

Research Article

Ciclo anual de la clorofila-*a* satelital en el archipiélago de Juan Fernández (33°S), Chile

Isabel Andrade¹, Samuel E. Hormazabal² & Marco A. Correa-Ramirez³

¹Programa de Doctorado en Oceanografía, Departamento de Oceanografía
Universidad de Concepción, P.O. Box 160-C, Concepción, Chile

²Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
P.O. Box 1020, Valparaíso, Chile

³Universidad de Concepción, P.O. Box 160-C, Concepción, Chile

RESUMEN. La variabilidad espacial y temporal del ciclo anual de la clorofila-*a* en el archipiélago de Juan Fernández se analiza usando ocho años de datos satelitales de clorofila-*a*, viento, corrientes y nivel del mar. Este archipiélago está conformado por tres islas: Robinson Crusoe-Santa Clara (RC-SC) y Alejandro Selkirk (AS). Las islas RC-SC se encuentran en una región de alta energía cinética y mayores concentraciones de clorofila-*a* definida como Zona de Transición Costera, en cambio la isla AS se encuentra en una región de baja energía cinética y menores concentraciones de clorofila-*a* denominada Zona Oceánica. RC-SC posee un incremento de las concentraciones de clorofila-*a* en el lado suroeste, mientras que AS posee sus mayores concentraciones en el lado oeste, indicando la presencia de procesos forzantes diferentes. En ambas islas el ciclo anual de la clorofila es significativo y comienza a incrementar en abril, alcanzando valores relativamente altos entre junio y noviembre, disminuyendo hacia diciembre, hasta alcanzar un mínimo hacia fines de marzo. Este ciclo anual aparece desacoplado con el viento y acoplado con la energía cinética. Incrementos invernales de clorofila-*a* aparecen vinculados con remolinos de mesoescala provenientes de la zona continental, mientras que incrementos primaverales se podrían asociar a procesos locales vinculados al "efecto masa de isla". En ambas islas existen incrementos significativos de la clorofila-*a* en la banda anual y cuasi-bianual, pero sólo en AS se encontró una fluctuación significativa en la banda interanual vinculada con el Niño y la Oscilación del Sur.

Palabras clave: archipiélago de Juan Fernández, clorofila-*a*, ciclo anual, remolinos de mesoescala, Pacífico suroriental, Chile.

Annual cycle of the satellite chlorophyll-*a* in the Juan Fernandez archipelago (33°S), Chile

ABSTRACT. The spatial and temporal variability of the annual cycle of chlorophyll-*a* in the Juan Fernandez archipelago is analyzed through eight years of satellite data of chlorophyll-*a*, wind, currents and sea level. This archipelago consists of three islands: Robinson Crusoe-Santa Clara (RC-SC) and Alexander Selkirk (AS). The RC-SC islands are in a region of high eddy kinetic energy and higher concentrations of chlorophyll-*a*, defined as Coastal Transition Zone, whereas the AS island is in a region with low eddy kinetic energy and lower concentrations of chlorophyll-*a* called Oceanic Zone. RC-SC has an increase in chlorophyll-*a* concentrations on the southwest side, while AS has its highest concentrations on the west side, indicating the presence of different forcing. On both islands the annual cycle of chlorophyll is significant and begins to increase in April, reaching relatively high values between June and November, decreasing to its lowest values in December, reaching a minimum in late March. This annual cycle does not appear related with the wind, but it appears related with the eddy kinetic energy. The increase of chlorophyll-*a* in winter is associated with mesoscale eddies coming from continental region, while spring increases could be associated with local processes linked to the "island mass effect". On both islands, it appears a significant increase in chlorophyll-*a* in the annual and bi-annual bands, but only in AS was found a significant inter-annual fluctuation linked with the El Niño and the Southern Oscillation.

Keywords: Juan Fernández archipelago, chlorophyll-*a*, annual cycle, mesoscale eddies, southeastern Pacific, Chile.

Corresponding author: Isabel Andrade (iandrade@udec.cl)

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de islas oceánicas y montes submarinos han sido descritos como regiones de gran importancia ecológica, con alto grado de endemismo y diversidad (Rogers, 1994; Parin, 1991; Andrade & Pequeño, 2008). En estas regiones, la interacción de las corrientes con las elevaciones topográficas generan patrones de circulación, tales como columnas de Taylor y remolinos, que promueven el ascenso de nutrientes subsuperficiales hacia la capa eufótica y favorecen el incremento de las concentraciones de fitoplancton respecto de las aguas oceánicas adyacentes (Stocks, 2002; Gubbay, 2002; Cruz *et al.*, 2008). Este incremento del fitoplancton favorece la alimentación de estadios tempranos de larvas pelágicas (incremento de las tasas de crecimiento) promoviendo el éxito del reclutamiento de diversos taxa marinos (Boehlert & Mundy, 1994). En los sistemas de islas del Pacífico suroriental, se han observado incrementos importantes de fitoplancton (Pizarro *et al.*, 2006) aunque es poco lo que se conoce sobre los mecanismos involucrados y las características de su variabilidad espacial y temporal.

En el Pacífico suroriental, uno de los sistemas de islas más productivos corresponde al archipiélago de Juan Fernández (AJF; 33°40'S, 78°40'W), ubicado aproximadamente a 650 km frente a la costa de Valparaíso (33°3'S, 71°38'W). Este archipiélago está compuesto por tres islas de pequeña superficie, Robinson Crusoe (RC, 93 km²), Santa Clara (SC, 5 km²) y Alejandro Selkirk (AS, 85 km²), reconocidas por presentar alta biomasa biológica, permitiendo sustentar importantes pesquerías como la que opera sobre la langosta de Juan Fernández, cangrejo dorado y el pampanito (Arana, 2000; Pequeño & Sáez, 2000; Ahumada & Arana, 2009). De acuerdo con lo observado en otros sistemas de islas, la alta biomasa biológica se explicaría por las altas concentraciones de fitoplancton observadas a su alrededor. Mediciones de clorofila-*a* utilizadas como un proxy de abundancia de fitoplancton, han mostrado que durante el periodo primaveral las islas que conforman el archipiélago alcanzan concentraciones cercanas a 0,5 mg m⁻³ en la capa superficial y máximos subsuperficiales cercanos a 2 mg m⁻³ (Pizarro *et al.*, 2006). Por el momento, las características de la variabilidad anual de la clorofila-*a* alrededor de estas islas aun no han sido detalladas.

