

EVENTOS DE INTENSIFICACIÓN Y RELAJACIÓN DEL VIENTO EN LA BAHÍA DE SANTA MARTA (CARIBE COLOMBIANO): IMPLICACIONES OCEANOGRÁFICAS

Martha Lucero Bastidas Salamanca, Silvio Andrés Ordóñez Zúñiga y Constanza Ricaurte Villota

Grupo de investigación Geociencias, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras “José Benito Vives de Andrés”. Calle 25 No. 2-55 Sector Salguero, Santa Marta – Colombia, martha.bastidas@invemar.org.co, silvio.ordonez@invemar.org.co, constanza.ricaurte@invemar.org.co

RESUMEN

Los eventos de intensificación y relajación del viento traen consigo cambios en las componentes que pueden resultar favorables o no a la surgencia costera debido a que hay un cambio en la alineación de estos con respecto a la línea de costa. Con el objetivo de evaluar la dinámica oceanográfica en la bahía de Santa Marta durante 2014 y 2015 en respuesta a los cambios en la componente zonal y meridional del viento, se analizaron datos de vientos en un punto marino adyacente a la bahía y se realizaron mediciones en la columna de agua de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto durante marzo, mayo, julio y octubre de 2014 y 2015 en una estación fija dentro de la bahía hasta 18 m de profundidad. Oceanográficamente se encontraron diferencias interanuales en los meses de marzo y junio, las cuales fueron explicadas por variaciones intra-estacionales en el campo de viento durante 2015, tal que en marzo se presentó una alternancia entre eventos de intensificación y relajación del viento con cambios tanto en la magnitud como en la dirección, que explicaron los incrementos en temperatura y advección de agua proveniente de La Guajira con valores inferiores de oxígeno. En junio de 2015 se registró una intensificación del viento, asociada a cambios de magnitud, mas no de dirección, lo cual explicó la disminución de la temperatura, que fue inferior a la registrada en 2014. Ese mes se caracterizó por presentar fuertes vientos y oleajes, pero las direcciones no fueron favorables a la surgencia costera, lo que explicó que no se encontraron bajos valores de oxígeno disuelto como es de esperarse en este tipo de eventos.

PALABRAS CLAVES: Componentes zonal (U) y meridional (V) del viento, Surgencia costera, Temperatura, Salinidad, Oxígeno disuelto.

ABSTRACT

Events of wind intensification and relaxation in the Bay of Santa Marta (Colombian Caribbean): Oceanographic implications. Events of wind intensification and relaxation bring changes in their components that can be favorable or not to the coastal upwelling because there is a change in the alignment of these with respect to the coast line. In order to assess the oceanographic dynamics in the bay of Santa Marta during 2014 and 2015 in response to changes in the zonal and meridional wind component, wind data were analyzed in an adjacent marine point at Santa Marta's bay and measurements of temperature, salinity and dissolved oxygen were conducted in the water column during the months of March, May, July, and October 2014 and 2015 at a fixed station in the bay up to 18 m deep. Interannual

* *Contribución No. 1156 del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar).*



oceanographic differences were found in March and June, which were explained by intra-seasonal variations in the wind field during 2015; in March alternating events of wind intensification and relaxation occurred with changes in both magnitude and direction, which explain the increases in temperature and water advection from La Guajira with lower oxygen values. In June 2015, an event of wind intensification, associated with changes in magnitude but no direction, was recorded, which explained the decrease in temperature, which was lower than the one in 2014. That month was characterized by strong winds and waves, but the directions were not favorable to the coastal upwelling, which explained that no low values of dissolved oxygen as expected in this type of events were found.

KEY WORDS: Zonal (U) and meridional (V) wind components, Coastal upwelling, Temperature, Salinity, Dissolved oxygen.

INTRODUCCIÓN

El mar Caribe presenta una gran variedad de condiciones ambientales físicas que tienen una profunda influencia en los organismos que allí habitan, esto debido a que el ambiente físico condiciona gran parte de la estructura y funcionalidad de los ecosistemas costeros. El Caribe es muy heterogéneo y las fuentes de esta variabilidad espacio-temporal incluyen la intensidad variable de los vientos en el ciclo anual (Bernal *et al.*, 2006; Ruiz-Ochoa, 2011), las descargas de los ríos (Restrepo *et al.*, 2014), el alcance espacial de la contracorriente (Pujos *et al.*, 1986) y la manifestación a principios de año del sistema de surgencia de La Guajira (Andrade y Barton, 2005). Esta última es una característica importante de la zona, derivada del comportamiento estacional de los vientos del noreste que actúan paralelos a la costa, lo cual produce una fuerte divergencia en el transporte de Ekman y ocasiona un ascenso de Aguas Subsuperficiales Subtropicales (Cabrera y Donoso, 1993; Andrade y Barton, 2005). Teniendo en cuenta este comportamiento atmosférico, en el cual el viento sopla paralelo a la costa, la componente este-oeste del viento o componente zonal (U), es negativa a principios de año cuando la surgencia costera es más fuerte. Según Lonin *et al.* (2010), en marzo, durante la transición a primavera del hemisferio norte, la U se hace positiva junto con un relajamiento de la surgencia.

El comportamiento estacional del campo de vientos estudiado a partir de datos de la serie satelital WindSat (2003-2015) en un punto marino ubicado a 33 km frente a la bahía de Santa Marta, mostró un máximo en el mes de febrero (11.94 ± 0.76 m/s) y un mínimo en octubre (6.26 ± 1.04 m/s), con una tendencia de la magnitud del viento a disminuir en el transcurso del año, interrumpida en junio, un mes atípico con una alta variabilidad (la mayor de toda la serie) y julio, cuando se presenta un aumento asociado con la manifestación del “Veranillo de San Juan” (Invemar-GEO, 2015).

