

Condiciones oceanográficas de la reserva de biosfera Seaflower 2014–2016

Oceanographic conditions of the Seaflower biosphere reserve 2014-2016

DOI: 10.26640/22159045.449

Fecha de recepción: 2018-07-13 / Fecha de aceptación: 2018-09-20

Claudia J. Dagua P.*, Ricardo R. Torres P.** y Julio C. Monroy S.***

Dagua, C., Torres, R. y Monroy, J. (2018). *Condiciones oceanográficas de la reserva de biosfera Seaflower 2014–2016*. Bol. Cient. CIOH (37):53-74. ISSN 0120-0542 e ISSN en línea 2215-9045. DOI: 10.26640/22159045.449

RESUMEN

En el marco de la Expedición Científica Seaflower, en los años 2014 y 2016, empleando la plataforma de investigación ARC Providencia de la Dirección General Marítima, se realizaron dos cruceros de investigación oceanográfica en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, en aguas del mar Caribe. Durante estas dos campañas, se midieron las condiciones físicas de la columna de agua entre las islas cayos de Roncador, Serrana y Quitasueño, con la recolección de 46 perfiles de temperatura, salinidad y presión, en dos épocas climáticas diferentes, marzo-abril de 2014 y agosto de 2016. En este trabajo se presenta la descripción general de las condiciones oceanográficas observadas durante estas campañas y se hace un análisis comparativo de las condiciones representativas de cada época, incluyendo un análisis del comportamiento de la profundidad de la capa isotermal, la cual mostró variación espacial y temporal en los dos cruceros. De igual forma, se describen las condiciones oceano atmosféricas el 7 de abril de 2014, producidas por un frente frío, fenómeno meteorológico que ingresó en esa fecha al mar Caribe y afectó marginalmente el área de estudio. Se encontraron diferencias en el comportamiento de la columna de agua entre la campaña de 2014 y la campaña de 2016, lo que está asociado con la época en la que se desarrolló cada crucero, con valores mayores tanto de temperatura como de salinidad, para la campaña de 2016, correspondiente a la época de lluvia afectada por el veranillo de San Juan. Se analizó el efecto del viento y giros de mesoescala en la variabilidad de la capa isotermal, sin lograr determinarse un forzante dominante.

PALABRAS CLAVE: Seaflower, oceanografía física, frente frío.

ABSTRACT

As part of the Seaflower Scientific Expedition, on board of the research vessel "ARC Providencia" of Colombia's Maritime Directorate – DIMAR, two oceanographic research cruises were done in 2014 and 2016 in the San Andres, Providencia and Santa Catalina Archipelago in the Caribbean Sea. During these campaigns, the physical conditions of the water column were measured at 46 stations between the island-cays Roncador, Serrana and Quitasueño, in two different climatic seasons, March-April of 2014, and August of 2016. In this work, a general description of the observed oceanographic conditions during the two cruisers is presented, as well as a comparative assessment of the representative conditions for each season, including the behavior of the Isotermal Depth Layer (IDL), which showed spatial and temporal variability between the two cruisers. Furthermore, the ocean and atmospheric conditions of the 7th of April 2014 are described, as produced by a cold front which entered this day to the Caribbean Sea, and marginally affected the area of study. Differences were found in the water column behavior between the 2014 and 2016 campaigns, due to the season in which the cruise was done, with higher temperature and salinity values in the later, corresponding to the rainy season affected by the Midsummer Draught. The effect of wind and mesoscale eddies in the IDL variability was assessed, but a dominant forcing could not be determined.

KEY WORDS: Seaflower, physical oceanography, cold front.

* Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH). Correo: cdagua@dimar.mil.co

** Universidad del Norte (Uninorte). Correo: rrtorres@uninorte.edu.co

*** Escuela Naval de Cadetes "Almirante Padilla". Correo: julio.monroy@armada.mil.co

INTRODUCCIÓN

La Reserva de Biósfera (RB) Seaflower se ha convertido en uno de los íconos más representativos de la protección marina en Colombia. Desde su declaración en calidad de reserva de biósfera en el año 2000, se muestra como una importante estrategia de conservación *in situ* y es un escenario de desarrollo sostenible donde se preservan los servicios ecosistémicos, así como el patrimonio natural y cultural (Murillo y Ortiz, 2013).

Desde el año 1972, en su condición como Autoridad Marítima Colombiana, la Dirección General Marítima, (Dimar), ha liderado, desarrollado y contribuido a la investigación científica marina en el territorio del archipiélago de San Andrés y Providencia, generando proyectos y publicaciones de gran interés, coadyuvando de esta manera al ejercicio de la soberanía colombiana en la reserva de biósfera Seaflower. Al continuar con esta labor y apoyando esta nueva iniciativa de cooperación interinstitucional en la búsqueda de profundizar el conocimiento sobre los territorios marítimos colombianos, el Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas del Caribe (CIOH), de la Dimar, en los años 2014 y 2016, volvió a desplegar su capacidad científica y operativa.

En esta investigación se describen las condiciones oceanográficas que se registraron durante las expediciones de marzo-abril 2014 y agosto 2016. De igual forma, se busca establecer la afectación de las condiciones oceanográficas por la presencia de un frente frío que ingresó al mar Caribe el 07 de abril de 2014, durante el primer crucero.

ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra ubicada en aguas del mar Caribe, específicamente en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina que, de acuerdo con el *Decreto 1946 del 9 de septiembre de 2013*, está conformado por las islas de San Andrés, Providencia, Santa Catalina; islas cayo de Albuquerque, Este Sudeste, Roncador, Serrana, Quitasueño, Serranilla y Bajo Nuevo, así como las demás islas, islotes, cayos, morros, bancos, elevaciones de bajamar, bajos y arrecifes adyacentes a cada una de estas islas.

El 9 de noviembre del 2000, trescientos mil kilómetros cuadrados (300 000 km²) del archipiélago, fueron declarados por la Unesco como reserva mundial de biosfera "Seaflower", llamada así en memoria al primer barco de puritanos ingleses arribado a San Andrés en 1631 (Espinosa, 2001). Las campañas oceanográficas de 2014 y 2016, se realizaron entre los meridianos 81.6° W y 79.9° W y entre las latitudes 13.4° N y 14.8° N, en inmediaciones de los cayos del norte (Figura 1).

La variabilidad estacional de la atmósfera en el mar Caribe está gobernada por la posición de la Alta Subtropical del Atlántico Norte (NASH, por sus siglas en inglés) que influye en la posición de la Zona de Convergencia Inter Tropical (ZCIT) y esta a su vez, determina la tasa de precipitación (Montoya, 2014). Así, los patrones de clima en la región están determinados por la migración anual de la ZCIT generando épocas húmedas y secas (Montoya, 2014). Durante los meses de diciembre hasta abril (época seca), cuando la ZCIT se ubica más al sur (alrededor de 2°N) los alisios del noreste son muy intensos, ocasionando un debilitamiento de las lluvias y un aumento de procesos de surgencia en la costa de Venezuela y Colombia (Andrade y Barton, 2005).

Durante el resto del ciclo anual (mayo a noviembre), la cobertura nubosa, asociada con la presencia de la ZCIT, en el centro del mar Caribe, ocasiona el aumento de las precipitaciones. En esta época húmeda, los vientos disminuyen, dando paso a intensas precipitaciones que modifican la salinidad (y densidad) y consecuentemente las corrientes superficiales (Montoya, 2014; Andrade C. , 1991). En la Figura 2 se representa la climatología de la velocidad y dirección del viento en el mar Caribe, para los meses en los que se realizaron las expediciones de los años 2014 y 2016. Las figuras 3, 4 y 5 representan la información climatológica de temperatura, salinidad y corrientes superficiales para el mismo periodo de tiempo.

Durante los meses de julio y agosto, la estación de lluvias se ve interrumpida por la reducción de la precipitación en el Caribe a un nivel mínimo. Este periodo relativamente seco, es conocido como el *mid-summer drought* (MSD), o *veranillo de San Juan* (Wang, 2007; Small y Szoeki, 2007).

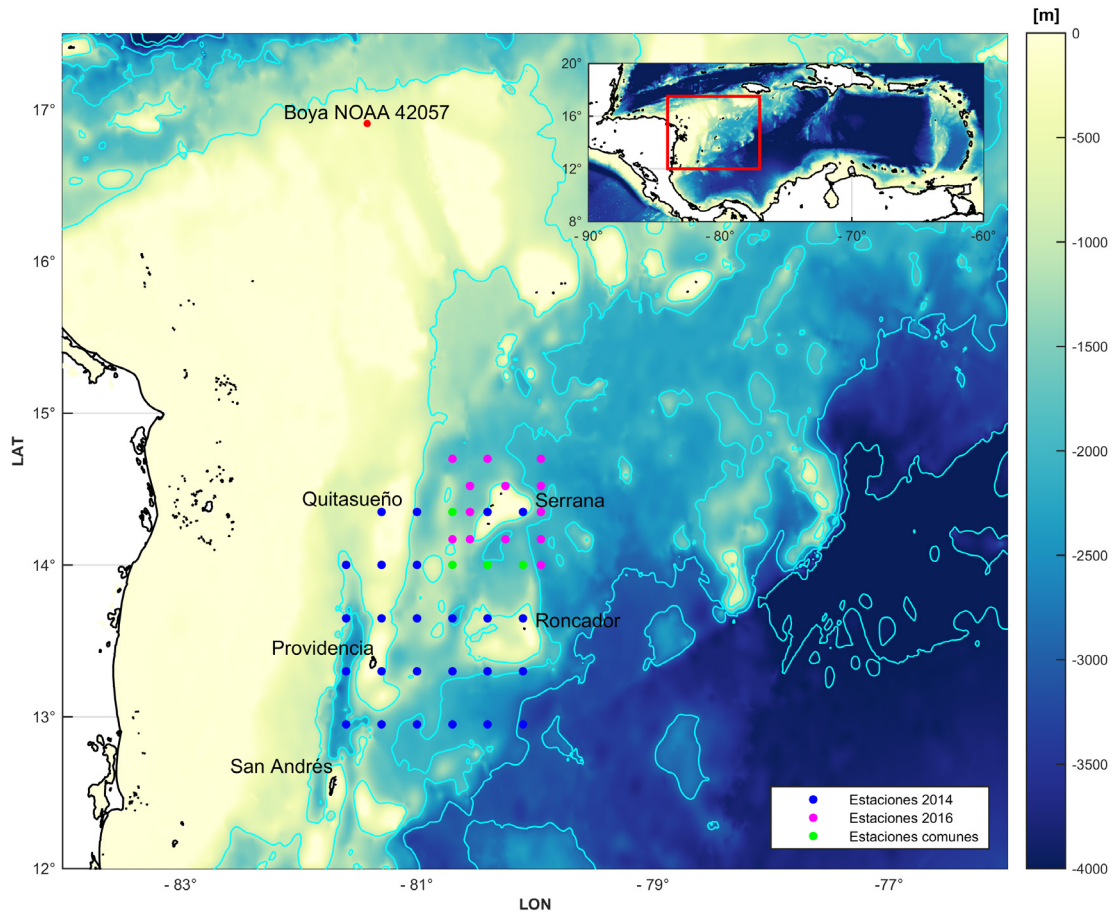


Figura 1. Área de estudio indicando la batimetría. Tomada de (GEBCO) en colores. Las estaciones muestreadas están representadas con puntos de color. En azul, las estaciones muestreadas en 2014; en magenta, las estaciones muestreadas en 2016 y en verde, las estaciones muestreadas en ambas campañas. Se muestra igualmente, la boya NOAA 42057 más cercana a la zona de estudio (16.90° N y 81.42° W). Las líneas en cian, muestran los veriles de 1000 m, 2000 m y 3000 m.

