

Análisis de la variabilidad espacio-temporal del sistema de surgencia de La Guajira en el dominio espacio-frecuencia, empleando el MTM-SVD (*Multi Taper Method Singular Value Decomposition*)

Analysis of the spatiotemporal variability of upwelling system of Guajira in the space and frequency domain, using MTM-SVD (*Multi Taper Method Singular Value Decomposition*)

Fecha de recepción: 2015-05-28 / Fecha de aceptación: 2015-10-25

Gustavo Adolfo Gutiérrez Leones¹, Marco Alejandro Correa Ramírez², Samuel Ernesto Hormazabal Fritz³

¹**Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de Chile (SHOA).** Alumno Especialización en Hidrografía Categoría A-OHI. Errazúriz Echaurren 254 Playa Ancha, Valparaíso, Chile+56(32)2266-666 oirs@shoa.cl. Correo electrónico: ggutierrez@dimar.mil.co.

²**Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar).** Investigador asociado. Calle 25 No. 2-55 Santa Marta. Correo electrónico: marco.correa.r@gmail.com

³**Pontificia Universidad Católica de Valparaíso.** Escuela Ciencias del Mar. Correo electrónico: sam.hormazabal@gmail.com.

Gutiérrez Leones, G.A., Correa Ramírez, M.A., Hormazabal Fritz, S.E. (2015). Análisis de la variabilidad espacio-temporal del sistema de surgencia de La Guajira en el dominio espacio-frecuencia, empleando el MTM-SVD (*Multi Taper Method Singular Value Decomposition*). Bol. Cient. CIOH, 33: 87-106.

RESUMEN

Se emplearon datos satelitales de clorofila-a, campo de vientos y temperatura superficial del mar para un periodo de doce años sobre el área de influencia del sistema de surgencia de la península de La Guajira, para ser analizados mediante el MTM-SVD, con el fin de obtener una visión general de las principales frecuencias de variabilidad, determinar la fracción de varianza explicada para cada una de estas frecuencias y determinar sus patrones de oscilación, tanto estacionarios o de propagación. Se encontró que la señal anual y semianual domina en forma significativa el comportamiento del sistema de afloramiento en la península de La Guajira. La señal anual está asociada a las fluctuaciones del esfuerzo de los vientos Alisios, mientras que la señal semianual obedece al incremento en la intensidad de los vientos que se da como consecuencia del descenso latitudinal de la baja de las Azores, que modifica el campo isobárico de la región, permitiendo la génesis del veranillo de "San Juan". Se establecieron relaciones entre el comportamiento interanual del campo de viento y la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña, observándose coherencia entre la respuesta del sistema y las alteraciones atmosféricas que se generan como consecuencia de la intervención de El Niño-Oscilación del Sur.

PALABRAS CLAVES: surgencia, La Guajira, dominio espacial, dominio frecuencia.

ABSTRACT

Satellite data of chlorophyll-a, wind field and sea surface temperature for a period of 12 years, on the area of influence of upwelling system of the La Guajira peninsula, are used for analysis by MTM-SVD, in order to get an overview of the main frequency variability, determine the fraction of variance explained for each of these frequencies, and determine their patterns of oscillation, both stationary or propagation. It is that the annual and semiannual signal dominate the system behavior outcrop on the La Guajira peninsula, significantly. The annual signal is associated with fluctuations in the efforts of the trade winds, while the semiannual signal due to the increase in the intensity of the winds that occurs as a result of latitudinal decrease in low Azores amending isobaric field region, allowing the genesis of "San Juan" summer. Relations between the annual performance of the wind field and the occurrence of El Niño and La Niña established, showing consistency between the system response and atmospheric disturbances that are generated as a result of the intervention of ENSO.

KEYWORDS: upwelling, La Guajira, spatial domain, frequency domain.

INTRODUCCIÓN

Los sistemas de surgencia son de alto interés por la influencia que tienen sobre la productividad primaria, la sostenibilidad económica de las comunidades que dependen de los abundantes recursos pesqueros que favorece la surgencia y evidentemente, sobre la industria de la pesca. El fenómeno físico se desarrolla como una respuesta a la acción del viento sobre la superficie del mar, que genera un transporte de Ekman costa afuera en la capa límite superficial, produciendo una divergencia horizontal que genera el ascenso de las aguas ubicadas en la zona eufótica (bombeo de Ekman) [1].

Las corrientes de viento que impulsan los cuatro grandes sistemas de surgencia alrededor del mundo (Canaria, Benguela, California y Humboldt) están asociadas a los anticiclones semipermanentes de los océanos, que permiten a las corrientes de aire desplazarse con una trayectoria paralela a la costa y con características propias de *fetch*, intensidad y persistencia. Esta fuerte actividad atmosférica, influenciada por la fuerza de Coriolis, es la que genera el movimiento horizontal de las masas de agua costa afuera [2].

En el caso específico de la surgencia en la península de La Guajira, el afloramiento responde a eventos atmosféricos de modulación estacional forzada por la variación anual de la intensidad de los vientos Alisios y a eventos de corto plazo que pueden disminuir la intensidad de la surgencia [3]. La dirección de los vientos es alineada al borde litoral y sus características son suficientes para generar transporte y bombeo de Ekman. Las aguas bombeadas por el sistema poseen un mayor contenido de nutrientes que estimula el incremento de la producción biológica en el área.

El sistema de surgencia de La Guajira tiene una variabilidad típica anual controlada por vientos fuertes entre diciembre-febrero y julio-agosto. Vientos débiles caracterizan la época húmeda entre septiembre y noviembre. También se ha reportado una posible asociación entre el fenómeno de El Niño y la disminución de precipitaciones en la zona de surgencia. Varios antecedentes han mostrado cómo las condiciones de riqueza biológica de la surgencia da lugar a mayores capturas pesqueras, comparadas con las realizadas al suroeste del Caribe colombiano [4].

Estudios previos, basados en imágenes satelitales de los sensores SeaWiFS, AVHRR y MODIS, revelan una alta actividad de mesoescala en forma de filamentos sobre el área de surgencia, los cuales transportan aguas frías con altas concentraciones de clorofila desde la región del afloramiento hasta el centro del Caribe, donde posteriormente son distorsionados por meandros anticiclónicos que se propagan hacia el oeste. Se desconocen los procesos que controlan la variabilidad espacial que presenta el sistema, los cuales son importantes para evaluar la influencia de la circulación oceánica en la productividad biológica, y en el transporte de material biogeoquímico y antropogénico desde y hacia la plataforma continental de La Guajira [5].

Se han descrito seis focos de surgencia a lo largo de la península de La Guajira observados en la temperatura superficial del mar (TSM), que se intensifican entre diciembre-abril. Además se presenta un enfriamiento secundario entre junio-agosto, debido a la surgencia de mitad de año. La clorofila y TSM a lo largo de la costa muestran típicamente una fuerte correlación inversa en las áreas de surgencia situadas lejos del ingreso de agua dulce. "Las zonas de afloramiento mostraron un promedio anual de 25.24°C, un máximo de clorofila de 1.65 mg/m³, vientos de 6.12 m/s y la isoterma de 22°C costa afuera en 85 m de profundidad" [6].

En la presente investigación se analizó en el dominio de la frecuencia, la variabilidad espacial y temporal del sistema de surgencia de La Guajira a través de información satelital, para un periodo de estudio entre los años 2002 y 2014, haciendo énfasis en el análisis de los parámetros físicos directamente relacionados con la variabilidad de la clorofila-a satelital; la cual es un indicador de la presencia de biomasa fitoplanctónica y cuya variabilidad para esta área influye en el desarrollo de peces de importancia comercial para la región.

En los análisis se utilizó el método MTM-SVD propuesto por Mann & Park en 1999 y revisado por Correa-Ramírez & Hormazabal en el 2012, quienes desarrollaron la implementación de algoritmos computacionales en MatLab.

Los resultados alcanzados aportan nuevo conocimiento relacionado con la variabilidad espacial del sistema. Se detectaron señales de baja frecuencia que se sugieren posiblemente vinculadas a eventos El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) sobre el sistema de surgencia,

que permiten aportar nuevos elementos a la discusión sobre la estabilidad de la vida marina en la región y su impacto en el desarrollo socioeconómico.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizaron doce años (2002-2014) de datos satelitales de clorofila-a, TSM y campo de vientos para la región de la península de La Guajira, comprendida entre los 10° y 15° de latitud Norte, y 71° y 76° de longitud Oeste. Los datos de clorofila-a y TSM obtenidos corresponden al promedio diario de las adquisiciones efectuadas por la plataforma MODIS-aqua (<http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>), modo L2, que representa una resolución espacial nominal de 1 km. Los datos del campo de viento para la misma área y periodo de estudio fueron obtenidos de la Multi Plataforma de Calibración Cruzada (CCMP, por

sus siglas en inglés), con resolución espacial de 0.25 grados (ftp://podaac.jpl.nasa.gov/ocean_wind/ccmp). Se calcularon los campos promedios para cada una de las variables (figuras 1, 2 y 3).

Se efectuó un análisis de múltiples series de tiempo mediante la aplicación del MTM-SVD que permite analizar las principales frecuencias de variabilidad de clorofila-a, TSM y viento, para la zona correspondiente al principal núcleo dentro del sistema de surgencia ubicado entre latitud 11.7°N y 12.6°N y longitud 71.6°W y 72.7°W. Adicionalmente, el método permite identificar la varianza explicada y reconstruir los patrones de oscilación, tanto estacionarios como de propagación [7]. Para la reconstrucción se seleccionaron inicialmente las frecuencias de mayor significancia (anual y semianual) y, posteriormente, las que tienen menos impacto sobre el sistema de surgencia (intraestacional e interanual ENOS).

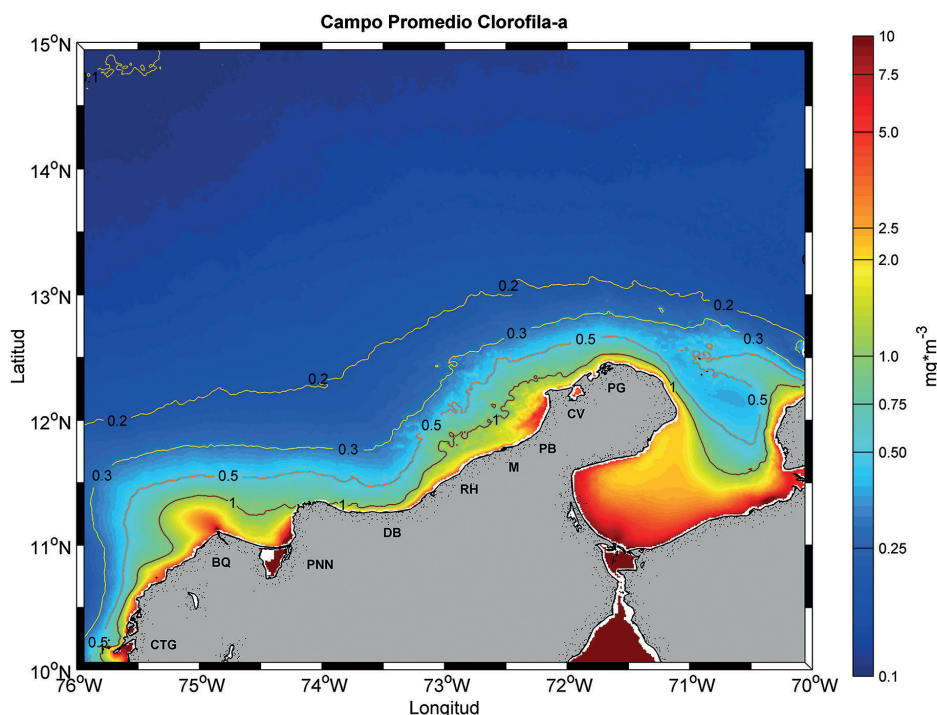


Figura 1. Campo promedio de clorofila-a. Las siglas indican las principales ciudades y poblaciones ubicadas sobre el borde litoral. PG (Punta Gallinas), CV (Cabo de La Vela), PB (Puerto Bolívar), M (Manaure), RH (Riohacha), DB (Dibulla), PNN (Parque Nacional Natural Ciénaga de Santa Marta), BQ (Barranquilla), CTG (Cartagena).