En el Sistema de Corrientes Chile-Perú (SCCP) se ha descrito el ciclo anual de la clorofila-*a* satelital identificándose un régimen costero, donde el máximo de clorofila-*a* ocurre en verano, coincidiendo con el máximo estrés del viento favorable a la surgencia, y un régimen oceánico con un máximo invernal de clorofila-*a* desacoplado del máximo estrés de viento (Yuras *et al.*, 2005), asociado a remolinos de mesoescala generados cerca de la costa de la zona continental (Correa-Ramirez *et al.*, 2007). En la zona oceánica frente a Chile central (hasta 80°W), el máximo invernal de clorofila-*a* es promovido por el desplazamiento hacia el oeste de remolinos de mesoescala, a los cuales se asocia más del 50% de la concentración de clorofila-*a* (Correa-Ramirez *et al.*, 2007). Recientemente, Correa-Ramirez *et al.* (2012) han mostrado que existe una división zonal de la clorofila-*a* satelital para el SCCP, en la cual las islas que conforman el AJF se encontrarían en dos zonas diferentes. El conjunto Robinson Crusoe-Santa Clara (RC-SC) se encontraría dentro de la denominada Zona de Transición Costera (ZTC), que se extiende a partir de 100 km desde la costa hasta ~80°W (Hormazabal *et al.*, 2004), que presenta rangos de clorofila-*a* de 0,3-1 mg m⁻³. Por otra parte, la isla Alejandro Selkirk (AS) se encontraría dentro de la Zona Oceánica (ZO, >80°W), con valores de clorofila-*a* <0,1 mg m⁻³ (Correa-Ramirez *et al.*, 2012). En la ZTC se ha propuesto que la variabilidad anual de la clorofila es forzada principalmente por ondas de Rossby y remolinos de mesoescala (Correa-Ramirez *et al.*, 2012), mientras que para la zona oceánica, los forzantes aun no han sido definidos.

El presente trabajo tiene como objetivo caracterizar la variabilidad espacial y temporal del ciclo anual de la clorofila-*a* satelital sobre el archipiélago de Juan Fernández, y discutir los posibles mecanismos forzantes de esta variabilidad. Esto permitirá incorporar nuevos elementos de análisis sobre el acoplamiento físico-biológico en las islas oceánicas del Pacífico suroriental.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó ocho años de información satelital de clorofila-*a* (clor-*a*), anomalía del nivel del mar, viento y corriente geostrofica, para caracterizar el ciclo anual

de la clor-*a* en el AJF. Los datos diarios de clor-*a* con una resolución espacial de 1 km fueron obtenidos desde el producto L2 de la misión MODISAqua (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) determinado a través del algoritmo OC3 (Werdell, 2009). Las brechas de información satelital producto de la presencia de nubes, fueron completadas mediante una interpolación objetiva utilizando el método DINEOF (Data Interpolating Empirical Orthogonal Function) aplicado con una caja móvil de 31 días (Alvera-Azcárate *et al.*, 2007). Datos semanales de anomalías de nivel del mar y corrientes geostroficadas (componentes *u* y *v*) con una resolución espacial de 0,25°x0,25° fueron obtenidas del producto combinado de las misiones Topex/Poseidon-ERS y Jason-Envisat distribuidos por AVISO (<http://www.aviso.oceanobs.com/>). Datos de vientos con una resolución temporal de cinco días (pentadas) y una resolución espacial de 0,25°x0,25°, se obtuvieron del producto combinado CCMP 13.5, estimado a través de la calibración cruzada y asimilación de datos de viento en la superficie del océano obtenidas desde QuikSCAT, ADEOS-II, AMSR-E, TRMM TMI y SSM/I (<http://podaac.jpl.nasa.gov/>).

El análisis de la variabilidad de clorofila-*a* que ocurre en el AJF se realizó en una región de cuatro grados de longitud y dos grados de latitud (32,75-34,75°S, 77,76-81,76°W) (Fig. 1). Para conocer las principales frecuencias de variabilidad temporal y espacial de clor-*a*, viento, anomalía del nivel del mar y energía cinética de remolinos se utilizó el método "MultiTaper Method-Singular Value Decomposition" (MTM-SVD). Este método permite estimar los espectros de potencia como varianza fraccional local, de varias series de tiempo independientes, distribuidas en una región de interés, además de las características espaciales de las frecuencias de interés (Mann & Park, 1999). Para efectuar la estimación de la varianza fraccional local, cada base de datos fue interpolada a la misma resolución temporal y espacial de la clor-*a*. Posteriormente, para estudiar los patrones de propagación de las perturbaciones, se procedió a reconstruir la frecuencia del ciclo anual en el tiempo y el espacio.

La energía cinética de remolinos fue calculada siguiendo a Hormazabal *et al.* (2004) de la siguiente forma:

$$EC = \frac{1}{2} \left[\left\langle \left(U_g - \langle U_g \rangle \right)^2 \right\rangle + \left\langle \left(V_g - \langle V_g \rangle \right)^2 \right\rangle \right]$$

donde U_g y V_g son los componentes de la corriente geostrofica y, $\langle \rangle$ indica el promedio en el tiempo.

RESULTADOS

El promedio de clor-*a* satelital para el periodo 2002-2010 mostró un importante decaimiento desde el sureste ($\sim 0,24 \text{ mg m}^{-3}$) hacia el noroeste ($< 0,16 \text{ mg m}^{-3}$), de la región de estudio (Fig. 1). En términos generales el conjunto de islas Robinson Crusoe-Santa Clara (RC-SC) se encuentra en una región de alta energía cinética y mayores concentraciones de clor-*a* que ha sido definida como Zona de Transición Costera (Hormazabal *et al.*, 2004; Correa-Ramirez *et al.*, 2012), mientras que Alejandro Selkirk (AS) se encuentra en una región de baja energía cinética y menores concentraciones de clor-*a* denominada Zona Oceánica (Correa-Ramirez *et al.*, 2012). La variabilidad espacial de la clor-*a* alrededor de las islas muestra que el conjunto RC-SC posee un incremento de las concentraciones en el lado suroeste, mientras que para la isla AS las mayores concentraciones se encontraron focalizadas en el lado oeste (Fig. 1).

Se determinaron los espectros de varianza fraccional local de la clor-*a*, magnitud del viento, anomalía del nivel del mar y energía cinética (Fig. 2). Para ambas islas, la clor-*a* presentó incrementos significativos de varianza ($>99\%$) en una amplia banda centrada en el ciclo anual (315-511 días). La amplitud de esta banda en el espectro, ha sido asociada al corrimiento (retraso/adelanto) del inicio de la estación del año (Montecinos & Gómez, 2010; Correa-Ramirez *et al.*, 2012). Esta banda anual también presentó incrementos significativos ($>99\%$) en los espectros del nivel del mar y energía cinética (Figs. 2c-2d). En el caso del viento, solo se observaron incrementos significativos ($>80\%$) en RC-SC (Fig. 2b). En el conjunto RC-SC, la clor-*a* presentó incrementos significativos sobre el 99% en la banda semianual y sobre el 90% en la banda estacional, en cambio para AS estos incrementos fueron significativos al 90% en la banda semianual y cercanos a 80% en la banda estacional. Al igual que en la clor-*a*, en RC-SC, el espectro de las anomalías del nivel de mar presentó máximos significativos sobre el 99% en la banda semianual, sugiriendo una buena relación entre estas dos variables. En el caso de AS, los máximos fueron significativos con un nivel de confianza menor ($\sim 90\%$) respecto de RC-SC, aspecto que también se observó en la clor-*a* (Figs. 2a y 2c). En la banda estacional la clor-*a* para RC-SC no parece estar relacionada con ninguna de las variables consideradas.