Durante el invierno boreal, el paso de los frentes fríos, da lugar a la ocurrencia de intensos eventos meteorológicos en el mar Caribe (Mooers y Maul, 1998; Ortiz, Otero, Restrepo, Ruiz y Cadena, 2013). Dado que los frentes fríos pueden alcanzar latitudes próximas al Ecuador, suelen alterar las condiciones del tiempo sobre la zona tropical. En el mar Caribe, estos eventos se caracterizan por intrusión de aire frío en latitudes entre 30° N y 10° N, con fuerte gradiente de presión en la baja tropósfera (generado por la interacción de una alta presión de una masa de aire frío y una baja presión, debido a la presencia

de la ZCIT) y una subsecuente abrupta intrusión de aire frío en la zona tropical (Hastenrath, 1991).

Debido a los fuertes gradientes de presión, el efecto de los frentes, se representa en el aumento de velocidad y cambio de dirección de los vientos superficiales. Cuando se hacen estacionarios, estos frentes pueden dar lugar a marejadas lo suficientemente fuertes como para generar inundaciones y afectar la morfología costera en el Caribe (Andrade, Thomas, Lerma, Durand y Anselme, 2013; Lerma, Thomas, Durand, Torres y Andrade, 2008; Torres y Tsimplis, 2014).

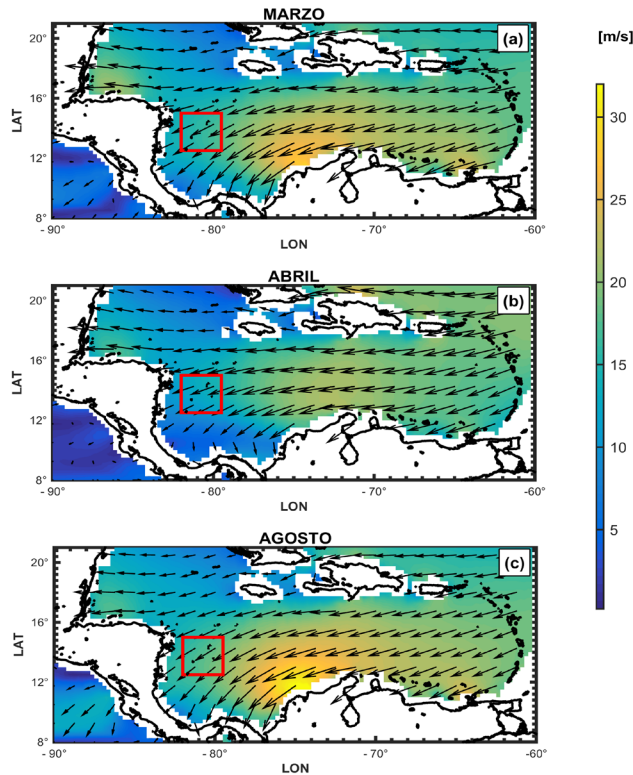


Figura 2. Datos climatológicos de intensidad y dirección del viento en el mar Caribe para los meses de (a) marzo; (b) abril y (c) agosto, meses en los cuales se realizó la toma de datos de las expediciones 2014–2016. En el recuadro rojo se señala la zona muestreada. Tomada de Reanálisis NARR.

En la parte superior del océano, específicamente en latitudes tropicales, la temperatura del agua muestra variaciones estacionales e interanuales. Usualmente, la capa superior comprendida entre los 25 y 200 m de profundidad, tiene la misma temperatura de la superficie del mar, debido a la intensa mezcla que ocurre principalmente por el forzamiento atmosférico (Montoya, 2014). La variabilidad estacional de las propiedades del agua de la capa superficial del mar Caribe, ha sido asociada principalmente a la influencia del esfuerzo rotacional del viento superficial y a las descargas de agua dulce de origen continental (Chelton, 2004; Ruiz-Ochoa, Beier, Bernal y Barton, 2012; Montoya, 2014). A escalas interanuales la región es influenciada por el forzamiento remoto dado por la ocurrencia de eventos ENSO en el Pacífico ecuatorial oriental (Enfield, Mestas-Núñez, Mayer y Cid-Serrano, 1999; Montoya, 2014). La Figura 3 muestra los datos climatológicos de la temperatura superficial del mar, tomados de la versión 2013 del World Ocean Atlas, para los

meses de muestreo de las estaciones. De igual forma, se consultó la información contenida en el Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922 – 2013 (Andrade, Rangel y Herrera, 2015) y se encontró valores de temperatura del agua y salinidad concordantes con las graficadas en las figuras 3 y 4. Estos resultados numéricos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Valores climatológicos de temperatura superficial del agua y salinidad, aproximados para la Reserva de Biósfera Seaflower, durante los meses de muestreo de acuerdo con el Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia.

Mes / Parámetro	Temperatura superficial del mar (°C)	Salinidad
marzo	27.5	36.2
abril	28	36
agosto	29	35.8

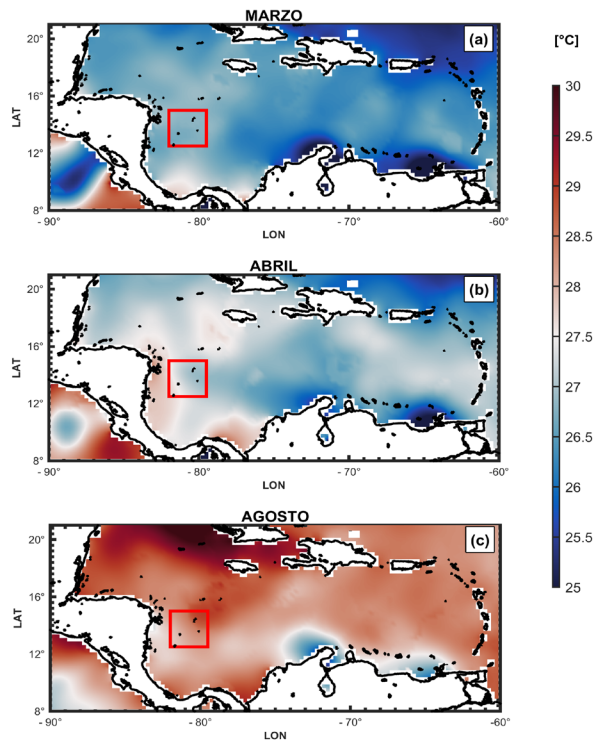


Figura 3. Datos climatológicos de temperatura superficial del agua en el mar Caribe para los meses de (a) marzo; (b) abril y (c) agosto, meses en los cuales se realizó la toma de datos de las expediciones 2014 – 2016. En el recuadro rojo se señala la zona muestreada. Tomada de WOA 2013.

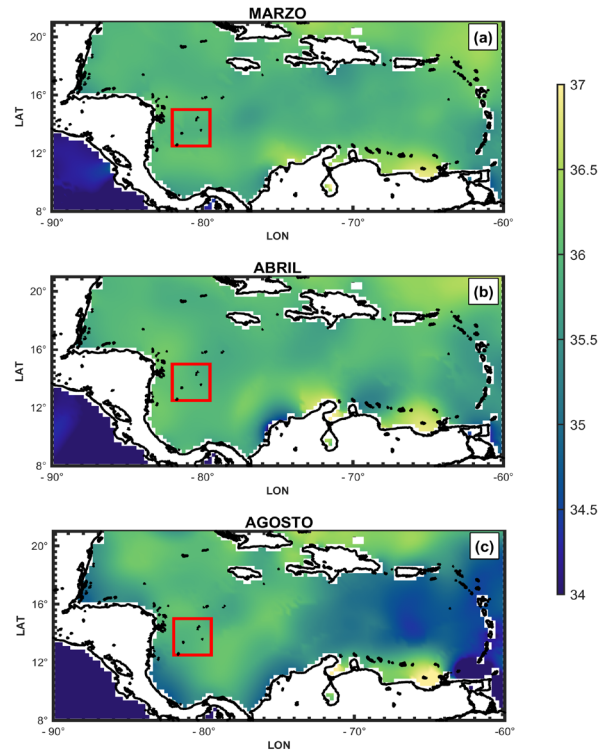


Figura 4. Datos climatológicos de salinidad del agua en el mar Caribe para los meses de (a) marzo; (b) abril y (c) agosto, meses en los cuales se realizó la toma de datos de las expediciones 2014 – 2016. En el recuadro rojo se señala la zona muestreada. Tomada de WOA 2013.

La Corriente Caribe, que domina la circulación en el área de estudio (Figura 5), está orientada zonalmente y transporta las aguas que entran a través de los pasos existentes entre las islas ubicadas en el este, llevándola hacia el golfo de México a través del canal de Yucatán (Montoya, 2014). El giro Panamá-Colombia domina la circulación en el sur de la cuenca Colombia (Andrade y Barton, 2000; Mooers y Maul, 1998; Richardson, 2005), con una marcada variabilidad estacional (Torres y Tsimplis, 2012). Jouanno, *et al.*, (2008), encontraron diferencias dinámicas entre las diferentes cuencas interiores del mar Caribe, organizándose primordialmente en dos *jets*

y determinando también, que la actividad de mesoescala es más fuerte cuando pasa de la cuenca de Venezuela a la cuenca Colombia.

El Archipiélago es un territorio insular ubicado en la zona intertropical, afectado por diferentes factores de mesoescala, tales como los remolinos ciclónicos y anticiclónicos que, transportados por la corriente Caribe, contribuyen a la generación de extremos del nivel del mar en el Caribe (Torres y Tsimplis, 2014). Así mismo, por encontrarse sobre una topografía submarina que presenta diversas geoformas, genera una dinámica oceanográfica compleja.

