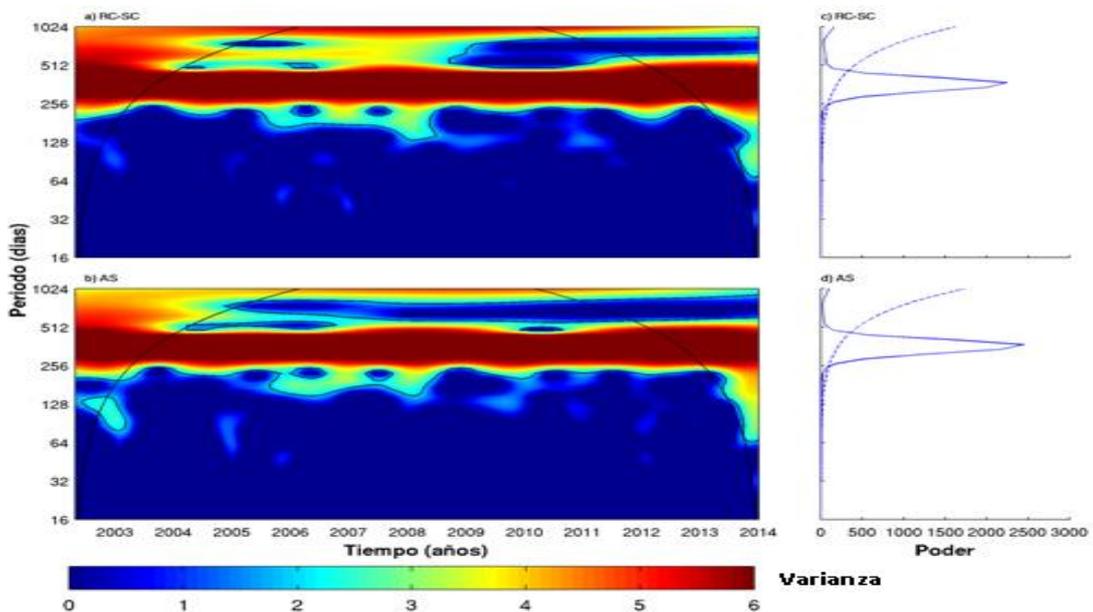


Figura 16. A la derecha: Espectro de potencia de Wavelet de la Temperatura Superficial del Mar: a) RC-SC y b) AS. Las líneas de contornos de color muestran las frecuencias en las que la variabilidad tiene un nivel de significancia del 95% de acuerdo a 1000 iteraciones del método de Monte Carlo. La línea negra delgada es el cono de influencia, fuera del cual los efectos de borde se vuelven importantes. A la izquierda: Espectro global de Wavelet: c) RC-SC y d) AS. La línea punteada indica que todo lo que está por encima es significativo.

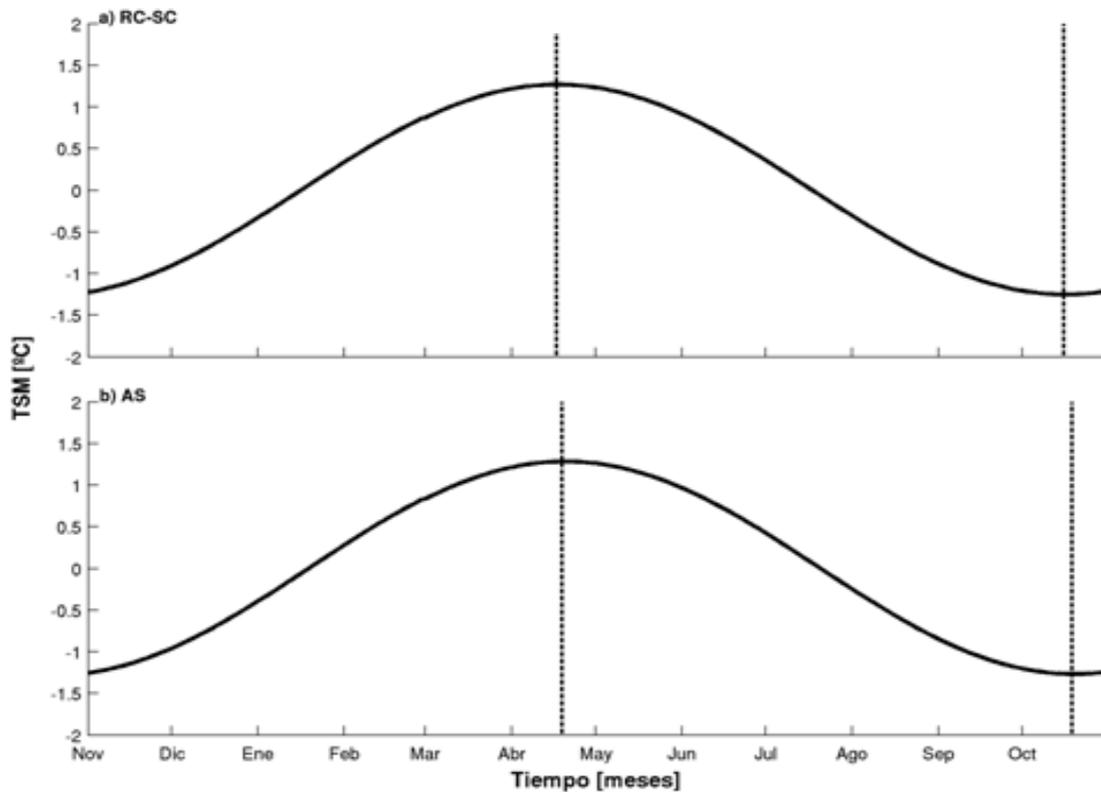


Figura 17. Curvas fenológicas de TSM: a) RC-SC y b) AS. Las líneas punteadas negras indican el inicio y el final del ciclo fenológico utilizando la reconstrucción en la BFA. En la Tabla 4 de los Anexos se muestran en detalle los índices fenológicos de la TSM para la reconstrucción de la serie en la BFA en ambas islas, promediados para el periodo de estudio entre 2002 y 2014.

5.3. Esfuerzo del viento (τ)

5.3.1. Distribución espacial y temporal de τ

Se observó el esfuerzo del viento (τ) promedio para el periodo de tiempo comprendido entre julio de 2002 y diciembre de 2010 (Fig. 18). El esfuerzo del viento promedio fluctuó entre 0,063 a 0,077 N m⁻², registrando valores mayores hacia el lado oriental de la región de estudio, mientras que los más bajos se presentaron hacia el noroeste (NO). Por tanto, en promedio, RC-SC estuvo bajo un esfuerzo del viento de mayor magnitud que AS. El viento predominante en la zona corresponde principalmente a viento sur (S) y suroeste (SO).

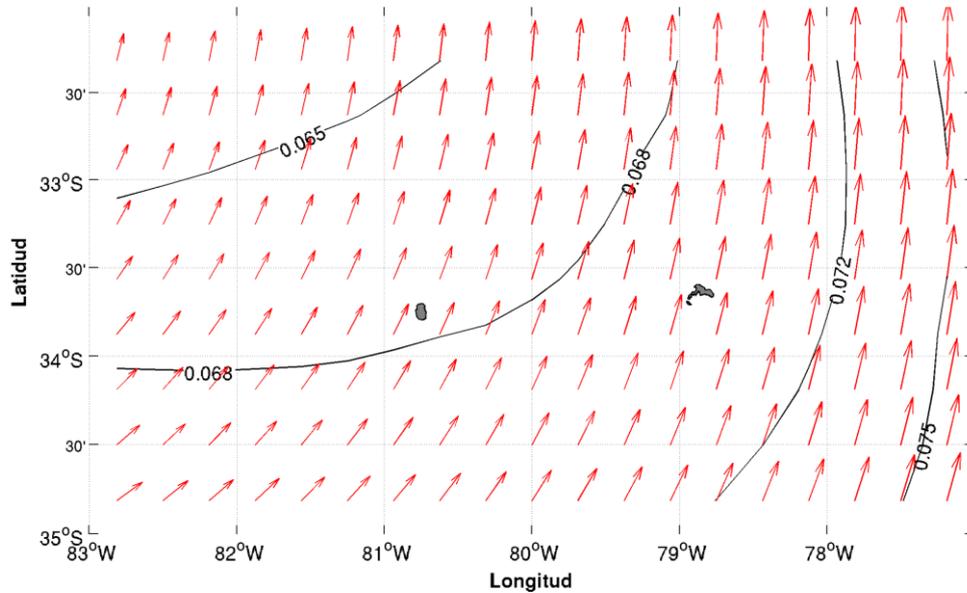


Figura 18. Distribución espacial esfuerzo del viento (τ) promedio para el periodo de comprendido entre 2002 y 2010. Las líneas sólidas negras de contorno indican la magnitud del esfuerzo del viento.

La climatología estacional de τ se representa en la Figura 19. En verano τ fluctuó entre 0,056 a 0,084 N m^{-2} , presentándose las mayores magnitudes al este (E) de la región de estudio, disminuyendo hacia el oeste (O). La dirección de τ mostró una predominancia desde el S en ambas islas (Fig.19a). En la estación correspondiente a otoño, el rango de fluctuación de τ disminuyó variando entre 0,07 a 0,08 N m^{-2} . A diferencia de verano, las mayores magnitudes se situaron en el SO disminuyendo hacia el NE, y la dirección predominante para cada isla fue oeste suroeste (OSO) y SO para AS y RC-SC, respectivamente (Fig. 19b). Durante los meses de invierno, el τ sólo aumentó en magnitud variando entre 0,07 a 0,09 N m^{-2} , manteniendo una distribución y dirección predominante semejante a la de otoño (Fig. 19c). Por último, en primavera, τ presento cambios tanto en magnitud como en dirección. Los menores valores se presentaron en el NO de la región de estudio, aumentando hacia el Este (E), oscilando entre 0,05 a 0,07 N m^{-2} , siendo este periodo del año en el cual se presentaron las menores magnitudes de τ . La dirección predominante de τ en primavera fue S para el conjunto de islas RC-SC, mientras que para AS fue SSO (Fig. 19d).

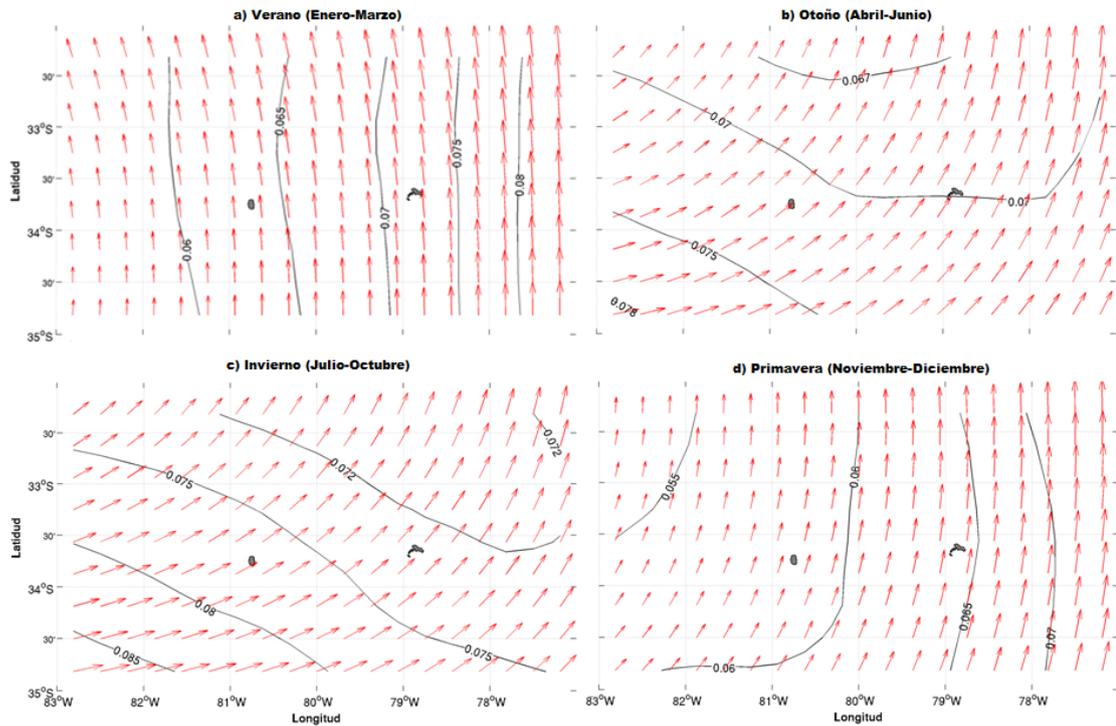


Figura 19. Climatología estacional del esfuerzo del viento (τ) para el periodo comprendido entre 2002 y 2010: a) Verano (Enero-Marzo), b) Otoño (Abril-Junio), c) Invierno (Julio-Septiembre) y d) Primavera (Octubre-Diciembre). Las líneas sólidas negras de contorno indican la magnitud de τ .