Adicional a los cambios a nivel anual y estacional, la escala intra-estacional tiene una fuerte influencia en la dinámica atmosférica. Estudios recientes apuntan a que esta trae consigo cambios en la frecuencia de eventos meteorológicos extremos, ya que agudiza o suaviza fenómenos climáticos como sequías e inundaciones, los que generan impactos socioeconómicos y ambientales de considerable magnitud (Pabón y Dorado, 2008). Sin embargo, no se ha explorado como estas variaciones climáticas de orden intra-estacional pueden repercutir en las condiciones oceanográficas de un área determinada.

La bahía de Santa Marta es una zona altamente dinámica. En ella se desarrollan diferentes actividades socio-económicas que repercuten en las condiciones ambientales del medio marino. Así mismo, son comunes emergencias ambientales relacionadas con dispersión de carbón mineral en el medio marino, derrames de aceite o mortandad de peces. Dichos eventos no han sido explicados en su totalidad debido al poco conocimiento de la dinámica oceanográfica y climática de la zona. Los estudios realizados hasta el momento hacen pensar en Santa Marta como una región de alta dinámica meteomarina (Müller, 1979; Blanco, 1988; Franco-Herrera, 2005, Arévalo y Franco, 2008; García *et al.*, 2012; Invemar-GEO, 2014), la cual se encuentra inmersa dentro de una zona donde confluyen varias de las provincias fisicoquímicas descritas por Chollett *et al.* (2012), las cuales se caracterizan por bajas temperaturas y altas salinidades al costado este y altas temperaturas y menores salinidades al oeste en el ciclo anual. Adicionalmente, en algunos años la bahía muestra la influencia de la surgencia costera en los primeros meses del año, señal que desaparece por el completo el resto del año, dando paso a aguas más cálidas y menos salinas (Invemar-GEO, 2014).

La existencia de estas provincias en inmediaciones de la zona de estudio, la creciente actividad turística y portuaria junto con la variabilidad ambiental descrita por varios autores, llevó en 2014 a dar inicio a la realización de monitoreos continuos por parte del Invemar, los cuales se mantuvieron durante 2015 y cuyo objetivo fue generar información espacio-temporal sobre el componente abiótico de los ecosistemas. El objetivo de este trabajo es evaluar la dinámica oceanográfica en la bahía de Santa Marta durante 2014 y 2015 y cómo estuvo modulada por eventos de intensificación y relajación de los vientos.

ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Santa Marta se ubica al noreste del Caribe colombiano, en el departamento de Magdalena; geomorfológicamente está delimitada al norte por

punta de Betín y al sur por la punta de Gaira, tal que a ella drenan las aguas del río Manzanares. En ella se desarrollan diferentes actividades económicas (turismo, pesca, transporte y almacenamiento de carbón), se evidencian procesos de erosión costera y se presentan descargas continentales (Invemar-GEO, 2014). El régimen de pluviosidad se caracteriza por una época seca de diciembre a abril, periodo donde se presentan las mayores magnitudes del viento, seguida por una época húmeda de mayo a noviembre, la cual es levemente interrumpida en junio, mes que registra las mayores temperaturas del aire (Invemar-GEO, 2015). Mancera *et al.* (2013) proponen un modelo conceptual de las masas de agua para la bahía, el cual está asociado con los periodos de surgencia (enero a abril) y escorrentía (agosto a noviembre); tal que a lo largo del año disminuye la salinidad y la transparencia del agua mientras aumenta la temperatura y la concentración de nutrientes orgánicos disueltos. García *et al.* (2012) en su estudio de calibración y validación de un modelo 3D para el área costera de Santa Marta, con datos tomados en 2009, encontraron que los perfiles de temperatura obtenidos para los periodos seco y de lluvias presentaron diferencias en su distribución. Con sus resultados se concluye que las características de la zona costera cambian drásticamente de acuerdo con la ocurrencia de las lluvias y régimen de vientos: en el período seco hay un fenómeno de surgencia caracterizado por aguas más frías y densas; mientras que durante el periodo de lluvias las masas de agua son más cálidas, permitiendo la estratificación de la columna de agua. Con respecto a la hidrología de la zona, el sistema de evacuación de las aguas lluvias y superficiales del sector céntrico de la ciudad de Santa Marta, llega a la bahía a través de la carrera primera y calles aledañas, con niveles muy bajos o nulos durante la época seca y altos durante el periodo de lluvias. (Mancera *et al.*, 2013).

MATERIALES Y MÉTODOS

Se realizaron cuatro salidas de campo en 2014 y cuatro en 2015 durante marzo, mayo, junio y octubre a una estación oceanográfica fija ubicada al interior de la bahía de Santa Marta (11.25°N y 74.22°W) (Figura 1). En cada salida se realizaron perfiles de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto (OD) en la columna de agua hasta la profundidad de 18 m empleando una sonda multiparamétrica SBE 19+V2 tipo CTDO (*conductivity, temperature, depth, oxygen*).

Los archivos obtenidos con el CTDO fueron pre-procesados empleando el programa *SBE Data Processing*, el cual permitió aplicar los filtros: *Data Conversion* (convierte los datos crudos a formato ASCII), *Filter* (suaviza el cambio brusco de los datos), *Align CTD* (los datos son alineados en el tiempo con respecto a la presión asegurando que correspondan a una misma sección), *Loop Edit* (marca los registros