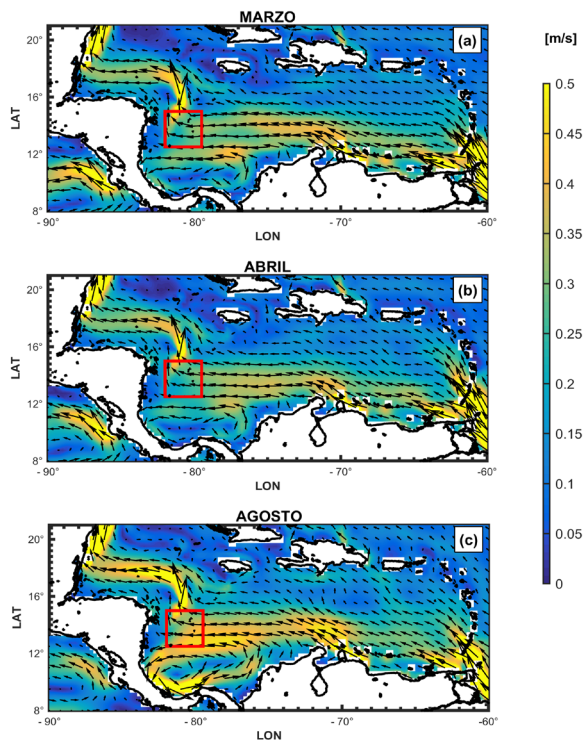


Figura 5. Datos climatológicos de corrientes superficiales en el mar Caribe para los meses de marzo (a), abril (b) y agosto (c), meses en los cuales se realizó la toma de datos de las expediciones 2014–2016. Tomada de proyecto COPERNICUS.

MATERIALES Y MÉTODOS

En los cruceros realizados a bordo del buque oceanográfico ARC Providencia en 2014 y 2016, se realizaron las estaciones oceanográficas indicadas en la Figura 1, en las que se tomaron perfiles de temperatura, conductividad y presión en la columna de agua hasta los 1600 metros de profundidad. Así, teniendo en cuenta que estos cruceros se realizaron en el marco de la Expedición Científica Seaflower, en la que se desarrollaron múltiples proyectos de investigación, al tener el buque que realizar actividades para otros proyectos, la toma de las estaciones no se hizo de manera continua.

Las 29 estaciones realizadas entre el 21 de marzo y el 08 de abril de 2014 son equidistantes dentro de una malla regular que cubre toda el área de muestreo, incluyendo a las islas de Providencia, isla cayo de Roncador, Quitasueño y Serrana. Entre el 10 y el 25 de agosto de 2016,

el muestreo de 17 estaciones se centró en los alrededores de isla cayo Serrana (Figura 1).

El instrumento utilizado para el muestreo fue un CTD modelo SBE-19 plus V2. Los datos fueron pre - procesados con el software Seasoft CTD y fueron aplicados los filtros Data conversion, Filter, Align ctd, Cell Thermal Mass, Loop Edit, Derive, Bin Average, Split y ASCII Out.

De manera que, usando los perfiles diarios de temperatura y salinidad se estimó la profundidad de la capa isotermal -en inglés, Isothermal Layer Depth, ILD-, que es aquella profundidad a la cual la temperatura de la columna de agua se mantiene muy similar a la de la superficie. Así, teniendo como referencia la temperatura a 10 m de profundidad (T_0) y un $\Delta T = 0.5^\circ\text{C}$, se usó la metodología descrita en (Kara, Rockford y Hurlburt, 2000) para el cálculo de la IDL, de modo que el límite inferior de la capa isotérmica se estimó para la mayor profundidad h_i (m) que verifica que:

$$T_0 - T(h_i) \leq 0.5 \quad (1)$$

Donde $T(h_i)$ ($^\circ\text{C}$) es el valor de la temperatura a la profundidad h_i y T_0 es la temperatura del mar en superficie (Navia, Garavito, Rodríguez y Villegas, 2015). La temperatura potencial y la densidad del agua de mar, fueron calculadas con los algoritmos TEOS-10 de la Unesco.

Los datos meteorológicos utilizados, corresponden a los datos de las estaciones meteorológicas de la red Sistema de Medición de Parámetros Oceanográficos y de Meteorología Marina (Smpomm) de la Dimar, específicamente por su cercanía a la zona de muestreo, los registrados en la estación ubicada en la isla de Providencia (latitud 13.38° N y latitud 81.36° W). Esta estación de la casa OTT, es de tipo automática y con un sistema de transmisión satelital. Adicionalmente, para registrar las variables de temperatura del aire, humedad relativa, velocidad (magnitud) y dirección del viento y presión atmosférica, en la campaña de 2016, en cada estación oceanográfica se utilizó una estación meteorológica portátil marca Davis, modelo Vantage PRO 2.

Por otro lado, se utilizaron mapas de topografía dinámica absoluta producidos por SSALTO/DUACS y distribuidos por AVISO, empleando los productos a escala global de post-proceso, con todos los satélites disponibles, empleando archivos con una resolución espacial en una grilla cartesiana de 0.25°. Estos mapas tienen correcciones de marea oceánica y terrestre, efecto de barómetro invertido, tropósfera seca y húmeda entre otros. La descripción más detallada del producto se puede encontrar en el *Manual del usuario SSALTO/DUACS (CLS-DOS-NT-06-034 del 2014/11/18)*.

RESULTADOS

Perfiles verticales de temperatura de la columna de agua

En los 29 perfiles verticales de temperatura del agua para el año 2014 (Figura 6 en azul), se observó una temperatura superficial de 27.5 °C y una profundidad de la capa de mezcla variando su espesor entre 23 m y 82 m (Figura 6). A partir de esta profundidad, la temperatura disminuye rápidamente desde 27.5 °C hasta 10 °C, a una profundidad de aproximadamente 500 m. A partir de esta profundidad, la temperatura del agua continúa disminuyendo hasta alrededor de 5 °C en cercanías de los 1000 m donde la variación en función de la profundidad disminuye.

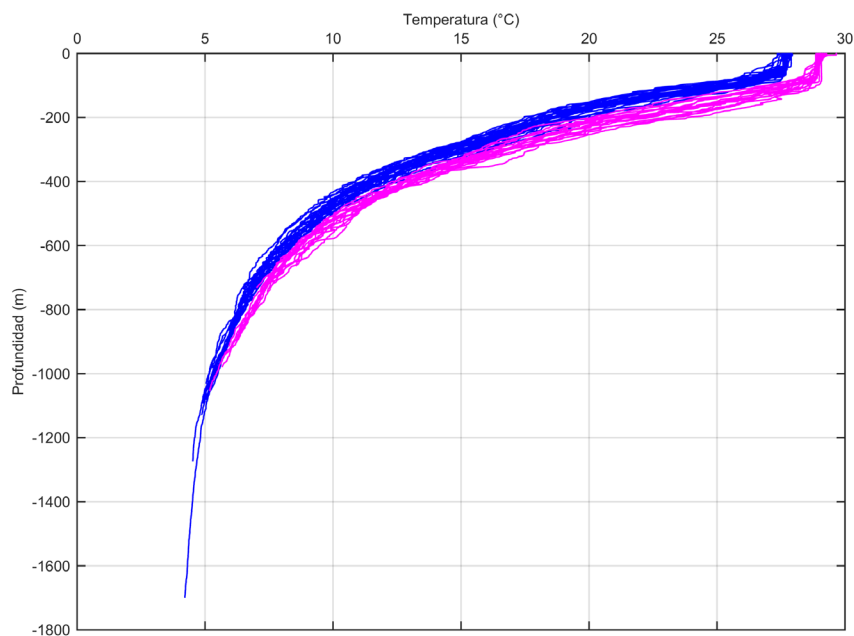


Figura 6. Perfiles verticales de temperatura de la columna de agua en las estaciones muestreadas. En azul, se muestran los perfiles de 2014 y en magenta se presentan los perfiles de 2016.

En los perfiles de 2016 (Figura 6 en magenta), se observa una temperatura superficial de 29 °C y cómo el espesor de la capa de mezcla es de 100 m aproximadamente. A partir de esta profundidad, inicia la termoclina, donde la temperatura disminuye rápidamente desde 29°C hasta 10°C, a una profundidad de 500 m. La temperatura en profundidad continúa disminuyendo hasta

temperaturas alrededor de 5° C en a los 1000 m. La mayor temperatura superficial observada en agosto, corresponde a la climatología mostrada en la Figura 3. En comparación con los perfiles de marzo y abril, los perfiles de agosto, muestran mayor temperatura a todas las profundidades.

Temperatura del agua a 10 m de profundidad

Este resultado se presenta con el fin de mostrar la variación espacial de la temperatura del mar durante los cruceros. Se muestra la variación a 10 m de profundidad para eliminar cualquier sesgo (BIAS) en el perfil de datos debido al "efecto de piel" en la superficie del océano (Fairall, y otros, 1996) en (Kara, Rockford y Hurlburt, 2000). En la mayoría de los casos, la temperatura a 10 m de profundidad es muy cercana a la temperatura superficial del océano (Kara, Rockford y Hurlburt, 2000); en (Montoya, 2014). Este resultado es el valor de referencia

inicial (T_0), utilizado en la ecuación (1) para el cálculo de IDL.

En la Figura 7 se observa la diferencia en la temperatura del agua a 10 m de profundidad para épocas climáticas diferentes (transición 2014 y veranillo 2016), con valores mayores de temperatura en época de veranillo respecto a la época de transición, en promedio de 1.5 °C. Estos valores medidos, corresponden con los datos climatológicos indicados en la Tabla 1, y concuerdan con la descripción que indica que estos valores a 10 m son muy cercanos a los superficiales debido a la intensa mezcla.

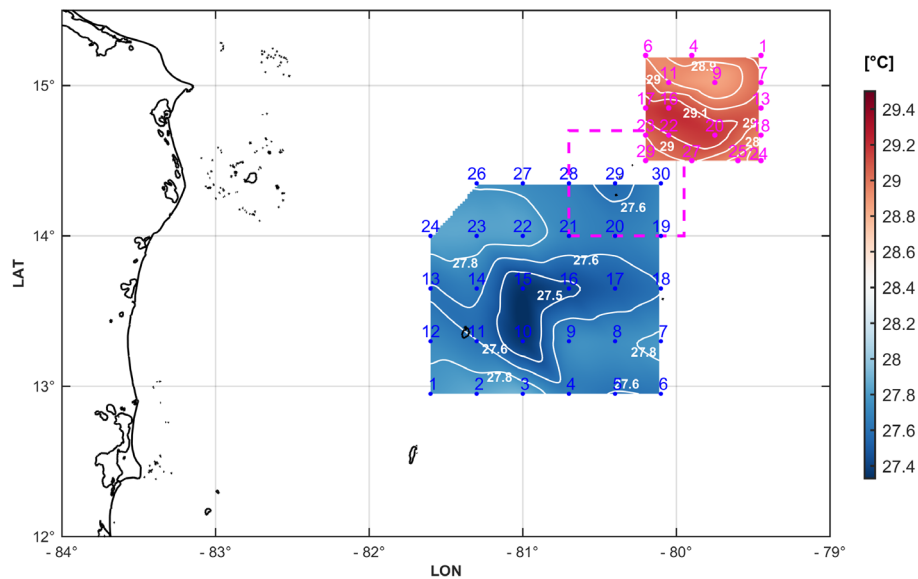


Figura 7. Variación espacial de la temperatura del agua a 10 m de profundidad para la campaña de 2014 (estaciones en azul) y 2016 (línea punteada en magenta). Para la visualización en el mapa, los datos de 2016 tienen un desplazamiento de 0.5° en latitud y longitud. Los números corresponden a la estación muestreada. En cian se presentan las isotermas cada 0.1 °C.