5.3.2. Series de tiempo de τ

Las series temporales del esfuerzo del viento para ambas islas se presentan en la Figura 20. Estas mostraron una alta variabilidad y, al igual que lo ocurrido con la clo-*a*, la señal anual no se mostró definida. En general, el τ fue similar en ambas islas, fluctuando aproximadamente entre 0,02 a 0,15 N m^{-2} . La media se mantuvo en torno a los 0,07 N m^{-2} , mientras que la mediana fue ligeramente menor. En la tabla 5 de los Anexos se presenta la estadística descriptiva.

5.3.3. Espectro de potencia de Wavelet para el τ

El espectro de potencia de Wavelet realizado para ambas islas se muestra en la Figura 21. En ambas islas se observó alta densidad espectral en las bandas asociadas a altas frecuencias, es decir, en la banda estacional (~ 90 días), intraestacional (~ 45 días) e incluso sinóptica (< 16 días). Siendo estas últimas las que acumularon mayor energía en

el espectro. Por otra parte, a diferencia de RC-SC, la isla AS presentó una alta variabilidad en la BFA a lo largo de todo el periodo de estudio, mientras que en RC-SC, esta banda solo fue significativa entre 2003 y 2005.

5.3.4. Índices fenológicos para la curva acumulada de τ

La fenología de τ en la región de estudio se mostró diferente entorno a ambas islas al utilizar la reconstrucción mediante la BFA (Fig. 22). RC-SC presentó el inicio del ciclo durante los últimos días del mes de noviembre, mientras que el término se ubicó dentro de la primera semana de junio, teniendo una duración de 6,3 meses y alcanzando una magnitud máxima acumulada de $0,13 \text{ N m}^{-2}$ (Fig. 22a). La isla AS mostró el inicio y el término dentro de la primera semana de enero y julio, respectivamente. La duración fue cercana a los 6 meses, siendo menor a la observada en RC-SC, no obstante, la magnitud máxima acumulada presentada en AS fue mayor, alcanzando un valor de $0,40 \text{ N m}^{-2}$ (Fig. 22b).

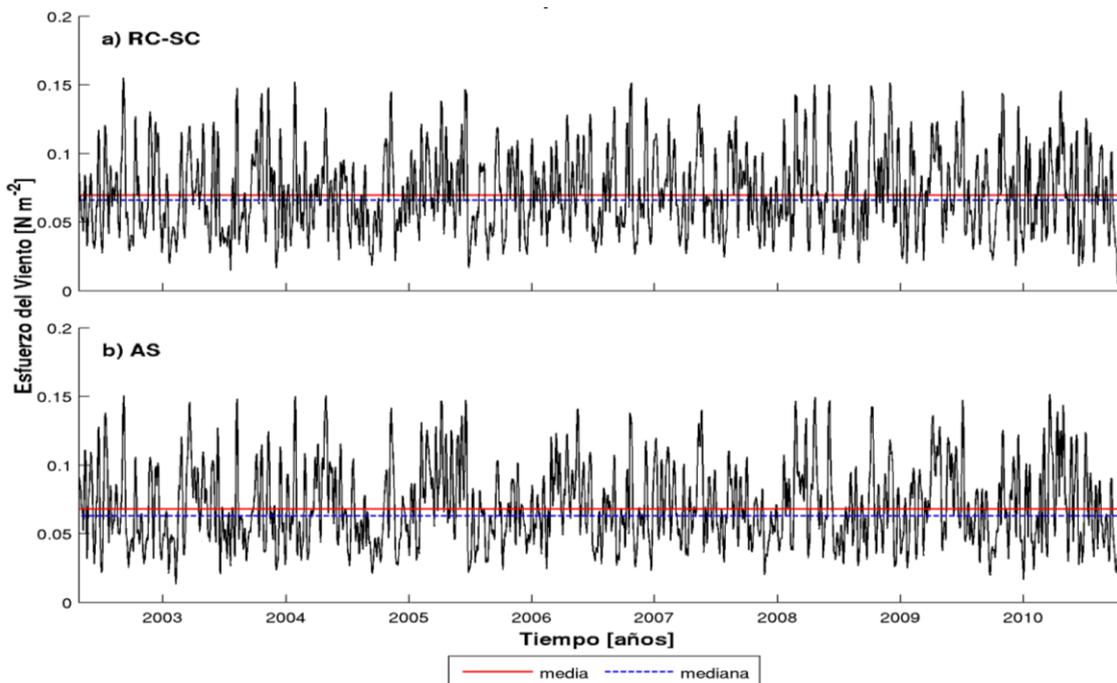


Figura 20. Series de tiempo del Esfuerzo del Viento (τ) filtradas, para el periodo de estudio comprendido entre 2002 y 2010: a) RC-SC y b) AS. Las líneas continuas rojas indican la media y las segmentadas azules la mediana para cada serie de tiempo.

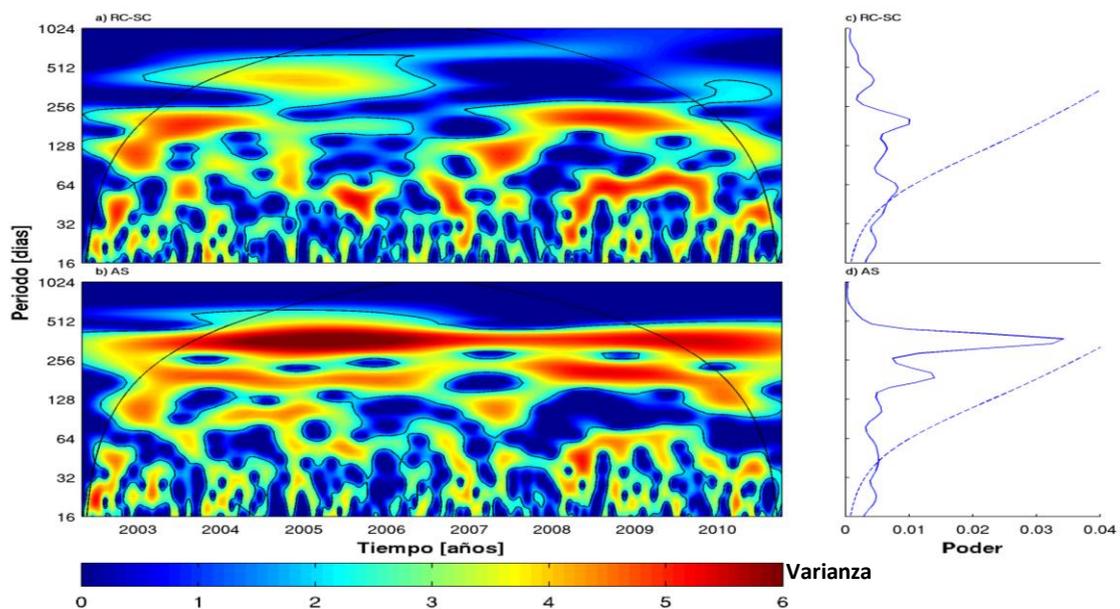


Figura 21. A la derecha: Espectro de potencia de Wavelet del Esfuerzo del Viento: a) RC-SC y b) AS. Las líneas de contornos de color muestran las frecuencias en las que la variabilidad tiene un nivel de significancia del 95% de acuerdo a 1000 iteraciones del método de Monte Carlo. La línea negra delgada es el cono de influencia, fuera del cual los efectos de borde se vuelven importantes. A la izquierda: Espectro global de Wavelet: c) RC-SC y d) AS. La línea punteada indica que todo lo que está por encima es significativo.

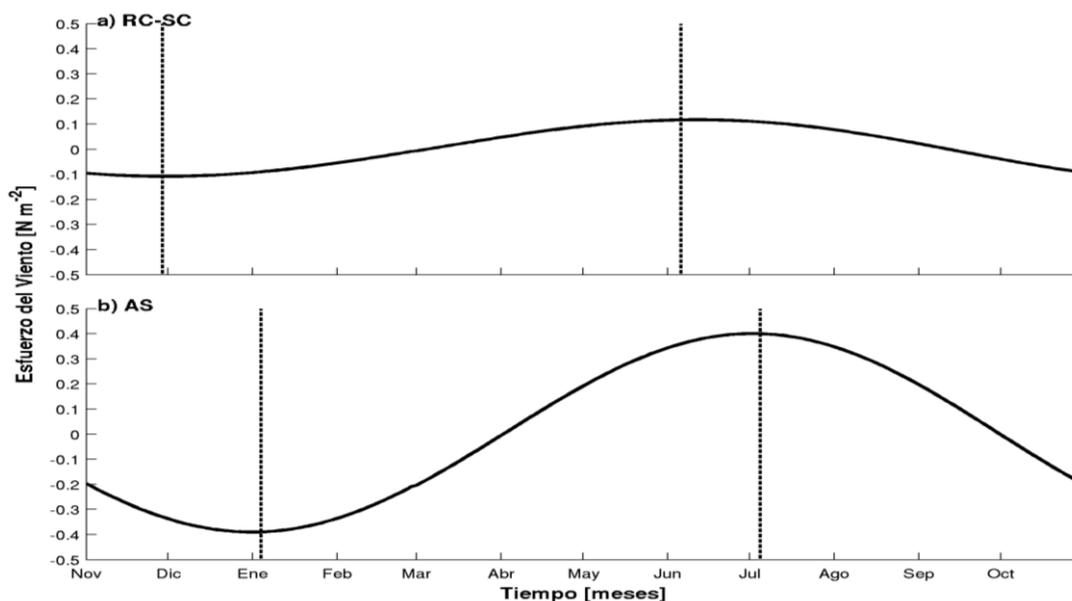


Figura 22. Curvas fenológicas de τ : a) RC-SC y b) AS. Las líneas punteadas negras indican el inicio y el final del ciclo fenológico utilizando la reconstrucción en la BFA. En la tabla 6 de los Anexos se presentan los índices fenológicos para τ .

