

PATRONES DE DISTRIBUCIÓN ESTACIONAL DE MASAS DE AGUA EN LA BAHÍA DE SANTA MARTA, CARIBE COLOMBIANO: IMPORTANCIA RELATIVA DEL UPWELLING Y OUTWELLING*

José Ernesto Mancera-Pineda^{1,2}, Gerfried Pinto³ y Sandra Vilardy⁴

1 Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, Departamento de Biología. Bogotá, Colombia. jemancerap@unal.edu.co

2 Universidad Nacional de Colombia sede Caribe, Instituto de Estudios Caribeños, San Andrés, Colombia.

3 Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano sede Santa Marta, Programa de Biología Marina. Carrera 2 No. 11-68, El Rodadero, Santa Marta, Colombia.

4 Universidad del Magdalena, Departamento de Biología, Santa Marta, Colombia. svilardy@gmail.com

RESUMEN

Con el propósito de generar un modelo conceptual de distribución estacional de masas de agua para la bahía de Santa Marta, se identificaron a lo largo del ciclo anual los patrones de las principales variables bióticas y abióticas relacionadas con la calidad de sus aguas. El modelo propuesto revela la gran influencia que ejerce la descarga de aguas residuales domésticas durante los períodos lluviosos (*outwelling*). Estas entradas explican la reducción de la transparencia del agua, el oxígeno disuelto y al mismo tiempo el aumento en la concentración de fosfatos y clorofila *a*. Si bien no hay estratificación a nivel de distribución vertical de nutrientes, existen diferencias en la distribución de la energía lumínica y consecuentemente la producción primaria se presenta principalmente en la superficie de la columna de agua. El modelo señala que las descargas del emisario submarino constituyen un aporte importante de nutrientes y postula como hipótesis que dichas descargas intensificarán el efecto de fertilización de la surgencia (*upwelling*) en la primera mitad del año, con un efecto bajo en la época de *outwelling* debido a la estratificación de la columna de agua.

PALABRAS CLAVES: Patrones estacionales, calidad del agua, bahía de Santa Marta, Caribe colombiano.

ABSTRACT

Seasonal patterns of water masses distribution in Santa Marta bay, Colombian Caribbean: relative importance of upwelling and outwelling. In order to generate a conceptual model of seasonal distribution of water masses to Santa Marta bay, we identify, from main biotic and abiotic variables related to its water quality, patterns along the annual cycle. The model shows the major influence of the domestic residual water discharges during the rainy seasons (*outwelling*). These discharges explains the reduction of dissolved oxygen and water transparency and at the same times the increase of phosphorus and chlorophyll *a* concentrations. Although there is not stratification in the vertical nutrient distribution,

* Contribución No. 1121 del Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar).

there are differences in light distribution and consequently the primary productivity takes place mainly in the water column surface. The model shows that the outfall constitutes an important nutrient input and postulates as a hypothesis that the discharges will intensify the upwelling fertilization effect during the first half of the year, with low impact during the outwelling season due to water stratification.

KEYWORDS: Seasonal patterns, water quality, Santa Marta bay, Colombian Caribbean.

INTRODUCCIÓN

El acelerado desarrollo de la zona costera está generando importantes impactos en diferentes ecosistemas a nivel mundial. Evaluaciones específicas de las perturbaciones causadas por actividades antrópicas en ecosistemas marinos han sido desarrolladas principalmente en Europa y Estados Unidos, mostrando cambios en la hidrodinámica de humedales y cuerpos de agua, modificación de procesos biogeoquímicos y alteraciones a nivel de estructura de comunidades y productividad biológica, comprometiendo así la calidad de estos ecosistemas (Nixon, 1995; Cloern, 1999; Costa *et al.*, 2008). A nivel tropical es mucho menos lo que se conoce sobre el funcionamiento de bahías, estuarios, humedales y lagunas costeras, y sobre su respuesta a potenciales impactos inducidos por el desarrollo socioeconómico costero. No obstante, la continua explotación de recursos bióticos y abióticos, el acelerado desarrollo urbano e industrial, junto con fuertes descargas de aguas enriquecidas con materia orgánica provenientes del continente y asociadas principalmente a períodos de lluvia, hacen pensar que los ecosistemas costeros tropicales podrían ser altamente susceptibles a las actividades antrópicas. Evaluar esta susceptibilidad supone conocer fuentes de entrada, patrones de distribución y asimilación de material alóctono.