Para la campaña de 2014, a 10 m de profundidad se observó la variación de la temperatura entre 27.4 °C y 27.9 °C, con diferencias alrededor de 0.5 °C en toda el área muestreada, por lo cual se presenta como una zona con temperatura homogénea, con aguas levemente más frías hacia el este de la isla

de Providencia y más cálidas en el resto de la zona de estudio. Si se tiene en cuenta que las 29 estaciones fueron realizadas en un periodo de 18 días, las pequeñas variaciones observadas en la temperatura pueden deberse tanto a variaciones espaciales en la zona de estudio como a variaciones temporales.

Para la campaña de 2016, al igual que lo observado en 2014, se encontraron variaciones muy pequeñas de la temperatura del agua a 10 m, con variaciones entre 28.9 °C y 29.4 °C (Figura 7), lo que es de esperar para una zona muestreada relativamente pequeña, comparada con la zona muestreada en 2014.

Estos resultados concuerdan con los datos climatológicos mostrados en la Figura 3 para la zona de estudio, donde entre los meses de marzo y abril, hay una diferencia de más de 1 °C, respecto a la temperatura del mes de agosto.

Capa de mezcla

Para conocer en detalle el comportamiento de la temperatura del agua durante los primeros metros de profundidad, se graficaron los perfiles de temperatura de ambas campañas hasta los 150 m de profundidad (Figura 8). En esta figura, se puede observar para ambas campañas, un cambio significativo en la profundidad de la capa de mezcla entre las diferentes estaciones, con diferencias de hasta 40 m entre perfiles de la misma campaña, por cuanto más adelante se examinarán los factores que pueden estar afectando la profundización o asomeramiento de esta capa.

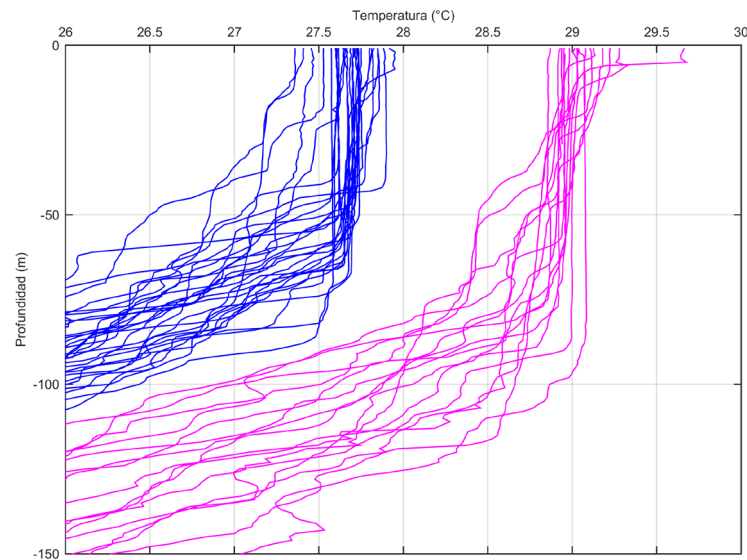


Figura 8. Perfiles de temperatura de la columna de agua en los primeros 150 m de profundidad mayores a 26°C, para resaltar la capa de mezcla. En azul, los perfiles tomados en 2014. En magenta, los perfiles de 2016.

Capa isotermal 2014

De acuerdo con la información meteorológica registrada por la Dimar en la isla de Providencia (latitud 13.579° N y 81.215 ° W, Figura 1), durante la campaña se presentaron temperaturas ambiente en promedio de 28.2 °C, humedad relativa de 74.5 %; con vientos de 3.5 m/s con dirección predominante ENE y una presión atmosférica de 1012 mbar. Como se mencionó en las secciones anteriores, durante el mes de abril, se presentó un frente frío que afectó las condiciones climáticas en la zona de estudio.

Por otro lado, debido a la gran variación del comportamiento en profundidad de los perfiles durante los primeros 100 m (Figura 8), por cada perfil se calculó la profundidad de la capa isotermal -en inglés, Isothermal Layer Depth, ILD-, (Tabla 2). Los resultados muestran la diferencia en el espesor de la IDL entre las estaciones realizadas en un espacio de 18 días. Dada la variabilidad de la capa de mezcla, se buscó en la zona de estudio, una posible relación entre la IDL y algún evento atmosférico específico, como el viento, la presencia de un frente frío, o un giro de mesoescala.

Tabla 2. Profundidad de la capa isoterma (en inglés, Isothermal Layer Depth, ILD), calculada para cada estación del crucero realizado en el 2014, organizadas cronológicamente.

Estación	Fecha (dd-mm)	Hora local colombiana	Latitud (° N)	Longitud (° W)	IDL (m)
1	21-mar	12:00	12.95	-81.60	60.4
2	21-mar	17:25	12.95	-81.30	47.8
3	21-mar	22:00	12.95	-81.00	44.9
4	22-mar	02:31	12.95	-80.70	52.7
5	22-mar	07:00	12.95	-80.40	56.5
6	22-mar	10:45	12.95	-80.10	75.3
7	22-mar	15:25	13.30	-80.10	61
8	22-mar	18:42	13.30	-80.40	64
17	22-mar	22:47	13.65	-80.40	39
18	23-mar	04:15	13.65	-80.10	45.4
9	25-mar	21:30	13.30	-80.70	67.6
12	30-mar	03:16	13.30	-81.60	59.7
13	30-mar	06:45	13.65	-81.60	72
14	30-mar	11:24	13.65	-81.30	55.8
23	30-mar	15:30	14.00	-81.30	72
24	30-mar	18:30	14.00	-81.60	66.9
26	31-mar	04:37	14.35	-81.30	62.8
22	03-abr	19:10	14.00	-81.00	88.7
28	04-abr	03:20	14.35	-80.70	68.1
27	04-abr	05:00	14.35	-81.00	57.5
29	04-abr	07:22	14.35	-80.40	83.7
30	06-abr	22:20	14.35	-80.10	72.9
19	07-abr	02:30	14.00	-80.10	70.1
20	07-abr	05:00	14.00	-80.40	72.7
21	07-abr	09:30	14.00	-80.70	75.5
15	07-abr	14:39	13.65	-81.00	79.6
16	07-abr	18:45	13.65	-80.70	62.8
10	07-abr	23:29	13.30	-81.00	44.9
11	08-abr	02:05	13.30	-81.30	55.4

Con la información de la Tabla 2 se generaron dos tipos de gráficas: la primera con la línea de tiempo de la variación de la profundidad de la IDL (Figura 9) y la segunda, donde se observa en planta los contornos de profundidad IDL (Figura 11). En la Figura 9 se visualiza la gran variación de la IDL especialmente los primeros días (21 a 23 de marzo) y los últimos días de muestreo (6 al 8 de abril). Aunque los muestreos de las

demás estaciones no fueron tomados con la misma frecuencia temporal, como en los casos anteriormente mencionados, en la IDL para las 29 estaciones, se observa un valor medio de alrededor de 63 m, con un valor de máxima profundidad isoterma el día tres (03) de abril a las 7:10 pm (88.7 m) y un valor mínimo el veintidós (22) de marzo a las 10:47 pm (39 m), indicando un rango de profundidad de casi 50 m.

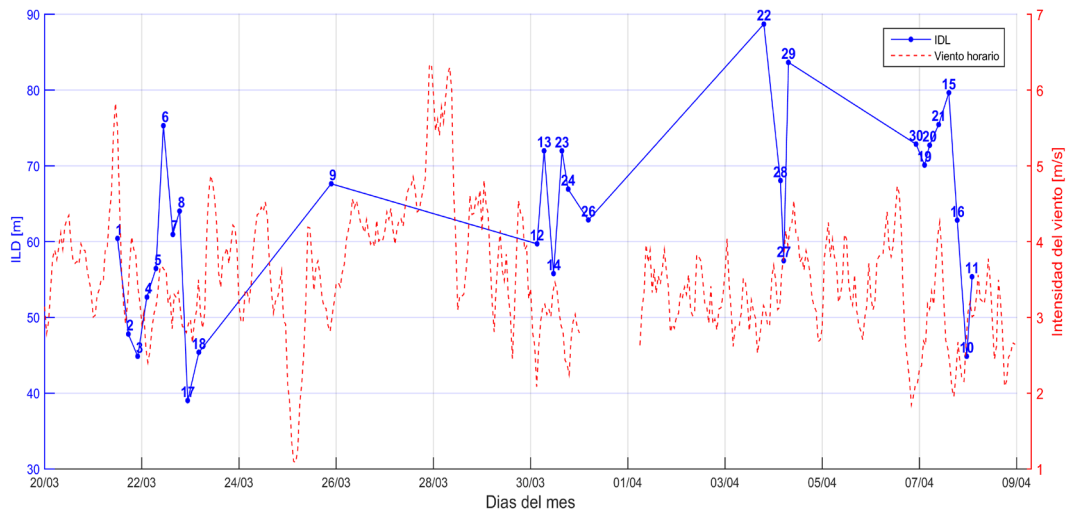


Figura 9. Variación temporal de la IDL en metros de las estaciones muestreadas en el crucero del 2014 (azul) y variación de la intensidad del viento (rojo) durante los días del muestreo en m/s. Los números en la línea azul indican la estación como se muestra en la Figura 1 y Tabla 2.

Adicionalmente, la Figura 9 muestra la relación entre la variación temporal de la IDL y la variación de la intensidad del viento registrado en la estación de la isla de Providencia (Figura 1). Los datos de viento, fueron filtrados con medias móviles cada 3 horas. Se esperaría que a mayor intensidad del viento, se presente una profundización de IDL, sin embargo, a partir de la Figura 9, no se observa una correlación entre los datos horarios de viento y la profundidad de la capa de mezcla.

Para establecer cuantitativamente la correlación lineal entre estas dos variables, se seleccionaron los datos en tiempos coincidentes entre la hora de la estación y la intensidad del viento registrado en esa misma hora. Como la serie de tiempo de viento presenta datos faltantes, para el cálculo de la correlación, se omitieron los datos tanto de viento como de IDL correspondientes al 31 de marzo de 2014.

Adicionalmente, para el viento registrado 3, 6 y 12 horas antes de la estación, se hizo el cálculo, encontrando en todos los casos, que las correlaciones no son estadísticamente significativas al 95 %. De igual modo, la serie de tiempo filtrada con media móvil de 3 horas, se correlacionó para los valores de la intensidad

del viento en la hora coincidente de la estación y 3, 6 y 12 horas antes de la hora de la estación. Al igual que en el caso anterior, no se encontró ninguna asociación estadísticamente significativa entre el viento filtrado y la IDL.

Como la IDL de las estaciones muestreadas no correlaciona significativamente con la intensidad del viento registrada en la isla de Providencia, ni en horas coincidentes, ni con desfases de 3, 6 ni 12 horas, se analizó el efecto de los giros de mesoescala como otra posible causa de la profundización de la IDL.

Capa isotermal 2016

Durante esta campaña, no se presentaron fenómenos meteorológicos adversos y de acuerdo con los datos de la estación de la isla de Providencia (Figura 1), se registraron temperaturas ambiente en promedio de 29.6°C, con vientos de 3.76 m/s con dirección predominante E y una presión atmosférica de 1010 mbar. La humedad relativa en la región fue de 83.4 % en promedio.

