

DISTRIBUCIÓN VERTICAL DE TEMPERATURA Y SALINIDAD EN EL ÁREA COSTERA DE SANTA MARTA (COLOMBIA)

VERTICAL DISTRIBUTION OF TEMPERATURE AND SALINITY AT SANTA MARTA COASTAL AREA (COLOMBIA)

FRANCISCO GARCÍA

M.Sc. Ing. Ambiental, Universidad del Magdalena, Docente, fcofdogarcia@yahoo.com

CARLOS PALACIO

Ph.D Ingeniería, Universidad de Antioquia, Docente, cpalacio@udea.edu.co

URIEL GARCIA

Biólogo, Universidad del Magdalena, Docente, uriel.garcia@yahoo.es

Recibido para revisar Marzo 11 de 2011, aceptado Junio 29 de 2011, versión final Agosto 30 de 2011

RESUMEN: Fueron determinados los perfiles de temperatura, salinidad y densidad en el punto de descarga del emisario submarino de Santa Marta. Se encontraron tres masas de aguas. Los periodos de estratificación térmica coinciden con las dos épocas de lluvias en la región (entre abril y junio la primera y agosto y diciembre la segunda). El espesor de la termoclina puede alcanzar hasta 12 metros de espesor y gradientes térmicos de 0.67 °C/m.

PALABRAS CLAVE: Perfil de salinidad, perfil de temperatura, termoclina, estratificación

ABSTRACT: Temperatura, salinity and density profiles were determined at Santa Marta submarine outfall discharge point. Two water masses were found. The periods of thermal stratification coincide with two rainy stations (between April and June the first one and August and December the second one). The thermocline can reach up to 12 meters of thickness and thermal gradients of 0.67 °C/m.

KEYWORDS: Salinity profile, Temperature profile, Thermocline, Estratification

1. INTRODUCCIÓN

En general en los ecosistemas marinos, los flujos de marea, vientos locales, surgencias y el aporte de agua dulce proveniente de ríos, generan condiciones hidrográficas de mezcla y estratificación de la columna de agua [1, 2], provocando cambios en el balance de nutrientes y en el estado trófico de estos ecosistemas [2, 3]. Un incremento de los niveles de nutrientes en la columna de agua de bahías y estuarios, se asocia a los procesos de mezcla [2, 4, 5] mientras que la disminución en los niveles de estos para la superficie o su acumulación en el fondo de la columna de agua, se observa bajo condiciones de estratificación [2, 5].

Los estudios de caracterización de las masas de agua en el Mar Caribe Colombiano son escasos [6]. En esta región ocurren fenómenos de surgencia cuya influencia es más notoria en las costas de los departamentos de La Guajira y Magdalena, en donde ascienden aguas

pertenecientes a la Masa de Agua Subtropical Sumergida (MASS), provenientes de profundidades entre 100 y 200 m [7,8], y que se caracterizan por presentar temperaturas de 19 a 25 °C, salinidades menores a 36.5 y densidad de aproximadamente 24 g/L [8, 9]. Su incidencia es estacional y coincide no sólo con la presencia de los vientos Alisios del noroeste, sino también con el desplazamiento sur-norte de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) en el ciclo anual, en razón a la intensidad diferencial de los vientos en cada hemisferio [8].

En el Área Costera de Santa Marta (ACSM) que incluye, las Bahías de Taganga y Santa Marta (BTySM), se ha desarrollado un uso diversificado de las aguas marinas que involucran recreación, saneamiento básico y una creciente actividad industrial y portuaria. En esta zona, que es uno de los principales destinos turísticos del país, dados sus paisajes y la belleza natural de sus playas, también se disponen las aguas residuales de la ciudad mediante el uso de un emisario

submarino que en la actualidad vierte 1000 L/s. Es un área propicia para el arribo de buques de gran calado, dado que a pocos metros de su línea costera se pueden encontrar profundidades importantes, lo que ha permitido el desarrollo de la actividad portuaria. Todos estos usos del ACSM se combinan con la pesca artesanal una de las principales fuentes de sustento de poblaciones nativas. Ello ha traído como consecuencia un importante impacto antrópico que genera problemas de contaminación ambiental, como lo han descrito algunos autores [10-15]. En estos estudios de calidad de agua se encontraron indicios de contaminación de las aguas recreacionales [10-15]; los coliformes fecales y totales mostraron valores altos superiores a los límites permisibles para aguas de contacto primario [15].