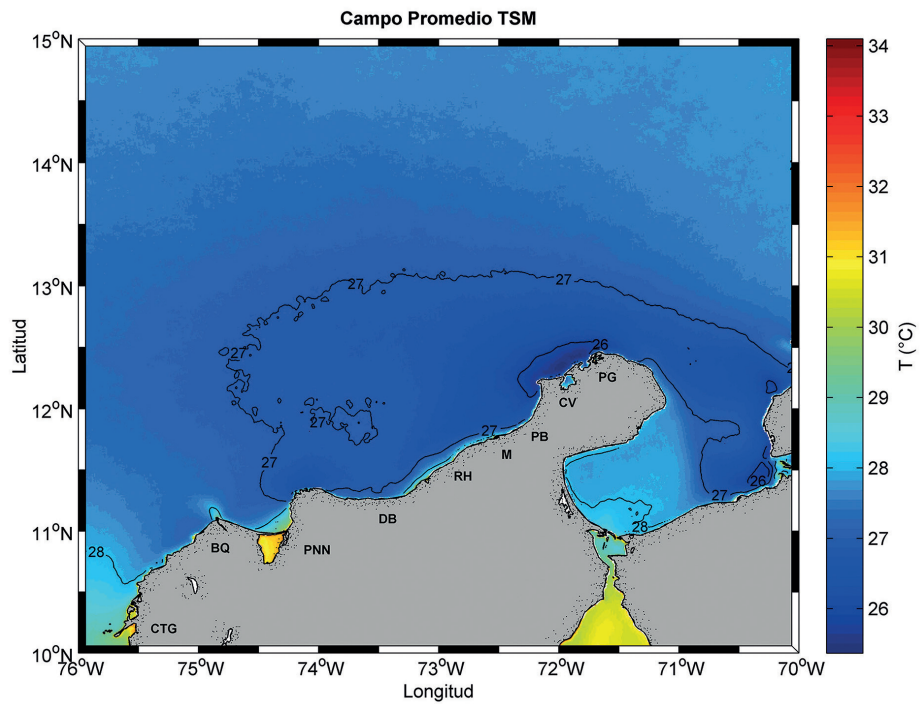


Figura 2. Campo promedio de temperatura superficial del mar (TSM). Las siglas indican las principales ciudades y poblaciones ubicadas sobre el borde litoral, su significado se indicó en la Figura 1.

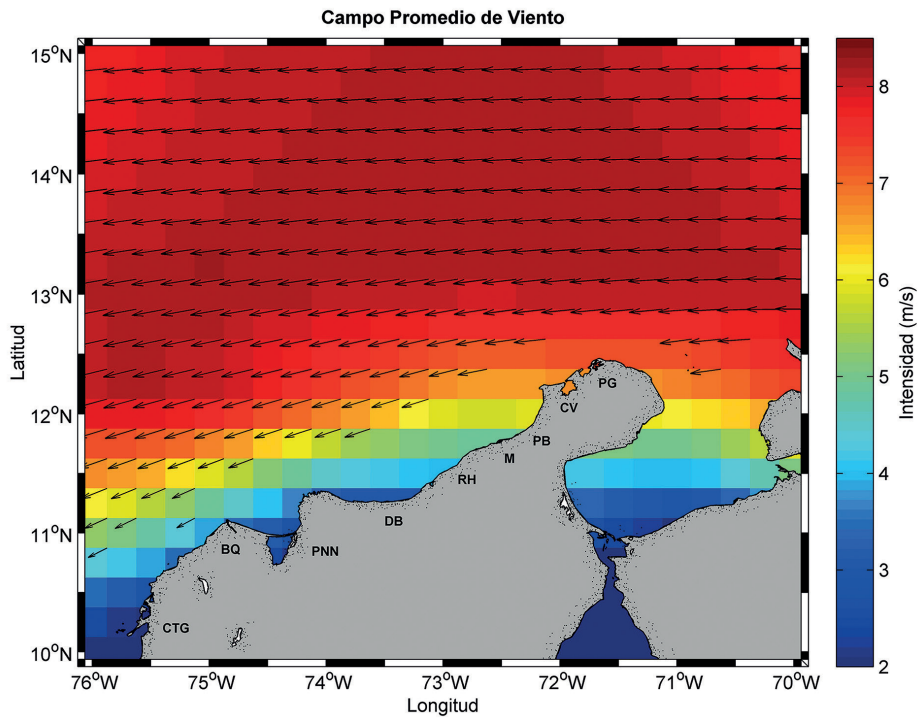


Figura 3. Campo promedio de intensidad del viento. Las siglas indican las principales ciudades y poblaciones ubicadas sobre el borde litoral, su significado se indicó en la Figura 1.

RESULTADOS

Principales frecuencias de variabilidad

El análisis de los resultados se centró en caracterizar la variabilidad anual, semianual,

interanual e intraestacional del sistema de surgencia de la península de La Guajira en el dominio espacio-frecuencia. Para esto se consideró como principal herramienta de análisis los espectros de varianza local fraccional (Figura 4).

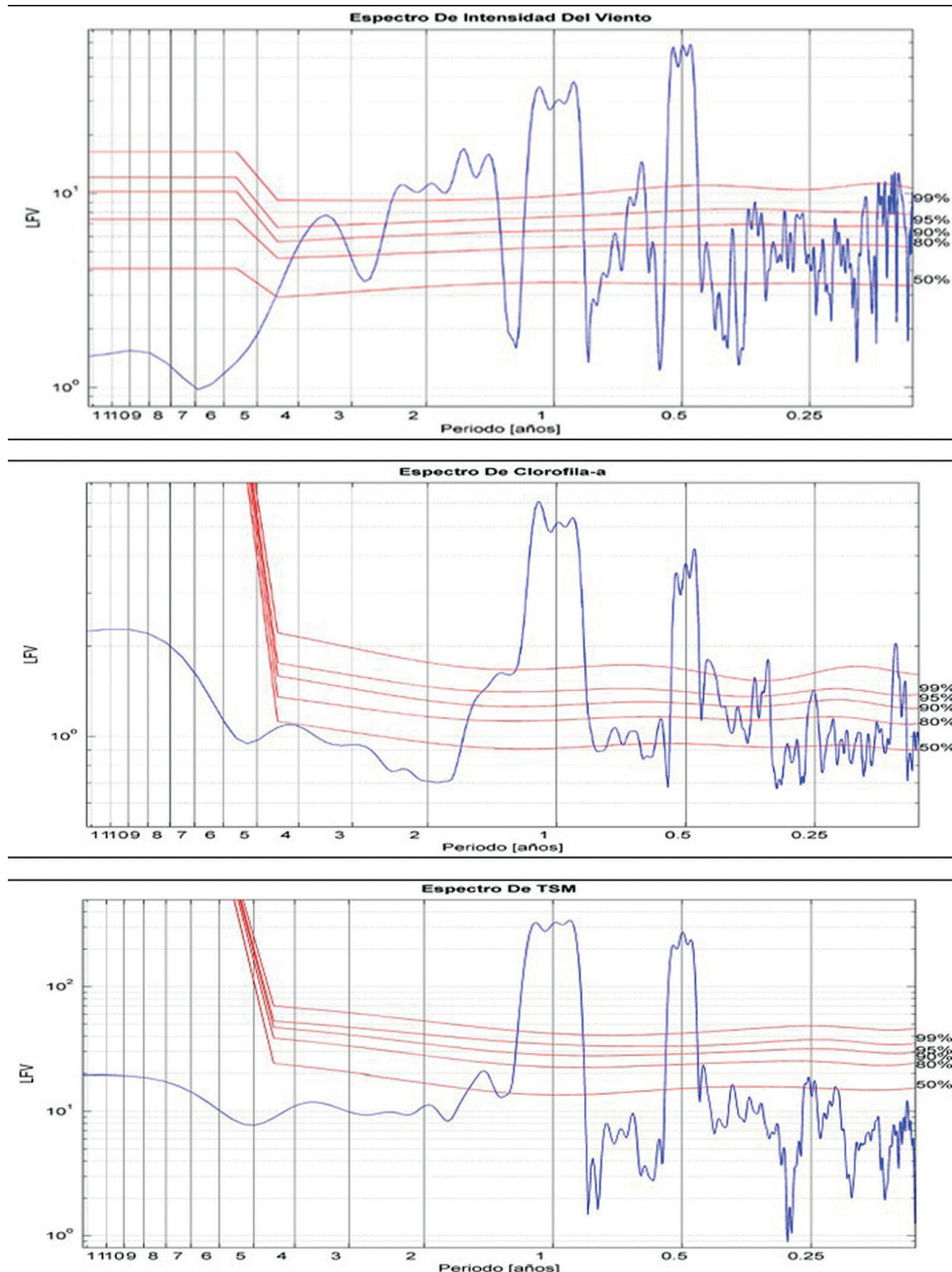


Figura 4. Espectros de varianza local fraccional para los parámetros analizados dentro del sistema de surgencia de la península de La Guajira.

El análisis comparativo de los espectros de clorofila-a, temperatura superficial del mar y viento mostró que la mayor parte de la variabilidad en cada uno de estos parámetros, se encuentra asociada a la frecuencia anual y semianual, frecuencias dominantes dentro de la dinámica del sistema de afloramiento. En el caso de clorofila-a y TSM la frecuencia anual demuestra una ligera preponderancia sobre la frecuencia semianual, mientras que el espectro de viento sugiere que la frecuencia de 2 ciclos/año ($T = 0.5$ años) es más importante que la oscilación anual.

La clorofila-a y la TSM no muestran frecuencias importantes en la banda interanual, mientras que en el viento sobresalen las frecuencias 0.2898 ciclos/año ($T = 3.5$ años), probablemente asociada con eventos como El Niño y 0.6131 ciclos/año ($T = 1.6$ años), que puede estar relacionada con las oscilaciones atmosféricas quasi-bienales.

En la banda intraestacional (periodo entre 30 y 90 días) del espectro de clorofila-a, la frecuencia 6.186 ciclos/año ($T = 59$ días) se observó significativa. La TSM no muestra frecuencias importantes en este rango. Al igual que en la

clorofila-a, en el viento se resalta la frecuencia 6.342 ciclos/año ($T = 57.6$ días).

No se observó ninguna frecuencia significativa en la banda secular, indicando que no existe tendencia de largo plazo en las series de tiempo de la región.