El espectro del viento indicó incrementos significativos ($\sim 90\%$) en la banda anual solamente para RC-SC, presentando una buena asociación con la

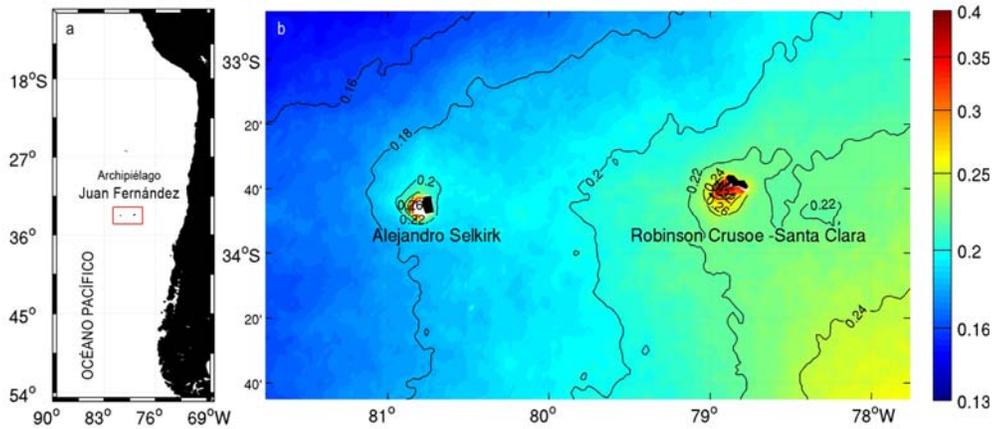


Figura 1. a) Ubicación geográfica del archipiélago de Juan Fernández, respecto de la costa de Chile, b) promedio de clorofila-*a* satelital (mg m^{-3} , líneas de contorno) durante el periodo 2002-2010, alrededor de las islas Alejandro Selkirk (AS) y Robinson Crusoe-Santa Clara (RC-SC).

Figure 1. a) Juan Fernández archipelago location relative to the Chilean coast, b) satellite chlorophyll-*a* (mg m^{-3} , contour lines) average between 2002 to 2010 around the Alejandro Selkirk (AS) and Robinson Crusoe-Santa Clara (RC-SC) islands.

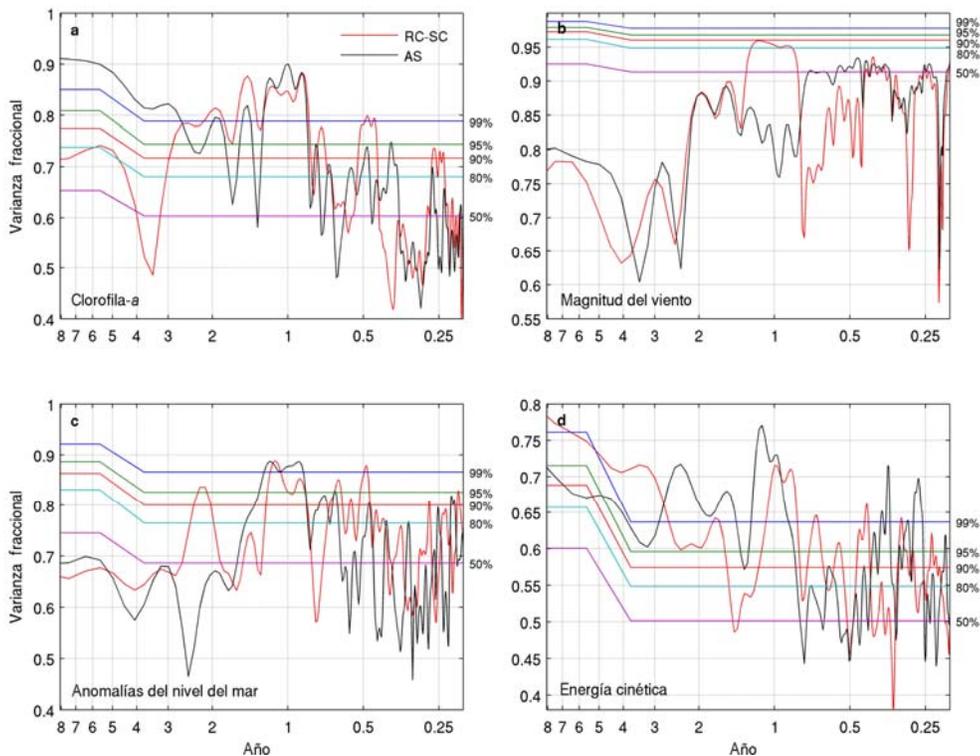


Figura 2. Espectros de varianza fraccional local mayores a la frecuencia estacional (período > 0.25) de a) clorofila-*a*, b) magnitud del viento, c) anomalías del nivel del mar, d) energía cinética de remolinos en el archipiélago de Juan Fernández. La línea roja corresponde al conjunto de islas RC-SC y la línea negra corresponde a la isla AS. Los niveles de confianza utilizados son 50%, 80%, 90%, 95%, 99%, que fueron calculados mediante un experimento de remuestreo aleatorio.

Figure 2. Spectra of local fractional variance longer than the seasonal frequency (period > 0.25) for a) chlorophyll-*a*, b) magnitude of the wind, c) sea level anomalies, d) eddy kinetic energy in the Juan Fernandez archipelago. The red line corresponds to RC-SC islands and the black line corresponds to AS island. Confidence levels used are 50%, 80%, 90%, 95%, 99%, which were calculated by a random resampling experiment.

clor-*a*. En las otras bandas de frecuencia, el espectro del viento alcanzó valores poco significativos (<80%), sugiriendo que su efecto sobre la variabilidad de la clor-*a* no es significativo. Es posible que los cerros del archipiélago, que alcanzan alturas máximas de 1650 m en AS y de 915 m en RC-SC, modifiquen la incidencia de los vientos afectando los procesos dinámicos locales que se relacionan con la variabilidad de la clor-*a*. Por otra parte, las diferencias en las amplitudes de los incrementos de clor-*a* se debería a que se encuentran ubicadas en zonas con distintas características dinámicas, la ZTC (RC-SC) y la ZO (AS).