Las alteraciones sobre la calidad bacteriológica del agua en el ACSM son generalmente atribuidas a la disposición final de aguas residuales mediante el uso del emisario submarino. Sin embargo no existe información científica que pueda corroborar o refutar dicha tesis. Después de la descarga de agua residual desde los difusores del emisario submarino al medio marino, la pluma asciende rápidamente a través de la columna de agua, debido a su flotabilidad en relación con las aguas circundantes [16]. En el proceso de ascenso la misma se va diluyendo, disminuyendo la concentración de sustancias contaminantes y aumentando gradualmente su densidad, hasta igualar la del medio receptor. Eventualmente pueden ocurrir niveles de atrapamiento de la pluma flotante, bien sea en la superficie o en un punto de la columna de agua donde alcanza su flotabilidad neutra. El nivel de atrapamiento por flotabilidad neutra, está gobernado por la aparición de estratificación en la columna de agua [16].

En este artículo se presentan los resultados de las mediciones de los perfiles verticales de temperatura, salinidad y densidad, en el punto donde se ubica la descarga del emisario submarino en el ACSM. A partir de estos datos se determina la presencia de termoclinas, para inferir si ocurre o no el atrapamiento de la pluma de la descarga de aguas residuales.

2. MATERIALES Y METODOS

2.1 Área de estudio

El ACSM que incluye las BTySM, se ubica entre los 11,21 y 11,30 de latitud norte y -74,20 y -74,24 de longitud oeste en el Mar Caribe. La localización de la

misma se puede apreciar en la Figura 1, donde a la vez se muestra la ubicación de la estación de medición (11,25 Lat., -74,22 Long.) usada en esta investigación. Su conformación es abierta y su línea costera está limitada al norte y al sur por formaciones rocosas y en su parte central predomina una playa arenosa. El régimen climático regional comprende una época lluviosa de junio a noviembre y otra de sequía de diciembre a mayo, durante la cual se presenta la influencia de los vientos alisios del noreste, con una velocidad media de 6,0 m/s y rango de variación de 0,3 - 12 m/s [9, 17]. Debido a la configuración de la costa y a la orientación, intensidad y frecuencia de los vientos alisios se presenta un evento de surgencia local moderado, durante la época seca.

2.2 Muestreo

Los datos hidrográficos fueron obtenidos mediante un WLR 7 Aandera equipado con sensores de presión (0 – 700 kPa m), temperatura (Thermistor: Fenwall GB32JM19 de -3 a 35 °C); Conductividad (Conductivity Cell 3094 0 – 77 mmho/cm). Los muestreos se realizaron de forma mensual entre enero y diciembre de 2009. En el punto de muestreo el equipo fue bajado lentamente en la columna de agua afín de registrar los datos. Los muestreos fueron realizados mensualmente (a mitad del mes) en horas de la mañana (entre 8:00 y 10:00 a.m.)