Por su ubicación y características físicas, la bahía de Santa Marta (BSM) es un ecosistema de gran interés socioeconómico en el país, pues desde hace varias décadas registra una intensa y creciente actividad turística y portuaria que, a su vez, ha estimulado una expansión urbana no solo de Santa Marta, sino también de sus alrededores. La actividad portuaria en Santa Marta constituye uno de los principales renglones de la economía, sin embargo el impacto en el ambiente es constante. La construcción de obras civiles para las mejoras del puerto, los diferentes tipos de vertimientos de los barcos (e.g. aguas de lastre, aguas servidas) y el transporte constante de partículas de carbón son factores determinantes de la calidad ambiental de esta bahía (Bioservice, 1998).

El crecimiento urbano y turístico también genera repercusiones en la calidad de las aguas de la BSM, a través del aporte de aguas servidas y de las descargas de los ríos de la cuenca de San Lorenzo, especialmente las de los ríos Gaira, Manzanares y Piedras, cuencas altamente influenciadas por los asentamientos humanos en sus riberas que aportan cargas contaminantes de diferente índole como

residuos orgánicos, metales pesados, sedimentos, nutrientes y microorganismos (Escobar, 1981; Canchano *et al.*, 1996).

Con miras a amortiguar el impacto de la descarga de aguas residuales en la BSM, en el año 2000 se construyó un emisario submarino; sin embargo, su efectividad e influencia en la calidad del agua no han sido evaluadas. La BSM, de otra parte, está influenciada por variaciones macroclimáticas relacionadas con la posición latitudinal del ecuador térmico denominado comúnmente como Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), estas variaciones establecen en la BSM dos fenómenos fundamentales: la surgencia (*upwelling*) y la escorrentía (*outwelling*) (Bioservice, 2001). El primer fenómeno se presenta en la época seca (diciembre-junio), trayendo aguas ricas en nutrientes y pocas lluvias, el segundo en la época de lluvias (septiembre-octubre) presenta vientos húmedos provenientes del sur (Bula-Meyer, 1985), en esta época las descargas que llegan a la BSM entre las calles 10 y 22 (nomenclatura urbana de Santa Marta) de manera espontánea y sin canalización producto de la escorrentía, aportan una cantidad significativa de sedimento y nutrientes que determinan el aumento en la turbidez de sus aguas (Canchano *et al.*, 1996).

Así, para la BSM sólo existen estudios fraccionados de la calidad de sus aguas tanto en el espacio como en el tiempo y no se dispone de un modelo básico de distribución de las masas de agua. En el presente estudio se identifican los principales patrones estacionales de distribución a lo largo del ciclo anual, de las principales variables físicoquímicas y biológicas relacionadas con la calidad de las aguas de la bahía; se propone, además, un modelo conceptual como base para evaluar la susceptibilidad de la BSM ante impactos originados por actividades antrópicas, como la operación del emisario submarino.

ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Santa Marta (BSM), ubicada entre $11^{\circ}13'00''$ y $11^{\circ}15'30''$ N y $74^{\circ}12'30''$ y $74^{\circ}14'30''$ W, presenta un área de 5 km² aproximadamente y una profundidad promedio de 20 m. Su conformación es abierta y la línea de costa presenta litoral rocoso en los extremos norte y sur; la playa de la BSM en la parte central está formada por deposición aluvial reciente de las descargas del río Manzanares (Ramírez, 1983). Hacia el norte se encuentra una península conformada por unas colinas, que termina en una punta rocosa llamada Punta de Betín; a unos 285 m de la costa emerge una estribación de esta península, en una formación rocosa llamada Morrito y aproximadamente a 927 m al oeste de Punta de Betín se manifiesta un islote rocoso de mayor extensión, llamado Morro Grande, con una altura de 60 m (Escobar, 1981). Al este se encuentra la ensenada de Ancón, la cual ha sido utilizada

desde hace muchos años como terminal marítimo. En la parte central de la bahía cerca de la desembocadura del río Manzanares, la plataforma es un poco más estrecha, con playas expuestas al efecto del viento y al oleaje, enmarcadas entre las puntas de San Fernando y del Cuerno (Canchano *et al.*, 1996; Pinto, 2005) (Figura 1).