5.4. Zonas de Referencia

5.4.1. Series de tiempo de las variables (clo-*a*, TSM y τ)

Se analizaron series de tiempo de todas las variables incluidas en este estudio para las zonas de referencia respectivas a cada isla, mostradas en la Figura 23. En estas se pudo observar que la clo-*a*, tanto para la ZR-1 como para la ZR-2, presentó la señal anual marcada y tuvo menores concentraciones en comparación a lo observado en torno a las islas que componen el AJF. Los valores de clo-*a* en la ZR-1 fluctuaron aproximadamente entre 0,1 a 0,35 mg m⁻³, con valores máximos asociados a la época de invierno y mínimos a verano, con la media centrada en 0,19 mg m⁻³ y la mediana en 0,18 mg m⁻³ (Fig. 23a). En tanto que en la ZR-2, la concentración de clo-*a* varió aproximadamente entre 0,1 a 0,3 mg m⁻³, con valores máximos asociados principalmente a invierno-primavera y mínimos asociados a verano-otoño. La concentración promedio fue de 0,16 mg m⁻³, mientras que la mediana fue ligeramente menor, con un valor de 0,15 mg m⁻³ (Fig. 23d). De acuerdo a esto, *a priori*, se pudo notar que existe una diferencia en las concentraciones de clo-*a* entre ZR-1 y ZR-2, y entre las zonas de referencia y las aguas adyacentes a las islas.

En cuanto a la TSM, al igual que lo observado en RC-SC y AS, esta mostró un marcado ciclo anual, con valores máximos asociados a otoño y mínimos a primavera, en ambas zonas de referencia. En la ZR-1, la TSM fluctuó aproximadamente entre 13 a 21°C, con una media de 17,4°C y mediana de 17,3°C (Fig. 23b), mientras que para la ZR-2, la temperatura varió entre 13 a 22°C, con una media de 17,8°C y mediana de 17,5°C (Fig. 23e). En ambas zonas de referencia, la TSM resultó ser mayor a lo observado en torno a las islas. Además, en la ZR-2 las temperaturas observadas fueron mayores que en la ZR-1.

Por último, las series de tiempo correspondiente a τ fueron muy similares a las observadas alrededor de las islas. La señal anual no se logró distinguir con facilidad, debido a que presentaron gran variabilidad asociada a altas frecuencias. Los valores fluctuaron entre 0,01 N m⁻² y 0,15 N m⁻². En la ZR-1 se observó un τ promedio de 0,068 N m⁻² y una mediana de 0,064 N m⁻² (Fig. 23c). Mientras que para ZR-2, el τ promedio tuvo un valor de 0,065 N m⁻² y la mediana de 0,061 N m⁻² (Fig. 23f). En este sentido, el

τ observado en ambas zonas de referencia fue menor a lo observado en torno a las islas del AJF, pero la zona de referencia que se encuentra en el lado oriental de la región de estudio (ZR-1) se mantuvo con mayor magnitud respecto a la ubicada en el sector occidental.

En la Tabla 7 de los Anexos se presenta la estadística descriptiva para cada variable analizada en las zonas de referencia evaluadas.

5.4.2. Espectro de potencia de Wavelet de las variables ($clo-a$, TSM y τ)

El poder espectral de Wavelet realizado para las distintas variables se presenta en las Figuras 24 y 25 para ZR-1 y ZR-2, respectivamente. La $clo-a$ en ambas regiones presentó mayor densidad espectral en periodos sobre 64 días, centrándose especialmente en la BFA, en donde la significancia estadística fue importante. Las bandas de frecuencia bianual y semianual también mostraron altos valores de energía en algunos años. El poder espectral de Wavelet para la $clo-a$ en las zonas de referencia se asemejó principalmente a la región evaluada entre 25 y 50 km alrededor de las islas. A diferencia de que en estas últimas, la banda de frecuencia intraestacional (~45 días) fue significativa en algunos años, situación que no se observó en las zonas de referencia.

La TSM presentó, al igual que en RC-SC y AS, la mayor densidad espectral en la BFA en ambas zonas de referencia. Esto dejó en evidencia el marcado ciclo anual de la TSM en toda la región de estudio, situación que también se observó en las series de tiempo realizadas para esta variable.

En tanto que para τ , la variabilidad encontrada entre ZR-1 y ZR-2 fue mayor. En ZR-1, la densidad espectral se concentró en periodos bajo la BFA, es decir, en las altas frecuencias, siendo importante la banda de frecuencia intraestacional e incluso la sinóptica. Las bandas estacional y semianual también presentaron valores de varianza elevados, pero fueron menos significativas a lo largo del tiempo. No se observaron grandes diferencias en relación a lo encontrado en RC-SC. Por otra parte, en ZR-2, las bandas de altas frecuencias presentaron la mayor densidad espectral y, a diferencia de ZR-1, la BFA mostró altos valores de varianza. En este caso, lo observado en ZR-2 y alrededor de AS tuvo un comportamiento muy similar.

5.4.3. Índices fenológicos para las curvas acumuladas de las variables ($clo-a$, TSM y τ)

Se calcularon los índices fenológicos a cada una de las variables analizadas en ambas zonas de referencia, los cuales se presentan en la Figura 26. Los índices fenológicos para la curva acumulada de $clo-a$ tuvieron un comportamiento similar a lo observado en la región más externa evaluada alrededor de las islas (25 y 50 km), teniendo el mismo patrón en relación a las fechas de inicio, término y de magnitud máxima acumulada. De acuerdo a esto, en la ZR-1 el ciclo productivo comenzó antes y acumuló más $clo-a$ que en la ZR-2, marcando nuevamente la diferenciación zonal que existe en el sistema de corrientes de borde oriental Chile-Perú. El inicio del ciclo fenológico para la $clo-a$ en la ZR-1 se produjo los primeros días de febrero, mientras que el término se presentó los primeros días de agosto, teniendo una duración de 6 meses y alcanzando una magnitud máxima acumulada de $0,88 \text{ mg m}^{-3}$ (Fig. 26a). En tanto que para la ZR-2, el inicio y el término se presentaron dentro de la tercera semana de febrero y agosto, respectivamente. La duración, al igual que en la ZR-1, fue de 6 meses, no obstante, el máximo de $clo-a$ acumulado fue menor con un valor de $0,82 \text{ mg m}^{-3}$ (Fig. 26d).

En cuanto a la TSM, los índices fenológicos para esta variable fueron semejantes entre ambas zonas de referencia y, entre estas y las aguas adyacentes a las islas, con diferencias a nivel de días. El inicio y el final, tanto para la ZR-1 como para la ZR-2, se produjo a mediados de octubre y abril, respectivamente. La duración fue de 6 meses, en la cual alcanzaron una magnitud máxima acumulada de $1,24^\circ\text{C}$ en la ZR-1 (Fig. 26b) y $1,25^\circ\text{C}$ en la ZR-2 (Fig. 26e).

Finalmente, con respecto a τ , los índices fenológicos, siguieron el mismo patrón observado alrededor de las islas del AJF, es decir, en ZR-1 el comienzo y final se presentó antes y la magnitud máxima acumulada fue menor con respecto a la ZR-2. En la ZR-1, el inicio se produjo a mediados de noviembre y el término dentro de la segunda semana de junio, con una duración de 6,8 meses y una magnitud máxima acumulada de $0,05 \text{ N m}^{-2}$ (Fig. 26c). En tanto que en la ZR-2, el inicio se presentó los últimos días de diciembre y el término se ubicó a principios de julio, teniendo una duración total de 6,2 meses y una magnitud máxima acumulada de $0,25 \text{ N m}^{-2}$ (Fig. 26f). De acuerdo a lo

presentado en las zonas de referencia, los índices fenológicos fueron similares entre ZR-2 y AS, a excepción de la magnitud máxima acumulada. Mientras que la ZR-1 presentó diferencias con RC-SC, tanto en la magnitud máxima acumulada como también en los índices relativos al inicio y duración. Estas diferencias en los índices estarían indicando que, a diferencia de la TSM, τ tiene mayor variabilidad espacial en la región de estudio, cambiando zonal como meridionalmente.

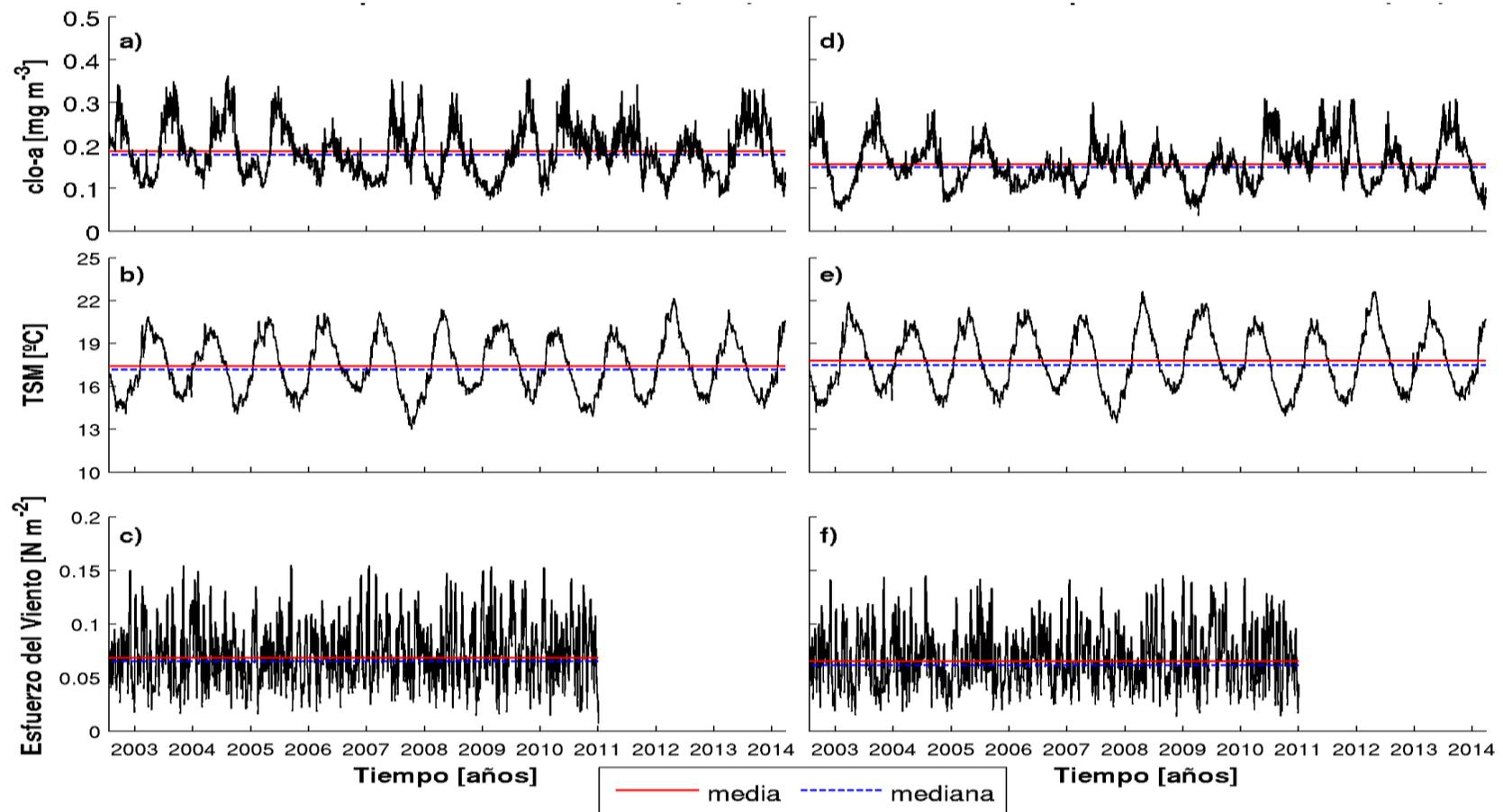


Figura 23. Series de tiempo de todas las variables evaluadas en las zonas de referencia escogidas para cada isla. A la izquierda: Zona de Referencia-1 (ZR-1). A la derecha: Zona de Referencia-2 (ZR-2). Letras a y d, b y e, c y f, corresponden a clo-a, TSM y esfuerzo del viento, respectivamente. Las líneas continuas rojas indican la media, y las líneas segmentadas azules la mediana para cada serie de tiempo.