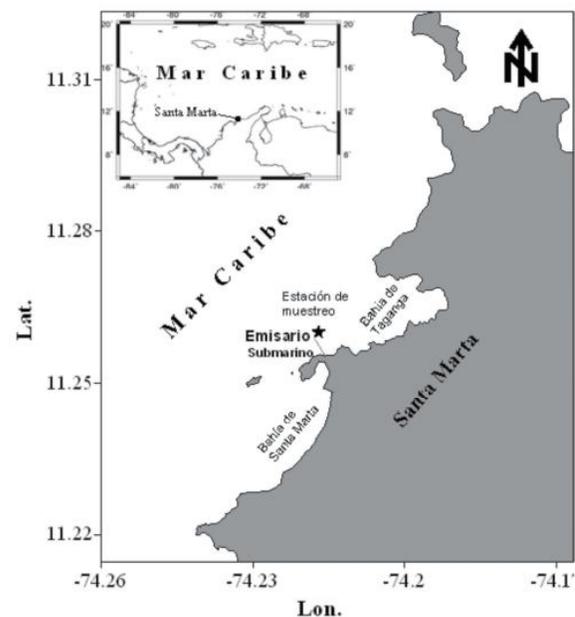


Figura 1. Localización del ACSM y de la estación oceanográfica

2.3 Análisis

Los datos incluyeron mediciones de profundidad, temperatura y conductividad, derivándose de estos la salinidad y la densidad, calculadas a partir de la ecuación de estado para agua de mar [19], siguiendo la recomendación de la UNESCO [20]. Se generaron perfiles verticales de temperatura, densidad y salinidad y diagramas T-S. La termoclina, piconclina y capa de mezcla, se encontró mediante el uso del algoritmo híbrido para MLD (mixed layer depth) propuesto por Holte et al. [21]. Para determinar la profundidad de la termoclina se usó el método del umbral que busca la profundidad a la cual la temperatura o los perfiles de densidad cambian en un valor predefinido y relativo con referencia los registros de la superficie. Para determinar la profundidad de la termoclina en el ACSM se asumió que hay un gradiente fuerte en la base de la capa de mezcla y por lo tanto, se buscan valores críticos de gradiente [21].

3. RESULTADOS

3.1 Perfiles de temperatura, salinidad y densidad

Los perfiles de temperatura, salinidad y densidad obtenidos en la columna de agua en la estación de monitoreo, se muestran en la Figura 2. Las mediciones hidrográficas entre enero y mediados de marzo revelan una capa superficial bien mezclada, en la que los perfiles verticales de la temperatura, la salinidad y densidad, son casi uniformes. En este periodo ocurren procesos turbulentos de mezcla accionados por la energía eólica y el intercambio de calor en la interface entre el aire y el mar que crean condiciones de mezcla entre el fondo del océano y la superficie. Se presentan igualmente corrientes ascensionales en dirección a la costa (surgencia o afloramiento) [22]. Dicho fenómeno oceanográfico es muy significativo entre Punta Gallinas y Puerto Colombia [6, 22, 9]. Este afloramiento de aguas profundas, que provienen entre los 100 y los 200 m de profundidad, es generado por los vientos Alisios que producen un transporte masivo de agua (transporte Ekman) superficial y subsuperficial en dirección perpendicular y hacia la derecha (por efecto de la fuerza de Coriolis) de la dirección del viento, prácticamente paralela a la costa. El retiro masivo de agua en la costa deja un vacío que es rápidamente reemplazado por agua profunda con temperaturas de 21-25 °C y salinidades

de 36. -37.2 partes por mil. Estas aguas, con tales características físicas, pertenece a la «masa de agua subtropical sumergida» (MASS) que se localiza entre los 100 y 200 m de profundidad en el Mar Caribe [6, 22]. La MASS tiene su origen aproximadamente en la latitud 30°N en el océano Atlántico, zona donde la evaporación es muy alta y las precipitaciones muy bajas por causa de los vientos Alisios.

Como resultado, la salinidad del agua aumenta en consecuencia con la densidad, ocasionando así su hundimiento hasta varios cientos de metros por debajo de los cuales se encuentra el «agua fría intermedia» en el Atlántico, que fluye de las regiones subpolares al ecuador. Parte de la MASS entra al Caribe por las Antillas Menores, y se localiza en las profundidades descritas anteriormente [22].

En este periodo del año no hay estratificación dado que hay un flujo ascensional de agua fría y más densa que no permite la formación de capas. También ocurre un periodo de surgencia menor en el mes de julio. La surgencia costera está bien delimitada durante las estaciones secas.

Hay dos épocas del año donde ocurren claros periodos de estratificación, de finales de abril a junio y entre agosto y diciembre. En estos hay una marcada diferencia entre los valores de temperatura en la superficie y el fondo. Las temperaturas registradas van entre 26 y 30 °C y densidades menores a 35 Unidades Prácticas de Salinidad (UPS). Estos periodos de estratificación ocurren durante las estaciones húmedas, especialmente en la de mayor duración. La surgencia es nula debido a la ausencia de los vientos Alisios. Otro factor favorable para la formación de capas estratificadas, es la presencia de la contracorriente de Colombia; esta viene acompañada por los vientos provenientes del suroeste-oeste y que también actúan como impulsores de dicha corriente [22].