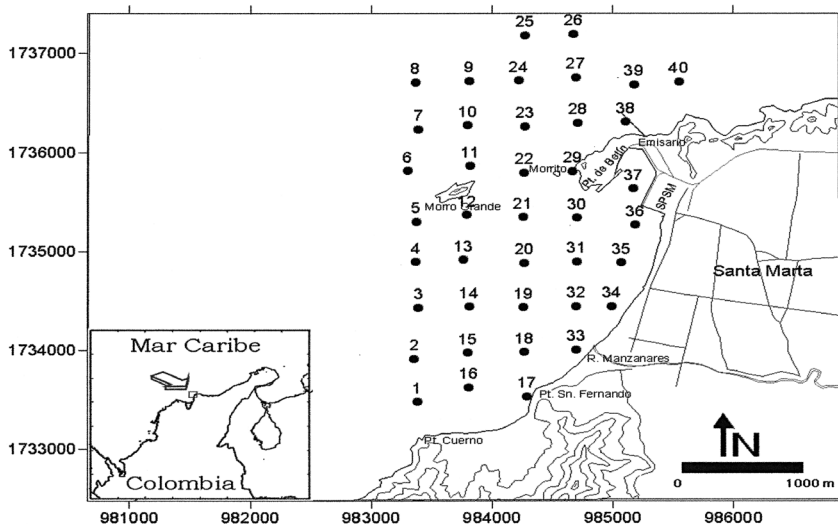


Figura 1. Diseño de muestreo para la bahía de Santa Marta, grilla imaginaria con 40 cuadrículas de 0.25 km², cada punto de la grilla corresponde a un sitio de muestreo.

La zona costera de Santa Marta presenta características entre semidesértica y desértica, siendo las lluvias las que marcan la estacionalidad climática en el área de la bahía, distinguiéndose así cuatro períodos climáticos, seco mayor (diciembre-abril), lluviosa menor (mayo-junio), seca menor (julio-agosto) y lluviosa mayor (septiembre-noviembre). El promedio de precipitación en la época seca mayor es mínimo (no mayor a 20 mm), incrementándose a partir de mayo (entre 20-60 mm); durante el Veranillo de San Juan (seca menor) la precipitación disminuye y en octubre alcanza el máximo hasta 105.4 mm. La velocidad del viento en la región de Santa Marta alcanza 4.6 m/s, en los primeros meses del año cuando predominan los alisios (Pinto, 2005).

El valor promedio de la humedad relativa se encuentra alrededor de 73%, el brillo solar con un ámbito entre 325 y 291 h en promedio. A partir de mayo se incrementa el porcentaje de humedad relativa (máximo 85% para octubre), disminuye la velocidad del viento (2.5 m/s) y se presenta mayor nubosidad (Castro, 2003). Las fuentes de entrada de aguas dulce a la BSM son básicamente aguas residuales, escorrentía y descarga de ríos.

Aguas residuales

El distrito de Santa Marta cuenta con 415270 habitantes más un desplazamiento de 150000 a 300000 turistas en épocas de alta temporada (DANE, 2005). Las actividades turísticas en la zona costera en general, especialmente en la ciudad de Santa Marta, se vienen desarrollando sin ningún ejercicio continuado de control por parte de las autoridades competentes, incrementándose por consiguiente la descarga de aguas residuales en la bahía, principalmente en sentido suroeste. Este vertimiento de aguas servidas a las zonas costeras ha sido identificado como uno de los factores de mayor aporte a la contaminación marina. Hasta abril de 2000, el distrito de Santa Marta carecía de sistemas de tratamiento para dichas aguas (Metroagua, 2003). La mayoría de los desechos, tanto industriales como domésticos (aguas negras compuestas principalmente por sedimentos, nutrientes, fósforo, nitrógeno, bacterias coliformes y patógenas) de la ciudad y del sector turístico de El Rodadero, era evacuada en el punto conocido como El Boquerón, donde, por efecto de los vientos, se crea una corriente que tiende normalmente a seguir la dirección noreste o suroeste (Escobar, 1981). En 2000 fue construido el emisario submarino, para el manejo de las aguas residuales del distrito, compuesto de una tubería de 428 m de longitud, 1 m de diámetro e instalado a una profundidad de 56 m. En la actualidad descarga 650 L/s de aguas servidas de la ciudad y su capacidad instalada es de 2500 L/s, el cual se espera verter en 2050 (Metroagua, 2003).