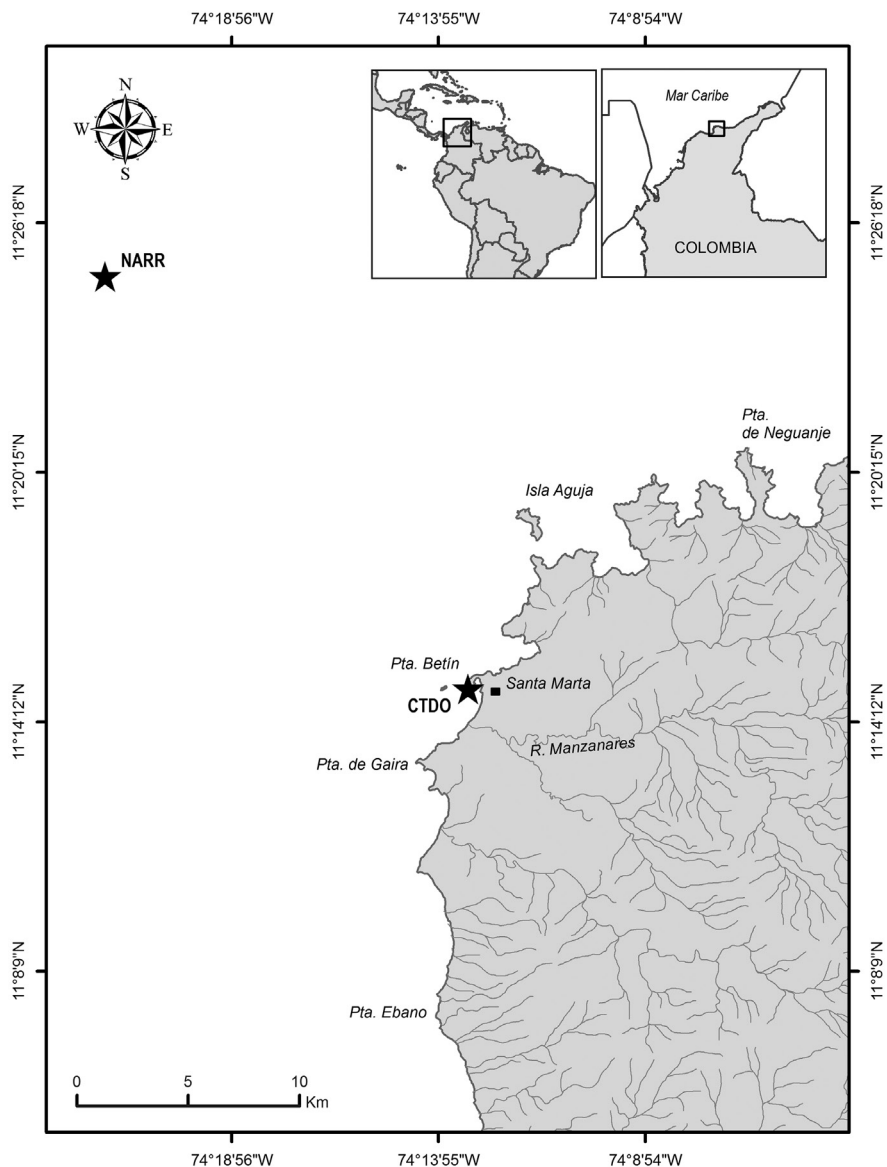


Figura 1. Bahía de Santa Marta en el departamento de Magdalena (Caribe colombiano) y ubicación de la estación de monitoreo oceanográfico (CTDO) y análisis de vientos (NARR).

inconsistentes o ‘badflags’ debido a retrasos de los parámetros respecto a la presión o reversiones repentinas del CTD), *Derive* (calcula o deriva las variables dependientes de la temperatura, la conductividad y presión) y *Bin Average* (realiza un promedio de datos de acuerdo a la presión, obteniendo un valor medio para cada metro). Solamente

los datos de oxígeno disuelto (OD) de octubre de 2015 no pasaron los filtros de calidad y no se tuvieron en cuenta. Con el objetivo de encontrar diferencias en los perfiles oceanográficos entre 2014 y 2015, fue aplicada la prueba no paramétrica de Wilcoxon para dos muestras independientes, debido a que los datos evaluados no presentaron distribución normal.

Adicionalmente, fue descrito el campo de vientos (magnitud y componentes) a partir de la serie de tiempo tri-horaria derivada del North American Regional Reanalysis - NARR (Mesinger *et al.*, 2006), en un punto marino adyacente a la estación oceanográfica: 11.3°N, 74.3°W, (Figura 1). Estos datos fueron comparados con los registrados por la estación Comarta ubicada en El Rodadero y suministrados por la Universidad Jorge Tadeo Lozano. Las comparaciones realizadas para 2014 y 2015 arrojaron un coeficiente de Pearson de 0.7 ($\alpha=0.05$), indicando alta asociación lineal entre las series; aunque mayores magnitudes presentaron los NARR por corresponder a un punto ubicado costa afuera. Se seleccionó la serie NARR debido a que corresponde a vientos sobre el océano, lo que permiten hacer una aproximación al comportamiento atmosférico durante eventos de surgencia.

RESULTADOS

La serie de tiempo de la magnitud del viento durante el periodo enero 2014 - julio 2015 en un punto ubicado a 21 km del área de estudio mostró variaciones durante el periodo evaluado: enero de 2014 – diciembre de 2015 (Figura 2). A lo largo de 2014 se registraron las mayores magnitudes a principios de año, las cuales descendieron hasta alcanzar su valor más bajo en octubre, siendo ligeramente interrumpida por un incremento en julio. A nivel oceanográfico y en el transcurso de 2014, la bahía de Santa Marta presentó un calentamiento de sus aguas, siendo similares los valores promediados en columna en mayo y junio (Tabla 1, Figura 2), meses que también presentaron valores similares en cuanto a la magnitud del viento promedio (10.47 ± 2.33 m/s y 10.27 ± 2.85 m/s respectivamente). Durante 2014, marzo presentó la menor temperatura, la cual se asoció con los vientos de mayor magnitud (13.74 ± 2.56 m/s); mientras que octubre se caracterizó por presentar las menores magnitudes del viento (6.48 ± 3.05 m/s) y los mayores valores de temperatura de 2014, revelando un comportamiento inverso entre las dos variables.

Con respecto a 2015, durante el primer semestre la magnitud del viento mostró un comportamiento diferente al de 2014 y no fue evidente su tendencia al descenso presentado en 2014; adicionalmente se observaron oscilaciones mensuales que podrían sugerir la presencia de ondas intra-estacionales. Marzo de 2015 presentó un promedio de magnitud del viento similar al de 2014, pero con mayor dispersión

(13.69 ± 4.10 m/s), lo cual se evidencia en la Figura 2 como alternancias entre eventos de intensificación y posterior relajación de los vientos. Oceanográficamente, este mes no presentó el enfriamiento de 2014 y el perfil presentó mayor dispersión (Tabla 1, Figura 2). Mayo fue similar a marzo (12.25 ± 3.08); mientras que junio presentó un descenso evidente en la temperatura, siendo la menor registrada en 2015, además presentó una elevada magnitud del viento, así como una alta dispersión (11.95 ± 5.29), lo cual se advierte gráficamente como una relajación a principios del mes y posterior intensificación. Durante el segundo semestre de 2015, la serie de vientos presentó un comportamiento similar al de 2014 con los menores valores en octubre (6.09 ± 2.31), mes que presentó una temperatura similar a la de 2014 (Tabla 1).