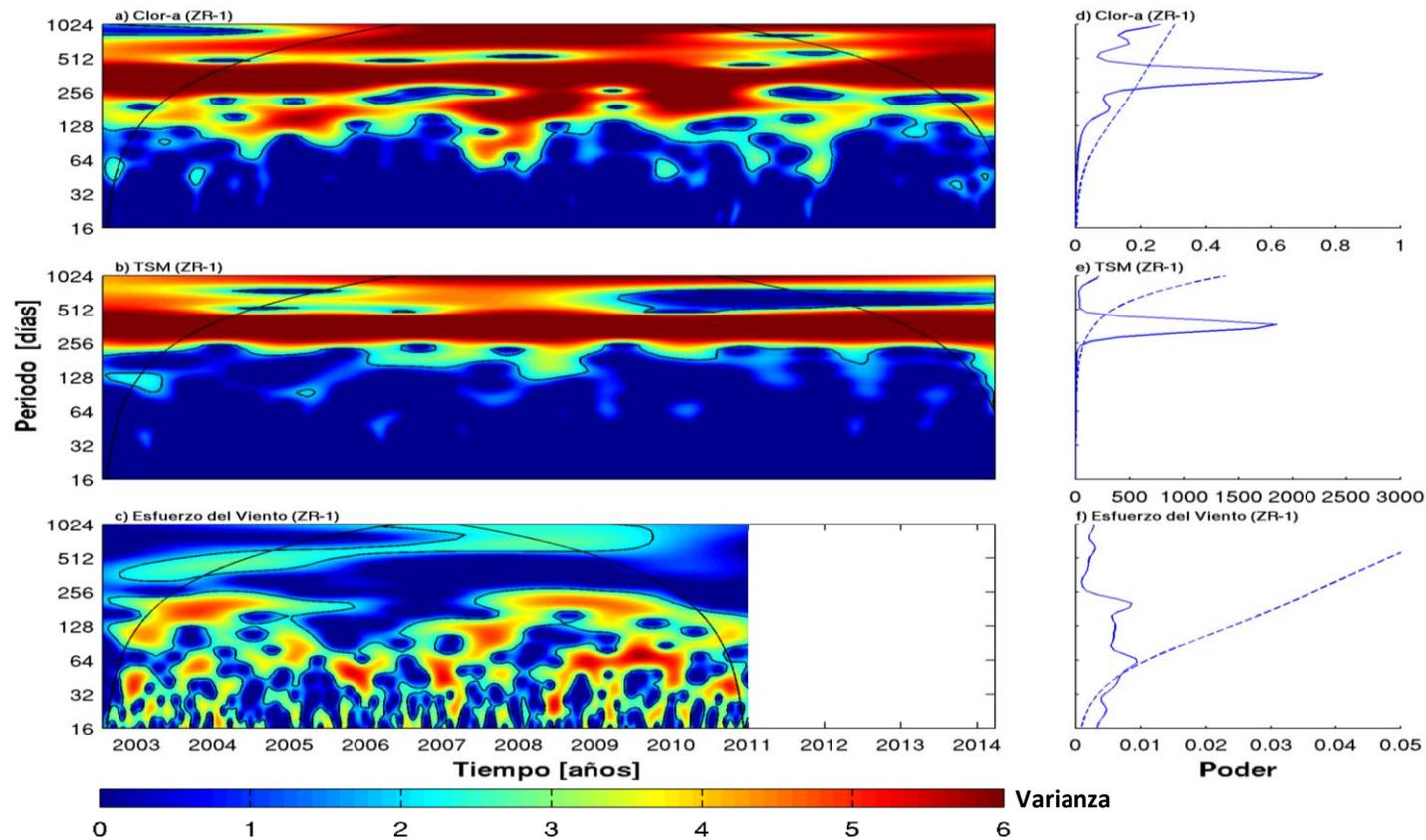


Figura 24. a-c) Espectro de potencia de Wavelet para las variables evaluadas en la zona de referencia denominada ZR-1. Las líneas de contornos de color muestran las frecuencias en las que la variabilidad tiene un nivel de significancia del 95% de acuerdo a 1000 iteraciones del método de Monte Carlo. La línea negra delgada es el cono de influencia, fuera del cual los efectos de borde se vuelven importantes. La línea negra delgada es el cono de influencia, fuera del cual los efectos de borde se vuelven importantes. d-f) Espectro global de Wavelet para la ZR-1. La línea punteada indica que todo lo que está por encima es significativo.

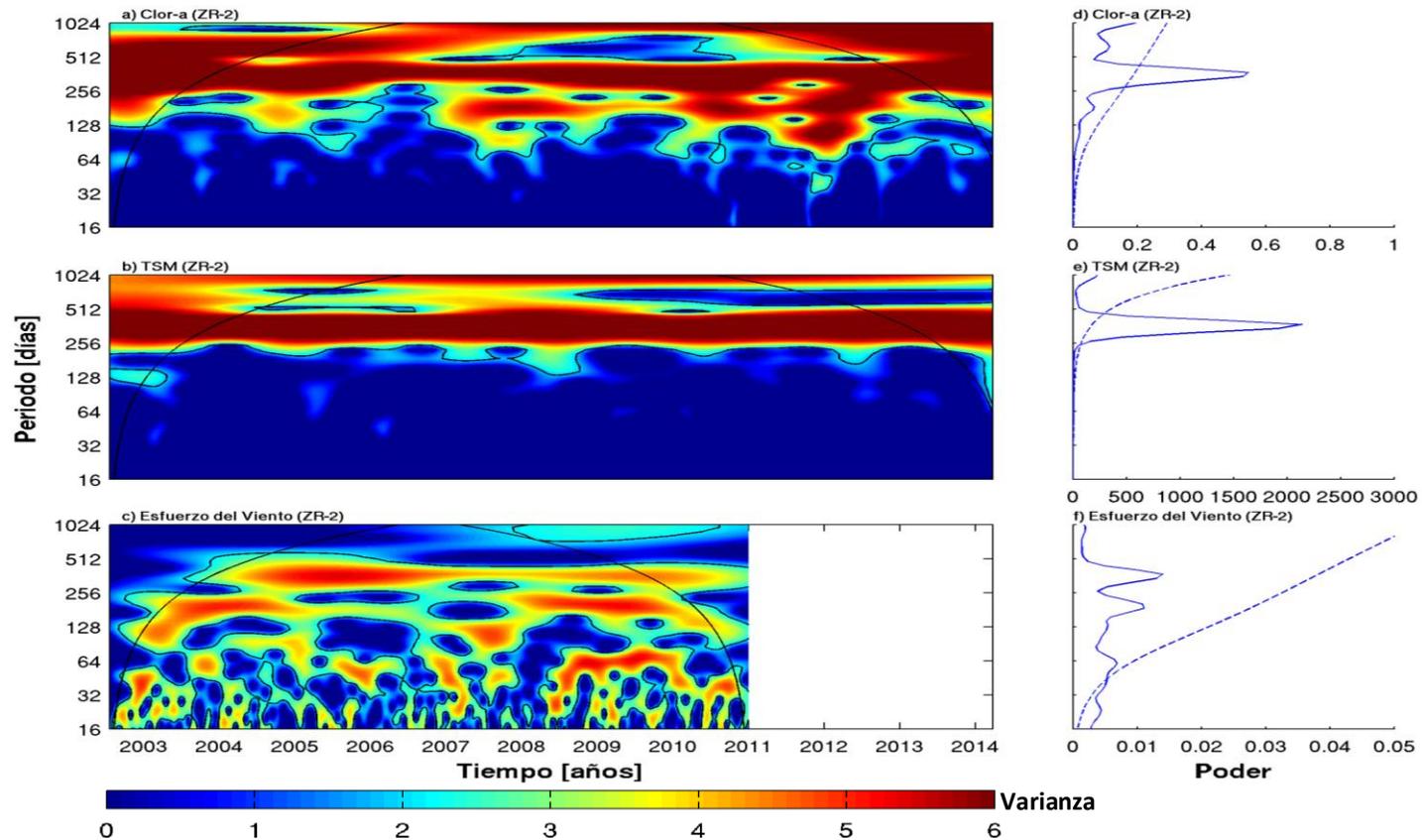


Figura 25. a-c) Espectro de potencia de Wavelet para las variables evaluadas en la zona de referencia denominada ZR-2. Las líneas de contornos de color muestran las frecuencias en las que la variabilidad tiene un nivel de significancia del 95% de acuerdo a 1000 iteraciones del método de Monte Carlo. La línea negra delgada es el cono de influencia, fuera del cual los efectos de borde se vuelven importantes. d-f) Espectro global de Wavelet para la ZR-2. La línea punteada indica que todo lo que está por encima es significativo.