Escorrentía

El sistema de recolección y evacuación de aguas lluvias y superficiales del sector céntrico de la ciudad de Santa Marta drena a la BSM a lo largo de la carrera primera y calles aledañas. En época seca el volumen estimado es de 850 L/s (Castro, 2003), que incluye también las aguas negras provenientes de los continuos rompimientos y derrames de las alcantarillas de la ciudad. En época de lluvias se presenta un problema crítico porque aumenta el caudal de las aguas hasta 1100 L/s (Castro, 2003), influyendo en las condiciones sanitarias de la BSM.

Actividad portuaria

Si bien el terminal marítimo operado por la Sociedad Portuaria de Santa Marta y ubicado en el extremo occidental de la ciudad sobre la bahía, ha sido un pilar en el desarrollo económico, su actividad genera diferentes impactos sobre el entorno marino. Las operaciones que hacen parte de la actividad portuaria, generan desechos, residuos de aceites, petróleo y demás hidrocarburos que constituyen fuentes de contaminación; estos desechos son arrastrados hacia las playas urbanas dependiendo de la circulación de las aguas de la bahía (Escobar, 1981). Por otro lado, la mayoría

de los buques que llegan al puerto, vienen lastrados con agua de mar que posee flora, fauna y nutrientes potencialmente activos. Cuando el buque es cargado, el agua de mar alóctona es vertida al puerto, introduciendo al sistema especies potencialmente invasoras, así como sustancias tóxicas y cantidades diferentes de nutrientes (Mancera y Vidal, 2007; Rangel, 2007). En 1990, Carboandes inició la exportación de 90000 tm de carbón por el puerto de Santa Marta, para 2002 se movilizaron en promedio más de un 1500000 tm, lo cual contribuye al aumento en la sedimentación (Bioservice, 2002). Además de esto, la movilización permanente de los buques en el transporte, carga y descarga del carbón mineral produce turbulencia, producto del continuo movimiento de sus hélices, generando problemas de resuspensión del sedimento.

Descarga de ríos

Los ríos Gaira y Manzanares, pertenecientes a la cuenca de San Lorenzo, son las principales fuentes de descarga de aguas y sedimentos en la BSM. Dicha descarga es muy baja o nula durante la época seca y alta durante la época lluviosa (Manzanares 330 L/s y Gaira 280 L/s), cuando se aporta la mayor cantidad de nutrientes inorgánicos disueltos, contaminantes de origen doméstico principalmente y de basuras de todo tipo. Además de los aportes de los ríos Gaira y Manzanares, se encuentran las aguas provenientes de la Ciénaga Grande de Santa Marta, las cuales a su vez son el producto de la mezcla de aguas del río Magdalena, el mar Caribe y principalmente los ríos del margen occidental de la Sierra Nevada de Santa Marta (Wiedemann, 1973; Rivera-Monroy y Mancera, 2001), estas aguas llegan a la BSM por efecto de la Contracorriente Panamá-Colombia (Bula-Meyer, 1985). Las masas de agua que ingresan por escorrentía y por aportes de los ríos y la ciénaga se mezclan rápidamente a nivel horizontal y, debido a la alta carga de materia disuelta (nitrógeno y fósforo) y particulada, reducen considerablemente la transparencia del agua, restringiendo la profundidad de la zona fótica (Canchano *et al.*, 1996; Pinto, 2005).

MATERIALES Y MÉTODOS

La información analizada corresponde a muestreos en tres de los cuatro períodos climáticos estacionales más representativos de la región. Se realizaron un total de seis muestreos, dos en la época de transición climática (agosto y noviembre de 2004), dos en la época lluviosa mayor (septiembre y octubre de 2004) y dos en la época seca mayor (enero y marzo de 2005). Adicionalmente, el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) suministró información de la estación meteorológica del aeropuerto Simón Bolívar de la ciudad de Santa Marta, correspondiente a los meses del muestreo.

Diseño de muestreo

En el área de la BSM se estableció una red sistemática de 40 estaciones de muestreo (Figura 1). En cada estación se determinaron las variables fisicoquímicas y biológicas (profundidad, salinidad, temperatura, densidad, oxígeno disuelto, pH, transparencia, amonio, nitritos, fosfatos, silicatos y clorofila *a*), a dos niveles de profundidad, 1 y 20 m. No obstante, seis de las estaciones más cercanas a la costa se localizaron en aguas someras; en esas estaciones se tomaron muestras a la mayor profundidad posible (2-5 m).