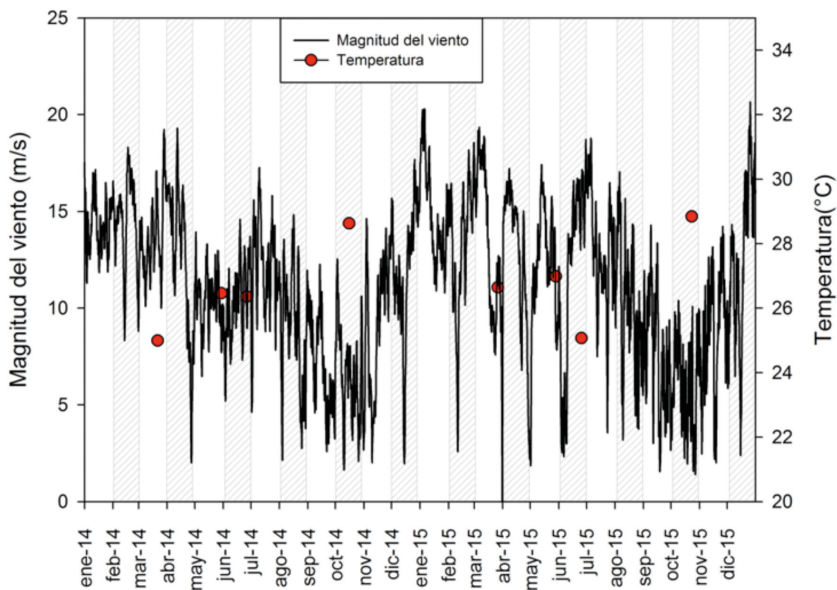


Figura 2. Serie de tiempo de la magnitud del viento (m/s) durante el periodo enero 2014 – diciembre 2015 y valores promedio de temperatura en columna durante el día de monitoreo.

Tabla 1. Valores promedio y desviaciones típicas de temperatura-T (°C), salinidad-S y oxígeno disuelto-OD (mg/L) en la bahía de Santa Marta durante 2014 y 2015.

	MARZO	MAYO	JUNIO	OCTUBRE
2014	T= 24.99 ± 0.14	T= 26.46 ± 0.27	T= 26.36 ± 0.18	T= 28.63 ± 0.09
	S= 36.72 ± 0.00	S= 36.61 ± 0.01	S= 36.62 ± 0.01	S= 35.69 ± 0.28
	OD= 5.49 ± 0.10	OD= 5.84 ± 0.07	OD= 5.64 ± 0.34	OD= 5.48 ± 0.07
2015	T= 26.64 ± 0.42	T= 26.98 ± 0.50	T= 25.07 ± 0.18	T= 28.84 ± 0.14
	S= 36.84 ± 0.04	S= 36.65 ± 0.02	S= 36.80 ± 0.04	S= 34.99 ± 0.03
	OD= 4.47 ± 0.04	OD= 5.76 ± 0.07	OD= 5.63 ± 0.14	OD= ---

En cuanto a la salinidad, 2014 presentó una asociación directa con la magnitud de viento, tal que los mayores valores se registraron en marzo, mes de fuertes vientos y los menores en octubre, mes de las menores magnitudes (Figura 3). Mayo y junio presentaron salinidades similares (Tabla 1), meses en los cuales no hubo una marcada diferencia en la magnitud del viento. Durante el primer semestre de 2015, se registraron mayores salinidades con respecto a 2014, destacándose los valores elevados de marzo y junio, los cuales correspondieron con mayores vientos; con la particularidad que en marzo se presentó durante una fase de relajación y en junio durante una de intensificación. Octubre de 2015 por su parte, presentó el valor más bajo de toda la serie evaluada (Tabla 1).

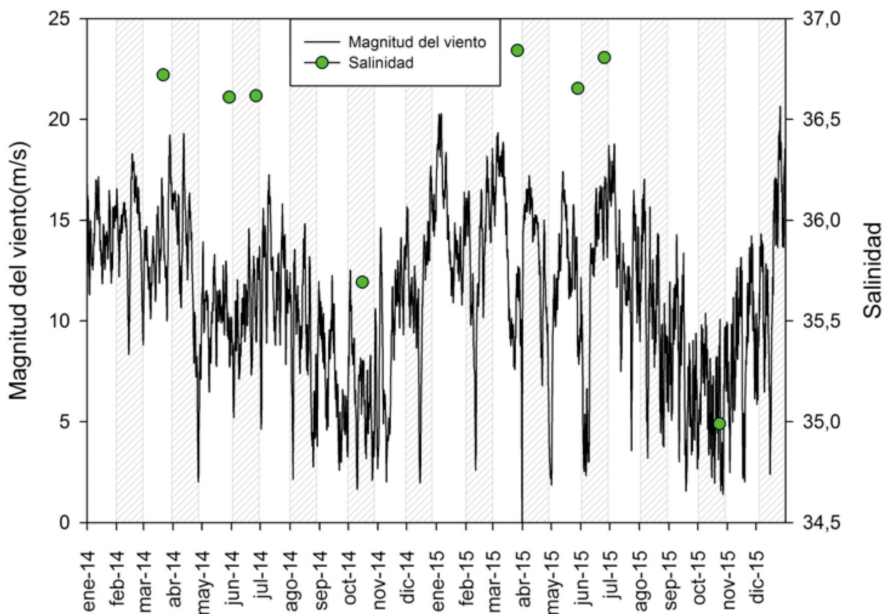


Figura 3. Serie de tiempo de la magnitud del viento (m/s) durante el periodo enero 2014 – diciembre 2015 y valores promedio de salinidad en columna el día de monitoreo.