Al igual que para la campaña de 2014, para los perfiles recolectados en 2016 para cada estación, se calculó el valor de la capa isotermal,

resultados que se presentan en la Tabla 3. Con estos datos, se graficaron tanto la variación temporal de la capa isotermal (Figura 10), como la distribución espacial de la información calculada, para las estaciones (Figura 11). Para

la estación 6 (20 de agosto de 2016 a las 8:20), el perfil recolectado solamente llegó hasta una profundidad de 33 m y debido a la metodología para el cálculo, no fue posible obtener el valor de la IDL de esta estación.

Tabla 3. Profundidad de la capa isotermal (IDL) (en inglés, Isothermal Layer Depth, ILD), calculada para cada perfil de 2016, organizadas cronológicamente

Estación	Fecha (dd-mm)	Hora local colombiana	Latitud (° N)	Longitud (° W)	IDL (m)
22	10-ago	16:03	14.17	-80.55	39.42
18	11-ago	07:59	14.17	-79.95	79.93
24	11-ago	11:04	14.00	-79.95	82.18
17	15-ago	10:31	14.35	-80.70	77.4
16	15-ago	15:22	14.35	-80.55	52.49
25	16-ago	07:00	14.00	-80.10	91.69
27	16-ago	10:50	14.00	-80.40	86.41
6	20-ago	08:20	14.70	-80.70	N/A
4	20-ago	15:15	14.70	-80.40	102.93
1	21-ago	06:30	14.70	-79.95	109.57
7	21-ago	12:12	14.52	-79.95	113.7
13	21-ago	16:30	14.35	-79.95	97.37
9	22-ago	06:30	14.52	-80.25	70.81
11	22-ago	12:50	14.52	-80.55	52.54
20	24-ago	14:55	14.17	-80.25	93.14
29	25-ago	08:15	14.00	-80.70	81.68
23	25-ago	12:58	14.17	-80.70	88.75

En la Figura 10 se observa la variación de la IDL, la cual fue mayor a la variación del 2014 (Figura 9), a pesar de ser un área más pequeña y en un lapso de tiempo menor. La menor profundidad se observó el 10 de agosto (39 m), en tanto que la mayor profundidad ocurrió el 21 de agosto (114 m), mostrando una diferencia de 75 metros. Esta alta variación del IDL se observa en lapsos cortos de tiempo,

como entre la estación 7 y 11, donde en un lapso poco mayor a 24 horas, la diferencia en la IDL es de 61 metros. El homogéneo comportamiento atmosférico en este lapso de tiempo, muestra que posiblemente la causa de las diferencias de la IDL entre estas estaciones, las cuales se encuentran a 10 millas náuticas de distancia aproximadamente, sea dominada por variaciones espaciales del océano.

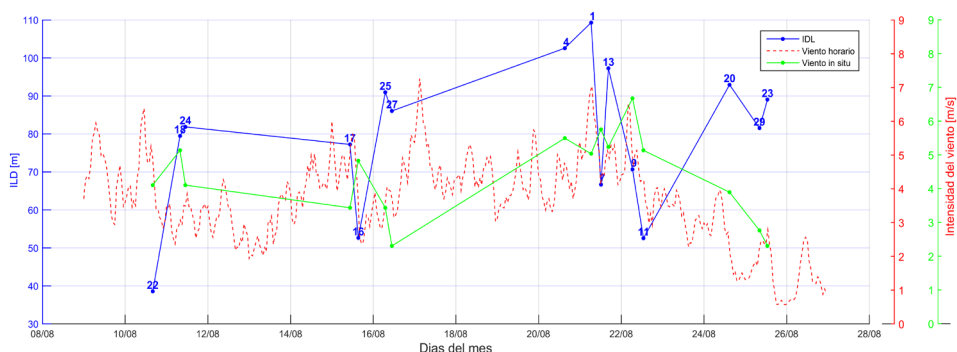


Figura 10. Variación temporal de la IDL (m) de las estaciones muestreadas en el crucero del 2016. Los números indican la estación como se muestra en la Figura 1 y Tabla 3. La línea roja indica la velocidad del viento medida en Providencia. La línea verde, intensidad del viento verdadero registrado con la estación meteorológica portátil a bordo.

Igual a como se hizo con los datos de 2014, para la campaña de 2016 en la Figura 10 se muestra la variación de IDL (línea azul) respecto de la intensidad del viento de la estación de Providencia (línea roja), así como la variación de la intensidad del viento registrado con la estación portátil que se llevó a bordo del buque (línea verde), durante los muestreos. Se calculó el coeficiente de correlación lineal entre la IDL y los vientos en horas coincidentes y en 3, 6 y 12 horas antes de la estación, tanto con los datos del instante, como con los datos del viento promediados cada 3 horas. En esta ocasión tampoco se encontró una asociación

estadísticamente significativa entre los datos de la intensidad del viento y la IDL, al 9%, en ninguno de los casos estudiados.

Variación espacial de la profundidad de capa isoterma

En la Figura 11 se examina la distribución espacial de la profundidad de la capa isoterma para las campañas de 2014 y 2016. A pesar de encontrarse en una zona de muestreo pequeña y con una variación temporal de algunos días, se observa gran variación en valores de IDL.

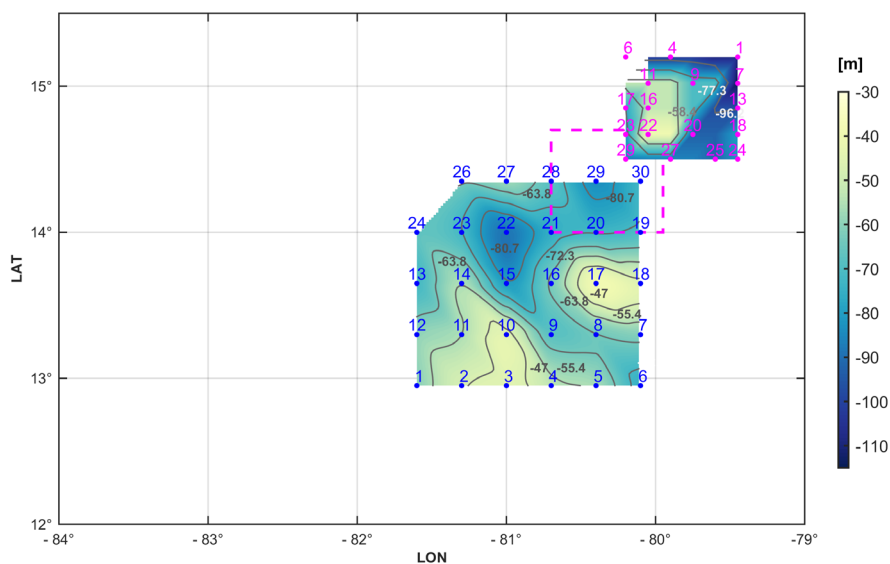


Figura 11. Variación espacial de IDL (en m) para la campaña de 2014 (estaciones en azul) y 2016 (línea punteada en magenta). Para la visualización en el mapa, los datos de 2016 tienen un desplazamiento de 0.5° en latitud y longitud. Los números corresponden a la estación muestreada. En cian se presentan las isolinas de profundidad.

En 2014 se observan dos sectores con valores someros de IDL de cerca de 40 m de profundidad: uno con centro en latitud 13.65 ° N y longitud 80.40 ° W (estación 17) y otro en latitud 13.30 ° N y longitud 81 ° W (estación 10). La IDL más profunda se observa con centro en la estación 22.

En la campaña de 2016 se observan las mayores profundidades de la IDL (110 m) con centro en latitud 14.7° N y longitud 79.95° W (estación 1), y la IDL más somera (39 m) hacia la estación 22 en latitud 14.17° N y longitud 80.55° W.

Cuatro estaciones se repitieron en los dos cruceros. Así, por ejemplo, la estación 19 del 2014, espacialmente corresponde a la estación 25 del 2016. En esta estación la IDL en el primer

crucero fue de 70 m de profundidad, en tanto que en el segundo crucero fue más profunda a 92 m, lo cual reafirma la variación temporal de la IDL en esta región.

Perfiles verticales de salinidad de la columna de agua

Los perfiles de salinidad registrados en 2014 (Figura 12, en azul), muestran salinidades superficiales alrededor de 36.25. Entre los 50 y 150 m, aproximadamente, se observa una capa con un incremento en la salinidad desde 36.2 hasta 36.8. Entre los 150 m y 750 m de profundidad, la salinidad disminuye desde 36.8 hasta un mínimo cercano a los 34.8. A partir de los 750 m de profundidad, la salinidad tiende a estabilizarse alrededor de 35.

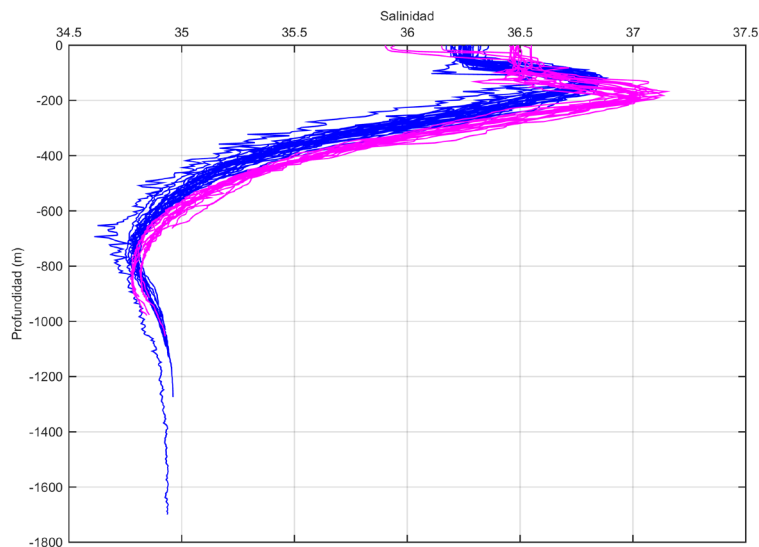


Figura 12. Perfiles verticales de salinidad de la columna de agua en las estaciones muestreadas en los cruceros del 2014 (azul) y 2016 (magenta).

Los perfiles de salinidad de la expedición Seaflower 2016 (Figura 12 en magenta), muestran una salinidad superficial mayor respecto a la observada en 2014, la cual fue de alrededor de 36.5. En 2016, a profundidades ente 160 y 200 m, los perfiles registran valores de salinidad mayores a 37. A una profundidad alrededor de los 750 m, se encontró el valor mínimo de salinidad de 34.8.

Al comparar los perfiles de salinidad de los dos cruceros, se observa que en el segundo crucero, el de 2016, se presenta una capa de mezcla más profunda, así como mayores valores de salinidad en todas las profundidades, salvo tres estaciones con valores de salinidad superficial cercana a los 36.