La toma de los datos fisicoquímicos en campo se hizo a bordo de una embarcación equipada con un geoposicionador satelital [GPS-Magellan 315 (± 1 s)] para localizar las estaciones. Todas las campañas de muestreo se realizaron principalmente en las horas de la mañana y tempranas de la tarde (de 07:00 a 14:00), esto para disminuir la variación diaria, siguiendo siempre el mismo orden del recorrido en cada muestreo, comenzando en la estación uno en sentido norte.

La temperatura del agua, salinidad, oxígeno disuelto y pH fueron tomados *in situ* con sondas WTW de la serie 315/SET, la transparencia se determinó usando disco Secchi y la profundidad media de la bahía se determinó con ayuda de una sonda marcada cada metro y provista de un lastre. Se tomaron muestras de agua con botellas Van-Dorn de 3 L de capacidad, las cuales fueron envasadas en botellas de polietileno de 2.5 L de capacidad, protegidas de la luz solar, previamente lavadas, rotuladas, purgadas con la muestra, refrigeradas y luego transportadas al laboratorio para análisis de clorofila *a* y nutrientes inorgánicos disueltos (amonio, nitritos, fosfatos y silicatos).

En el laboratorio se pasaron 2 L de agua por un filtro de fibra de vidrio Whatman GF/C de 0.75 μm con la ayuda de una bomba de vacío. Las muestras se almacenaron en botellas de polietileno de 0.5 L de capacidad y se congelaron a una temperatura de $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$, por un período no mayor a 15 días. La determinación de clorofila *a* se llevó a cabo por el método de Strickland y Parsons (1968), utilizando acetona al 90 % para la extracción de los pigmentos. Las concentraciones de nutrientes y clorofila *a* fueron medidas fotométricamente utilizando un espectrofotómetro de luz visible Genesys 10UV Thermo Spectronic, siguiendo la metodología descrita en Standard Methods (Unesco, 1993).

Para determinar la densidad se tuvo en cuenta la temperatura del agua, la salinidad y la presión, aplicando la ecuación internacional de estado simple (Unesco, 1981; Knauss, 2005). El cálculo de la zona fótica se basó en la conocida ecuación de Beer-Lambert (1) para la transmisión de luz, en este caso del medio marino (Raymont, 1980).

$$I_z = I_0 * e^{-Kz}$$

Donde:

I_z = energía lumínica a la profundidad z

I_0 = energía lumínica en la superficie del cuerpo de agua

e = base de los logaritmos naturales

K = coeficiente de atenuación vertical de luz

El valor de K se obtuvo a partir de las lecturas de transparencia del disco Secchi (DS), aplicando la ecuación (2):

$$K = 1.7/DS \text{ (Raymont, 1980)}$$

Análisis estadístico

Con el fin de establecer diferencias significativas en la concentraciones de nutrientes, clorofila a y variables fisicoquímicas, en cada uno de los muestreos y para cada uno de los niveles de profundidad se realizó un análisis de varianza a dos vías, utilizando el software estadístico Statgraphics 4.0. Debido a que los datos no presentaron distribución normal, se aplicaron pruebas para evaluar muestras no paramétricas y se empleó la prueba de Kruskal-Wallis para muestras independientes, el cual es un contraste no paramétrico análogo al análisis de varianza cuyo estadístico de contraste es similar a χ^2 (Guisande *et al.*, 2005).

Se realizó un análisis de componentes principales (ACP) para establecer un patrón de asociación entre las variables fisicoquímicas, los nutrientes (amonio, nitrito, fosfatos y silicatos) y los valores de clorofila a registrados en las estaciones de muestreo en cada uno de los meses de estudio. El análisis histórico se basó en la recopilación de información existente sobre la tendencia de algunas variables fisicoquímicas en la BSM (e.g. Salzwedel y Müller, 1983; Blanco, 1988; Ramírez, 1990a; Canchano *et al.*, 1996; Bioservice, 1998, 2001, 2002, 2003, 2004; Castro, 2003; Vidal *et al.*, 2005). Finalmente, con base en el análisis de variables bióticas y abióticas, se propuso un modelo conceptual de distribución estacional de masas de agua en la BSM, con énfasis en la influencia ejercida durante los períodos de *upwelling* y *outwelling*.