Caracterización de la variabilidad anual en el principal núcleo del sistema de surgencia de La Guajira

El mapa de varianza explicada para la clorofila-a (Figura 5a) muestra que existen tres zonas en las cuales la frecuencia correspondiente al ciclo anual explica más del 15 % de variabilidad; una zona ubicada al norte de Punta Gallinas (PG) (zona 1), otra entre Punta Gallinas y cabo de La Vela (CV) (zona 2), y una última localizada al oeste de Puerto Bolívar (PB) (zona 3). En términos generales, estas zonas son reducidas y bien delimitadas. Entre la zona 1 y la zona 2 se observaron diferencias de fase de 50° , mientras que entre la zona 2 y la zona 3 se detectaron diferencias de fase de 100° , sin identificarse patrones espaciales definidos en ninguno de los dos casos (Figura 5b).

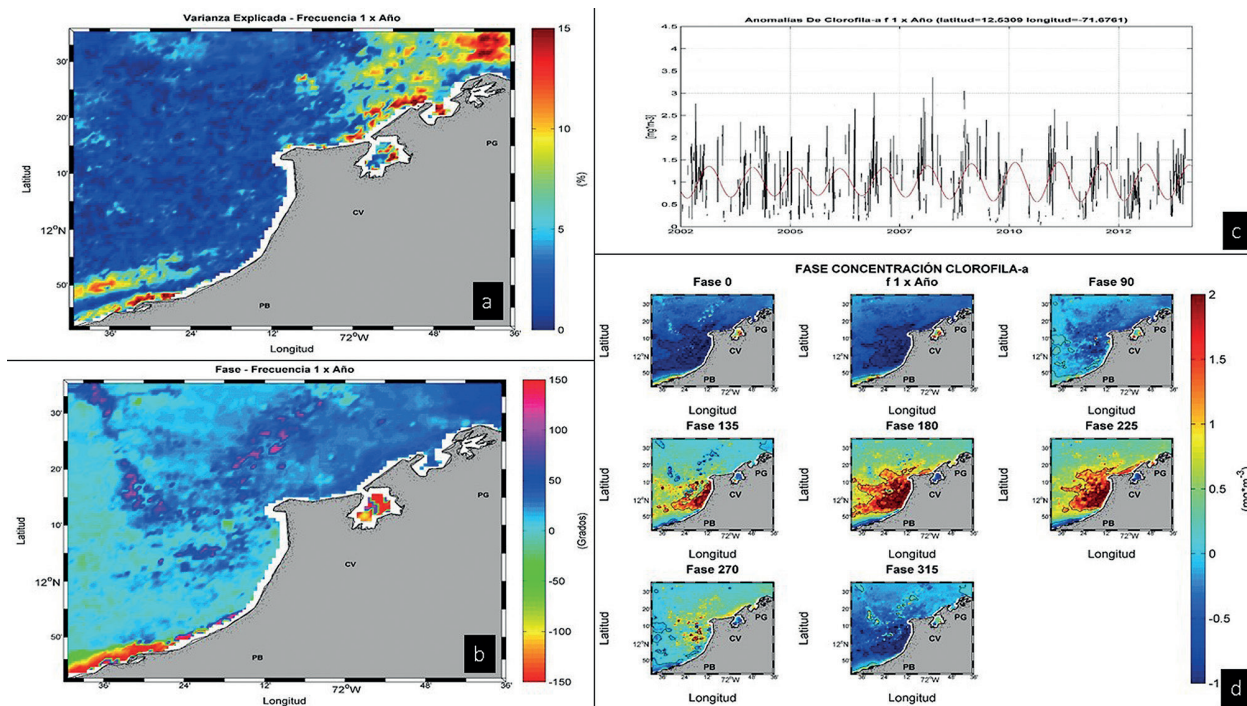


Figura 5. Imágenes de clorofila-a correspondientes a la frecuencia anual. Cada grado equivale a 1.015 días, la fecha de inicio de la serie es 4 de julio de 2002.

La reconstrucción armónica de la frecuencia anual de clorofila-a (Figura 5c) guarda una estrecha coherencia con la serie original, reafirmando su importancia dentro del comportamiento de la variable. Se notó un aumento de la amplitud entre los años 2008 y 2011, posiblemente por el efecto de la variabilidad interanual de La Niña que, eventualmente, podría generar un aumento inusual en la concentración de clorofila-a.

No se detectó ningún patrón de propagación en el análisis de la secuencia de imágenes del ciclo canónico (Figura 5d), pero se observó un patrón estacionario con valores máximos al oeste de cabo de La Vela entre los 135° y 225° de fase, es decir entre los 140 y 234 días a partir de la fecha de inicio de la serie (4 de julio de 2002), lo que indica que entre octubre y enero se presenta el máximo anual. A partir de febrero la intensidad de la clorofila-a en la frecuencia anual disminuye, alcanzando los mínimos hacia la mitad del año, correspondiente a la fase 0° .

El campo de varianza explicada para la TSM (Figura 6a) muestra que en el suroccidente de la región de estudio el ciclo anual explica el $\sim 60\%$ de la variabilidad. Desde Puerto Bolívar (PB) y hacia el norte la varianza disminuye alcanzando valores de 50% en la esquina nororiental del área de estudio; la distribución del campo sugiere una

intervención importante de la frecuencia anual en la TSM.

Se apreciaron diferencias de fase pequeñas del orden de los 10 días entre Puerto Bolívar y Punta Gallinas, con un aparente patrón de propagación en sentido sur-norte que se configura muy bien latitudinalmente (Figura 6b).

La reconstrucción armónica de la frecuencia anual (Figura 6c) muestra buena coherencia con la serie original, evidenciando la dominancia de esta oscilación en el comportamiento de la variable.

La reconstrucción espacial no permitió identificar ningún patrón de propagación (Figura 6d), pero se observó claramente un enfriamiento en las aguas del área de estudio que comienza en la fase 135° (141 días desde el inicio de la serie) y alcanza los valores mínimos en la fase 225 (234 días desde el inicio de la serie), a partir de la cual empieza a aumentar nuevamente la temperatura. Al igual que en el caso de la clorofila-a, las menores temperaturas se obtienen entre octubre y enero, con anomalías negativas de 2°C ; mientras que los valores máximos se observaron entre julio y agosto, con valores de TSM 2.5°C por encima del promedio.

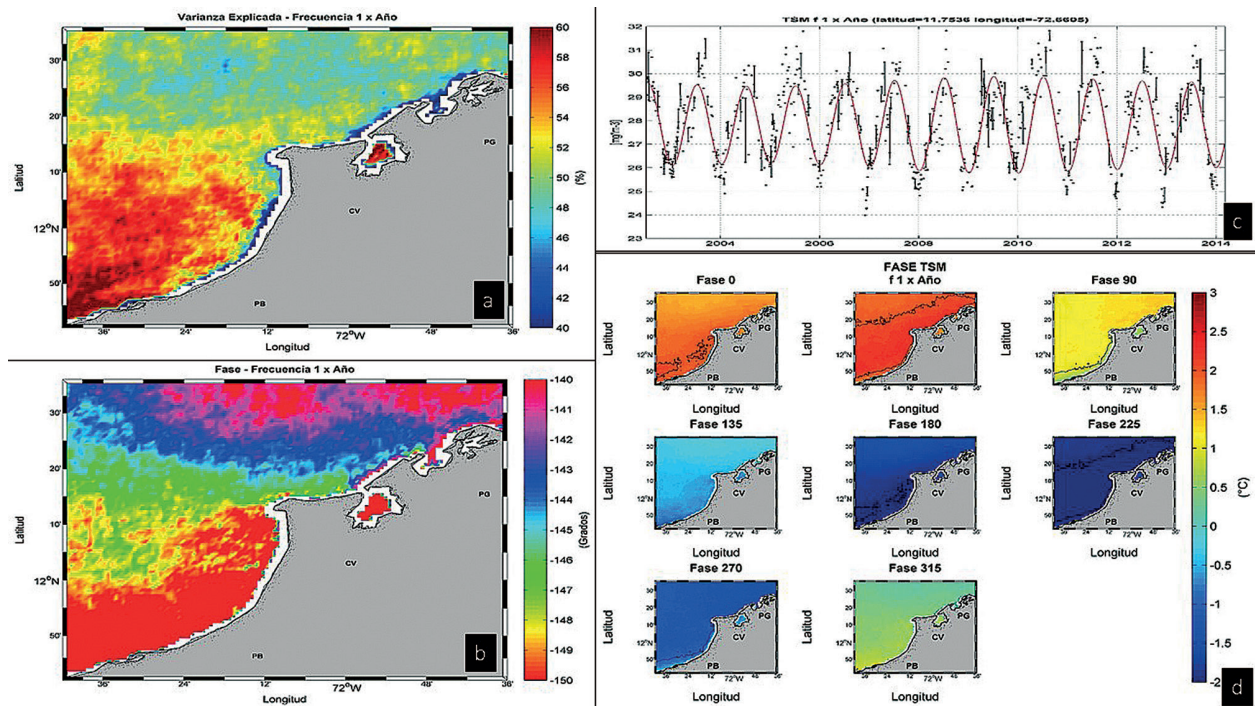


Figura 6. Imágenes de TSM correspondientes a la frecuencia anual. Cada grado equivale a 1.015 días, la serie inicia el 24 de junio de 2002.

La varianza explicada para el viento entre Manaure (M) y Punta Gallinas (PG) que corresponde al principal núcleo de surgencia en el área de estudio, oscila entre el 5 y el 9 % (Figura 7a). El área con los valores más altos se encontró bien diferenciada entre Barranquilla y Cartagena, pero no se consideró para la reconstrucción armónica de la frecuencia anual, por estar fuera del principal núcleo de surgencia identificado. El campo de fase muestra diferencias de $\sim 50^\circ$ entre Riohacha y la zona marítima al norte de Punta Gallinas (PG) (Figura 7b) que podrían estar relacionadas con la Oscilación Madden-Julian, la cual se caracteriza por tener un periodo similar.

La reconstrucción armónica para el punto en posición latitud 12.125°N y longitud 72.375°W permitió observar buena coherencia con la serie original; no se detectaron cambios en la amplitud de la señal (Figura 7c). Se apreció una buena coherencia entre la distribución de los datos originales y la frecuencia anual reconstruida.

Se detectó un patrón de propagación en sentido suroeste-noreste de la intensidad del viento que crece progresivamente desde la fase 0° (enero), alcanza los máximos para el área de estudio en la fase 90° (marzo) y registra los mínimos en la fase 270° (septiembre) (Figura 7d).

Considerando el sistema de surgencia de la península de La Guajira como una interacción compleja entre los tres parámetros de estudio (clorofila-a, TSM y campo de viento), se encontró una perfecta relación inversa entre la clorofila-a y la TSM a partir de la comparación entre los resultados encontrados y los campos promedio calculados (Figura 8). Se observó que temperaturas bajas en la superficie del mar coinciden con los máximos de clorofila-a. Se detectó la mayor actividad durante diciembre y enero, demostrándose la importancia de la frecuencia anual dentro de los dos parámetros, como lo mostró el espectro de varianza para cada uno de ellos.