Durante el periodo de estudio, la energía cinética presentó incrementos significativos (>99%) en los periodos centrados en 97 y 127 días (Fig. 2d). Estos incrementos se asocian a la presencia permanente de remolinos alrededor del archipiélago, los cuales pueden ser generados producto de la interacción del viento y/o las corrientes con las islas (Sangrà *et al.*, 2009) o a remolinos que viajan hacia las islas desde la zona continental de Chile (Correa-Ramirez *et al.*, 2007). Hacia las bajas frecuencias, en ambas islas se presentaron incrementos significativos de la varianza en la banda anual (315-455 días), cuasi-bianual (2,2 años) e interanual (>3,5 años). De las variables analizadas, sólo la energía cinética presenta incrementos de energía en la banda interanual que se puedan asociar a los observados en la clor-*a*. En AS, el espectro conjunto entre la clor-*a* y la energía cinética (no mostrado) presenta incrementos significativos (>90%) en la banda interanual (>3,5 años), sugiriendo una buena relación entre ambas variables, en cambio para RC-SC no se obtienen valores significativos. Dentro de esta banda de frecuencias se han observado fluctuaciones similares que han sido asociadas a patrones de teleconexión atmosféricos y oceánicos vinculados con El Niño y la Oscilación del Sur (Hormazabal *et al.*, 2004; Correa-Ramirez *et al.*, 2012).

El ciclo anual de clor-*a*, magnitud del viento, anomalías del nivel del mar y energía cinética de remolinos para el conjunto de islas RC-SC y la isla AS se muestra en la Fig. 3. En el conjunto RC-SC el ciclo anual de la clor-*a* mostró los mayores incrementos en la época invernal del hemisferio sur (entre junio y fines de agosto), el cual comienza a disminuir en septiembre para incrementar levemente hacia fines de octubre y noviembre (época primaveral) y terminar en un mínimo a fines de marzo (Fig. 3a). Los incrementos invernales de clor-*a* (0,25 mg m⁻³), también se observan en el ciclo anual de energía cinética de remolinos con aproximadamente 15-30 días de antelación (Fig. 3d). Esta relación en el

máximo invernal podría deberse a un incremento de clor-*a* asociada a remolinos de mesoescala, que viajan desde la zona continental con velocidades del orden de 2 km d⁻¹ (Hormazabal *et al.*, 2004; Chaigneau *et al.*, 2008), por lo que su efecto sobre la dinámica de las corrientes alrededor de las islas debería sentirse por un periodo cercano a 120-160 días, concordando con lo observado en los espectros de la energía cinética, el cual muestra incrementos de energía significativos (>95%) entre 0,43-0,46 años (157-168 días) (Fig. 2d). Por otro lado, el máximo primaveral no presenta una coherencia con la fase de propagación de la clor-*a* desde la zona continental. Esto último indica que el incremento primaveral de clorofila-*a* alrededor de estas islas estaría desvinculado de la propagación de procesos generados en la zona continental. El ciclo anual de la magnitud del viento presenta sus valores máximos en primavera-verano (Fig. 3b), con fase opuesta a los mayores incrementos de clor-*a* invernal, coincidiendo con lo observado por Yuras *et al.* (2005) para la ZTC.

En AS los mayores incrementos de clor-*a* (0,22 mg m⁻³), se producen a fines de invierno – principios de primavera, presentándose desacoplados de los máximos del viento (Fig. 3b). En cambio, la energía cinética muestra sus mayores valores en esta época, lo que sugiere un efecto dominante de esta variable sobre el incremento de clor-*a* alrededor de esta isla (Fig. 3d). Por último, el ciclo anual de las anomalías del nivel del mar presentó un patrón inverso a los periodos de incrementos de clor-*a* y energía cinética para ambas islas, donde las diferencias en el nivel de mar, entre sus máximos y mínimos, alcanzan valores cercanos a 7 cm. En términos generales, la isla AS presentó menores concentraciones de clor-*a* que el conjunto RC-SC, encontrándose emplazada en la ZO, caracterizada por valores de clorofila <0,1 mg m⁻³ (Fig. 3a). Además, existe un máximo de clorofila en junio, que se observó con una mayor amplitud en el ciclo anual de RC-SC y menor en AS. Esto último indicó que los procesos físicos que dominan la dinámica que ocurre alrededor de AS son diferentes a los que dominan en el conjunto RC-SC.

La variación longitudinal del promedio zonal de la clor-*a*, durante invierno y primavera (Fig. 4) presentó fuerte decaimiento desde la zona continental hacia la zona oceánica, con incrementos significativos alrededor de las islas del archipiélago. Alrededor de las islas, las mayores concentraciones medias de clor-*a* se observaron durante invierno y, fueron ligeramente mayores en primavera respecto al invierno (Fig. 4a). Si bien, los valores de clor-*a* alrededor de las islas son menores a los encontrados en la costa continental (~10 mg m⁻³), fueron constantes en el tiempo y mayores

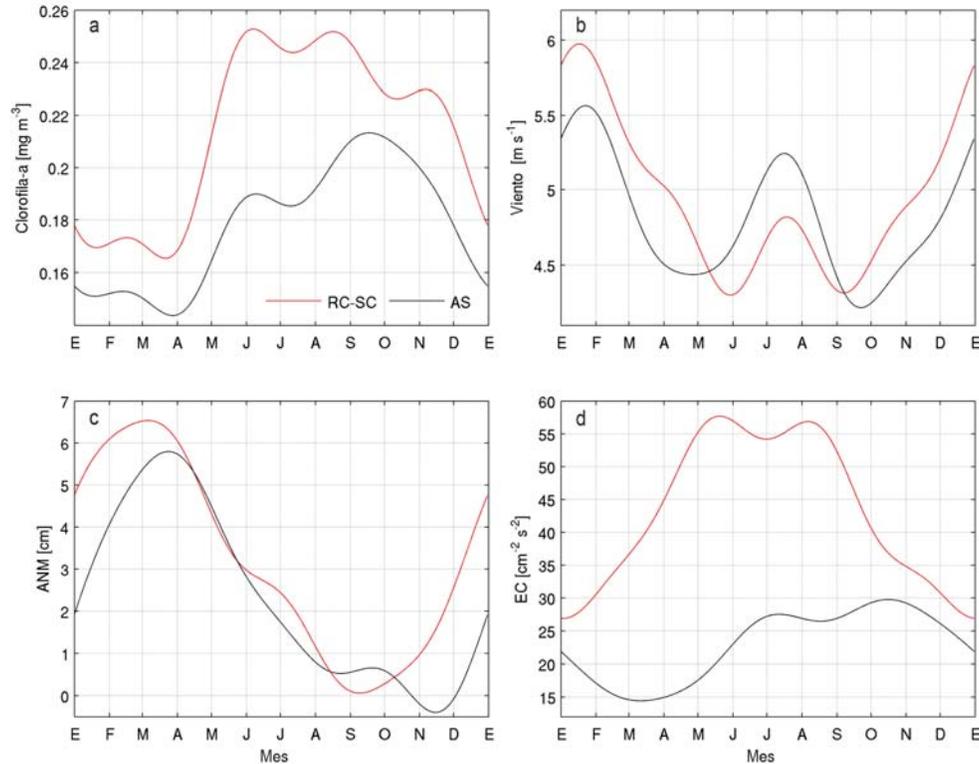


Figura 3. Ciclo anual de a) clorofila-*a*, b) magnitud del viento, c) anomalías del nivel del mar (ANM), d) energía cinética de remolinos (EC), obtenido a través de análisis armónico durante el periodo 2002-2010. Para cada variable se muestra el conjunto de islas RC-SC (línea roja) y la isla Alejandro Selkirk (línea negra).