Un comportamiento particular presentó el OD, el cual estuvo entre 5 - 6 mg/L a lo largo de 2014 y 2015; con excepción de marzo de 2015, cuando presentó un descenso significativo (4.47 ± 0.04 mg/L) y resultó estadísticamente diferente a marzo de 2014 (Figura 4). Teniendo en cuenta los bajos valores de OD en marzo de 2015 y de temperatura en junio del mismo año (Tabla 1), se analizaron las

componentes del viento (U y V) en estos dos meses con respecto a la climatología de los mismos, esto con el objetivo de tener una aproximación al comportamiento tanto en magnitud como en dirección en dichos meses que resultaron oceanográficamente particulares. El marzo promedio obtenido a partir de la climatología NARR (1979-2015) presenta una magnitud del viento de 14.01 ± 1.27 m/s y una dirección promedio de $58.86 \pm 4.72^\circ$. Durante 2015 la magnitud de marzo disminuyó en promedio a 13.69 ± 4.10 m/s, pero se presentó mayor dispersión (mayor desviación estándar), lo cual se advierte gráficamente como eventos de intensificación y relajación del viento a lo largo del mes con respecto al promedio climatológico 1979 - 2015 de la serie NARR (Figura 5a). Así mismo, la dirección de los vientos cambió y se hizo más norte y menos este de lo esperado, con una dirección promedio de $45.64 \pm 0.82^\circ$, lo que implica que se incrementó la componente meridional (V) y disminuyó la zonal (U). Esto se refleja gráficamente en cada componente, donde el incremento en la magnitud en la primera quincena de marzo de 2015 se atribuye al incremento en la V (Figura 5b); mientras que la relajación en la segunda quincena (cuando se realizó el monitoreo oceanográfico), se debió a una relajación en la U (Figura 5c).

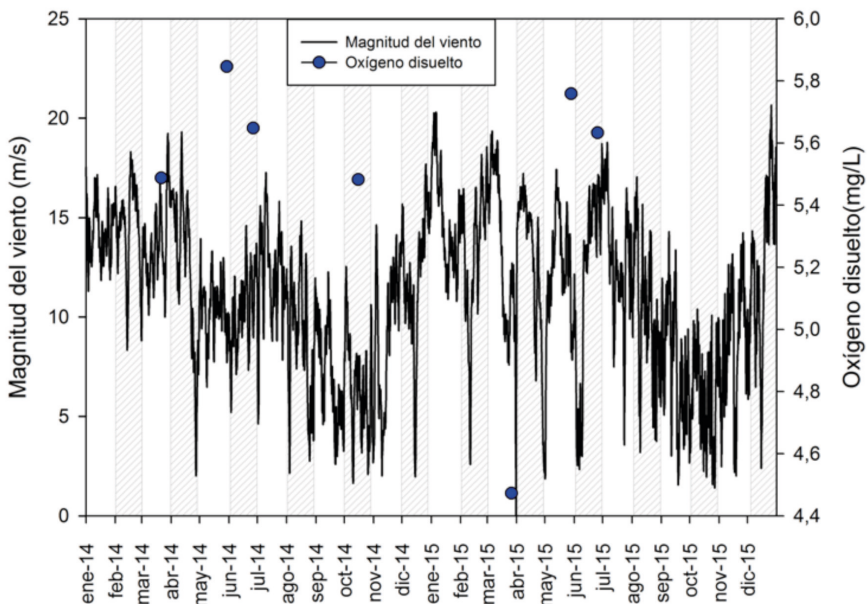


Figura 4. Serie de tiempo de la magnitud del viento (m/s) durante el periodo enero 2014 – diciembre 2015 y valores promedio de oxígeno disuelto en columna el día de monitoreo.

Para junio, el promedio histórico de la magnitud es 7.05 ± 1.84 m/s; sin embargo, en 2015 se presentó una intensificación de la magnitud de la segunda a la cuarta semana (Figura 5d). En cuanto a la dirección, históricamente el valor promedio es $64.44 \pm 10.28^\circ$ y en junio de 2015 fue de $61.92 \pm 21.85^\circ$, indicando una mayor dispersión en los vectores, aunque conservando la dirección este-noreste. Al analizarlo por componentes, la relajación de la primera semana de junio de 2015 se advirtió en ambas componentes (Figura 4e y 4f). Así mismo ocurrió con el incremento en las siguientes semanas, el cual fue advertido en ambas componentes, pero en la U principalmente, la cual alcanzó a ser el doble de lo esperado por la climatología.