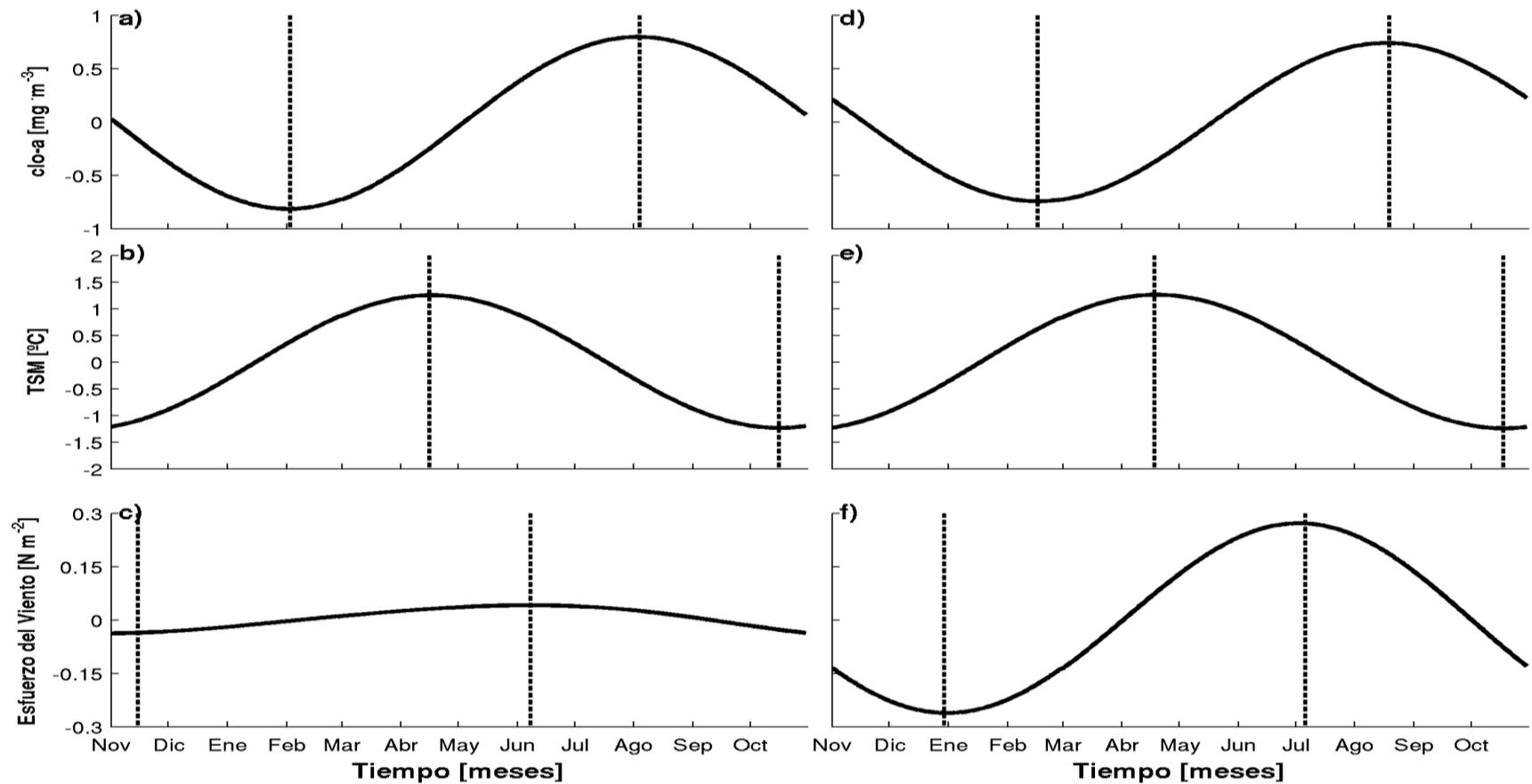


Figura 26. Curvas fenológicas de las variables evaluadas para las zonas de referencia. Las líneas punteadas negras indican el inicio y el final del ciclo fenológico utilizando la reconstrucción en la BFA. A la izquierda: Zona de Referencia-1 (a-c); a la derecha: Zona de Referencia-2 (d-f). En la Tabla 8 de los Anexos se muestra en detalle los índices fenológicos para cada una de las variables en ambas zonas de referencia.

6. DISCUSIÓN

6.1. Variabilidad espacial y temporal de las variables ($clo-a$, TSM y τ)

Al analizar la distribución espacial de $clo-a$ promedio para el periodo de estudio, se observaron altas concentraciones de $clo-a$ ubicadas al sur del conjunto de islas RC-SC y al oeste de la isla AS, coincidiendo con lo encontrado por Andrade *et al.* (2012), situación que podría deberse a la extensión de la plataforma en esos sectores de las islas. Por otra parte, se distingue la diferenciación zonal de la $clo-a$ satelital descrita por Correa-Ramirez *et al.* (2012), en donde se dividió el Sistema de Corrientes Chile-Perú en 3 zonas (ZC, ZTC y ZO) de acuerdo a sus características cinemáticas y concentración de $clo-a$. En cuanto a la variación estacional de esta variable, la región de estudio presentó menores valores de $clo-a$ en verano, mientras que valores máximos se observaron en invierno, con mayor intensidad en la ZTC que en la ZO. Correa-Ramirez *et al.* (2007), encontraron que en la temporada de invierno se produce la mayor actividad de mesoescala en la ZTC, ocurriendo aproximadamente 6 meses después del máximo de vientos favorable a la surgencia en la ZC (primavera-verano), que es el tiempo que tardan los remolinos en generarse y propagarse. Por tanto, esta sería una de las razones por las que en verano las concentraciones de $clo-a$ son más bajas alrededor del AJF, ya que la actividad de mesoescala en la ZTC disminuye en ese periodo del año. Por otra parte, las aguas inmediatamente adyacentes a las islas siempre mantuvieron elevadas concentraciones de $clo-a$ en relación al resto de la región de estudio. Sin embargo, en primavera fue la temporada en que la $clo-a$ satelital aumentó, tanto en concentración como en el espacio. Esta situación ya no tendría una relación directa con la actividad de mesoescala en la región de estudio, si no que el incremento de $clo-a$ estaría más bien relacionado a procesos locales propios de las islas como fue sugerido por Andrade *et al.* (2014).

En cuanto a la TSM, esta mostró el mismo patrón de distribución en las distintas estaciones del año, es decir, en todos los casos se observó un aumento de la TSM en dirección noroeste, por tanto, RC-SC presentó siempre menores temperaturas que las encontradas en AS. Las mayores temperaturas se presentaron en otoño con una media de 19,5°C, mientras que las temperaturas más bajas estuvieron asociadas al periodo de

primavera con una media de 15°C. Estos valores son consistentes a lo encontrado por Silva & Sievers (1973), quienes observaron valores medios *in situ* de 18,6°C en otoño y de 16,8°C en primavera.

En cuanto a la variabilidad espacial promedio del esfuerzo del viento en la región de estudio, se observó que los vientos dominantes fueron SSO y SO en RC-SC y AS, respectivamente. Situación esperada, dado que el AJF se encuentra bajo la influencia directa del Anticiclón del Pacífico Sureste, el cual se caracteriza por vientos predominantes del sur (Garreaud & Muñoz, 2005). De acuerdo a la estacionalidad, en los meses de verano predominaron los vientos S y SSE, coincidiendo con lo encontrado por Hajek & Espinoza (1987) para el mes de enero en el AJF. En invierno en cambio, los vientos fueron predominantes del SO, aunque se ha observado la influencia de vientos con distintas direcciones (Hajek & Espinoza, 1987). La magnitud del esfuerzo del viento presentó mayor intensidad en invierno fluctuando entre 0,07 a 0,09 N m⁻², mientras que en primavera se presentó el τ de menor intensidad variando entre 0,05 y 0,07 N m⁻². Esto difiere a lo encontrado por Andrade *et al.* (2012), quien encontró las mayores magnitudes del viento en el periodo correspondiente a primavera-verano.

6.2. Correlación espacial de la clo-a

El análisis de correlación espacial aplicado a las series de tiempo promedio entre 0 y 5 km alrededor de las islas que componen el AJF con las series de tiempo de todos los pixeles mostró amplias diferencias entre las islas en cuanto a extensión. AS presentó valores de correlación >0,5 que abarcaron un área mayor que RC-SC, sugiriendo que las islas tienen distinta influencia sobre la variabilidad espacial de la clo-a, lo que podría deberse a sus diferencias morfológicas (tamaño, altura y forma), modificando de distinta manera los procesos que ocurren en ambas.

6.3. Series de tiempo de las variables (clo-a, TSM y τ) alrededor de las islas y en zonas de referencia

Las series de tiempo de clo-a evaluadas en cuatro zonas alrededor de las islas del AJF no presentaron bien marcada la señal anual, mostrando incrementos de clo-a en más de una ocasión durante un año, coincidiendo con los 2 máximos (invierno y

primavera) observados por Andrade *et al.* (2012). En contraste, la ZC y regiones oceánicas en ausencia de islas sí presentan definida la señal anual, en donde para la ZC el máximo de clo-*a* ocurre durante el verano coincidiendo con el esfuerzo del viento favorable a la surgencia (Yuras *et al.*, 2005; Correa-Ramirez *et al.*, 2007; Corredor-Acosta *et al.*, 2015), mientras que en océano abierto, el máximo de clo-*a* se presenta durante invierno (McClain *et al.*, 2004; Yuras *et al.*, 2005). En las zonas de referencia evaluadas en este estudio se observó la señal anual marcada, mostrando además, menor concentración de clo-*a* que las series de tiempo alrededor de las islas. Andrade *et al.* (2014) también observó en RC-SC y AS valores promedio de clo-*a* de mayor magnitud que una zona de control sin influencia de islas, demostrando que la presencia de estas provoca incrementos de clo-*a* en las aguas adyacentes. Por otra parte, en ambas islas disminuyó la concentración de clo-*a* a medida que se evaluaron zonas más alejadas de las costas insulares, esto podría estar asociado al EMI (Andrade *et al.*, 2014), proceso que favorece los incrementos de clo-*a* alrededor de las islas. Adicionalmente, en todas las zonas evaluadas, RC-SC presentó mayor concentración de clo-*a* que AS, situación que concuerda con estudios anteriores realizados en las islas (Pizarro *et al.*, 2006; Andrade *et al.*, 2012, 2014) y que estaría asociado en gran parte a la ubicación zonal de ambas (RC-SC en la ZTC y AS en la ZO). Según Correa-Ramirez *et al.* (2012), la ZTC se caracteriza por moderadas concentraciones de clo-*a* satelital (0,3 y 1 mg m⁻³), mientras que en la ZO son menores a 0,1 mg m⁻³.

La TSM mostró la señal anual bien definida, con temperaturas máximas en verano-otoño y mínimas en invierno-primavera. Esto es consistente con estudios realizados anteriormente en la región (Silva & Sievers, 1973; Sievers, 1975; Neshyba & Silva, 1985; Andrade *et al.*, 2014). AS presentó una temperatura promedio ligeramente mayor que RC-SC (17,2 y 16,9°C, respectivamente), esto se debe a que AS se encuentra al oeste de RC-SC, y la TSM aumenta en dirección noroeste. Por otro lado, las series evaluadas en las zonas de referencia también mostraron marcado el ciclo anual pero, debido a que se ubicaron al norte de las islas, las temperaturas registradas fueron mayores.

En cuanto a τ , este presentó una alta variabilidad temporal, tanto alrededor de las islas como en las zonas de referencia, con la media oscilando entorno a los 0,07 N m⁻² y

0,065 N m⁻², respectivamente. Estos valores son ligeramente mayores a los encontrados por Hellerman & Rosenstein (1983), quienes observaron para esta región valores medios de 0,05 N m⁻². En general, τ presentó mayor magnitud en invierno, a diferencia de lo que se encuentra en la ZC, en la cual el máximo de τ favorable a la surgencia se presenta en el periodo de verano (Yuras *et al.*, 2005; Letelier *et al.*, 2009). No obstante, el máximo de τ coincide con el máximo de *clo-a* invernal en la región de estudio, sugiriéndolo como un mecanismo generador de mayor mezcla vertical en este periodo del año, favoreciendo el abastecimiento de nutrientes hacia las capas superficiales y, en consecuencia, aumentando la *clo-a* en la zona (McClain *et al.*, 2004).

6.4. Espectro de potencia de Wavelet de las variables (*clo-a*, TSM y τ) alrededor de las islas y en zonas de referencia

El poder espectral de Wavelet para la *clo-a*, evaluado en 4 zonas alrededor de las islas, mostró alta variabilidad en gran parte del espectro, especialmente en la zona comprendida entre 0 y 5 km alrededor de las islas, presentando altos valores de varianza en las bandas de frecuencia bianual, anual, semianual, estacional e intraestacional. En general, la densidad espectral se concentró principalmente en la BFA, siendo reflejado en el espectro global de Wavelet. Adicionalmente, se observó que a medida que se evaluaron zonas más alejadas de las islas, la varianza disminuyó en las bandas de altas frecuencias. La zona comprendida entre 25 y 50 km mostró un espectro similar al de las zonas de referencia, en las cuales, la BFA fue significativa y no tuvieron valores de varianza importantes asociado a altas frecuencias. De acuerdo a esto, es posible notar que las islas tienen influencia sobre la *clo-a* de las aguas inmediatamente adyacentes (entre 0 y 5 km), modificando de manera importante la variabilidad espacio/temporal de ésta, lo que podría atribuirse en primera instancia al efecto a escala local que tiene el EMI producido por las islas (Andrade *et al.*, 2014).