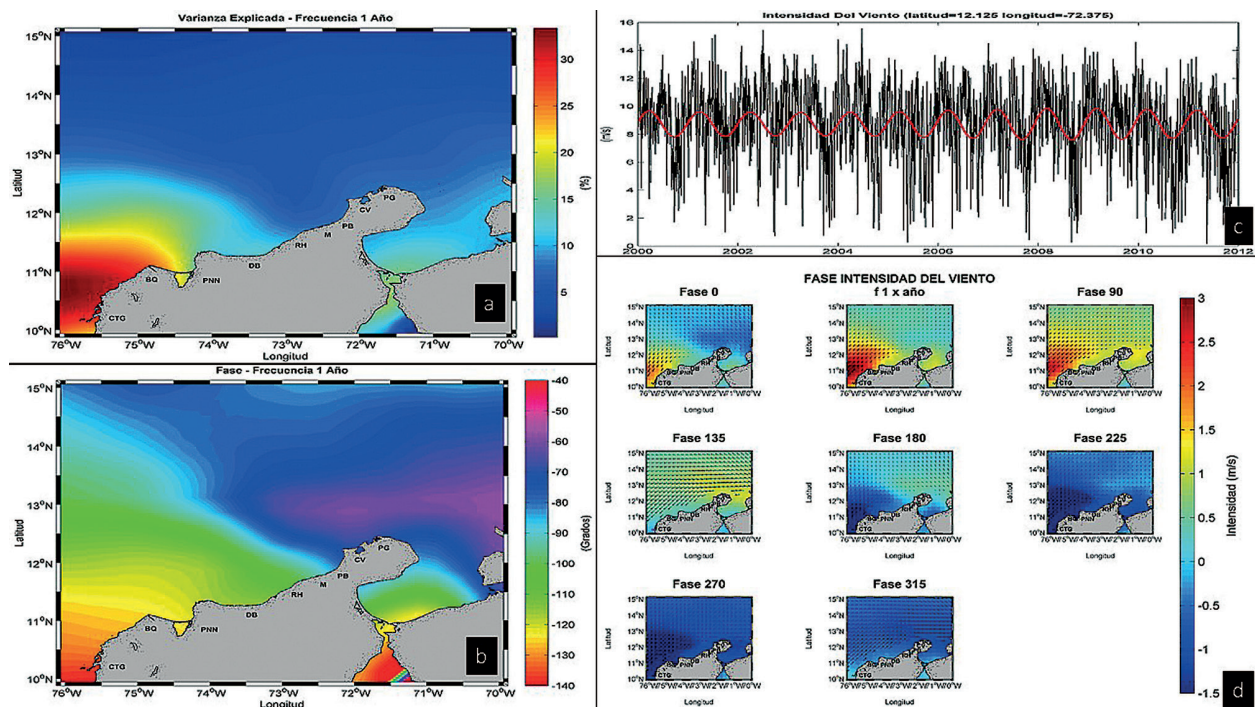


Figura 7. Imágenes del campo de viento correspondientes a la frecuencia anual. Cada grado equivale a 1.015 días, la serie inicia el 1 de enero de 2000.

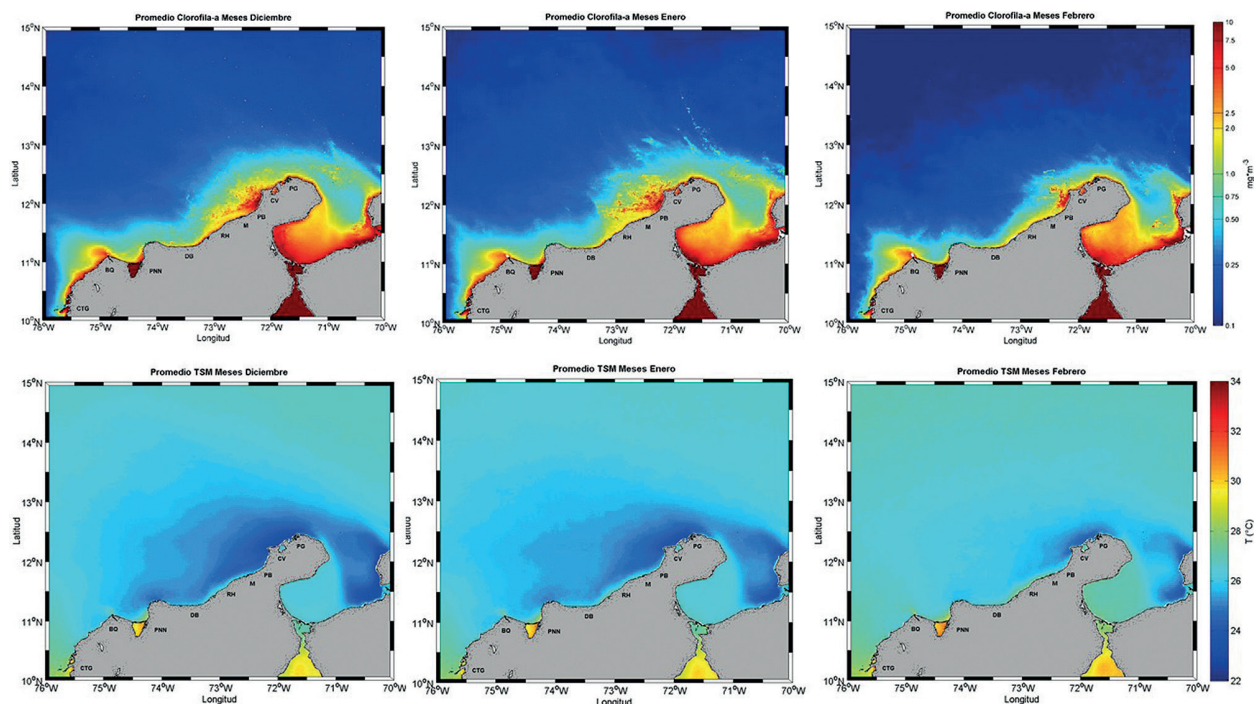


Figura 8. Campos promedio mensuales (diciembre, enero, febrero) calculados para toda la serie de clorofila-a y TSM.

Los resultados obtenidos para la frecuencia anual del viento sugieren máximas anomalías en la intensidad durante marzo, altura del principal núcleo de surgencia; sin embargo, los campos promedio indican un máximo entre enero y febrero (Figura 9), por lo cual se confirma que la frecuencia anual no es la dominante, de forma coherente con lo explicado por el espectro de varianza local fraccional del viento.

El campo promedio sugiere que la intensidad del viento se mantiene prácticamente constante sobre el borde costero. Hacia la zona de mar abierto se nota un incremento en la intensidad durante febrero. El afloramiento es más activo durante diciembre y enero (Figura 9), por lo que se sugiere que existen variaciones de dirección importantes en otras frecuencias que reducen el transporte e inhiben en parte el bombeo de Ekman, evitando que durante el segundo mes del año se presenten máximos de clorofila.

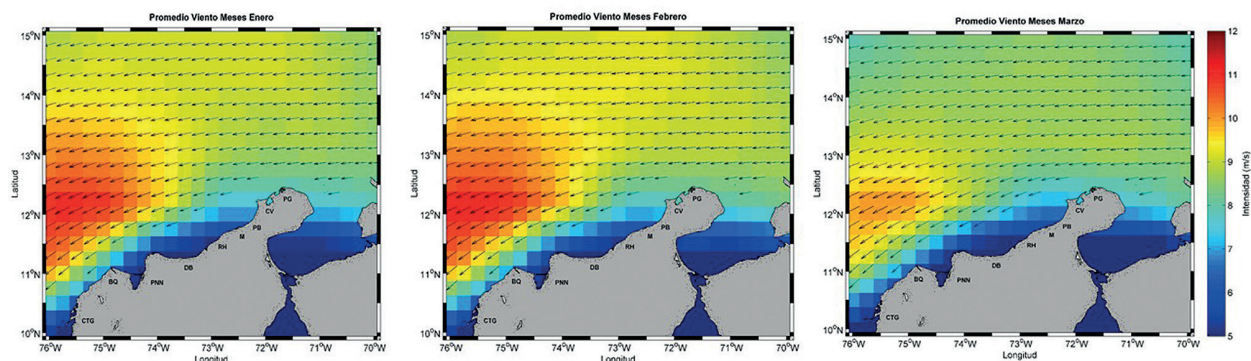


Figura 9. Campos promedio mensuales (diciembre, enero, febrero) de intensidad y dirección del viento calculados para toda la serie.

Caracterización de la variabilidad semianual en el principal núcleo del sistema de surgencia de La Guajira

El mapa de varianza explicada de clorofila-a (Figura 10a) permitió identificar dos pequeñas áreas con valores cercanos al 10 %, una al norte de Punta Gallinas (PG) y otra hacia el oeste de Puerto Bolívar (PB). En el resto del área se observaron valores entre 1 y 3 %. El rango de valores del campo de varianza explicada sugiere una menor interferencia de esta oscilación sobre el comportamiento de la variable en estudio que la explicada por la frecuencia anual.

Se encontraron diferencias de fase en la clorofila-a de 50° (~ 26 días) entre el área más activa de surgencia al frente de cabo de La Vela y la zona septentrional de la península (Figura 10b).

No se detectó ningún patrón de propagación en la frecuencia semianual. Se identificó un patrón estacionario en el principal núcleo de surgencia del sistema (Figura 10d), que alcanza sus máximos valores hacia el final del ciclo en la fase 315° (junio y diciembre) y se mantiene con una ligera disminución hasta la fase 0° (enero y junio). La entrada en resonancia de la frecuencia anual, con la frecuencia semianual hacia diciembre y enero podrían explicar los máximos de clorofila en este periodo del año.

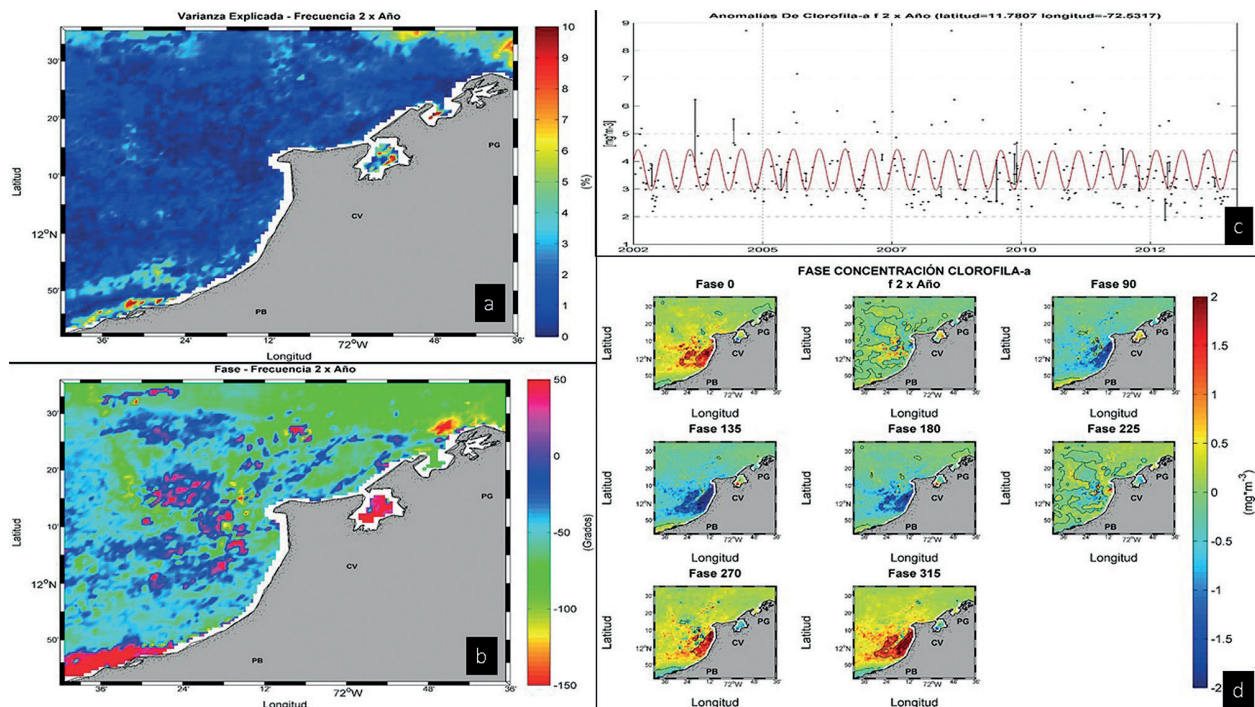


Figura 10. Imágenes de clorofila-a correspondientes a la frecuencia semianual. Cada grado equivale a 0.51 días, la fecha de inicio de la serie es 4 de julio de 2002.