Figure 3. Annual cycle of a) chlorophyll-*a*, b) magnitude of the wind, c) sea level anomalies, d) eddy kinetic energy, obtained by harmonic analysis over the period 2002-2010. For each variable shows the group of islands RC-SC (red line) and the Alejandro Selkirk Island (black line).

mayores al de las aguas oceánicas adyacentes a las islas ($<0,1 \text{ mg m}^{-3}$), resaltando la importancia de la presencia de elevaciones topográficas emplazadas en aguas oligotróficas (Fig. 4b). Mediciones *in situ* de clor-*a* realizadas en el archipiélago de Juan Fernández por Pizarro *et al.* (2006), indicaron valores superficiales $<0,5 \text{ mg m}^{-3}$ coincidiendo con aquellos determinados en el presente estudio mediante información satelital. Por otra parte, en este archipiélago se han observado incrementos subsuperficiales (20-100 m) que alcanzan $\sim 2 \text{ mg m}^{-3}$ (Pizarro *et al.*, 2006). En islas del Atlántico norte, se ha observado que la concentración superficial de clor-*a* es producto de una advección pasiva de máximos subsuperficiales producto de la interacción de las corrientes con las islas (*e.g.* generación de molinos o procesos de surgencia locales) (Hasegawa *et al.*, 2008).

El patrón espacial del ciclo anual de la clor-*a* obtenido mediante el método MTM-SVD, representa alrededor de un 15% de la varianza total de la región analizada. La máxima (mínima) amplitud del ciclo

anual de clor-*a* se propagó de sur a norte hasta los 34°S , desde fines de diciembre (junio) hasta mediados de febrero (agosto), continuando hacia el norte de los 34°S sólo en el extremo este de la región (Fig. 5). Posteriormente, desde comienzos de marzo (septiembre), el máximo (mínimo) de clor-*a* se propaga desde el borde oriental de la región de estudio hasta alcanzar su borde occidental en julio (enero). Cuando el máximo (mínimo) de clor-*a* se extiende a toda la región de estudio comienza a incrementar (disminuir) la clor-*a* en forma simultánea alrededor de las islas (RC-SC y AS), alcanzando su máximo (mínimo) alrededor de 30 días después de observado el máximo (mínimo) de la región de estudio (Figs. 5b y 5f). La diferencia de fase entre los máximos (mínimos) de clor-*a* alrededor de las islas y el máximo (mínimo) de la región de estudio, sugiere la ocurrencia de procesos locales asociados a las islas que favorecen el incremento de clor-*a*.

Los campos superficiales de corrientes geostroficas obtenidas desde información satelital (flechas) superpuestos sobre los campos superficiales de la

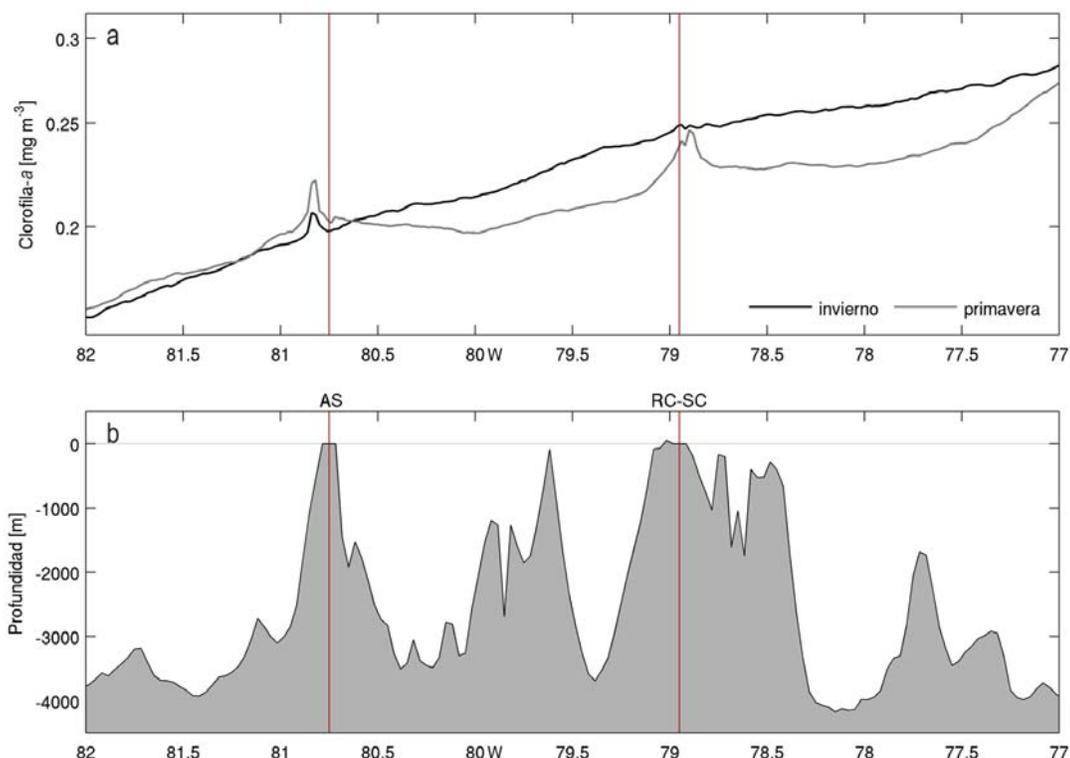


Figura 4. a) Variaciones longitudinales del promedio zonal de clorofila-*a*, realizado entre 32,75°S y 34,75°S, considerando los períodos de invierno (mediados de junio a fines de agosto) y de primavera (fines de septiembre a fines de noviembre) comprendidos entre los años 2002-2010, b) batimetría del fondo oceánico para la sección longitudinal sobre 33,7°S (Smith & Sandwell, 1997). Las líneas verticales demarcan la posición de las islas AS y RC-SC.

Figure 4. a) Zonal average of chlorophyll-*a* between 32.75°S and 34.75°S for winter (mid June to late August) and spring (late September through November) periods of years 2002-2010, b) Bathymetry for longitudinal section at 33.7°S (Smith & Sandwell, 1997). Vertical lines indicate the position of AS and RC-SC islands.