La TSM presentó únicamente la BFA significativa, tanto en las islas como en las zonas de referencia. Mostrando nuevamente, la marcada señal anual de esta variable en la región de estudio. Corredor-Acosta *et al.* (2015), encontró para la región de surgencia costera frente al centro-sur de Chile, que la TSM no solo presentó la BFA significativa, sino que también bandas de mayor frecuencia, como la estacional e intraestacional,

fueron significativas durante algunos años. Esta diferencia podría atribuirse a que la TSM en la región de estudio está sujeta a cambios producidos principalmente por variaciones en intensidad de la radiación solar propio de latitudes medias (Neshyba & Silva, 1985), mientras que la ZC, adicionalmente, experimenta variaciones de temperatura producto de vientos locales favorables a la surgencia costera, a ondas atrapadas a la costa ó a variaciones en el nivel del mar (Hormazábal *et al.*, 2001).

El análisis realizado para τ mostró, tanto para las islas como para las zonas de referencias, alta densidad espectral en las bandas de frecuencia asociadas a bajos periodos, siendo la banda estacional e intraestacional las más significativas. Esto es coherente con la variabilidad encontrada para τ en el PSO en estudios anteriores (Hormazábal *et al.*, 2002,2004; Garreaud & Muñoz, 2005; Ancapichún & Vargas, 2015). La BFA presentó mayor valor de varianza en AS que RC-SC durante todo el período de estudio, lo mismo sucedió con la ZR-2 y ZR-1. Esto podría tener relación con la posición zonal que tienen las islas respecto al Anticiclón del Pacífico Sur Oriental (APSO), el cual se desplaza y cambia su extensión durante el año, moviéndose en dirección al Ecuador en invierno y hacia los Polos en verano (Hajek & Espinoza, 1987) afectando directamente la intensidad y dirección de τ (Ancapichún y Vargas, 2015). En este sentido, AS y ZR-2 se encontrarían más próximas al núcleo del APSO y, por tanto, los desplazamientos que tiene durante el año podrían estar marcando de forma más significativa la BFA de estas zonas en relación a las regiones que se encuentran en zonas más externas del APSO.

6.5. Índices fenológicos para las curvas acumuladas de las variables (clo-a, TSM y τ) alrededor de las islas y en zonas de referencia

Los índices fenológicos para la curva acumulada de clo-a en la región de estudio se mostraron diferentes entre: a) las islas RC-SC y AS, b) las distintas zonas evaluadas alrededor de las islas y c) las islas y sus respectivas zonas de referencia. En el primer caso, RC-SC mostró la fecha de inicio y final para todas las zonas evaluadas antes que AS, estando el término de RC-SC asociado principalmente a la temporada de invierno-principios de primavera y él de AS a primavera, aumentando la diferencia de días entre los índices a medida que se evaluaron zonas más alejadas de las islas. En adición, RC-SC acumuló mayor cantidad de clo-a en todas las zonas evaluadas. El distinto

comportamiento que tuvo la fenología del fitoplancton entre islas podría ser atribuido a la ubicación zonal de cada una, debido a que RC-SC se ubica en la ZTC y AS en la ZO, se explica que la primera presente mayor cantidad de *clo-a* y que el inicio ocurra primero, ya que en la ZTC las concentraciones de *clo-a* son moderadas y han sido asociadas a la actividad de mesoescala que presenta un máximo invernal de *clo-a* en la ZTC (Correa-Ramirez *et al.*, 2007, 2012). Mientras que la ZO forma parte del giro Subtropical del Pacífico Sur presentando concentraciones de *clo-a* $<0,1 \text{ mg m}^{-3}$ y estaría relacionado a otros procesos físicos que provocarían un incremento estacional de *clo-a* en primavera (McClain *et al.*, 2004; Correa-Ramirez *et al.*, 2012). En cuanto a las diferencias que presentaron las zonas evaluadas alrededor de ambas islas, el inicio del ciclo productivo y el término del mismo se produjo primero en la zona más externa evaluada (entre 25 y 50 km) y, en último lugar, en la zona más cercana a las islas (entre 0 y 5 km). Esta marcada diferencia de la fenología alrededor de las islas estaría demostrando que la presencia de estas modifica la fenología de las aguas adyacentes, y que en la zona más externa, la señal que predomina es lo que ocurre normalmente en la región oceánica, con el máximo de *clo-a* en invierno (Yuraset *et al.*, 2005), mientras que próximo a las islas la fenología del fitoplancton podría estar respondiendo al EMI, el cual está asociado a la perturbación del flujo de agua que producen las islas, lo que conllevaría a la formación de una calle de vórtices produciendo incrementos de *clo-a* alrededor de las islas (Andrade *et al.*, 2014). Por último, en las zonas de referencia, la fenología del fitoplancton solo mostró similitud con la fenología encontrada para la zona entre 25 y 50 km en ambas islas, demostrando nuevamente que las islas modifican de forma significativa la fenología del fitoplancton de la región de estudio. Por último, al comparar la fenología del fitoplancton alrededor del AJF con la descrita por Corredor-Acosta *et al.* (2015) para la región de surgencia costera frente al centro-sur de Chile, se observa un desfase aproximado de 6 meses, en donde el inicio se produce a mediados de septiembre y el término a principios de marzo, mientras que alrededor del AJF, en la zona evaluada entre 0 y 5 km, el inicio se presentó a fines de marzo y el final a mediados de octubre. Estas diferencias en los índices fenológicos son consistentes, debido a que en la ZC el máximo de *clo-a* se produce en verano, mientras que en regiones oceánicas la *clo-a* presenta un máximo invernal (Yuras *et al.*, 2005) asociada a la actividad de mesoescala (Correa-Ramirez *et al.*, 2007).

La fenología para la TSM se mostró muy similar en toda la región de estudio, presentando variaciones en los índices del orden de días. El inicio y término ocurrió a mediados de octubre y abril, respectivamente. La similitud de los índices fenológicos para esta variable alrededor de las islas y las zonas de referencia estaría indicando que la TSM no se ve modificada por la presencia de las islas, presentando un comportamiento uniforme en la región estudiada. Los resultados encontrados para la TSM presentan un desfase aproximado de tres semanas con lo observado por Corredor-Acosta *et al.* (2015) para la reconstrucción utilizando la misma banda de frecuencia (BFA), en donde el inicio y final de la fenología para la curva acumulada de la TSM presentó el inicio a comienzos de noviembre, mientras que el término se ubicó a principios de mayo, teniendo aproximadamente la misma duración. Esta diferencia en las fechas de inicio y final podrían atribuirse a los distintos procesos que controlan la TSM en las regiones de océano abierto y en la ZC.

Los índices fenológicos para τ mostraron diferencias alrededor de las islas, tanto en las fechas de inicio/final como en magnitud, con aproximadamente un mes de desfase entre una isla y otra, comenzando y terminando primero en RC-SC (fines de noviembre-comienzos de junio) y luego en AS (principios de enero-comienzos de julio). AS presentó una mayor magnitud máxima acumulada de τ que RC-SC. Esto mismo fue observado en las zonas de referencia, las cuales tuvieron un comportamiento similar a lo ocurrido alrededor de las islas, con las fechas de inicio y final primero en ZR-1 y luego en ZR-2, con una magnitud máxima acumulada mayor en ésta última. Por tanto, las diferencias encontradas entre islas y, a su vez la similitud que presenta cada una con sus respectivas zonas de referencia, podría estar indicando que τ presenta mayor variabilidad zonal respecto a la meridional. Por otra parte, las diferencias en magnitud acumulada se deberían a que la reconstrucción de las series de tiempo se realizaron utilizando la BFA y, tanto para AS como para ZR-2, esta banda de frecuencia presentó mayor varianza y significancia estadística que RC-SC y ZR-1. De los índices fenológicos encontrados para τ , se puede notar que el máximo acumulado para la zona de estudio ocurre principalmente en invierno, situación completamente contraria a lo que ocurre en la zona centro-sur de Chile ($\sim 35^\circ$ S), en donde el máximo de τ se presenta en verano (Taaajard, 1972). No obstante, en el centro-norte de Chile ($\sim 30^\circ$ S), el APSO

es más intenso en invierno (Tajaard, 1972), sugiriendo que probablemente en la región de estudio τ sigue el patrón presentando para esta zona.

Los indicadores fenológicos encontrados para la TSM y τ no parecen estar acoplados de forma directa con la fenología del fitoplancton alrededor de las islas, sobre todo en la zona comprendida entre 0 y 5 km, en donde la TSM comienza a disminuir aproximadamente un mes después de la fecha de inicio de acumulación de *clo-a*, por tanto, la *clo-a* no responde al cambio de TSM. Mientras que τ , presenta un desfase en la fecha de inicio cercano a 4 meses con respecto a al inicio de la *clo-a* (Fig. 27). Por tanto, se sugiere que la fenología del fitoplancton de las aguas adyacentes al AJF responde a otros forzantes físicos, tales como la interacción de los remolinos de mesoescala con las islas (Andrade *et al.*, 2012) y a incrementos locales de *clo-a* producidos por el EMI el cual se ve potenciado por el rotor del esfuerzo del viento sobre las islas (Andrade *et al.*, 2014).

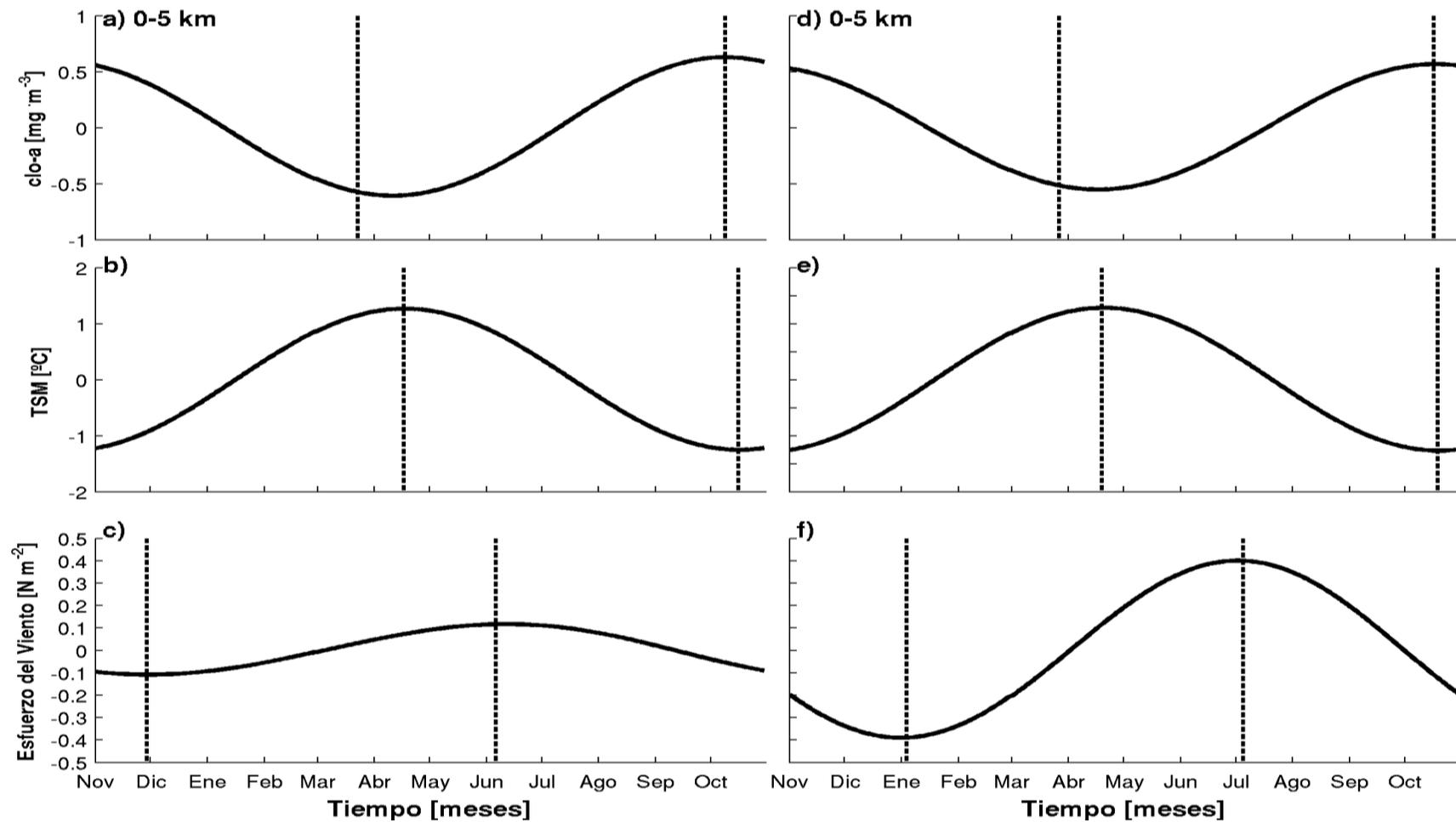


Figura 27. Curvas fenológicas de las variables evaluadas alrededor de las islas: a-c) RC-SC y d-f) AS. Las líneas punteadas negras indican el inicio y el final del ciclo fenológico utilizando la reconstrucción en la BFA.