Con respecto a la evolución temporal de las temperaturas en la columna de agua (superficie y fondo) en el ACSM durante el periodo de estudio, se registraron valores extremos de 22.3°C y 30.2°C correspondientes a los meses de febrero y agosto respectivamente. La media anual fue de 26.2°C. De diciembre a abril las temperaturas superficiales se mantuvieron por debajo de la media anual. De mayo a noviembre se mantienen

por encima de la media anual exceptuando el mes de julio donde se presenta un descenso considerable de temperatura. La salinidad, registró valores extremos entre 35.6 UPS y 36.5 UPS en los meses de agosto y abril respectivamente, indicando una variación anual de 0.9 UPS. La media anual fue de 36.1 UPS. Las salinidades mayores por encima de la media anual se registran de enero a julio y las menores, inferiores a la

media anual se presentan de agosto a diciembre. Con relación a la densidad se registran valores superficiales extremos de 22 y 24.8 kg/m³ en los meses de agosto y enero respectivamente. La media anual fue de 24 kg/m³ y las densidades mayores por encima de la media anual se presentan de enero a abril y las menores inferiores a la media anual se registran de mayo a diciembre.

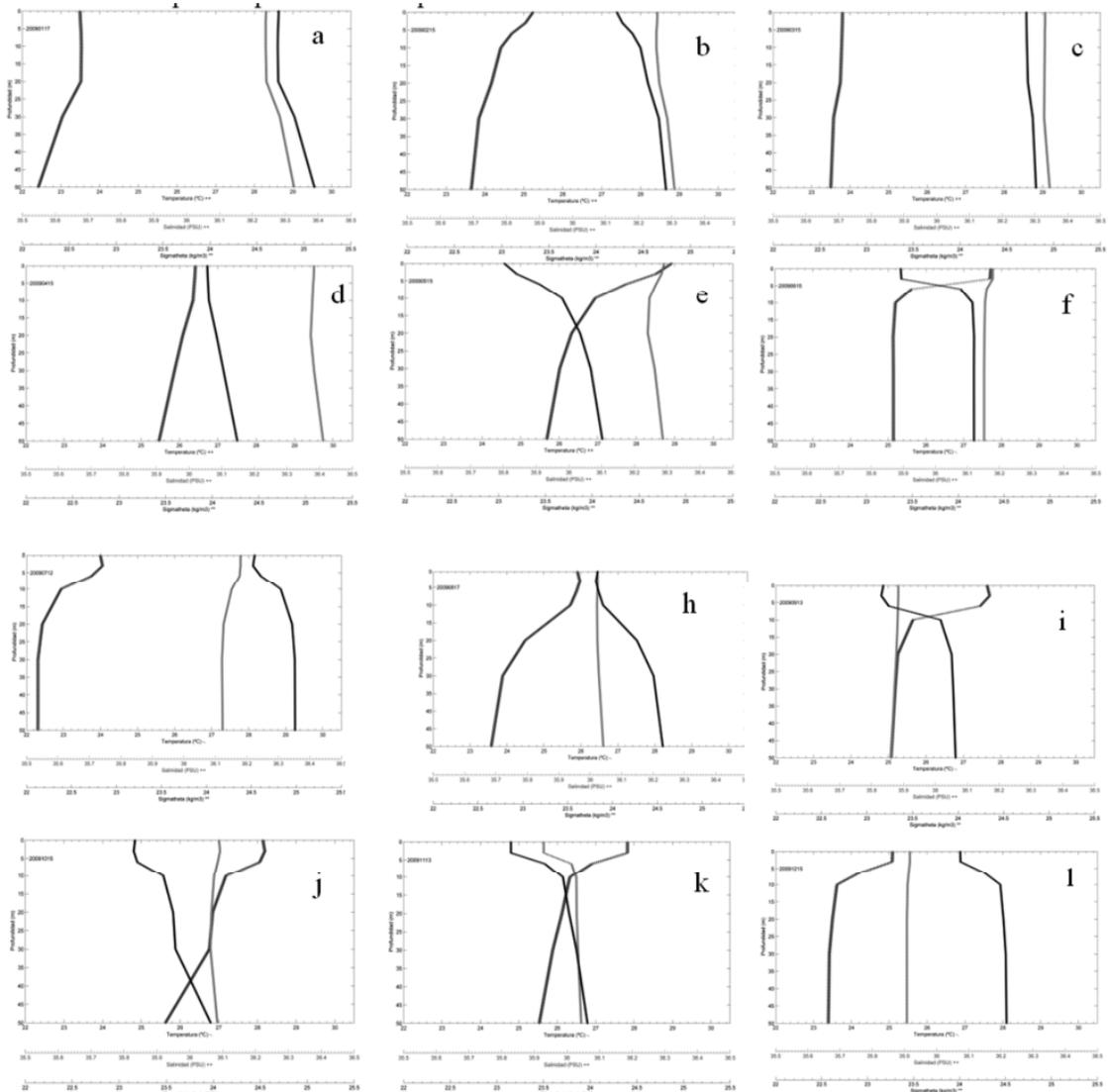