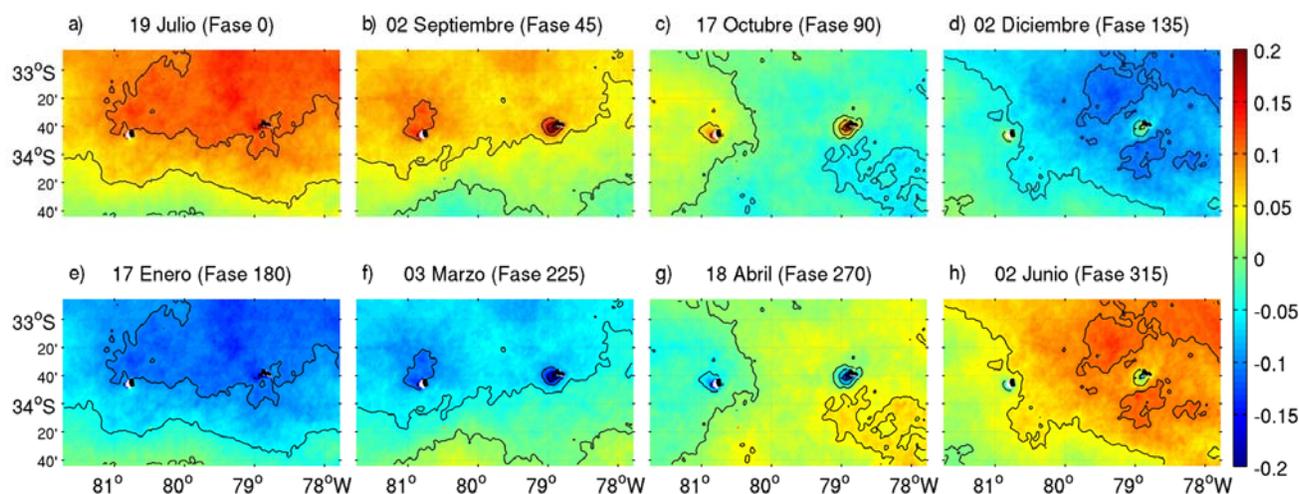


Figura 5. Reconstrucción espacial del ciclo anual de la clorofila-*a* (a-h) para el archipiélago de Juan Fernández obtenido a través del método MTM-SVD. Los recuadros están cada 45° (aproximadamente 45 días cada uno).

Figure 5. Spatial reconstruction of the annual cycle of chlorophyll-*a* (a-h) for the Juan Fernandez archipelago obtained through the MTM-SVD method. The panels are 45° each (about 45 days each one).

clor-*a*, además de los campos superficiales de energía cinética, para un día representativo del periodo de invierno (julio 2004) y de primavera (octubre 2005), se presentan en la Fig. 6. En términos generales, se observó que los remolinos de mesoescala aparecen como estructuras recurrentes en la región de estudio tanto para el periodo de invierno como de primavera (paneles superiores Fig. 6), dando cuenta de una importante variabilidad de mesoescala asociada a las fluctuaciones de la energía cinética de remolinos (paneles inferiores Fig. 6). En invierno, se observó una mayor extensión hacia el oeste de la zona con mayores concentraciones de clor-*a*. Además, durante este periodo se presentaron fuertes corrientes y altos valores de energía cinética, que perduraron más tiempo (panel inferior izquierdo Fig. 6). Durante primavera, la zona de extensión de la clor-*a* se presentó más estrecha y apegada a la zona continental, aunque con mayores concentraciones de clor-*a* debido a la intensificación de la surgencia en esa época. Alrededor de las islas se observaron incrementos de clor-*a* desvinculados de los incrementos costeros continentales. Estos incrementos no se observaron más al sur o al norte del archipiélago (~200 km) en el mismo rango de longitudes.

DISCUSIÓN

Las islas que conforman el archipiélago de Juan Fernández (AS y RC-SC), se encuentran ubicadas en dos zonas de distintas características, separadas por una distancia cercana a 200 km. El conjunto de islas RC-SC se encuentra emplazado sobre la denominada ZTC la que ha sido caracterizada, sobre el promedio de 11 años de datos satelitales, como una zona de alta energía cinética y rangos de clor-*a* entre 0,3 y 1 mg m⁻³, mientras que la isla AS ubicada sobre la denominada ZO, presentó baja energía cinética y ha sido caracterizada por exhibir concentraciones de clor-*a* <0,1 mg m⁻³ (Correa-Ramirez *et al.*, 2012). Además, en este trabajo se ha observado una marcada diferencia en la ubicación de las áreas de mayor concentración de clor-*a* alrededor de las islas (suroeste en RC-SC, oeste en AS), y en la variabilidad temporal (el régimen semianual y estacional es más marcado en RC-SC que en AS), lo que indica que los principales forzantes de la variabilidad espacial y temporal de la clor-*a* en las islas son diferentes.

El ciclo anual de clor-*a* observado en el archipiélago no aparece relacionado de forma importante con el ciclo anual del viento, debido a que

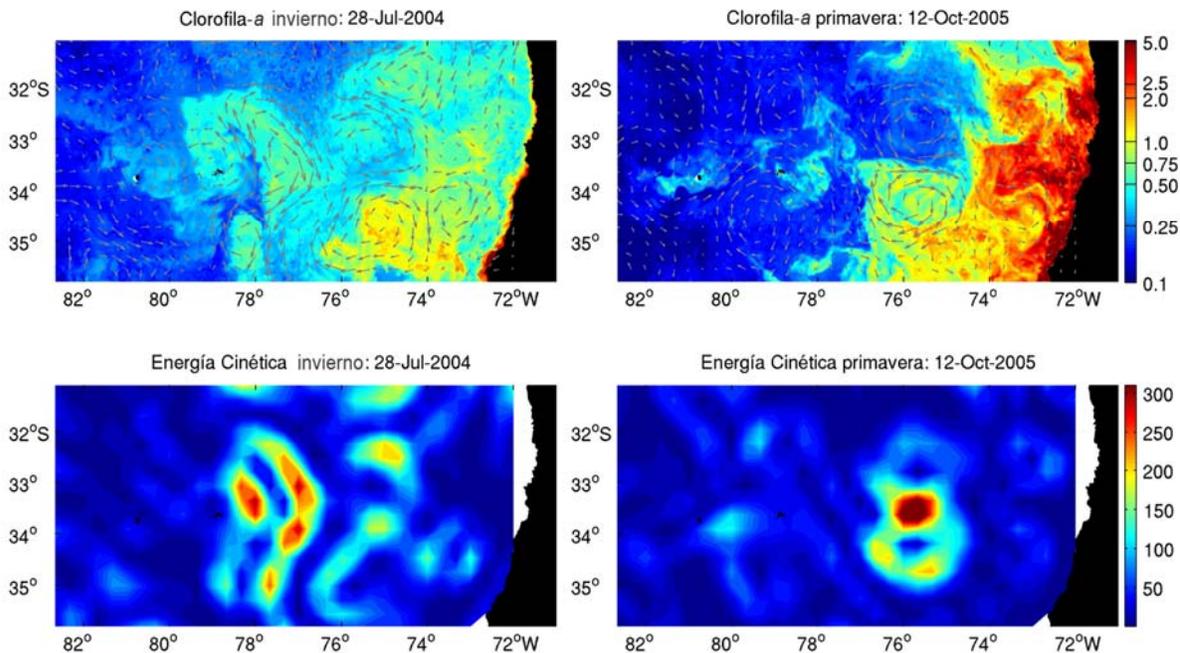


Figura 6. Campos superficiales de clorofila-*a* (mg m⁻³) superpuestos con los campos superficiales de las corrientes geostroficas (flechas) para un día, durante los periodos de invierno 2004 (panel superior izquierdo) y verano 2005 (panel superior derecho) obtenidos a través de información satelital. Los paneles inferiores corresponden a los campos superficiales de energía cinética (cm⁻² s⁻²) para los mismos periodos.