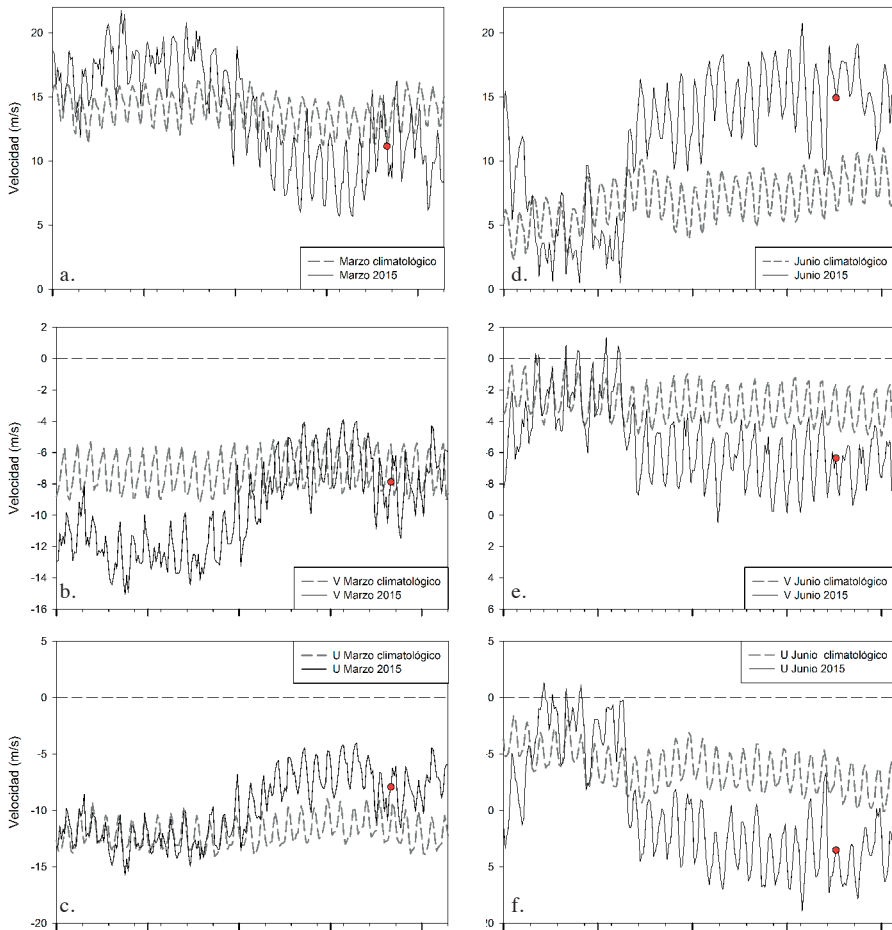


Figura 5. Vientos NARR: marzo climatológico y marzo 2015 (a), V climatológica de marzo y V de marzo 2015 (b), U climatológica de marzo y U de marzo 2015 (c), junio climatológico y junio 2015 (d), V climatológica de junio y V de junio 2015 (e), U climatológica de junio y U de junio 2015 (f). El punto rojo indica el día del monitoreo oceanográfico.

DISCUSIÓN

Las condiciones oceanográficas encontradas durante los monitoreos realizados en 2014 y 2015 pueden ser explicadas en términos de las condiciones atmosféricas presentes durante los mismos. Durante el primer semestre de 2014, la costa Caribe experimentó fuertes sequías; tal que para los meses de monitoreo de marzo y mayo, no se registraron precipitaciones en la estación meteorológica ubicada en el aeropuerto Simón Bolívar de Santa Marta, lo que representa anomalías negativas para ambos meses de acuerdo con la climatología descrita en Invemar-GEO (2014). Junio, por su parte, se caracterizó por presentar precipitaciones por debajo de las esperadas (cerca de 75% menos) y finalmente en octubre, aunque los registros del IDEAM indicaron que se llegó al acumulado histórico, este se alcanzó con las lluvias de fin de mes; ya que para la fecha de realización de la salida de campo (tercera semana) había un déficit de precipitación cercano a 90%. Mancera *et al.* (2013) mencionan que las lluvias son las que marcan la estacionalidad climática en el área de la bahía y que la escorrentía generada durante los periodos lluviosos (outwelling) genera una columna estratificada. No obstante, la disminución de la salinidad de octubre de 2014 no puede ser explicada con la precipitación local, puesto que había déficit para las fechas de los monitoreos. En este sentido, la disminución de los vientos, característica de octubre así como la ausencia de la surgencia, la cual acarrea agua del fondo más fría, más salina y baja en OD, ayuda a explicar los bajos valores de salinidad y mayores valores de oxígeno encontrados en octubre.

Las temperaturas registradas en marzo de 2014 son similares a las registradas por García *et al.* (2012) entre enero y mediados de marzo de 2009 y por Mancera *et al.* (2013) para marzo de 2005, las cuales revelan una columna de agua bien mezclada, con temperaturas alrededor de 25° C; lo cual indica que marzo de 2014 tuvo el comportamiento esperado para esta época del año. Sin embargo, las mayores temperaturas registradas en marzo de 2015 no concuerdan con los valores promedio registrados por otros autores ni con el encontrado en 2014, lo cual podría asociarse a la relajación de los vientos en la segunda quincena del mes, que disminuye el poder de mezcla del mismo sobre las primeras capas. Lonin *et al.* (2010) mencionan que la surgencia costera en La Guajira puede ser interrumpida por eventos atmosféricos de corto plazo (días) que modifican la componente U, dominante en la surgencia y que pueden disminuir la intensidad de la misma. La serie del viento de 2015 exhibe variaciones intra-estacionales que podrían estar condicionando la oceanografía local. De acuerdo con CIIFEN (2015), los primeros meses de 2015 se caracterizaron por una marcada actividad intra-estacional (oscilación Madden-Julian), la cual

es reconocidas por otros autores, como la responsable de las fluctuaciones intra-estacionales de la precipitación (Torres-Pineda, 2012).

El promedio de la temperatura superficial en 2014 fue $26.98 \pm 1.46^\circ \text{C}$ y el de 2015 fue de $27.63 \pm 1.33^\circ \text{C}$, valores que se encuentran dentro de los ámbitos tanto de la provincia “Upwelling” como la “Inner Caribbean”, descritas por Chollet et al. (2012). Con respecto a la salinidad superficial promedio, esta fue de 36.21 ± 0.88 en 2014 y de 36.37 ± 0.99 en 2015, valores que se encuentran dentro del ámbito descrito para la provincia “Upwelling”. Esta confluencia de provincias le confiere al área de estudio una alta dinámica marina y teniendo en cuenta que la precipitación no fue un factor determinante en las condiciones oceanográficas tanto de 2014 como de 2015 (Invemar-GEO, 2014, 2015), pero las variaciones en el campo de vientos sí; el estudio de los eventos de intensificación y relajación del mismo juegan un papel muy importante en el entorno físico de la zona de estudio.

El evento de intensificación y relajación de los vientos en marzo de 2015 también se reflejó oceanográficamente en la boya de DIMAR ubicada en Barranquilla, donde la altura significativa de la ola en la primera quincena del mes estuvo cerca de 1 m por encima del promedio; mientras que para la segunda quincena presentó valores de hasta 0.5 m por debajo del promedio esperado (CIOH, 2015a). A esta relajación de los vientos en la segunda quincena de marzo se le puede atribuir el incremento en la temperatura durante el día medido, mas no explicaría la drástica disminución del OD.