El campo de varianza explicada calculado para la TSM muestra para gran parte de la región de estudio, valores por encima del 20 % (Figura 11a). Los máximos se encontraron alrededor de la latitud $12.6309^\circ N$ y longitud $72.2005^\circ W$, al noroeste de cabo de La Vela, mientras que los mínimos se localizaron al suroeste de la región de estudio.

Se encontraron diferencias de fase de $\sim 15^\circ$ (7.65 días) entre la señal identificada sobre el borde costero (verde-azul) a la altura de Puerto Bolívar, y la que se extiende hacia el suroeste desde cabo de La Vela (color fucsia) (Figura 11b). El campo de fase sugiere una propagación de la señal en dirección noroeste, coherente con el comportamiento de las aguas subsuperficiales

que ascienden a la superficie y, posteriormente, se desplazan en sentido paralelo a la costa.

Se observó buena coherencia entre el patrón armónico reconstruido para la frecuencia semianual de la TSM y la serie de datos original (Figura 11c), identificándose un estrechamiento en la amplitud hacia la mitad del periodo de muestreo (año 2008), lo que indica valores de temperatura más bajos en esta época que los observados en los extremos de la serie (años 2002 y 2014).

No se detectó ningún patrón de propagación en la reconstrucción espacial de la frecuencia

semianual de TSM (Figura 11d). Se observó un patrón estacionario coherente con el comportamiento de la clorofila-a, que indica un enfriamiento a partir de la fase 270°, con valores mínimos de temperatura en la fase 315° y que, posteriormente, aumenta levemente hasta la fase 0°, sin dejar de ser anomalías frías. El calentamiento de las aguas inicia en la fase 45°, alcanzando las anomalías más altas en la fase 135°. Los resultados encontrados coinciden con lo observado en los campos promedio, mostrando el mayor enfriamiento hacia diciembre y enero, y una leve disminución de la temperatura durante mayo y junio.

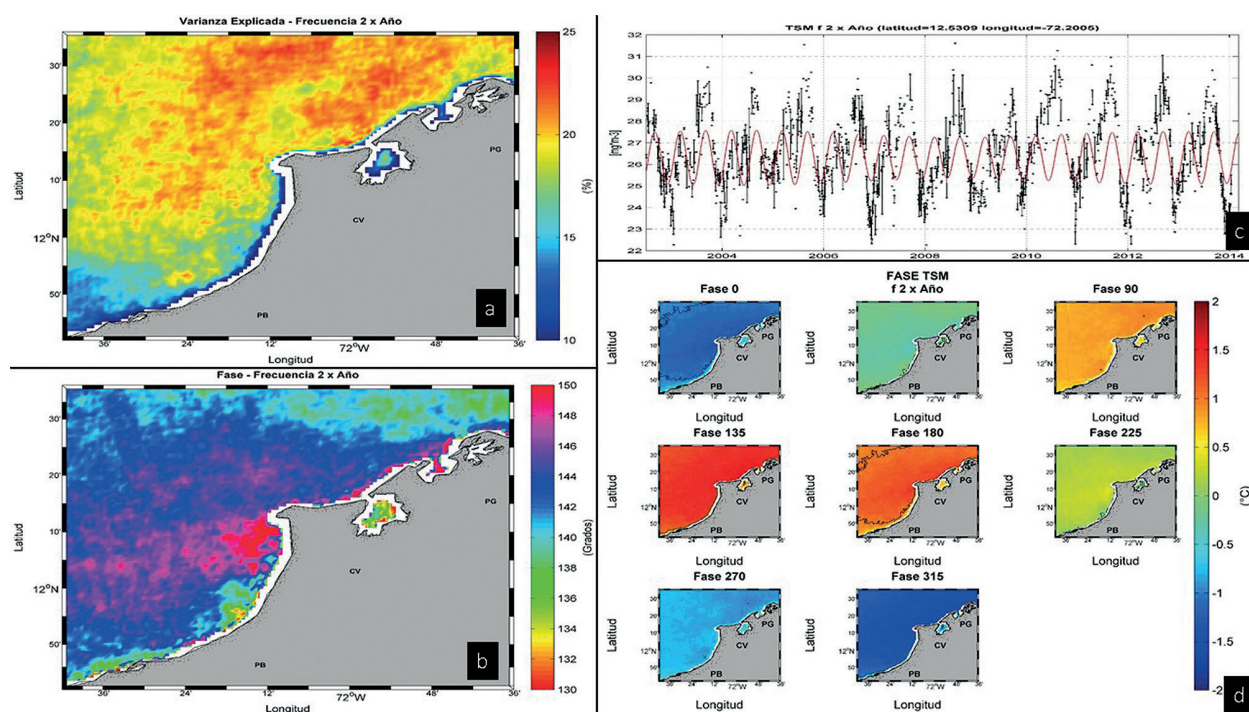


Figura 11. Imágenes de TSM correspondientes a la frecuencia semianual. Cada grado equivale a 0.51 días, la fecha de inicio de la serie es 24 de junio de 2002

La varianza explicada del viento para la mayor parte del área de estudio oscila entre 8 y 14%, observándose valores altos en el principal núcleo del sistema de surgencia, ubicado entre cabo de La Vela (CV) y Puerto Bolívar (PB) con valores de 11 % (Figura 12a). Sobre el borde costero desde Riohacha (RH) hacia el suroeste, y desde Punta Gallinas (PG) hacia el este se observaron valores de varianza explicada cercanos al 9 %. Los máximos valores

se localizaron en la esquina noroccidental del área de estudio.

Se detectaron señales con diferencias de fase de $\sim 20^\circ$ (10 días) entre Manaure (M) y Barranquilla (BQ), y de alrededor de 5 días entre la señal litoral (color amarillo), a la altura de cabo de La Vela (CV), y la observada en el centro de la cuenca del Caribe (color naranja) al noroeste de CV (Figura 12b).

Se observa muy buena correspondencia entre la señal semianual reconstruida y la serie original, explicando la dominancia mostrada por el espectro de varianza local fraccional del viento (Figura 12c).

Se identificaron los valores máximos de anomalías al inicio del ciclo entre la fase 0° y 45° (Figura 12d), lo que explica la fortaleza del sistema de surgencia al comienzo del año, con anomalías positivas de ~2 (m/s); los mínimos se observaron entre la fase 180° y 225°, con un cambio de dirección de NE a E, explicando por qué los máximos de la frecuencia anual observados

en marzo no generan actividad importante dentro del sistema de afloramiento. Se encontró un patrón de propagación en sentido este-oeste, contrario a lo observado en la oscilación anual.

Se detectó un desfase del orden de pocos días entre la reconstrucción espacial de patrón semianual y los campos promedio, el cual puede asociarse al error inherente del método en el proceso de estimación; no obstante, es una fortaleza del MTM-SVD la capacidad de detectar la oscilación semianual dentro del sistema y describir el patrón espacial de propagación correspondiente.

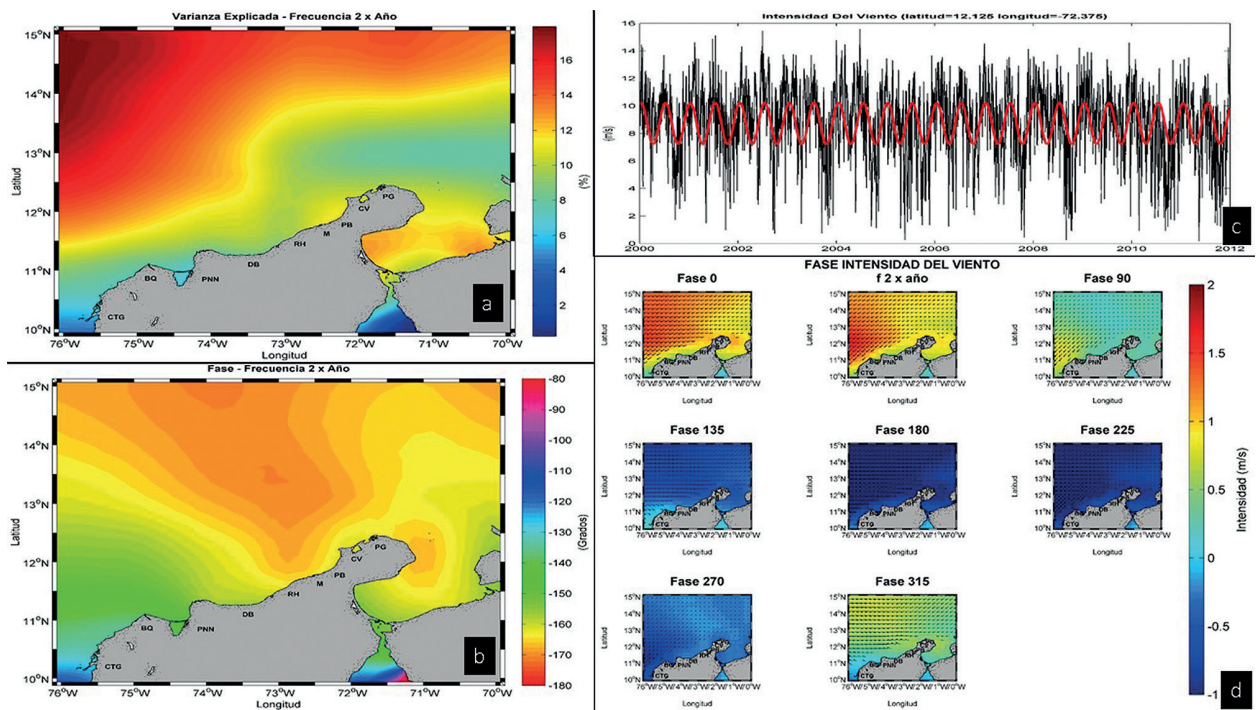


Figura 12. Imágenes de viento correspondientes a la frecuencia semianual. Cada grado equivale a 0.51 días, la fecha de inicio de la serie es 1 de enero de 2000.

El análisis de la frecuencia anual y semianual, permitió concluir que se presentan dos épocas de actividad importante dentro del sistema de surgencia y fácilmente identificables dentro de los campos promedio, debido a la dominancia que ejercen sobre las variables asociadas al afloramiento. La primera época y más representativa por la intensidad del fenómeno es la que desarrolla durante diciembre y enero

(Figura 11), y la segunda temporada, mucho menos energética, se presenta durante mayo y junio (Figura 13).

El campo promedio del viento calculado para junio y julio (Figura 14) indica un incremento en la intensidad acorde con los resultados obtenidos en la reconstrucción de la frecuencia semianual. Este aumento se produce por el desplazamiento

hacia el sur de la alta presión de las Bermudas, que comprime el campo isobárico que caracteriza la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT), ocasionando la intensificación de los vientos. Para esta época del año la ZCIT se encuentra sobre la península de La Guajira, generando

anomalías con dirección este, como se observa en la fase 315° del viento (frecuencia semianual), que modifica la trayectoria paralela a la costa y en consecuencia la reacción del sistema de surgencia frente a las condiciones forzantes del viento es bastante débil.