Figure 6. Surface fields of chlorophyll-*a* (colour, mg m⁻³) and geostrophic surface currents (arrows) for a representative day of winter 2004 (upper left panel) and summer 2005 (upper right panel), obtained from satellite information. The bottom panels correspond to the fields of eddy kinetic energy (cm⁻² s⁻²) for the same periods.

los incrementos (decaimientos) estacionales de la clor-*a* se registran cuando la magnitud del viento presenta sus valores mínimos (máximos). Esta situación es contraria a lo que sucede en otros sistemas insulares, donde se ha observado que las islas modifican la incidencia de los vientos, siendo esta interacción, la principal fuente de perturbación para la formación de remolinos y el transporte de aguas y propiedades biogeoquímicas (Sangrà *et al.*, 2009). Es posible que la presencia de cerros de distintas alturas en las islas asociada a su pequeño tamaño, actúen modificando la incidencia de los vientos y afecten los procesos dinámicos locales (e.g. intensificando procesos de mezcla de la capa superficial, generación de alta vorticidad de submesoescala) que se relacionan negativamente con el incremento de las concentraciones de clor-*a*. Debido a la baja resolución espacial del viento satelital utilizado en este trabajo (0,25°x0,25°), el efecto de la orografía del AJF sobre el viento incidente no está bien representado. El impacto del viento local sobre la dinámica de las aguas alrededor del AJF y, su efecto sobre la variabilidad de la clor-*a* alrededor de las islas es un aspecto que debe ser analizado con más detalle en otro trabajo.

En términos generales el ciclo anual de la clor-*a* posee una relación inversa con el ciclo anual del nivel del mar, donde el incremento (disminución) de la concentración de clor-*a* se asocia a un nivel del mar bajo (alto), lo cual podría estar vinculado con la propagación de ondas de Rossby (Cipollini *et al.*, 2001). Por otra parte, dentro del ciclo anual, el incremento (disminución) de la clor-*a* se asoció al incremento (disminución) de la energía cinética de remolinos, sugiriendo que los procesos físicos asociados a las variaciones de la energía cinética estarían contribuyendo en forma significativa en la variabilidad de la clor-*a* en la región. En el Pacífico suroriental, las fluctuaciones de la energía cinética han sido vinculadas con la presencia de remolinos de mesoescala y corrientes de meandro (Hormazabal *et al.*, 2004; Correa-Ramirez *et al.*, 2007, 2012), que pueden ser generados producto de la interacción del viento y/o las corrientes con las islas (Sangrà *et al.*, 2009) o a remolinos que viajan hacia las islas desde la zona continental de Chile, permitiendo extender la zona de alta concentración de clor-*a* vinculada a la surgencia costera (Correa-Ramirez *et al.*, 2007). Varios mecanismos asociados a remolinos de mesoescala podrían estar incrementando la clor-*a* a lo largo de la trayectoria de estas estructuras desde la zona continental hasta el AJF, 1) el transporte directo de clor-*a* generada por la surgencia costera continental, 2) producción nueva de clor-*a* durante el

desplazamiento del remolino, producto de una inyección vertical de nutrientes hacia la capa superficial dentro del remolino, y 3) incremento de la mezcla favorecida por la actividad de estas estructuras (Correa-Ramirez *et al.*, 2007). Estos mecanismos podrían explicar la buena relación entre el ciclo anual de clor-*a* y el de la energía cinética alrededor del archipiélago.

Durante el periodo de invierno (junio-julio), AS presentó valores medios de energía cinética y clor-*a* cercanos a la mitad del observado en RC-SC. El incremento de la clor-*a* durante este periodo ha sido asociado a incrementos de energía cinética vinculados con remolinos de mesoescala provenientes de la zona continental y al paso de ondas de Rossby (Correa-Ramirez *et al.*, 2007; McGillicuddy *et al.*, 1998, 2011). Es probable que el conjunto de islas RC-SC genere una especie de barrera para los procesos remotos que llegan al archipiélago desde la zona continental (e.g. remolinos de mesoescala y ondas de Rossby), disminuyendo parte de la energía que se podría transferir a los procesos físicos locales que afectan la variabilidad de la clor-*a* alrededor de la isla AS.

Los incrementos de clor-*a* en primavera aparecen desvinculados de la propagación de remolinos de mesoescala desde la costa continental, sugiriendo para este periodo la ocurrencia de procesos locales alrededor de las islas que inciden en la variabilidad de la clor-*a*. En otras partes del mundo se han observado incrementos biológicos alrededor de las costas insulares debido a la inyección de macro y micronutrientes dentro de la capa eufótica asociados al “efecto de masa de isla” (Doty & Ogury, 1956). Este efecto puede afectar las concentraciones de clor-*a* a través de: 1) advección vertical de clor-*a* subsuperficial por parte de remolinos, 2) inyección de nutrientes a la capa superficial debido a la generación de remolinos por las islas (Hasegawa *et al.*, 2009) y, 3) ingreso de nutrientes debido a la lixiviación de suelos durante las precipitaciones (Perissinotto *et al.*, 2000). En el AJF se han registrado máximos subsuperficiales de clorofila-*a* (Pizarro *et al.*, 2006), pero aun se desconoce su fuente de formación y su efecto sobre los máximos observados en superficie. La variabilidad espacial y temporal de estos máximos subsuperficiales, que no pueden ser observados mediante datos satelitales, podría cumplir un rol relevante en la dinámica poblacional de estos ecosistemas. Parte de las diferencias que existen en la variabilidad espacial y temporal de la clor-*a* en las islas que conforman el AJF podrían estar asociadas al “efecto de masa de isla”, del cual se desconocen sus

principales características y su impacto sobre la variabilidad de la clorofila en la región.

CONCLUSIONES

- Las islas RC-SC y AS están ubicadas sobre dos zonas oceánicas de distintas características tanto en energía cinética como en niveles de concentración de clor-*a*, lo cual indica que la magnitud/frecuencia de los forzantes que operan sobre la dinámica oceanográfica asociada a las islas son diferentes.
- Al contrario de lo que sucede en la costa continental del Pacífico suroriental, en el AJF el viento no aparece como un forzante importante sobre la variabilidad espacial y temporal de la clor-*a*.
- En la época invernal existe una relación positiva entre los incrementos de las concentraciones de clor-*a* y los incrementos de la energía cinética propagados desde la costa de la zona continental. Sin embargo, no se observa lo mismo en la época de primavera, donde los incrementos de clorofila-*a* aparecen desvinculados de la energía cinética que se propaga desde la zona continental, sugiriendo que para esta época domina el origen local de los incrementos de clor-*a*, donde el “efecto de masa de isla” aparece como el mecanismo más probable.
- Si bien, los datos satelitales entregan valiosa información, se restringen únicamente al nivel superior de la columna de agua, pudiendo subestimar el potencial productivo del AJF. Esto hace imprescindible desarrollar investigaciones que integren observaciones de terreno con datos obtenidos desde modelos biofísicos que permitan complementar el actual conocimiento de los sistemas insulares del Pacífico suroriental.