Adicional a los registros oceanográficos, durante la última semana de marzo de 2015 fue registrada una mortandad de peces en el sector de El Rodadero, la cual fue asociada a una baja de oxígeno (Invemar, 2015). Send y Nam (2012) mencionan que las plataformas continentales donde se presenta surgencia costera, están sujetas a secuencias de intensificación y relajación de la misma, cada una en escalas de tiempo del orden de una semana típicamente, que también modifican la temperatura y la densidad. Estos autores discuten que los eventos de intensificación/relajación pueden generar incrementos en las concentraciones de oxígeno en una plataforma estrecha y disminuciones en una plataforma ancha. No obstante, también registran que las bajas de oxígeno no solo ocurren cuando la surgencia se incrementa, sino que también se pueden presentar en fases de relajación; lo cual ocurre por procesos de advección, cuando aguas bajas en OD son transportadas de zonas de plataforma amplia hacia zonas de plataforma estrecha. Esto podría explicar los bajos valores de OD encontrados en Santa Marta durante la última semana de marzo de 2015, cuando hubo relajación de los vientos, como aguas poco oxigenadas advectadas desde La Guajira, la cual tiene una plataforma más amplia. De esta forma, estas oscilaciones

en los regímenes de intensificación/relajación de los vientos resultan importantes, puesto que en cuestiones de días pueden ocasionar fluctuaciones en los niveles de oxígeno que pueden tener consecuencias ambientales.

Adicional a esto, durante marzo de 2015 hubo mayor componente norte ($45.64 \pm 0.82^\circ$) con respecto a la climatología ($58.86 \pm 4.72^\circ$), cambio que desfavorece la alineación de los vientos con la línea de costa en el sector del Parque Tayrona, pero que incrementa su alineación hacia la península de La Guajira. Esto contribuiría a incrementar la surgencia en La Guajira y disminuirla en Santa Marta, lo cual ya había sido notado por Páramo *et al.* (2011). Estos mismos autores mencionan que la amplia extensión de las aguas de surgencia en el Caribe ha sido atribuida al transporte de masa producida por las corrientes de deriva que favorece la redistribución de las propiedades físicas en la superficie y como consecuencia la ocurrencia de procesos advectivos y difusivos (Fajardo, 1979; Andrade y Barton, 2005).

Con respecto a junio de 2015, el sistema de alta presión de las Azores generó vientos con velocidades de 46 a 56 km/h (25 a 30 nudos, fuerza 6-7) y fuerte marejada, principalmente durante la segunda quincena del mes, afectando el norte y centro del litoral Caribe colombiano (CIOH, 2015b). En este mismo informe, el CIOH presenta el comportamiento de la altura de la ola en la boya de Barranquilla, la cual guarda estrecha relación con el patrón de vientos obtenido: menores en la primera semana e incrementos en el resto de mes. En Invemar-GEO (2015), a partir de datos satelitales, ya había sido notado que históricamente junio presenta la mayor dispersión en la magnitud del viento, por lo cual se pueden esperar vientos fuertes para este mes con sus respectivas consecuencias oceanográficas. Esta intensificación de los vientos y del oleaje, explica el enfriamiento y mayores salinidades presentadas en la columna de agua durante junio de 2015; no obstante aunque los vientos alcanzaron elevadas magnitudes, no fueron favorables a la surgencia; razón por la cual no se evidenciaron disminuciones en el OD.

CONCLUSIONES

Los eventos de intensificación y relajación del viento traen consigo cambios en las componentes zonal (U) y meridional (V) que pueden resultar favorables o no a la surgencia costera, debido a que cambia la alineación con respecto a la línea de costa. En marzo y junio de 2015 se presentaron eventos de intensificación y relajación del viento asociados a fuerte actividad intra-estacional, lo cual pudo ser advertido a partir del análisis de las componentes U y V, las cuales durante el mismo mes, presentaron variaciones significativas. En marzo de 2015, la magnitud del viento

se incrementó en la primera quincena por una intensificación en la componente V y disminuyó su magnitud en la segunda quincena, debido a una relajación en la componente U; es decir, presentó cambios tanto de magnitud como de dirección. Estos cambios atmosféricos se evidenciaron oceanográficamente como un aumento en la temperatura y una disminución en la concentración de oxígeno disuelto con respecto a marzo de 2014, mes cuando no se presentó esta alternancia de eventos y que registró mayores valores de oxígeno. Esta disminución del oxígeno disuelto en 2015 fue asociada a agua advectada de la surgencia de La Guajira. Para el mes de junio de 2015 la intensificación del viento se registró en ambas componentes; esto es, hubo cambio en magnitud, pero no en dirección; lo cual explica la disminución de la temperatura, que fue inferior a la registrada en 2014 y fue el menor registro de 2015. Así mismo, esta fuerte mezcla aumentó la salinidad, pero no disminuyó el valor de oxígeno disuelto. Junio se caracterizó por presentar fuertes vientos y oleajes, lo cual generó mezcla local, pero las direcciones no fueron favorables a la surgencia costera, por lo que se descarta el ingreso de aguas provenientes de La Guajira, ya que no se encontraron bajos valores de oxígeno disuelto como es de esperarse en este tipo de eventos.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados presentados se derivan de los proyectos “Dispersión de sedimentos mediante el estudio de la dinámica meteo-marina en el sector isla de Salamanca - PNNT Tayrona (departamento del Magdalena)” y “Variabilidad oceanográfica y climática en la bahía de Santa Marta, ensenada de Gaira y zona de puertos (Caribe colombiano) y su relación con la dinámica sedimentaria del carbón” desarrollados en 2014 y 2015 por el Programa de Geociencias Marinas y Costeras – GEO del Invemar, dentro del proyecto “Investigación básica y aplicada de los recursos naturales renovables y del medio ambiente en los litorales y ecosistemas marinos y oceánicos de interés nacional” Código BPIN: 2014011000405. Los autores agradecen a todos los investigadores del Programa GEO que participaron en las salidas de campo durante 2014 y 2015, al investigador Marco González por el apoyo cartográfico, al Dr. Marco Correa por la contribución científica y a los revisores externos por sus aportes para el enriquecimiento del documento.