Figura 2. Perfiles de Salinidad (línea roja), temperatura (línea azul) y densidad (línea negra) de la columna de agua a).Enero, b).Febrero, c).Marzo, d).Abril e).Mayo, f).Junio, g).Julio, h).Agosto, i).Septiembre, j).Octubre, k).Noviembre, l). Diciembre.

3.2 Termoclina y Pícnoclina

En la Figura 3 se presentan las profundidades de la termoclina y picnoclina para los periodos de estratificación. El algoritmo usado identifica la

profundidad de la capa de mezcla (MLD) que se muestra en la figura como una línea azul horizontal, para cada perfil de temperatura y densidad (líneas gruesas negras verticales). Igualmente se trazan las pendientes de las termoclinas (línea roja) en la grafica

de la temperatura. La línea roja también es la pendiente de la pycnoclina para los perfiles de densidad. La profundidad de intersección de la termoclina y la capa de mezcla se muestra con un punto de color naranja, mientras que para la pycnoclina el punto es de color verde. El fondo de la termoclina es el punto en donde

dejan de coincidir el perfil de temperatura (línea negra gruesa) y la pendiente de la termoclina (línea roja). La información de la profundidad de la capa de estratificación, su punto de inicio y finalización en la columna de agua, su espesor y los gradientes logrados se muestra en la Tabla 1.