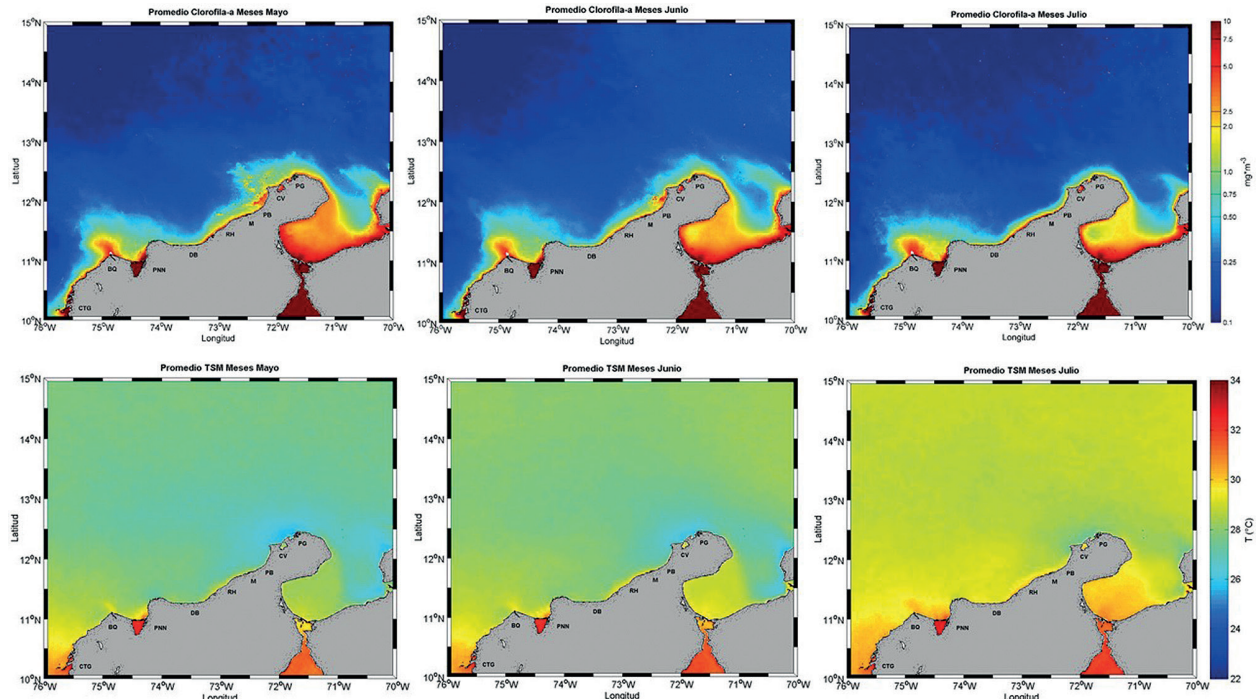


Figura 13. Campos promedio mensuales (mayo, junio y julio) calculados para toda la serie de clorofila-a y TSM.

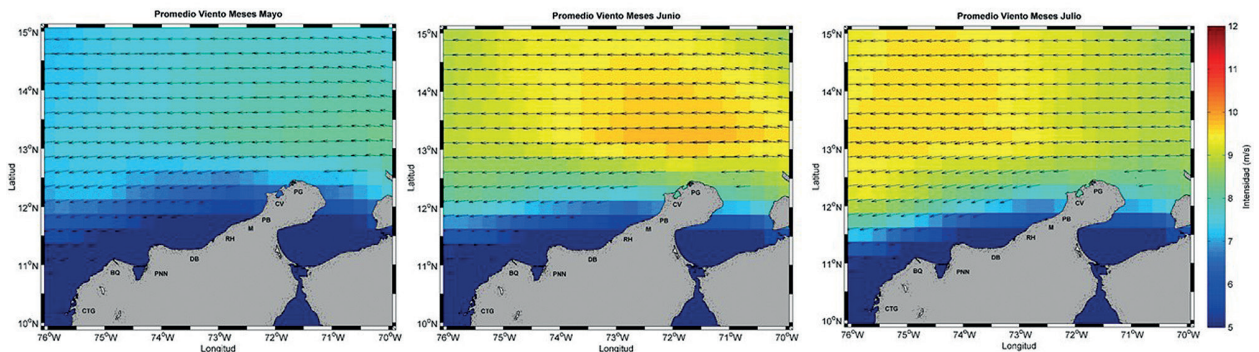


Figura 14. Campos promedio mensuales (mayo, junio y julio) calculados para toda la serie de viento.

Caracterización de la variabilidad intraestacional en el principal núcleo del sistema de surgencia de La Guajira

La variabilidad intraestacional del sistema de afloramiento de la península de La Guajira es menos intensa que la variabilidad anual y semianual, por lo que se dificultó observarla con claridad en el análisis detallado de los campos promedio.

A partir de la construcción del espectro de varianza local fraccional se identificaron frecuencias importantes entre los 30 y 90 días para la clorofila-a (6.186 ciclos/año) y para el viento (6.342 ciclos/año).

El espectro de TSM sugiere una respuesta muy leve en la misma banda de frecuencia, por debajo del cuantil del 50 %, razón por la cual no se consideró para el análisis.

El mapa de varianza explicada para clorofila-a indica valores de ~3% al oeste y noroeste de cabo de La Vela, y al noroeste de Punta Gallinas

(PG) (Figura 15a); mientras que la mayor parte de la región de estudio muestra valores entre 0 y 1.5 %, indicando una interferencia débil de la oscilación intraestacional en el comportamiento del sistema de surgencia.

El campo de fase de la frecuencia intraestacional para clorofila-a indica diferencias de ~70° (11 días) entre la señal litoral (verde) y la zona de aguas abiertas (naranja) (Figura 15b).

No se observó coherencia marcada entre la reconstrucción armónica y los datos originales (Figura 15c). Se identificó un aumento de la amplitud de la señal entre 2008 y 2012, asociado probablemente a eventos de oscilación interanual como La Niña.

No se detectó ningún patrón de propagación en la reconstrucción espacial de la frecuencia intraestacional de clorofila-a. Se encontró un patrón estacionario al oeste del cabo de La Vela en el centro del principal núcleo de surgencia (Figura 15d). Se observaron anomalías positivas entre la fase 315° y la fase 90°, detectando las máximas en la fase 45° (7 días) y las mínimas en la fase 225° (36 días).

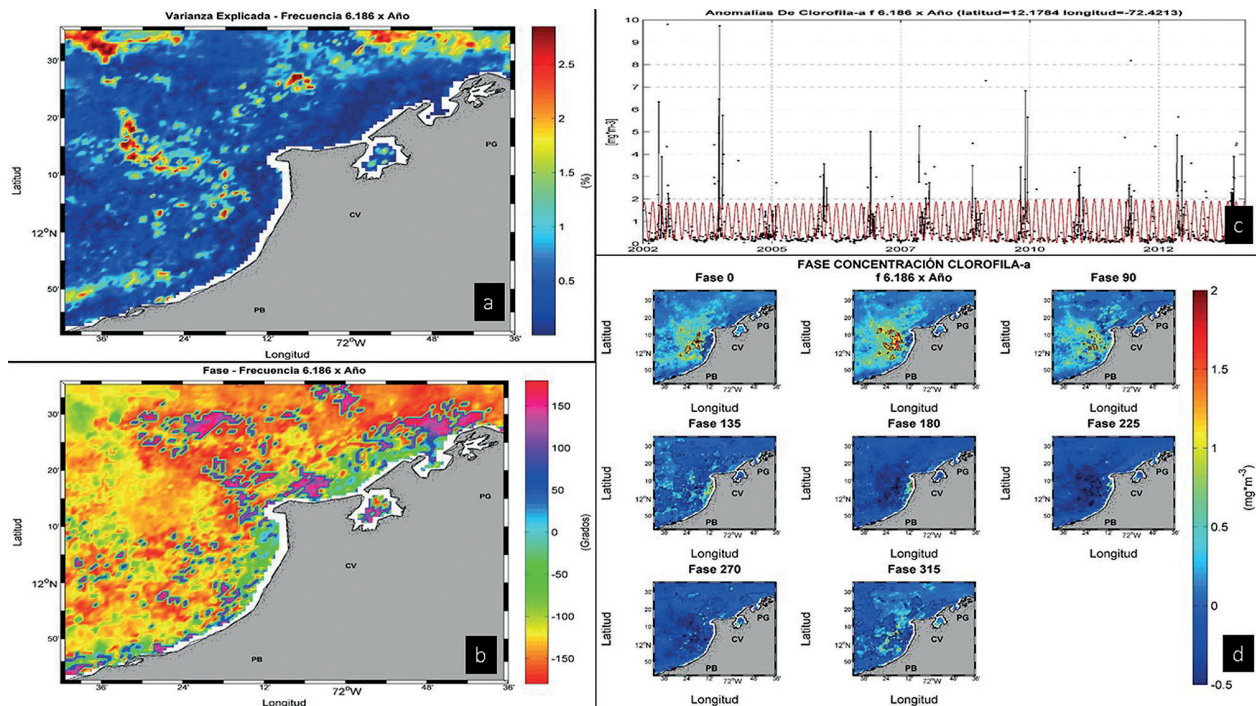


Figura 15. Imágenes de clorofila-a correspondientes a la frecuencia intraestacional (6.186 ciclos/año). Cada grado equivale a 0.16 días, la fecha de inicio de la serie es 4 de julio de 2002.

La identificación del patrón intraestacional en las imágenes de campo promedio de la serie de clorofila no es tan clara como en el caso de las frecuencias anuales y semianuales, debido a que las señales dominantes enmascaran la oscilación intraestacional.

A partir de una observación minuciosa se estableció una relación entre el campo

promedio de clorofila-a calculado para julio y agosto (Figura 16), y la frecuencia intraestacional, encontrándose en agosto menores valores de concentración en el sector sugerido por la reconstrucción espacial, al oeste de cabo de La Vela, en perfecta coherencia con los resultados obtenidos clorofila-a.

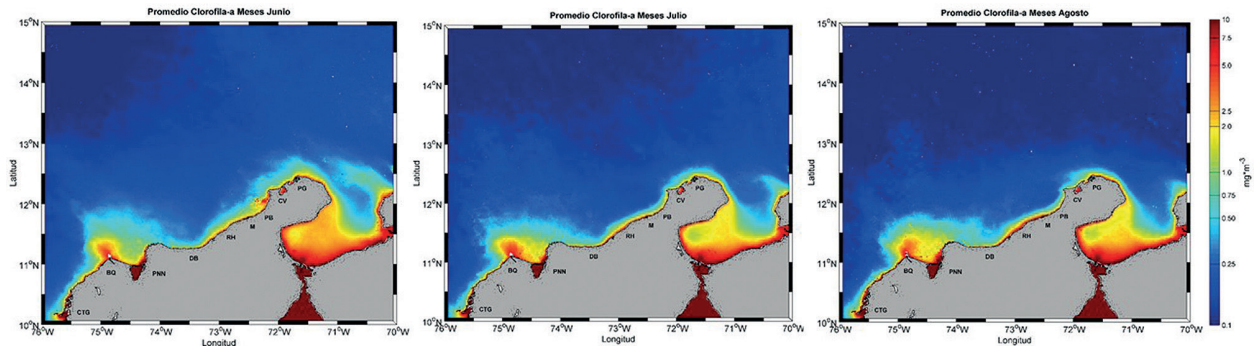


Figura 16. Campos promedio mensuales (junio, julio y agosto) calculados para toda la serie de clorofila-a.