AGRADECIMIENTOS

I. Andrade agradece a CONICYT por el financiamiento de sus estudios doctorales. Al Ocean Biology Processing Group (Code 614.2) en el GSFC, Greenbelt, MD 20771 por la producción y distribución de los datos SeaWIFS. S. Hormazabal agradece el financiamiento de parte de “Conservation, Research and Education Opportunities (“CREO”) y M. Correa-Ramirez agradece al FONDECYT 3110173.

REFERENCIAS

Ahumada, M. & P.M. Arana. 2009. Pesca artesanal de cangrejo dorado (*Chaceon chilensis*) en el archipiélago de Juan Fernández, Chile. In: P.M.

- Arana, J.A.A. Perez & P.R. Pezzuto (eds.). Lat Am. J. Aquat. Res., 37(3): 285-296.
- Alvera-Azcárate, A., A. Barth, J.M. Beckers & R.H. Weisberg. 2007. Multivariate reconstruction of missing data in sea surface temperature, chlorophyll, and wind satellite fields. J. Geophys. Res., 112: 11 pp.
- Andrade, I. & G. Pequeño. 2008. Mesobathic Chondrichthyes of the Juan Fernández seamounts: are they different from those of the central Chilean continental slope? Rev. Biol. Trop., 56(1): 181-190.
- Arana, P.M. 2000. Estimación de abundancia y biomasa del cangrejo dorado (*Chaceon chilensis*) en el archipiélago de Juan Fernández. Invest. Mar., Valparaíso, 28: 53-68.
- Boehlert, G.W. & B.C. Mundy. 1994. Vertical and onshore-offshore distributional patterns of tuna larvae in relation to physical habitat features. Mar. Ecol. Prog. Ser., 107: 1-13.
- Chaigneau, A., A. Gizolme & C. Grados. 2008. Mesoscale eddies off Peru in altimeter records: identification algorithms and eddy spatio-temporal patterns. Prog. Oceanogr., 79: 106-119.
- Cipollini, P., D. Cronwell, P.G. Challenor & S. Raffaglio. 2001. Rossby waves detected in global ocean colour data. Geophys. Res. Lett., 28: 323-326.
- Correa-Ramirez, M.A., S.E. Hormazabal & G. Yuras. 2007. Mesoscale eddies and high chlorophyll concentrations off Central Chile (29°-39°S). Geophys. Res. Lett., 34: 5 pp.
- Correa-Ramirez, M.A., S.E. Hormazabal & C.E. Morales. 2012. Spatial patterns of annual and interannual surface chlorophyll-*a* variability in the Peru-Chile system. Prog. Oceanogr., 92-95: 8-17.
- Cruz-Gómez, R.C., M.A. Monreal-Gómez & S.N. Bulgakov. 2008. Efectos de los vórtices en sistemas acuáticos y su relación con la química, biología y geología. Interciencia, 33(10): 741-746.
- Doty, M.S. & M. Ogury. 1956. The island mass effect. J. Cons. Int. Explor. Mer, 22: 33-37.
- Gubbay, S. 2002. The offshore directory. Review of a selection of habitats, communities and species of the North-East Atlantic. WWF-UK. North-East Atlantic Programme, U.K., 108 pp.
- Hasegawa, D., H. Yamazaki, T. Ishimaru, H. Nagashima & Y. Koike. 2008. Apparent phytoplankton bloom due to island mass effect. J. Mar. Syst., 69: 238-246.
- Hasegawa, D., M.R. Lewis & A. Gangopadhyay. 2009. How islands cause phytoplankton to bloom in their wakes. Geophys. Res. Lett., 36: 4 pp.
- Hormazabal, S., G. Shaffer & O. Leth. 2004. Coastal transition zone off Chile. J. Geophys. Res., 109: 13 pp.

- McGillicuddy, D.J., A.R. Robinson, D.A. Siegel, H.W. Jannasch, R. Johnson, T.D. Dickey, J. McNeil, A.F. Michaels & A.H. Knap. 1998. Influence of mesoscale eddies on new production in the Sargasso Sea. *Nature*, 394: 263-266.
- McGillicuddy, D.J. 2011. Eddies masquerade as planetary waves. *Science*, 334: 318-319.
- Mann, M.E. & J. Park. 1999. Oscillatory spatiotemporal signal detection in climate studies: a multiple-taper spectral domain approach. *Adv. Geophys.*, 41: 1-131.
- Montecinos, A. & F. Gómez. 2010. ENSO modulation of the upwelling season off southern-central Chile. *Geophys. Res. Lett.*, 37: 4 pp.
- Parin, N.V. 1991. Fish fauna of the Nazca and Sala y Gómez submarine ridges, the easternmost outpost of the Indo-West Pacific zoogeographic region. *Bull. Mar. Sci.*, 49(3): 671-683.
- Pequeño, G. & S. Sáez. 2000. Los peces litorales del archipiélago de Juan Fernández (Chile): endemismo y relaciones ictiogeográficas. *Invest. Mar.*, Valparaíso, 28: 27-37.
- Perissinotto, R., J.R.E. Lutjeharms & R.C. van Ballegooyen. 2000. Biological-physical interactions and pelagic productivity at the Prince Edward Islands, Southern Ocean. *J. Mar. Sys.*, 24: 327-341.
- Pizarro, G., V. Montecino, 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.
- Rogers, A.D. 1994. The biology of seamount. *Adv. Mar. Biol.*, U.K., 30: 305-350.
- Sangrà, P., A. Pacual, A. Rodríguez-Santana, F. Machín, E. Mason, J.C. McWilliams, J.L. Pelegrí, Ch. Dong, A. Rubio, J. Arístegui, A. Marrero-Díaz, A. Hernández-Guerra, A. Martínez-Marrero & M. Auladell. 2009. The Canary eddy corridor: a mayor pathway for long-lived eddies in the subtropical North Atlantic. *Deep-Sea Res. I*, 56: 2100-2114.
- Smith, W.H.F. & D.T. Sandwell. 1997. Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings. *Science*, 277: 1957-1962.
- Stocks, K. 2002. Seamounts online, an online information system for seamount biology. *Proceedings of the colour of Data Symposium*, Brussels, 13 pp.
- Werdell, J. 2009. Global bio-optical algorithms for ocean color satellite applications: inherent optical properties algorithm workshop at ocean optics XIX; Barga, Italy, 3-4 October 2008. *Eos, Trans. Am. Geophys. Union*, 90(1): 4 pp.
- Yuras, G., O. Ulloa & S. Hormazabal. 2005. On the annual cycle of coastal and open ocean satellite chlorophyll off Chile (18-40°S). *Geophys. Res. Lett.*, 32: 4 pp.

Received: 29 March 2011; Accepted: 30 May 2012