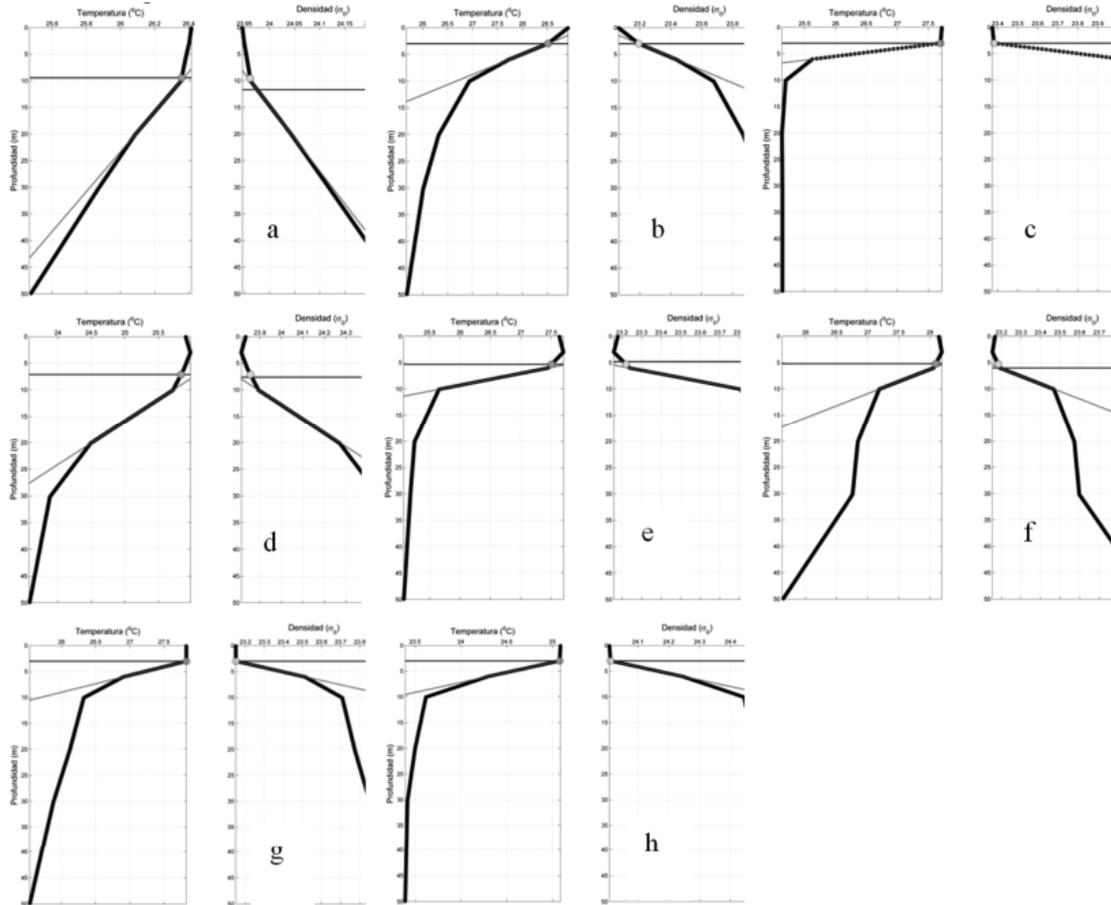


Figura 3. MLD, termoclina y pycnoclina para los perfiles de temperatura y densidad en el ACSM a).Abril, b).Mayo, c).Junio, d).Agosto, e).Septiembre, f).Octubre, g).Noviembre, h).Diciembre.

Tabla 1. Formación de la en el ACSM para los periodos de estratificación

Fecha	Profundidad inicio (m)	Profundidad de terminación (m)	Temperatura inicio (°C)	Temperatura terminación (°C)	Gradiente (°C/m)	Espesor (m)
Abril	4.02	10.00	27.03	26.00	0.172	5,98
Mayo	3.01	9.56	28.51	26.94	0.240	6,55
Junio	3.02	6.10	27.69	25.60	0.679	3,08
Agosto	7.14	20.00	25.84	24.50	0.104	12,86
Septiembre	5.33	10.00	27.51	25.70	0.388	4,67
Octubre	5.23	10.00	28.09	27.10	0.208	4,77
Noviembre	3.01	10.00	27.83	26.20	0.233	6,99
Diciembre	3.02	10.00	25.08	23.60	0.212	6,98

4. DISCUSIÓN

Los perfiles de salinidad, temperatura y densidad en el mes de marzo muestran una distribución de agua uniforme y estable, es decir, hay muy poca diferencia entre los valores medidos en la superficie y el fondo. El diagrama TS (Figura 4) muestra las masas de aguas encontradas. Las condiciones hidrográficas dan indicios de la presencia de dos masas de agua bien definidas, la MASS y MACC. La primera de estas coincide con los vientos alisios y la época seca entre enero y abril y una época de menor intensidad y corta duración en julio. En ella los perfiles son uniformes con poca variación entre la superficie y el fondo. Son generalmente aguas más frías y con salinidades altas que llegan por la circulación termohalina que permite el afloramiento o surgencia de aguas profundas en la bahía. La MACC ocurre en la época de lluvias, entre abril y junio la primera y agosto y diciembre la segunda. Son aguas menos densas y con una mayor temperatura que pueden alcanzar los 30°C. La alternación de estas dos masas de agua, permite la ocurrencia de una tercera, no muy bien definida que puede tener características mixtas entre la MASS y la MACC. Esta se ha denominado de transición o MAT. Las diferencias de temperatura entre el fondo y la superficie de la columna de agua en el ACSM son el factor predominante de los cambios de densidad.