Salinidad del agua superficial

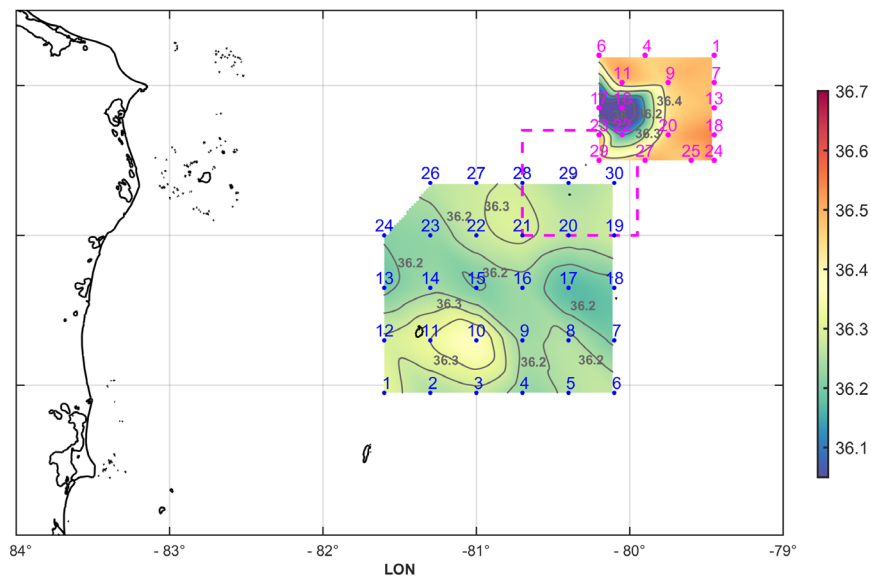


Figura 13. Variación espacial de la salinidad a 10 m de profundidad de los datos de los cruceros 2014 (estaciones en azul) y 2016 (línea punteada en magenta). Para la visualización en el mapa, los datos de 2016 tienen un desplazamiento de 0.5° en latitud y longitud. Los números corresponden a la estación muestreada. En cian se presentan las isohalinas cada 0.1.

La Figura 13 muestra el comportamiento de la salinidad del agua a 10 m de profundidad para las campañas 2014 y 2016. En 2014, el promedio de salinidad a esta profundidad, en las 29 estaciones, es 36.2 y la variación de salinidad en toda el área fue de alrededor de 0.2, con valores ligeramente mayores hacia la zona norte y suroeste de la región de estudio. Las estaciones del 2016, muestran un promedio de salinidad alrededor de 36.4, y valores entre 35.9 y 36.5, con un rango de 0.4. Hacia el costado oriental de la región de estudio, se pueden observar valores de salinidad ligeramente mayores. Entre los datos de salinidad de 2014 y los de 2016, se observa una diferencia de alrededor de 0.2.

Presencia de un frente frío en el Caribe del 8 a 11 de abril de 2014

Por otro lado, se quiso verificar si al igual a lo que se documentó en 2004, por Morales *et al.* (2004), donde, durante el paso de una onda del este por la zona de estudio, se evidenció la profundización de la capa de mezcla y para el

evento del frente frío de 2014, ocurría un efecto similar en la capa isotermal. Como es sabido, los frentes fríos que se desplazan de latitudes altas a medias, presentan un gradiente fuerte de presión con el consecuente aumento en la velocidad y cambio de dirección del viento, que podría ocasionar una profundización de la capa de mezcla.

A partir del día 8 de abril de 2014 ingresó al Caribe un frente frío que afectó las condiciones atmosféricas del área de estudio y la navegabilidad del buque en el que se desarrolló la toma de datos de la expedición Seaflower. En la Figura 14, se observan la presión superficial y los vientos de los días 7 al 12 abril de 2014, con la progresión del frente hacia el Caribe central. Durante los días 7 y 8 de abril, la toma de datos de la columna de agua se encontraba en su fase final, por cuanto los efectos del frente se sintieron en las condiciones ambientales, especialmente en el oleaje y en las condiciones de navegabilidad (Figura 16).

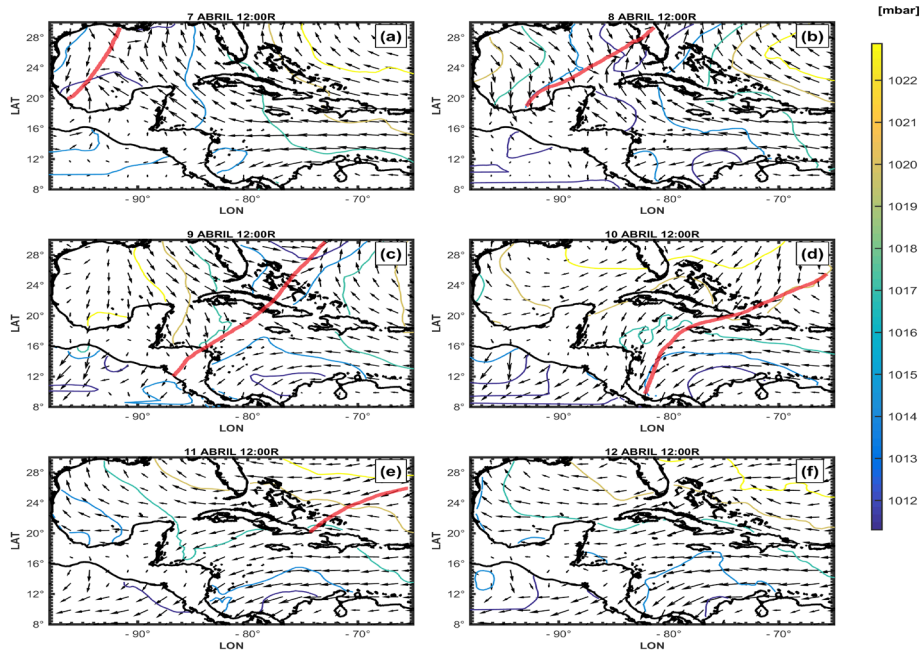


Figura 14. Datos de vientos (CCMP) y presión superficial (NARR) para las 12:00 m GMT. (a) y (b) 7 y 8 de abril respectivamente con el frente frío en el golfo de México; (c) y (d) 9 y 10 de abril con el frente frío estacionario en la cuenca Colombia; (e) y (f) 11 y 12 de abril con el frente frío saliendo del mar Caribe. La posición aproximada del frente frío se indica con la línea roja.

Para verificar las alteraciones en las condiciones de vientos en la región de estudio por el paso del frente frío, se utilizó la información de la boya de la NOAA 42057 (latitud 16.75 ° N y longitud

81.55 ° W), en la ubicación mostrada en la Figura 1. En la Figura 15 se muestran las componentes zonal y meridional del viento y demás variables medidas, para el lapso del crucero en 2014.

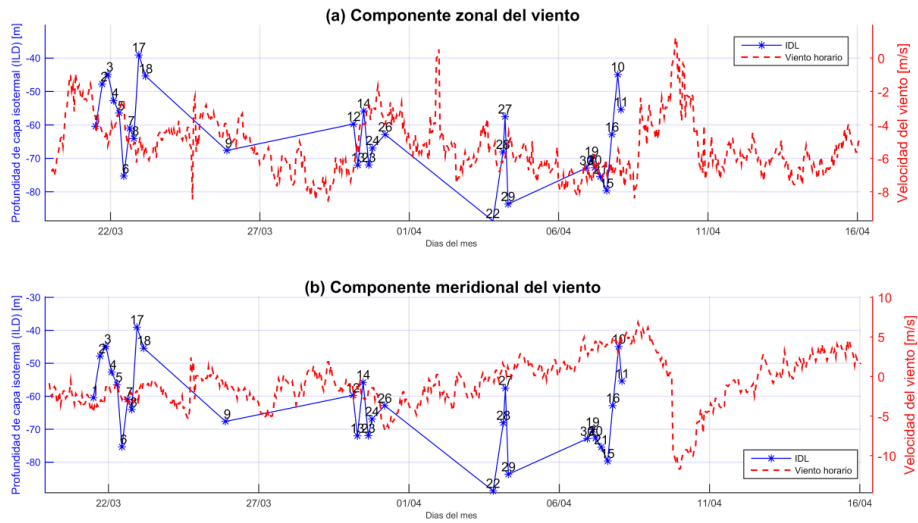


Figura 15. Componentes zonal y meridional registrados por la boya NOAA 42057 del 1 al 30 de abril de 2014. Datos en hora local colombiana.

En condiciones normales, los vientos en el mar Caribe tienen componente zonal negativa; la Figura 15, muestra la perturbación causada por el frente frío. En los valores el de la componente zonal del viento durante los días del frente, con la disminución de la intensidad del viento a partir del día 9 de abril de 2014. Adicionalmente, la Figura 15 deja ver claramente como afectó el frente frío el comportamiento de la componente meridional del viento, donde se observa un cambio de dirección, pasando de un componente positivo (hacia el norte) a uno negativo (hacia el sur). Si bien espacialmente hay diferencias entre la ubicación de la boya y el área del cruce, no

se observa una relación entre el IDL y el viento medido por la boya.

Desafortunadamente, para la fecha del paso del frente por la región de estudio, ya había finalizado la toma de muestras en la columna de agua, y no fue posible verificar el efecto del frente frío en la capa superficial del océano. Sin embargo, en la Figura 16 puede observarse claramente cómo la mayoría de variables atmosféricas y oceanográficas registradas por la boya de la NOAA, presentaron perturbaciones importantes en los valores registrados durante el paso del frente, respecto a los datos del resto del mes.