Para el viento se analizó la frecuencia 6.342 ciclos/año, correspondiente al pico indicado en el espectro para el mismo ancho de banda relacionado con la frecuencia intraestacional de clorofila-a (6.186 ciclos/año). El campo de varianza calculado muestra valores muy bajos en el área del sistema de surgencia (~ 0.1), sugiriendo una baja interferencia de esta frecuencia en la dinámica general del campo de vientos sobre el área de estudio (Figura 17a). Los valores más altos de varianza explicada se observaron al suroccidente de Barranquilla (BQ), con cerca de 0.30 %, y al noreste de Punta Gallinas (PG), con 0.20%. Se encontraron diferencias de fase de 40° (6.5 días) entre la esquina noreste del área de estudio y la zona de surgencia, sugiriendo un desplazamiento en sentido norte-sur (Figura 17b).

La reconstrucción armónica reveló dos áreas de aumento en la amplitud de la señal entre el 2002–2004 y 2008–2010, reaccionando a algún fenómeno atmosférico que no se logró establecer con claridad (Figura 17c).

Se identificó un patrón de propagación este-oeste, con anomalías en la dirección que rotan en sentido contrario a las manecillas del reloj (Figura 17d). Las menores anomalías en

la intensidad se presentan entre la fase 0° y la fase 90° , permitiendo una leve actividad dentro del sistema de surgencia que puede asociarse con la concentración de clorofila-a (Figura 15d). A partir de la fase 135° empiezan a aumentar las anomalías en intensidad, y las anomalías en dirección rotan adoptando patrones que afectan la dirección del campo promedio, inhibiendo casi por completo el afloramiento en la fase 270° .

Caracterización de la variabilidad interanual en el principal núcleo del sistema de surgencia de La Guajira

El análisis espectral de varianza fraccional para cada una de las variables de estudio, no evidenció ninguna frecuencia interanual por encima del intervalo de 99 % de confianza, excepto en el viento, que se destaca un pico que corresponde a la frecuencia cuasi-bienal, que se analiza en detalle posteriormente.

Teniendo en cuenta el impacto que los eventos ENOS (Figura 18) puedan tener sobre el sistema de afloramiento, se analizó la frecuencia 0.2898 ciclos/año ($T = 3.45$ años) del campo de viento, siendo el único parámetro de los tres

considerados en la presente investigación que mostró una concentración de energía importante en la banda interanual, por encima del cuantil del 95 %. El espectro de clorofila-a no mostró

ninguna respuesta en la misma frecuencia, y el espectro de temperatura indicó una señal tenue en la misma banda, pero muy por debajo del intervalo del 50 % de confianza.

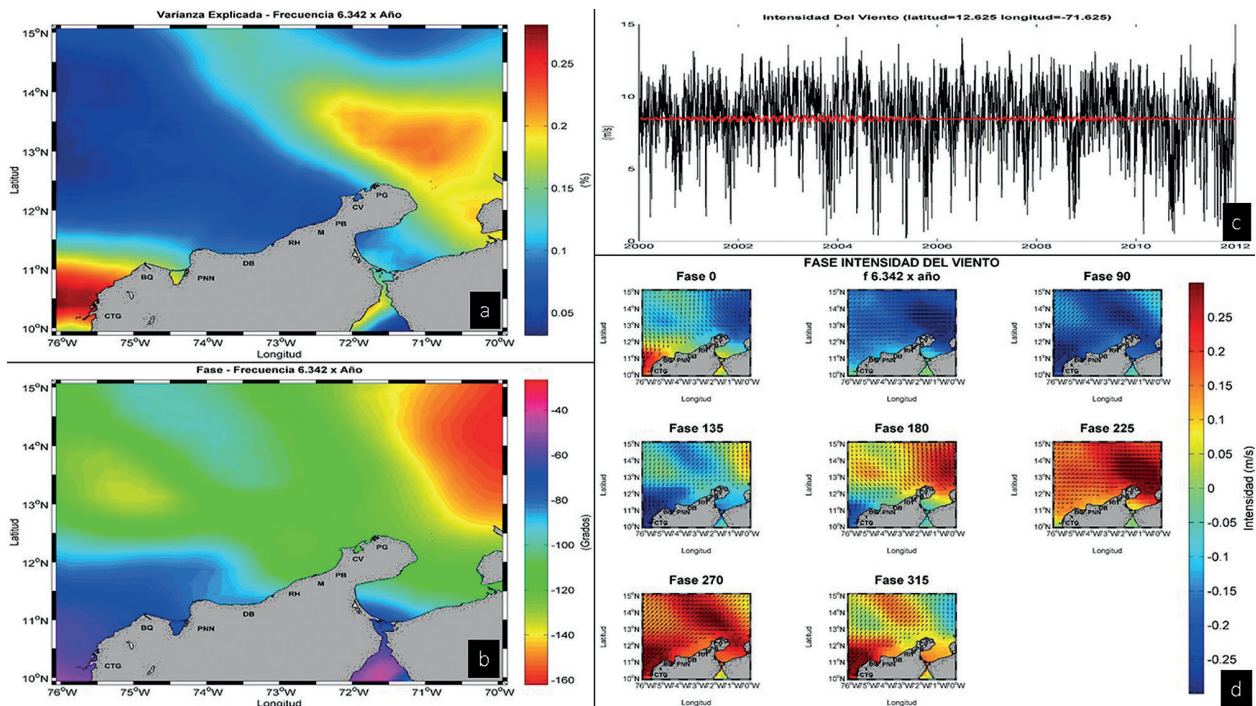


Figura 17. Imágenes de viento correspondientes a la frecuencia intraestacional (6.342 ciclos/año). Cada grado equivale a 0.16 días, la fecha de inicio de la serie es 1 de enero de 2000.

El método calculó el campo de varianza explicada para el viento, encontrando valores máximos entre 1.2 y 2 % en la zona norte de la península de La Guajira, mientras que en la mayor parte de la región, la varianza del viento osciló entre 0 y 0.8 % (Figura 19a). Se observaron diferencias de fase de $\sim 15^\circ$ entre el sector norte del área de estudio y el área de afloramiento (Figura 19b).

En la reconstrucción armónica los mínimos de amplitud coincidieron con los eventos El Niño 2002-2003 y 2005, con un retraso de aproximadamente cinco meses. Los eventos El Niño 2007 y 2010 no se identificaron claramente (Figura 19c). La serie original del campo de viento mostró registros de intensidades bajas para todos los eventos El Niño (Figura 4-16c), conservando el retraso de la señal anteriormente mencionado. Se encontraron coincidencias

de los valores altos con la ocurrencia de los eventos La Niña 2000, 2006 y 2009, sugiriendo una interferencia de este tipo de eventos interanuales sobre el sistema de surgencia, evaluada en $\sim \pm 0.5$ (m/s), dependiendo del signo de las anomalías del Índice de Oscilación Sur. La reconstrucción espacial mostró un incremento en la intensidad del viento en el inicio del ciclo (fase 0°) y hacia el final del ciclo (fase 315° , $T = 3$ años), con anomalías en la dirección que no deberían inhibir totalmente la surgencia, coincidiendo con los eventos La Niña 2000, cuasi-La Niña 2003, La Niña 2006 y La Niña 2009 (Figura 4-16d). Las anomalías negativas asociadas con la disminución en la intensidad del viento son más evidentes entre la fase 135° ($T = 1.30$ años) y 180° ($T = 1.72$ años), describiendo muy bien casi todos los periodos cálidos. El desarrollo de los eventos ENOS afecta el patrón atmosférico

de circulación normal en la península de La Guajira, sugiriendo una respuesta débil del sistema de afloramiento, orientada hacia un aumento de actividad o desaceleración, dependiendo el caso. El aporte de energía

de esta oscilación, con respecto a las principales frecuencias que dominan la dinámica del sistema de surgencia, es bajo, pero suficiente para influir en las condiciones altamente oligotróficas de la cuenca.

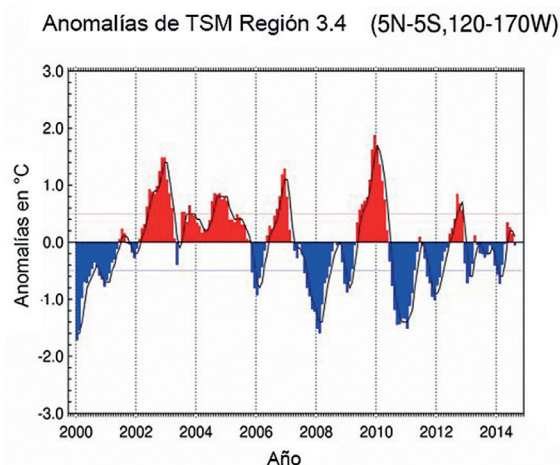


Figura 18. Índice de anomalías TSM. Valores entre -1 y +1 del índice El Niño 3.4, técnicamente es situación neutral [7].

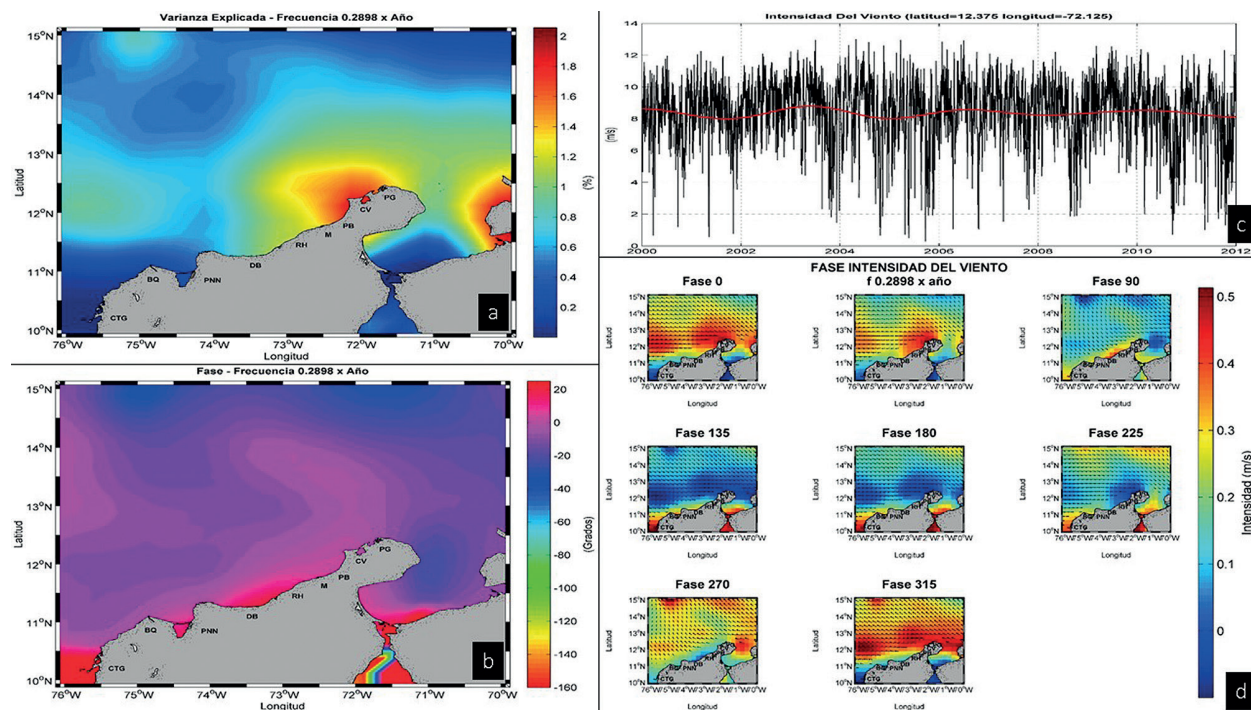


Figura 19. Imágenes de viento correspondientes a la frecuencia interanual (0.2898 ciclos/año). Cada grado equivale a 3.5 días, la fecha de inicio de la serie es 1 de enero de 2000.