BIBLIOGRAFÍA

- Andrade, C. y E. Barton. 2005. The Guajira upwelling system. *Cont. Shelf Res.*, 25: 1003-1022.
- Arévalo, D y A. Franco. 2008. Características oceanográficas de la surgencia frente a la ensenada de

- Gaira, departamento de Magdalena, época seca menor de 2006. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 2: 131-162.
- Bernal, G., G. Poveda, P. Roldán y C. Andrade. 2006. Patrones de variabilidad de las temperaturas superficiales del mar en la costa Caribe colombiana. *Rev. Acad. Col. Cienc.*, 115: 195-208.
- Blanco, J. 1988. Las variaciones ambientales estacionales en las aguas costeras y su importancia para la pesca de la región de Santa Marta, Caribe colombiano. Tesis M.C., Universidad Nacional de Colombia, Bogotá. 62 p.
- Cabrera, E., y M. Donoso. 1993. Estudio de las características oceanográficas del Caribe colombiano, Región III, Zona 1, PDCTM. *Bol. Cient. CIOH*, 13: 19-32.
- Chollett, I., P.J. Mumby, F.E. Müller-Karger y C. Hu. 2012. Physical environments of the Caribbean Sea. *Limnol. Oceanogr.*, 4: 1233-1244.
- CIIFEN - Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño. 2015. Nota Técnica. 3 p.
- CIOH. 2015a. Boletín meteomarino mensual del Caribe colombiano No. 27. Marzo 2015. Centro Invest. Oceanogr. Hidrogr., Cartagena. 23 p.
- CIOH. 2015b. Boletín meteomarino mensual del Caribe colombiano No. 30. Junio 2015. Centro Invest. Oceanogr. Hidrogr., Cartagena. 27 p.
- Fajardo, G. 1979. Surgencia costera en las proximidades de la península colombiana de La Guajira. *Bol. Cient. CIOH*, 2: 7-19.
- Franco-Herrera, A. 2005. Oceanografía de la ensenada de Gaira: El Rodadero, más que un centro turístico en el Caribe. Universidad Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta. 58 p.
- García, F.F., G. Chang y C. A. Palacio. 2012. Calibración y validación de un modelo 3D para el área costera de Santa Marta (Colombia). *Rev. Fac. Ing.*, 62: 177-188.
- Invemar. 2015. Concepto técnico sobre mortandad de peces en el sector Puerto Luz y el Acuario de Santa Marta. 2015. Concepto técnico tipo "D". CPT-CAM-007-15. Santa Marta. 19 p.
- Invemar-GEO. 2014. Dispersión de sedimentos mediante el estudio de la dinámica meteo-marina en el sector Isla-Salamanca – PNN Tayrona (departamento del Magdalena). Inf. Técn. Final. Actividad GEO - BPIN INVEMAR. Santa Marta. 60 p.
- Invemar-GEO. 2015. Variabilidad oceanográfica y climática en la bahía de Santa Marta, ensenada de Gaira y zona de puertos (Caribe colombiano) y su relación con la dinámica sedimentaria del carbón. Inf. Técn. Final. Actividad GEO - BPIN INVEMAR. Santa Marta. 60 p.
- Lonin, S., J. Hernández y D. Palacios. 2010. Atmospheric events disrupting coastal upwelling in the southeastern Caribbean. *J. Geoph. Res.: Oceans*, 115 C6.
- Mancera, J., G. Pinto y S. Vilardy. 2013. Patrones de distribución estacional de masas de agua en la bahía de Santa Marta, Caribe colombiano: importancia relativa del upwelling y outwelling. *Bol. Inv. Mar. Cost.*, 2: 329-360.
- Mesinger, F., G. DiMego, E. Kalnay, K. Mitchell, P. C. Shafran, W. Ebisuzaki y M. B. Ek. 2006. North American regional reanalysis. *Bull. Am. Met. Soc.*, 3: 343-360.
- Müller, K. 1979. Interrelaciones entre salinidad y temperatura en la bahía de Santa Marta. *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betín*, 11: 219-226.
- Pabón, J. D. y J. Dorado. 2008. Intraseasonal variability of rainfall over Northern South America and Caribbean region. *Earth Sc. Res J.*, 12: 194-212.
- Paramo, J., M. Correa y S. Núñez. 2011. Evidencias de desacople físico-biológico en el sistema de

- surgencia en La Guajira, Caribe Colombiano. *Rev. Biol. Mar. Oceanogr.*, 3: 421-430.
- Pujos, M., J. Pagliardini, R. Steer, G. Vernet y O. Weber. 1986. Influencia de la contra-corriente norte colombiana para la circulación de las aguas en la plataforma continental: su acción sobre la dispersión de los efluentes en suspensión del río Magdalena. *Bol. Cient. CIOH*, 6: 3-15.
- Restrepo, J. C., J. C. Ortíz, J. Pierini, K. Schrottke, M. Maza, L. Otero y J. Aguirre. 2014. Freshwater discharge into the Caribbean Sea from the rivers of Northwestern South America (Colombia): Magnitude, variability and recent changes. *J. Hydrol.*, 509: 266-281.
- Ruiz-Ochoa, M. A. y G. B. Franco. 2009. Variabilidad estacional e interanual del viento en los datos del reanálisis NCEP/NCAR en la cuenca Colombia, mar Caribe. *Avanc. Rec. Hidr.*, 20: 7-20.
- Send, U. y S. Nam. 2012. Relaxation from upwelling: The effect on dissolved oxygen on the continental shelf. *J. Geol. Res.*, 117p.
- Torres-Pineda, E. 2012. Efecto de las ondas Madden-Julian en la precipitación sobre algunas regiones del territorio colombiano. Tesis M.C., Universidad Nacional Colombia, Bogotá. 96 p.

RECIBIDO: 08/03/2016

ACEPTADO: 05/09/2016