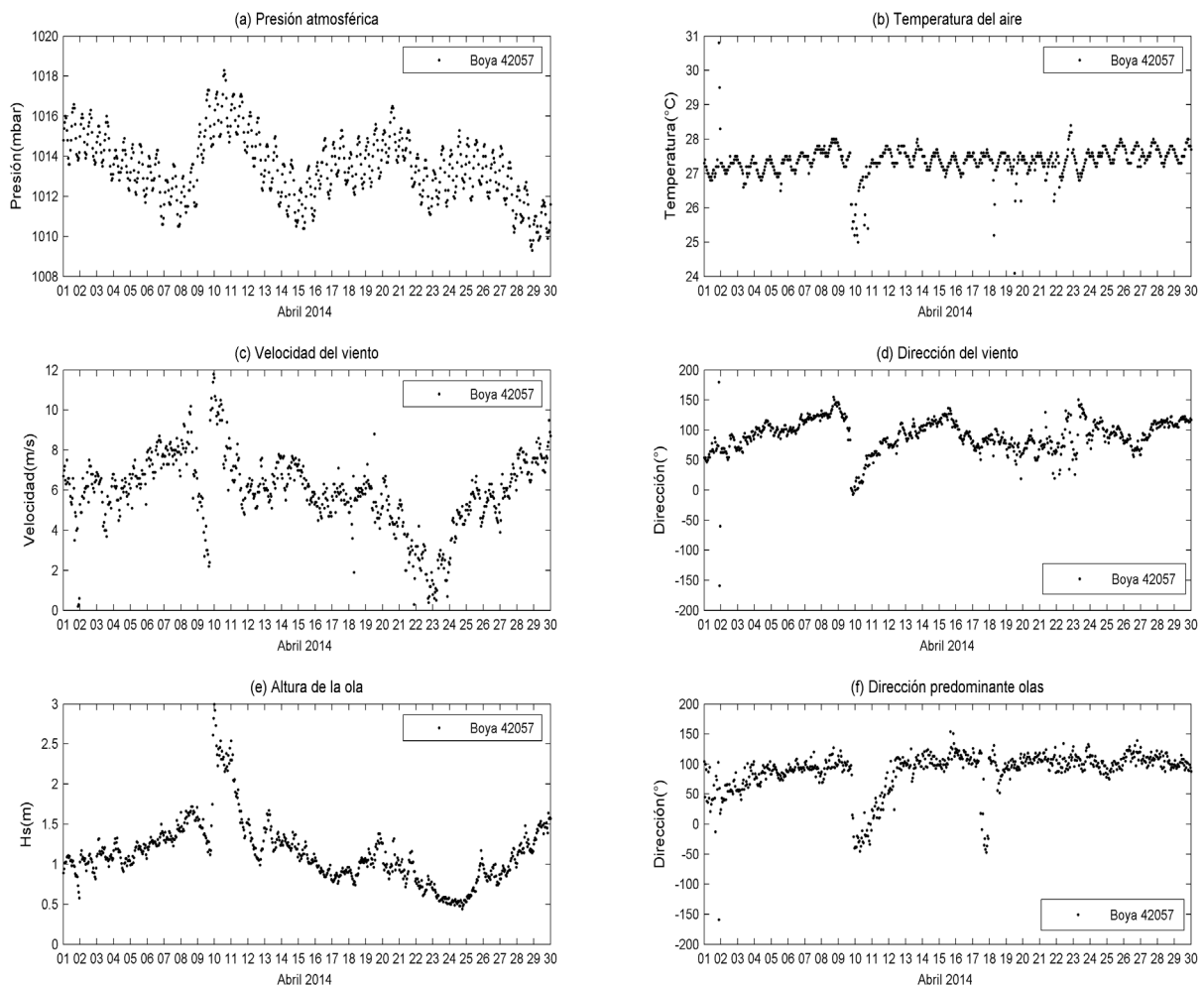


Figura 16. Datos registrados por la boya NOAA 42057 del 1 al 30 de abril de 2014. Datos en hora local colombiana.

En la Tabla 3 se presenta un resumen de las principales variables océano-atmosféricas registradas por la boya de la NOAA 42057,

especificando los valores encontrados para los días con frente frío (8 al 11 de abril), respecto a los valores registrados el resto del mes.

Tabla 4. Datos básicos de las principales variables ambientales del mes de abril de 2014, registradas por la boya de la NOAA 42057. Se muestran los datos de los días con frente frío y los del resto del mes.

Valor	Presión atmosférica (mbar)	Temperatura del aire (°C)	Velocidad del viento (m/s)	Altura de la ola (m)	Periodo dominante (s)
Datos días de frente frío (8 al 11 de abril) (95 datos)					
Promedio	1015.09	27.17	3.72	1.82	7.74
Mínimo	1011.20	25.00	1.13	1.12	4.55
Máximo	1018.30	28.00	6.07	3.00	10.00
Datos del mes sin frente frío (624 datos)					
Promedio	1013.18	27.40	2.99	1.06	7.51
Mínimo	1009.30	24.10	0.1	0.44	4.00
Máximo	1016.60	30.80	5.19	1.92	11.43

Los datos de la Tabla 4 indican que para los días del frente frío, la presión atmosférica subió cerca de 2 mbar, la velocidad del viento se incrementó en 0.73 m/s, la altura de la ola se incrementó cerca de 0.8 m, con valores máximos de hasta 2 m por encima del promedio, con respecto a los datos del resto del mes.

Así, teniendo en cuenta el aumento en la velocidad del viento, sería de esperar una profundización de la capa de mezcla, sin embargo, el efecto observado en las estaciones realizadas el 7 de abril (Figura 15), fue un asomeramiento de esta capa y un enfriamiento de las aguas superficiales (estación 10 en la Figura 7). Es pertinente mencionar que en la Figura 16-c se observa una disminución de la intensidad del viento en la boya, pasando de 8 m/s a 2 m/s, la que ocurrió entre el 8 y 9

de abril/14, por lo cual no guardaría relación con el asomeramiento observado del IDL en la noche del 7 de abril/14. No obstante lo anterior, es interesante observar que el paso del frente frío generó variación en la dirección del viento, pero además y según su posición, puede generar aumento o disminución de la intensidad del viento.

Paso de giros en la zona de estudio

Con el objetivo de estudiar si el paso de giros en la zona de estudio tuvo influencia en estos cambios de la IDL en 2014, en la Figura 17 se graficó la topografía dinámica absoluta (ADT por sus siglas en inglés) en la zona, para los días 23 de marzo, 30 de marzo, 4 de abril y 7 de abril durante los cuales hubo muestreo (Figura 9), a partir de los datos del programa AVISO.

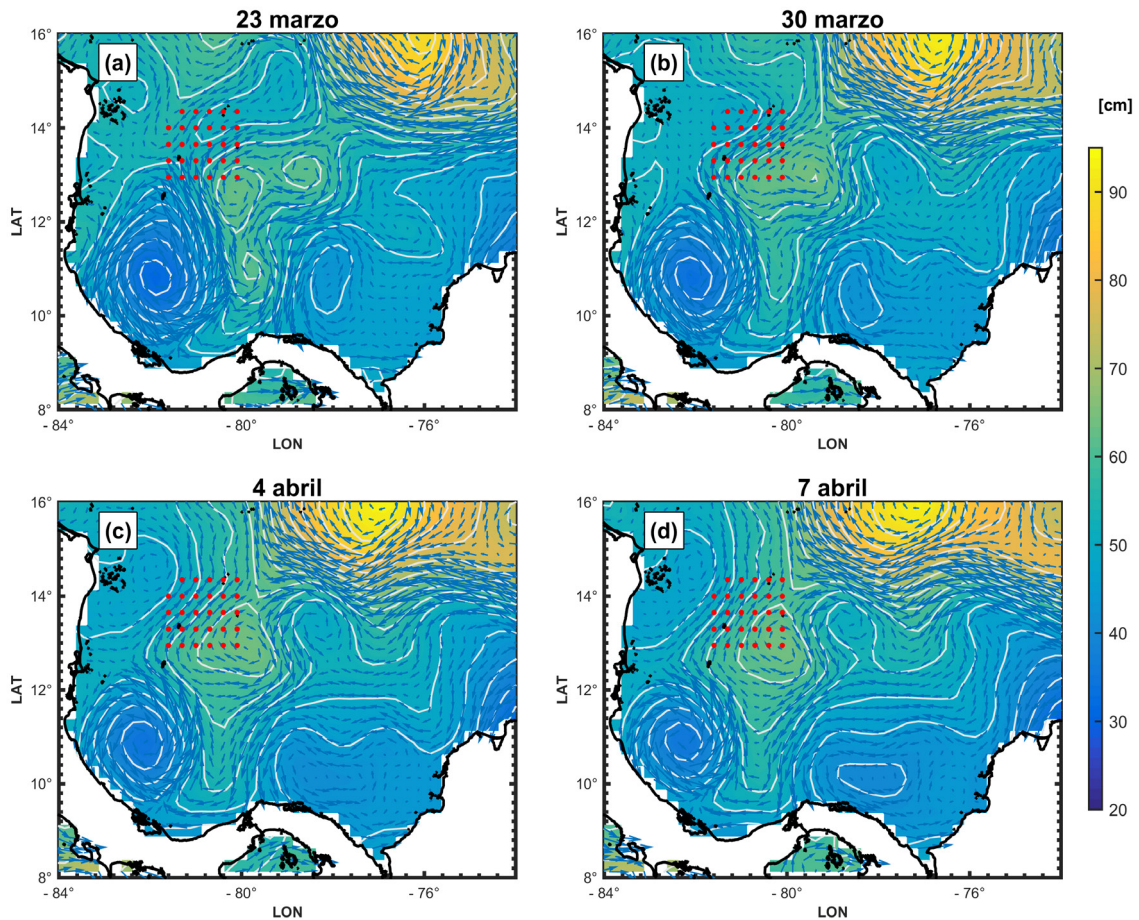


Figura 17. Topografía dinámica absoluta (ADT) de la región de estudio de acuerdo con la escala de colores, para los días: (a) 23 de marzo; (b) 30 de marzo; (c) 4 de abril y (d) 7 de abril de 2014 y sus correspondientes corrientes geostroficas superficiales (u, v en cm s^{-1}) indicadas por los vectores. Los puntos en rojo representan las estaciones muestreadas. Las líneas blancas representan los contornos del nivel del mar.

La ADT mide las variaciones del nivel del mar con referencia al geoide, por lo cual incluye las variaciones en el nivel del mar causado por el campo promedio de las corrientes permanentes, así como las anomalías del nivel del mar por las variaciones en estas corrientes generadas por fenómenos de mesoescala, como por ejemplo por el paso de giros o eddies.

En el hemisferio norte, los giros anticiclónicos (circulación en el sentido de las manecillas del reloj), tienen en su centro la topografía dinámica elevada y su circulación hace que la capa de mezcla se profundice, por el contrario, los giros ciclónicos (circulación en contra al

sentido de las manecillas del reloj) tienen en su centro una depresión en la topografía dinámica y su circulación hace que la capa de mezcla se asomere.

En la Figura 17 se muestra el campo de topografía dinámica absoluta y los vectores de la corriente, junto con las estaciones muestreadas en 2014. Al noreste de la región mostrada en la figura, se observa el tránsito en dirección oeste de un giro anticiclónico; por el contrario, al suroeste se observa el giro Panamá-Colombia con rotación ciclónica, pero el 23 de marzo y el 7 de abril/14, con su diámetro disminuido. En medio de estos dos ciclones, hacia el sureste de

la zona muestreada (puntos rojos), se observa un giro anticiclónico menos intenso al señalado en el noreste de la figura, generando un aumento en la topografía dinámica absoluta, que afecta las estaciones realizadas en diferente medida durante el crucero. Se esperaría que este giro anticiclónico profundizara la capa de mezcla, en especial hacia las estaciones al sureste de la zona muestreada, sin embargo, no se observa este comportamiento espacialmente coherente en la Figura 11.

Esta falta de coherencia espacial, puede ser por el lapso de tiempo entre la toma de datos en las estaciones, especialmente por la alta dinámica de los giros en la zona de estudio, evidente en la Figura 17. No obstante, los efectos de los giros en la profundidad de IDL, se perciben en los siguientes casos. La estación 6, se tomó cuando el giro anticiclónico afectaba solo el sureste de la zona de estudio (Figura 17a), y tiene la IDL más profunda entre las estaciones muestreadas entre el 21 y 23 de marzo/14 (Figura 9 y Figura 11). Las estaciones 22 y 29 muestran las IDL más profundas de las estaciones realizadas el 3 y 4 de abril/14 (Figura 9), lo cual es consecuente con la ubicación del giro anticiclónico en el área de estudio (Figura 17c), que afecta todas las estaciones, salvo aquellas al noroeste de la zona de estudio, donde están las estaciones 27 y 28 (Figura 11).