7. CONCLUSIÓN

La región de estudio que comprende las islas del AJF presenta una marcada estacionalidad con máximos incrementos de clo-*a* durante invierno y concentraciones mínimas en verano. No obstante, las aguas inmediatamente adyacentes a las costas insulares siempre mantuvieron concentraciones $>0,4 \text{ mg m}^{-3}$, siendo más altas que la clo-*a* regional, alcanzando un máximo local en primavera. Por tanto, esto muestra *a priori* que la presencia de estas islas modifica los valores de clo-*a* que existen comúnmente en regiones oceánicas.

En la isla RC-SC se encontraron concentraciones de clo-*a* de mayor magnitud que en AS en las 4 zonas evaluadas alrededor de las islas, ocurriendo lo mismo en las zonas de referencia (ZR-1 > ZR-2). De acuerdo a esto, la concentración de clo-*a* presente en la región de estudio está determinada principalmente por la ubicación zonal que poseen las islas. Por otra parte, tanto en AS como en RC-SC, la clo-*a* disminuyó a medida que se evaluaron zonas más externas a éstas, indicando nuevamente la importancia que tienen las islas, las que modificane incrementan la concentración de clo-*a* de manera significativa en la región oceánica frente a Chile central. Estos incrementos promueven la productividad biológica en océano abierto, recalcando la importancia ecológica que estas tienen.

Los distintos indicadores fenológicos encontrados en la región de estudio para la clo-*a* sugieren que la fenología del fitoplancton se ve modificada por tres factores: i) la ubicación zonal, ii) la presencia de islas y iii) la proximidad o lejanía de las zonas evaluadas alrededor de las islas. Esto podría tener especial relevancia para el crecimiento y distribución de ciertos organismos marinos de carácter comercial, los que sustentan la pesca artesanal que existe en el AJF.

Finalmente, la fenología del fitoplancton alrededor de RC-SC y AS no presenta relación con la fenología de las otras variables analizadas en este estudio. En consecuencia, los mecanismos involucrados en modular y manejar la fenología del fitoplancton en el AJF estarían relacionados a otros procesos físicos. Lo que conlleva a la necesidad de un estudio más profundo, involucrando otras variables que interactúen de forma significativa con el archipiélago.

8. REFERENCIAS

- Alvera-Azcárate, A., A. Barth, M. Rixen, & J.M. Beckers. 2005. Reconstruction of incomplete oceanographic data sets using empirical orthogonal functions: Application to the Adriatic Sea. *Ocean Modell.* 9: 325–346, doi: 10.1016/j.ocemod.2004.08.001.
- Andrade, I., S. Hormazábal & M. A. Correa-Ramirez. 2012. Ciclo anual de clorofila-a satelital en el archipiélago Juan Fernández (33°S) Chile. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 40(3):657-667, doi: 103856/vol40 issue3-fulltext-14.
- Andrade, I., P. Sangrá, S. Hormazábal & M.A. Correa-Ramirez. 2014. Island Mass Effect in the Juan Fernández Archipelago (33°S) Southeastern Pacific. *Deep-Sea Res. I.*, 84: 56-99, doi: 10.1016/j.dsr.2013.10.009.
- Brody, S. R., M. S. Lozier & J. P. Dunne. 2013. A comparison of methods to determine phytoplankton bloom initiation. *J. Geophys. Res.* 118(5): 2345-2357, doi:10.1002/jgrc.20167.
- Chiba, S., S. Batten, K. Sasaoka, Y. Sasai & H. Sugisaki. 2012. Influence of the Pacific Decadal Oscillation on phytoplankton phenology and community structure in the western North Pacific. *Geophys. Res. Lett.*, 39, L15603, doi:10.1029/2012GL052912.
- Cole, H., S. Henson, A. Martin, & A. Yool. 2012. Mind the gap: The impact of missing data on the calculation of phytoplankton phenology metrics. *J. Geophys. Res.* 117: C08030, doi: 10.1029/2012JC008249.
- Correa-Ramirez, M., S. Hormazábal & G. Yuras. 2007. Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off central Chile (29°–39°S). *Geophys. Res. Lett.*, 34, L12604, doi:10.1029/2007GL029541.
- Correa-Ramirez, M.A., S. Hormazabal & C.E. Morales. 2012. Spatial patterns of annual, and interannual surface chlorophyll-*a* variability in the Peru–Chile Current System. *Prog. Oceanogr.*, 92(1): 8-17, doi: 10.1016/j.pocean.2011.07.008.

Corredor-Acosta, A., C. Morales, S. Hormazábal, I. Andrade & M. Correa-Ramírez. 2015. Phytoplankton phenology in the coastal upwelling region off central-southern Chile (35-38°S): time-space variability, coupling to environmental factors, and sources of uncertainty in the estimates. *J. Geophys. Res.*, doi: 10.1002/2014JC010330.

Cushing, D.H. 1990. Plankton production and year-class strength in fish populations: An update of the match mismatch hypothesis, *Adv. Mar. Biol.*, 26: 249-293, doi:10.1016/S0065-2881(08)60202-3.

Fuenzalida, R., W. Schneider, J. Blanco, J. Garcés & L. Bravo. 2007. Sistema de corrientes Chile-Perú y masas de agua entre Caldera e Isla de Pascua. *Cienc.Tecnol. Mar*, 30(2): 5-16.

Garreaud, R. & R. Muñoz. 2005. Low-level jet off the West Coast of subtropical South America: structure and variability. *Am. Met. Soc.*, 133:2246-2261.

Greve, W., S. Prinage, H. Zidowitz, J. Nast & F. Reiners. 2005. On the Phenology of North Sea ichthyoplankton. *ICES J. Mar. Sci.*, 62: 1216-1223.

Hayek, E. & G.A. Espinoza. 1987. Meteorología, climatología y bioclimatología de las Islas Oceánicas Chilenas. Ediciones Universidad Católica de Chile, Santiago, pp. 55-83.

Hellerman, S. & M. Rosenstein. 1983. Normal monthly wind over the world ocean with error estimates. *Jour. Phys. Oceanogr.*, 13: 1093-1104.

Henson, S., I. Robinson, J. Allen, & J. Waniek. 2006. Effect of meteorological conditions on interannual variability in timing and magnitude of the spring bloom in the Irminger Basin, North Atlantic, *Deep-Sea Res. I*, 53, 1601-1615, doi:10.1016/j.dsr.2006.07.009.

Hormazábal, S., G. Shaffer, J. Letelier, & O. Ulloa. 2001. Local and remote sensing of sea surface temperature in the coastal upwelling system off Chile. *Jour. Of Geophys. Res.*, 106, 16.657-16.671.

- Hormazábal, S., G. Shaffer & O. Pizarro. 2002. Tropical Pacific control of intraseasonal oscillations off Chile by way of oceanic and atmospheric pathways, *Geophys. Res. Lett.*, 29(6),1081, doi:10.1029/2001GL013481.
- Hormazabal, S., G. Shaffer & O. Leth. 2004. Coastal transition zone off Chile. *J. Geophys. Res.*,109 (C01021), doi: 10.1029 2003JC001056.
- Hudson, I. 2010. Interdisciplinary approaches: towards new statistical methods for phenological studies. *Climatic Change*, 100: 143-171,doi: 10.1007/s10584-010-9859-9
- Koeller, P., C. Fuentes-Yaco, T. Platt, S. Sathyendranath, A. Richards, P. Ouellet, D. Orr, U. Skúladóttir, K. Wieland, L. Savard & M. Aschan. 2009. Basin-scale coherence in phenology of shrimps and phytoplankton in the North Atlantic ocean, *Science*, 324(5928), 791-793, doi:10.1126/science.1170987.
- Large, W.G. & S. Pond. 1980. Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Oceanogr.*, 11: 324-336.
- Lavigne, H., F. D'Ortenzio, C. Migon, H. Claustre, P. Testor, M. Ribera d'Alcalá, R. Lavezza, L. Houpert & L. Prieur. 2013. Enhancing the comprehension of mixed layer depth control on the Mediterranean phytoplankton phenology. *J. Geophys. Res.*, 118: 3416-3430, doi:10.1002/jgrc.20251.
- Letelier, J., O. Pizarro & S. Nuñez. 2009. Seasonal variability of coastal upwelling and the upwelling front off central Chile. *J. Geophys. Res.*, 114: 0-16
- McClain, C., S. Signorini & J. Christian. 2004. Subtropical gyre variability observed by ocean-color satellites. *Deep-Sea Res.,II: Topical Studies in Oceanography* 51 (1-3), 301.
- Montecinos, A. & F. Gomez. 2010. ENSO modulation of the upwelling season off southern-central Chile. *Geophys. Res. Lett.* 37: L02708, doi:10.1029/2009GL041739.
- Neshyba, S. & N. Silva. 1985. Algunos aspectos climatológicos de las islas Robinson Crusoe y Santa Clara (Pacífico Sud Oriental). *Invest. Mar.*, Valparaíso, 43-54.

Pequeño G. & S Sáez, 2000. Los peces litorales del Archipiélago de Juan Fernández (Chile): endemismo y relaciones ictiogeográficas. *Invest. Mar., Valparaíso* 28:27-37.

Pizarro, G., V. Montecinos, R. Astoreca, G. Alarcón, G. Yuras & L. Guzmán. 2006. Variabilidad espacial de condiciones bio-ópticas de la columna de agua entre las costas de Chile insular y continental, Primavera 1999 y 2000. *Cienc. Tecnol. Mar*, 29(1): 45-58.

Platt, T., G. N. White III, L. Zhai, S. Sathyendranath & R. Shovonlal. 2009. The phenology of phytoplankton blooms: Ecosystem indicators from remote sensing. *Ecol. Modell.*, 220: 3057-3069, doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.11.0.

Poulin, E. 2006. Biodiversidad en Juan Fernández. Laboratorio de Ecología Molecular, Departamento de Ciencias Ecológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de Chile, 1-21.

Racault, M., C. Le Quéré, E. Buitenhuis, S. Sathyendranath & T. Platt. 2012. Phytoplankton phenology in the global ocean. *Ecol. Indic.*, 14: 152-163, doi: 10.1016/j.ecolind.2011.07.010

Retamal, M.A. & P. Arana. 2000. Descripción y distribución de cinco crustáceos decápodos recolectados en aguas profundas en torno a las islas Robinson Crusoe y Santa Clara (Archipiélago Juan Fernández, Chile). *Invest. Mar, Valparaíso*, 28: 149-163.