Tendencia de clorofila-a, TSM y viento

Se calcularon los campos de pendiente para todos los parámetros, con el fin de identificar la tendencia de cada una de las variables durante el periodo de estudio y analizar la proyección del sistema.

En la clorofila-a (Figura 20) se encontró una tendencia positiva de $0.05 \text{ ((mg}\cdot\text{m}^{-3}) \cdot \text{año)}$ sobre el borde costero entre Santa Marta (PNN)

y cabo de La Vela (CV), mostrándose fuerte en el principal núcleo del sistema de surgencia. No se descarta el aporte de nutrientes por parte del río Magdalena y la ciénaga de Santa Marta hacia el norte de la península. A partir de las ~12 millas náuticas en este mismo sector se observó una tendencia a la baja que oscila entre $-0.01 \text{ ((mg}\cdot\text{m}^{-3}) \cdot \text{año)}$ y $-0.05 \text{ ((mg}\cdot\text{m}^{-3}) \cdot \text{año)}$. Entre cabo de La Vela y Punta Gallinas (PG) se observó una tendencia a la baja sobre el litoral de $-0.01 \text{ ((mg}\cdot\text{m}^{-3}) \cdot \text{año)}$. En general sobre el océano abierto no se identificó ninguna tendencia de largo plazo.

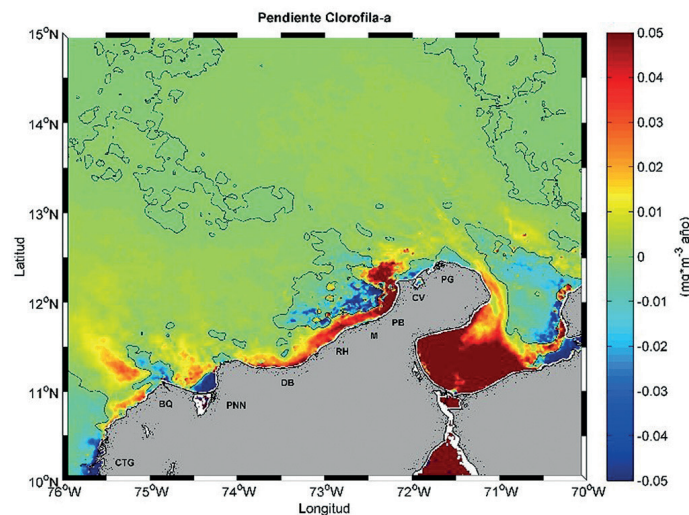


Figura 20. Pendiente de clorofila-a para toda la serie de datos 2002-2014.

La tendencia de la TSM (figura 21) sugiere una disminución de temperatura a razón de $-0.015 \text{ (}^{\circ}\text{C} \cdot \text{año)}$ en la zona de surgencia. Esta tendencia se proyecta hacia el noroeste de la zona de estudio, lo que implica la presencia de mecanismos físicos que se encargan de transportar aguas frías hacia el centro de la cuenca, como pueden ser los remolinos de mesoescala. Se detectó una tendencia al calentamiento en las regiones adyacentes a la influencia del sistema de surgencia, con valores de $0.03 \text{ (}^{\circ}\text{C} \cdot \text{año)}$, y que se infiere es lo que sucede hacia el centro de la cuenca donde la intervención de aguas frías es mínima. Se observó tendencia al calentamiento en la desembocadura del río Magdalena, la ciénaga de Santa Marta (PNN) y a lo largo del borde costero entre Dibulla (DB) y Punta Gallinas (PG). El campo de tendencia para la TSM sugiere que estas aguas cálidas podrían provenir del

aporte del río Magdalena y de la ciénaga de Santa Marta, que por la existencia de ondas atrapadas a la costa propagan aguas cálidas hacia el norte.

Con base en la tendencia de largo plazo para el campo de viento (Figura 22) se puede sugerir que la intensidad del viento está aumentando a razón de $0.07 \text{ (m/s} \cdot \text{año)}$ para gran parte del área de estudio, lo cual es coherente con las investigaciones acerca del calentamiento global, que indican un aumento en la fuerza de los vientos que repercute en la severidad de los fenómenos asociados, como huracanes, tormentas, frentes e incluso los sistemas de surgencia. Entre Dibulla (DB) y Manaure (M) se detectó un área con tendencia negativa de $-0.025 \text{ (m/s} \cdot \text{año)}$ que no se evidencia en el mapa de TSM, pero que podría coincidir con la tendencia negativa de clorofila-a en la misma zona.

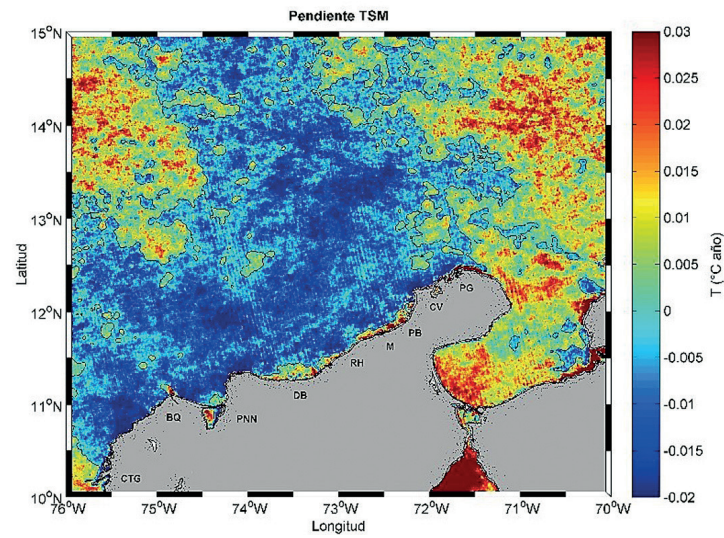


Figura 21. Pendiente de TSM para toda la serie de datos 2002-2014.

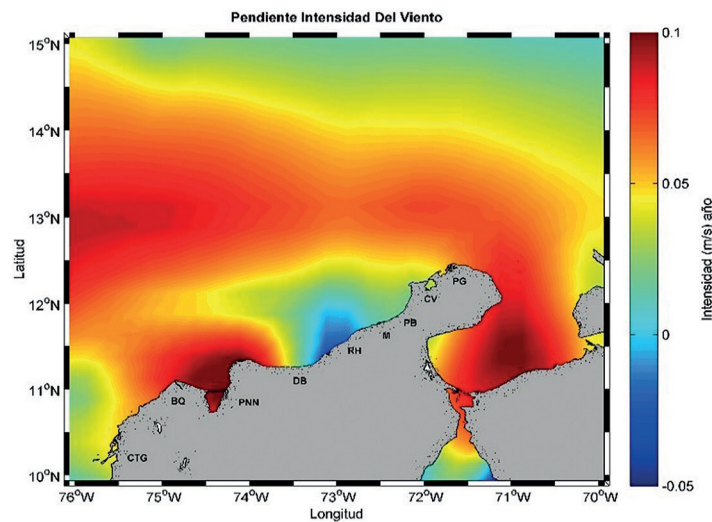


Figura 22. Pendiente para toda la serie del campo de viento 2000-2011.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se encontró que las frecuencias anuales y semianuales dominan la actividad del sistema, notándose en el campo de viento una mayor concentración de energía en la frecuencia semianual, mientras que para clorofila-a y TSM

la frecuencia anual se constituye en la más importante. El patrón espacial de la variabilidad anual de clorofila-a y TSM fue estacionario. Anomalías en la intensidad del viento mostraron en la frecuencia anual un patrón de propagación W-E y un patrón de propagación E-W en la frecuencia semianual.

Se identificó la interferencia de la frecuencia intraestacional ($f = 6.186$ ciclos/año) sobre el campo de clorofila-a, detectándose un patrón estacional entre Puerto Bolívar y cabo de La Vela. En el campo de viento se identificó un patrón en las anomalías de intensidad que se propaga en sentido E-W, favoreciendo la surgencia en ciertas fases del ciclo.

Se establecieron relaciones entre el comportamiento interanual del campo de viento ($f = 0.2898$ ciclos/año) y la ocurrencia de eventos El Niño y La Niña, observándose coherencia entre la respuesta del sistema y las alteraciones atmosféricas que se generan como consecuencia de la intervención del ENOS.

Se encontró una tendencia de largo plazo al enfriamiento de las aguas vinculadas con el sistema de afloramiento, probablemente asociada al incremento progresivo de la intensidad del viento. Se identificó tendencia positiva en la concentración de clorofila-a especialmente sobre el borde costero. No se logró establecer una tendencia clara en mar abierto.

Se comprobó la fortaleza del método MTM-SVD para identificar y reconstruir las principales frecuencias de variabilidad asociadas con el sistema de surgencia de la península de La Guajira, permitiendo la detección de patrones estacionarios o de propagación en cada una de las variables estudiadas.

Se recomienda profundizar el estudio aumentando la capacidad computacional para analizar toda la región del litoral norte colombiano, haciendo algunas exploraciones minuciosas en áreas como la desembocadura del río Magdalena y la ciénaga de Santa Marta, con el fin de establecer relaciones que puedan existir entre estos sistemas dinámicos.

Es conveniente observar la presencia, evolución y desarrollo de *eddies* de mesoescala e identificar el mecanismo de interacción existente entre el sistema de surgencia y los remolinos, el cual favorece la actividad biológica especialmente en el centro de la cuenca del Caribe.

Por último, se sugiere explorar la hipótesis de la presencia de ondas internas atrapadas a la costa en la región de la península de La Guajira y establecer su interferencia sobre el sistema de surgencia.

LITERATURA CITADA

- [1] Stewart R. Introduction To Physical Oceanography, Texas, USA, Texas A & M University, 2007.
- [2] Chávez, F. P., Messié, M. A comparison of Eastern Boundary Upwelling Ecosystems. Progress In Oceanography 83, 80-96. doi:10.1016/j.pocean.2009.07.032
- [3] Páramo, J., Correa, M., et al. "Evidencias de desacople físico-biológico en el sistema de surgencia en la Guajira, Caribe Colombiano", Revista de Biología Marina y Oceanografía, vol. 46 No. 3, 2011, pp.422.
- [4] Andrade, C. y Barton, E. "The Guajira Upwelling System", Continental Shelf Research, vol. 25, 2005, 1005 pp.
- [5] Bernal, G., Poveda, G., et al. "Patrones de Variabilidad de las Temperaturas Superficiales del Mar en la costa Caribe colombiana". Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, vol. 30, 2006, 206 pp.
- [6] Rueda-Roa, D. y Muller-Karger, F. "The southern Caribbean upwelling system: Sea surface temperature, wind forcing and chlorophyll concentration patterns", Deep-Sea Research I, 2013, 110 pp.
- [7] Correa, M. y Hormazabal S. "MultiTaper Method-Singular Value Decomposition (MTM-SVD): variabilidad espacio-frecuencia de las fluctuaciones del nivel del mar en el Pacífico suroriental", Latin American Journal of Aquatic Research, vol. 40, 2012.