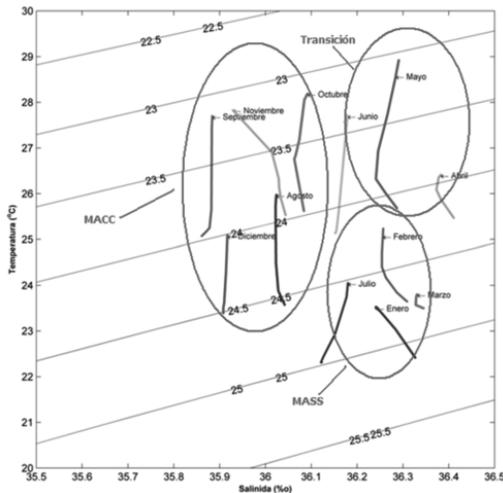


Figura 4. Diagrama T-S para ACSM

Al observar la variación temporal de la temperatura y la salinidad tanto en el fondo como en la superficie de la columna de agua (ver Figura 5), se advierte que esta última, no registra diferencias importantes entre los dos

niveles; por el contrario la temperatura, presenta periodos de tiempo en los que hay diferencias marcadas (superiores a los 5°C) entre los valores del fondo y de la superficie.

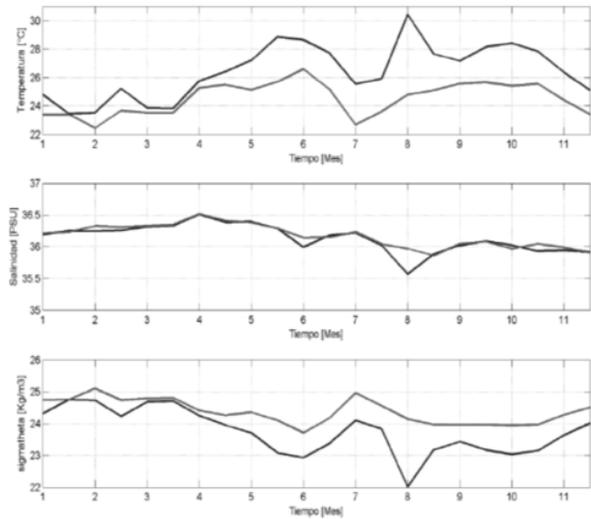


Figura 5. Variación temporal de la temperatura, salinidad y densidad en el ACSM. Superficie (línea azul), fondo (línea roja).

5. CONCLUSIÓN

En la época del año con aguas de la MASS, no hay estratificación vertical en el ACSM. Este fenómeno ocurre cuando se presenta la masa de agua asociada con la MACC. Es allí cuando pueden experimentarse termoclinas con gradientes hasta de 0,67°C/m. En el periodo de aguas de transición que se da a finales de los meses de abril, junio, agosto y diciembre pueden ocurrir periodos cortos de estratificación con gradientes más bajos.

La información de la presencia de la termoclina en el ACSM da indicios del atrapamiento de la pluma flotante de la descarga de aguas residuales, dispuestas por el emisario submarino; cuando ocurre el fenómeno de estratificación de la columna de agua (entre abril y junio) y de agosto a diciembre). El resto del año la pluma puede aflorar a la superficie, allí el proceso de dilución juega un papel importante en la disminución de los contaminantes vertidos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a COLCIENCIAS y las universidades del Magdalena y de Antioquia por la financiación brindada para este estudio.