Rodriguez-Ruiz, M., M. Andreu-Cazenave, C. Ruz, C. Ruano-Chamorro, F. Ramírez, C. González, S. Carrasco, A. Pérez-Matus & M. Fernández. 2014. Initial assessment of coastal benthic communities in the Marine Parks at Robinson Crusoe Island. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 42(4): 918-936, doi: 10.3856/vol42-issue4-fulltext-16.

Siegel, D., S. Doney & J. Yoder. 2002. The North Atlantic spring phytoplankton bloom and Sverdrup's critical depth hypothesis, *Science*, 296(5568), 730-733, doi:10.1126/science.1069174.

Silva, N. & H. Sievers. 1973. Condiciones oceanográficas de primavera y otoño de las aguas circundantes a las islas Robinson Crusoe y Santa Clara (Crucero Juan Fernández I. Diciembre 1972, Crucero Juan Fernández II. Abril de 1973). *Inv. Mar.*, Valparaíso, 4(6): 158-179.

Silva, N. 1985. Algunas características físicas y químicas de las masas de agua alrededor de las islas Robinson Crusoe y Santa Clara (archipiélago de Juan Fernández). In: P. Arana (ed.). *Investigaciones marinas en el archipiélago de Juan Fernández*. Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 36-41.

Strub, P., J. Mesías, V. Montecino, J. Rutllant & S. Salinas. 1998. Coastal ocean circulation off Western South America coastal segment. *The Sea*, 11, 273- 313.

Taljaard J.J. 1972. Synoptic meteorology of the Southern Hemisphere. In: Newton CW, Van Loon H, National Center for Atmospheric Research (US) (eds.), *Meteorology of the Southern Hemisphere*. American Meteorological Society, Boston, pp. 139-213.

Thomalla, S., N. Fauchereau, S. Swart & P. Monteiro. 2011. Regional scale characteristics of the seasonal cycle of chlorophyll in the Southern Ocean, *Biogeosciences*, 8: 2849-2866, doi:10.5194/bg-8-2849-2011.

Torrence, C. & G.P. Compo. 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79: 61-78, doi: 10.1175/1520-0477.

UNESCO. 2011. *Ecological Sciences for Sustainable Development*. Página web [www.unesco.org/new/en/natural-sciences/environment/ecological-sciences/biosphere-reserves/latin-america-and-the-caribbean/chile/juan-fernandez/s]. Revisado: 15 junio 2015.

White, M., K.M. deBeurs, K. Didan, D.W. Inouye, A.D. Richardson, O.P. Jensen, J. O'Keefe, G. Zhang, R.R. Nemani, W.J.D. Van Leeuwen, J.F. Brown, A. De Wit, M. Schaepman, X. Lin, M. Dettinger, A.S. Bailey, J. Kimball, M.D. Schwartz, D.D. Baldocchi, J.T. Lee & W.K. Lauenroth. 2009. Intercomparison, interpretation, and assessment of spring phenology in North America estimated from remote sensing for 1982–2006. *Global Change Biol.*, 15: 2335–2359, doi:10.1111/j.1365-2486.2009.01910.x.

Winder, M. & J. Cloern. 2010. The annual cycles of phytoplankton biomass. *Phil. Trans. R. Soc. B.*, 365: 3215–3226, doi:10.1098/rstb.2010.0125.

Yuras, G., O. Ulloa & S. Hormazábal. 2005. On the annual cycle of coastal and open ocean satellite chlorophyll off Chile (18 degrees–40 degrees S). *Geophys. Res. Lett.*, 32 L23604, doi: 10.1029/2005GL023946.

9. ANEXOS

9.1. Análisis de correlación cruzada aplicado a la TSM

La estadística descriptiva encontrada en las series de tiempo evaluadas en 4 zonas alrededor de las islas que componen el AJF fue muy similar, con diferencias del orden de centésimas. En este sentido, se decidió proceder a un análisis de correlación cruzada entre la serie de tiempo más próxima a las islas (0 y 5 km) con las series de tiempo restantes, al que se le aplicó el test t-student para la significancia estadística. El análisis mostró alta correlación entre las series de tiempo con valores de $r > 0,99$ a un rezago de 0 días, mientras que para rezagos de 20 días tuvo valores de $r > 0,90$ para ambas islas (Fig. 28). Por tanto, la alta correlación presentada entre las series de tiempo permite trabajar con una serie, sin que ello se traduzca en grandes diferencias en los resultados.

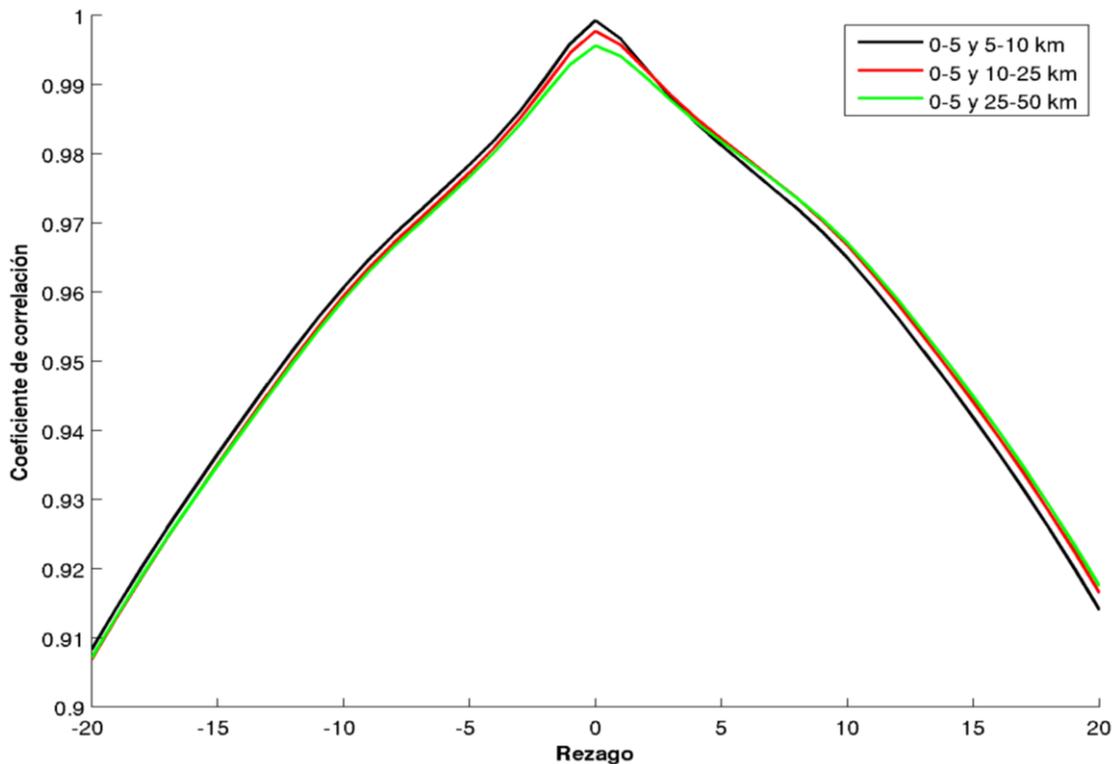


Figura 28. Correlación cruzada con un lag de 20 días aplicado a las series de tiempo de TSM de RC-SC.

9.2. Tablas

Tabla 1. Estadística descriptiva de las series de tiempo de clo-*a* para las zonas evaluadas alrededor de las islas RC-SC y AS para el periodo de estudio entre julio de 2002 y marzo de 2014.

Clo- <i>a</i> (mg m ⁻³)	Media		Mediana		Varianza		Desv.Est.		
	Zona	RC-SC	AS	RC-SC	AS	RC-SC	AS	RC-SC	AS
0 a 5 km		0,34	0,29	0,30	0,27	0,02	0,01	0,19	0,11
5 a 10 km		0,27	0,21	0,25	0,20	0,01	0,00	0,10	0,08
10 a 25 km		0,24	0,20	0,23	0,19	0,01	0,00	0,08	0,06
25 a 50 km		0,23	0,19	0,22	0,19	0,00	0,00	0,07	0,05

Tabla 2. Índices fenológicos promedio (2002-2014) para la curva acumulada de clo-*a* para las zonas evaluadas alrededor de las islas RC-SC y AS. Los días están enumerados del 1 de noviembre del año N al 31 de octubre del año N+1.

Zona	Inicio		Fin		Duración		Magnitud	
	RC-SC	AS	RC-SC	AS	RC-SC	AS	RC-SC	AS
0 a 5 km	143	147	343	351	200	203	0,73	0,67
5 a 10 km	134	140	322	331	188	190	0,69	0,74
10 a 25 km	108	130	291	317	183	187	0,71	0,76
25 a 50 km	96	120	278	307	182	187	0,80	0,76

Tabla 3. Estadística descriptiva de la TSM para la zona comprendida entre 0 a 5 km alrededor de RC-SC y AS para el periodo de estudio entre julio de 2002 y marzo de 2014.

TSM (°C)	Media	Mediana	Varianza	Desv. Est.
RC-SC	16,87	16,66	4,61	2,15
AS	17,20	16,94	4,88	2,21

Tabla 4. Índices fenológicos promedio (2002-2014) para la curva acumulada de TSM alrededor de RC-SC y AS. Los días están enumerados del 1 de noviembre del año N al 31 de octubre del año N+1.

TSM	Inicio	Fin	Duración	Magnitud
RC-SC	350	168	182	1,26
AS	353	170	182	1,27

Tabla 5. Estadística descriptiva para el esfuerzo del viento alrededor de RC-SC y AS para el periodo de estudio entre julio de 2002 y diciembre de 2010.

τ (N m ⁻²)	Media	Mediana	Varianza	Desv. Est.
RC-SC	0,069	0,066	0,00079	0,029
AS	0,068	0,063	0,00077	0,028

Tabla 6. Índices fenológicos promedio (2002-2010) para la curva acumulada del esfuerzo del viento alrededor de RC-SC y AS. Los días están enumerados del 1 de noviembre del año N al 31 de octubre del año N+1.

τ	Inicio	Fin	Duración	Magnitud
RC-SC	29	218	189	0,127
AS	65	247	181	0,393

Tabla 7. Estadística descriptiva de las variables (clo-*a*, TSM y τ) evaluadas en las zonas de referencia ZR-1 y ZR-2.

Variable	Media		Mediana		Varianza		Desv. Est.	
	ZR-1	ZR-2	ZR-1	ZR-2	ZR-1	ZR-2	ZR-1	ZR-2
Clo- <i>a</i> (mg m ⁻³)	0,19	0,16	0,18	0,15	0,00	0,00	0,06	0,05
TSM (°C)	17,41	17,81	17,18	17,49	3,87	4,40	1,97	2,10
τ (N m ⁻²)	0,068	0,065	0,065	0,061	8,1*10 ⁻⁴	7,1*10 ⁻⁴	0,029	0,027

Tabla 8. Índices fenológicos promedio para la curva acumulada de las variables (clo-*a*, TSM y τ) en las zonas de referencia ZR-1 y ZR-2. Los días están enumerados del 1 de noviembre del año N al 31 de octubre del año N+1.

Variable	Inicio		Fin		Duración		Magnitud	
	ZR-1	ZR-2	ZR-1	ZR-2	ZR-1	ZR-2	ZR-1	ZR-2
Clo- <i>a</i>	95	109	277	292	181	182	0,88	0,82
TSM	350	352	167	169	183	182	1,24	1,25
τ	15	60	220	248	205	188	0,05	0,25