DISCUSIÓN

Los cruceros realizados en 2014 y 2016 permitieron describir las condiciones físicas de una parte del mar, en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, en dos épocas climáticas diferentes. Así, para el año 2014 (marzo - abril), se observó una temperatura superficial del mar alrededor de 27.5° C con un máximo de 27.9° C en superficie y un mínimo de 4.5° C a 1700 m de profundidad, mientras que para 2016 (agosto), la temperatura superficial estuvo en promedio 1.5°C por encima del promedio de 2014, con un máximo de 29.6° C en superficie y un mínimo de 5° C a 1100 m. Estos resultados concuerdan con los datos climatológicos mostrados en la Figura 3, donde hay una diferencia de más de 1°C de temperatura entre los meses de marzo

y abril, respecto a la temperatura del mes de agosto en la zona de estudio.

Para el año 2014, los valores de salinidad superficial del agua estuvieron alrededor de 36.2, y los valores en 2016 fueron de 36.4. El valor máximo de salinidad fue registrado en 2016, con un valor de 37.2 a 190 m de profundidad y el valor mínimo se registró en 2014 con un valor de 34.6 a 700 m de profundidad. Estos valores de salinidad registrados para estas dos épocas concuerdan entre otros, los datos reportados en (Rangel Herrera, Palomino, Herrera y Andrade, 2015; Morales, Vanegas, Bustamante y Andrade, 2004; Cabrera y Donoso, 1993).

Adicionalmente, los valores de salinidad corresponden con los datos climatológicos de salinidad en la superficie del mar, mostrados en la Figura 4, donde, para la región de estudio, los valores de salinidad no presentan mayores variaciones.

En el 2016 (agosto) pudieron observarse valores mayores tanto de temperatura como de salinidad comparados con las del 2014 (marzo-abril). Dada la cercanía entre las estaciones de los dos cruceros, se asumen las diferencias encontradas como consecuencia de las variaciones estacionales.

Por otro lado, en ambas campañas se encontró gran variación en la IDL, con rangos entre 49 y 76 m de profundidad en un mismo día para el 2014 y entre 52 y 91 m de profundidad en el mismo día, en el año 2016. En ambos casos, la influencia de la intensidad del viento se verificó en la profundización/asomeramiento de la IDL, mediante el cálculo de coeficientes de correlación para horas coincidentes y 3, 6 y 12 horas antes de la estación, sin encontrar una influencia directa en las variaciones diarias de IDL. Para el año 2014, se trató de explicar analizando el efecto en la capa de mezcla debido a la presencia de un frente frío hacia el 7 de abril/14, así como a causa del paso de giros o eddies.

No se pudo establecer una clara influencia de eventos como un frente frío o la presencia de eddies en la variación de las profundidades de la capa isoterma, respecto a los perfiles del

2014. Esto sugiere, que la profundidad de capa en esta área puede por una suma de factores que no son fácilmente reconocibles y que deben ser estudiadas a mayor profundidad, para lo cual sería necesario un monitoreo permanente de las variables atmosféricas y de la columna de agua durante por lo menos un año.

Parte de la dificultad en comprender el comportamiento de la IDL en el área de estudio, es por la compleja dinámica oceanográfica en este Archipiélago, donde las islas más al norte (Serranilla y Bajo Nuevo) se encuentran influenciadas por la Corriente Caribe y la permanente presencia de giros afectados por las limitaciones impuestas por la batimetría en su tránsito hacia el Mar Caimán; en tanto que las otras islas son afectadas por el Giro Panamá-Colombia, con Quitasueño y Serrana en el límite del giro, en tanto que las otras islas con una influencia más directa de la estacionalidad de este giro (Torres, Sánchez y Moreno, 2017).

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento a la tripulación de los buques oceanográficos de la Dirección General Marítima, por su oportuno apoyo durante las campañas de muestreo; así como al profesor Raúl Montoya, por sus valiosos aportes a este trabajo que ayudaron a enriquecer este manuscrito.

REFERENCIAS

- Andrade, C. (1991). *Mesoscale variability of the Caribbean Sea from GEOSAT*. Monterey, CA: Naval Postgraduate School.
- Andrade, C. (2009). Variaciones temporales termohalinas en la cuenca Colombia. *Boletín Científico CIOH*(27), 8-21.
- Andrade, C. A. (2015). *Oceanografía dinámica de la cuenca de Colombia*. Cartagena de Indias, Bolívar, Colombia: Alpha Editores.
- Andrade, C. A. y Barton, E. D. (2005). The Guajira upwelling system. *Continental Shelf Research*, 25, 1003-1022.
- Andrade, C. A., Thomas, Y. F., Lerma, A., Durand, P. y Anselme, B. (2013). Coastal flooding hazard related to swell events in Cartagena de Indias, Colombia. *Coastal Res.*, 29(5), 1126-1136.
- Andrade, C. y Barton, E. (2000). Eddy development and motion in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.* 105, 26191-26201.
- Andrade, C., Giraldo, S. y Lonin, S. (1996). Nota sobre la circulación de las aguas en el Bajo Alicia y el sector de San Andrés. *Boletín Científico CIOH*(17), 27-36.
- Andrade, C., Rangel, O. y Herrera, E. (2015). *Atlas de los datos oceanográficos de Colombia 1922-2013 Temperatura, Salinidad, Densidad, Velocidad Geostrofica*. Bogotá, Colombia: Dirección General Marítima - Ecopetrol S.A. Ed. Dimar.
- Cabrera, E. y Donoso, M. (1993). Estudio de las características oceanográficas del Caribe colombiano, región III, zona 1, PDCTM. *Bol. Cient. CIOH*(13), 19-32.
- Chelton, D. B. (2004). Satellite Measurements Reveal Persistent Small-Scale Features in Ocean Winds. *Science*, 303, 978-983.
- Enfield, D. B., Mestas-Núñez, A. M., Mayer, D. A. y Cid-Serrano, L. (1999). How ubiquitous is the dipole relationship in tropical Atlantic sea surface temperatures? *J. Geophys. Res.*, 104, 7841-7848.
- Espinosa, R. (17 de enero de 2001). *Oficializada reserva de la biosfera en San Andrés*. Recuperado el 27 de 03 de 2017, de www.eltiempo.com: <http://www.eltiempo.com/archivo/documento/MAM-644886>
- Fairall, C. W., Bradley, E. F., Godfrey, J. S., Wick, G. A., Edson, J. B. y Young, G. S. (1996). Cool-Skin and warm-layer effects on sea surface temperature. *J. Geophys. Res.*, 101, 1295-1308.
- Garay, J. F., Castillo, F., Andrade, C., Aguilera, J., Niño, L., De la pava, M., Márquez, G. (1988). Estudio oceanográfico del Caribe colombiano

- en el área del archipiélago de San Andrés y Providencia y cayos adyacentes. *Boletín Científico CIOH*(9), 3 - 73.
- González, E. (1987). Oceanografía Física descriptiva del archipiélago de San Andrés y Providencia con base en el análisis de los cruceros OCEANO VI a IX. *Boletín Científico CIOH*(7), 73-100.
- Hastenrath, S. (1991). *Climate dynamics of the Tropics*. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers.
- Jouanno, J., Sheinbaum, J., Barnier, B., Molines, J. y Debreu, L. (2008). The mesoscale variability in the Caribbean Sea. Part I: Simulations and characteristics with an embedded model. *Ocean Modell.*, 23 (3-4), 82-101.
- Kara, A., Rockford, P. A. y Hurlburt, H. E. (2000). An optimal definition for ocean mixed layer depth. *J. Geophys. Res.*, 105, 16803-16821.
- Lerma, A., Thomas, Y., Durand, P., Torres, R. R. y Andrade, C. (2008). Sea-level variability from 1950 to 2000 and hazards linked to storm surge episodes in Bocagrande and Castillogrande peninsulas. *Boletín Científico CIOH*, 26, 72-85.
- Molares, R., Vanegas, T., Bustamante, J. y Andrade, C. (2004). Aspectos oceanográficos sobre la Depresión Providencia en mayo de 2004. *Boletín Científico CIOH*(22), 11-25.
- Montoya, R. (2014). *Variabilidad estacional e interanual del balance de calor en la capa de mezcla superficial en el mar Caribe*. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín.
- Mooers, C. N. y Maul, G. A. (1998). IntraAmericas sea circulation. *The Sea vol II edited by K. H. Brink, A. R. Robinson*, 183-208.
- Murillo, I. y Ortiz, R. (2013). *Análisis de los metadatos sobre proyectos de investigación científica marina desarrollados en el área de la Reserva de Biósfera Seaflower*. Bogotá D.C.: APC - CCO.
- Narvaez, G. y León, G. (2003). Intrusión de aire frío en áreas tropicales. Estudio del caso del 5 al 8 de enero del 2002. *Revista de Meteorología Colombiana*, 99-108.
- Navia, J. D., Garavito, J. D., Rodríguez, A. T. y Villegas, N. L. (2015). Determinación de las capas isotérmica y activa, contenido y flujo de calor en aguas oceánicas de la cuenca del Pacífico colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 33, 39-51.
- Ortiz, J. C., Otero, L. J., Restrepo, J. C., Ruiz, J. y Cadena, M. (2013). Cold fronts in the Colombian Caribbean Sea and their relationship to extreme wave events. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 13, 2797-2804.
- Rangel, O., Herrera, E., Palomino, A., Herrera, G. y Andrade, C. (2015). Análisis de rasgos del clima regional en el Atlas de los Datos Oceanográficos de Colombia 1922 - 2013. *Boletín Científico CIOH*(33), 3-17.
- Richardson, P. L. (2005). Caribbean Current and eddies as observed by surface drifters. *Deep Sea Res., Part II*, 52(3-4), 429-463.
- Ruiz-Ochoa, M., Beier, E., Bernal, G. y Barton, E. D. (2012). Sea surface variability in the Colombian Basin, Caribbean Sea. *Deep-Sea Res., Part I*, 64, 43-53.
- Small, R. y Szoeké, S. (2007). The Central American Midsummer Drought: Regional Aspects and Large-Scale Forcing. *J. Climate*, 20, 4853-4873.
- Torres, R. R. y Tsimplis, M. N. (2012). Seasonal sea level cycle in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res.*, 117, C07011.
- Torres, R. & Tsimplis, M. N. (2014). Sea level extremes in the Caribbean Sea. *J. Geophys. Res. Oceans* 119, 4714-4731.
- Torres, R., Sánchez, D. y Moreno, M. (2017). Variación estacional del nivel del mar en el archipiélago de San Andrés, Providencia y Santa Catalina, mar Caribe. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 52(2), 343-352.
- Wang, C. (2007). Variability of the Caribbean Low-Level Jet and its relations to climate. *Clim. Dyn.*, 29, 411-422.
- Whyte, F., Taylor, M., Stephenson, T. y Campbell, J. (2008). Features of the Caribbean low level Jet. *Int. J. Climatol.*, 28, 99-128.