REFERENCIAS

- [1] Kiørboe, T., Turbulence, Phytoplankton cell size, and the structure of pelagic food Webs, *Advances in Marine Biology*, 29, pp. 1-72, 1993.
- [2] López, D. J., Gárate, I., Bustillos, J., Guzmán, R., Alonso, R. and Murillo, R., Variabilidad del estado trófico y la biomasa del fitoplancton de Bahía Concepción, Golfo de California (1997-1999), *Hidrobiológica*, 13(3), pp. 195-206, 2003.
- [3] Scharek, R., Smetacek, V., Fahrbach, E., Gordon, L., Rohardt, G. and Moore, S., The transition from winter to early spring in the Eastern Weddell Sea, Antartica: Plankton biomass and composition in relation to hydrography and nutrients, *Deep-Sea Research*, 41(8), pp. 1231-1250, 1994.
- [4] Delgadillo, F., Gaxiola, G., Segovia, J., Muñoz, A. and Orozco, M., The effect of vertical mixing on Primary Production in Bay of the Gulf of California, *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 45, pp. 135-148, 1997.
- [5] Casas, B., Varela, M. and Bode, A., Seasonal succession of phytoplankton species on the coast of A Coruña (Galicia, northwest Spain), *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 15(1-4), pp. 413-429, 1999.
- [6] Lozano, Y., Medellín, J. y Navas, G., Contexto climatológico y oceanográfico del mar Caribe Colombiano, INVEMAR (Eds.), Biodiversidad del margen continental del Caribe colombiano. Serie de Publicaciones Especiales, Invemar No. 20, 2010
- [7] Fajardo, G., Surgencia costera en las proximidades de la península colombiana de La Guajira, *Bol. Cient. CIOH*, 2, pp. 7-19, 1979.
- [8] Arévalo, D. y Franco, A., Características oceanográficas de la surgencia frente a la ensenada de Gaira, departamento de Magdalena, época seca menor de 2006, *Boletín de Investigaciones Marinas y Costeras*, 37(2), 2008.
- [9] Cabrera, E., and Donoso, M., Estudio de las características oceanográficas del Caribe colombiano, Región III, Zona 1, PDCTM, *Bol. Cient. CIOH*, 13, pp. 19-32, 1993.
- [10] Escobar, A., Estudio de algunos aspectos ecológicos y de la contaminación bacteriana en la bahía de Santa Marta, Caribe colombiano, *An. Inst. Inv. Mar.*, 18, pp. 39-57, 1988.
- [11] Gámez, J., Impacto sobre las aguas costeras adyacentes al Emisario Submarino de Santa Marta (D.T.C.H), Caribe colombiano [tesis de grado]. Riohacha, Universidad de La Guajira, 2002.
- [12] Marín, B., Garay, J., Ramírez, G., Betancourt, J., Troncoso, W., Gómez ML, et al. Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia. Diagnóstico Nacional y Regional 2005. INVEMAR, Santa Marta, 2005.
- [13] MMA, INVEMAR, CIOH, CORPORACIONES COSTERAS, IIAP, DAMARENA. Diagnóstico y evaluación de la calidad ambiental marina en el Caribe y Pacífico colombiano red de vigilancia para la conservación y protección de las aguas marinas y costeras de Colombia. Fase II; 2002.
- [14] Ramírez, G., Características físico-químicas de la bahía de Santa Marta. (Agosto 1980 - Julio 1981), *An. Inst. Inv. Mar Punta Betín*, 13, pp. 111-21, 1983.
- [15] Ramos, L., Vidal, L. y Vilarity, S., Analysis of the microbiological contamination (Total and Fecales Coliforms) In The Bay Of Santa Marta, Colombian Caribbean, *Acta biol. Colomb.*, 13, pp. 85-96, 2008.
- [16] Miller, B., Peirson, W., Wang, Y. and Cox, J., An Overview of Numerical Modelling of the Sydney Deepwater Outfall Plumes, *Marine Pollution Bulletin*, 33(7-12), pp. 147-159, 1996.
- [17] Andrade, C., Análisis de la velocidad del viento en el mar Caribe, *Bol. Cient. CIOH*, 13, pp. 33-43, 1993.
- [19] Fofonoff, P. and Millard, R., Algorithms for computation of fundamental properties of seawater, *Unesco technical papers in marine science*. París, Francia, 1983.
- [20] UNESCO. Processing of oceanographic station data. *Unesco technical papers in marine science*. París, Francia, 1991.
- [21] Holte, J. and Talley, L., A new algorithm for finding mixed layer depths with applications to Argo data and subantarctic mode water formation, *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 26(9), pp. 1920-1939, 2009.
- [22] Reichel, G. y Jimeno, M., Caribe Colombia. <http://www.banrepcultural.org/blaavirtual/geografia/carcol/biblio1.htm> [citado Enero 8 de 2011].