RESULTADOS

Precipitación

De acuerdo con la precipitación media mensual registrada en la estación 1502505 del aeropuerto Simón Bolívar de la ciudad de Santa Marta y registrada por

el Ideam para 24 años, existen diferencias climáticas claras en la zona de estudio. Así el valor más alto (105.42 mm; IC = 31.73; n = 720) se presenta en octubre, seguido por el de septiembre (89.13 mm; IC = 21.74; n = 720), mientras que entre diciembre y marzo se registran valores muy bajos (16 a 0 mm; IC = 9.81; n = 720) (Figura 2). La precipitación total anual durante el período de muestreo (470.50 mm) fue levemente menor al valor histórico (508.84 mm), no obstante, el patrón fue básicamente el mismo. En la época de muestreo la mayor precipitación se presentó en septiembre de 2004, con una media mensual mayor al promedio de los últimos 24 años, en octubre también se presentaron valores altos de precipitación, sin superar el promedio multianual.

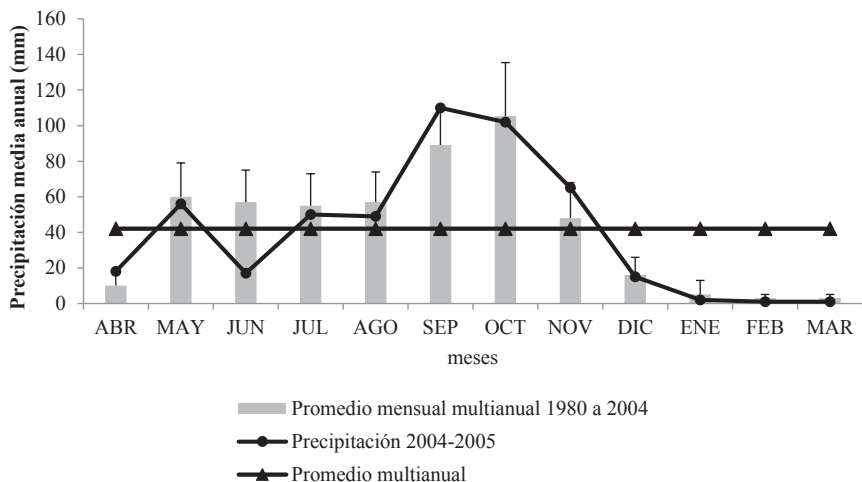


Figura 2. Precipitación media multianual (mm). Mediciones de la estación del aeropuerto Simón Bolívar (1502505) registrados por el Ideam.

Viento

Los promedios multianuales de la velocidad del viento en la región de Santa Marta, registrados en la estación 1502505 del aeropuerto Simón Bolívar y registrados por el Ideam, presentan una clara tendencia creciente a partir de diciembre, alcanzando máximos en febrero y marzo (valor máximo 4.6 m/s; IC = 0.1258; n = 720), disminuyendo su intensidad gradualmente desde abril cuando empieza a dominar el viento del S-SW, el cual registra velocidades máximas de 2.9 m/s al final de la época lluviosa menor. Entre agosto y septiembre se observa un pequeño incremento (3.1 m/s; IC = 0.991; n = 720), causado principalmente por el fenómeno conocido como vendaval. Finalmente en octubre alcanza sus menores frecuencias cercanas a 2.7 m/s.

Salinidad

Presentó un promedio general en los seis muestreos de 35.91 ± 1.26 ($n = 240$) y 36.44 ± 0.86 ($n = 240$) en superficie y media profundidad, respectivamente, con ámbitos entre 30.8 y 37.4 en superficie y 30.0 y 37.4 a media profundidad. En la época de transición climática, la salinidad superficial promedio fue 36.8 ± 0.16 ($n = 40$) y a media profundidad 36.8 ± 0.28 ($n = 40$). Entre agosto y octubre descendió, presentándose estratificación en la columna de agua, los promedios en estos meses en superficie y media profundidad fueron 34.6 ± 0.41 ($n = 40$) y 35.6 ± 1.07 ($n = 40$) en septiembre y 33.8 ± 0.56 ($n = 40$) y 35.4 ± 0.60 ($n = 40$) en octubre. En noviembre el promedio fue 37.2 ± 0.08 ($n = 40$), descendiendo en enero a 36.9 ± 0.16 ($n = 40$) y en marzo a 36.3 ± 0.10 ($n = 40$) (Figura 3).

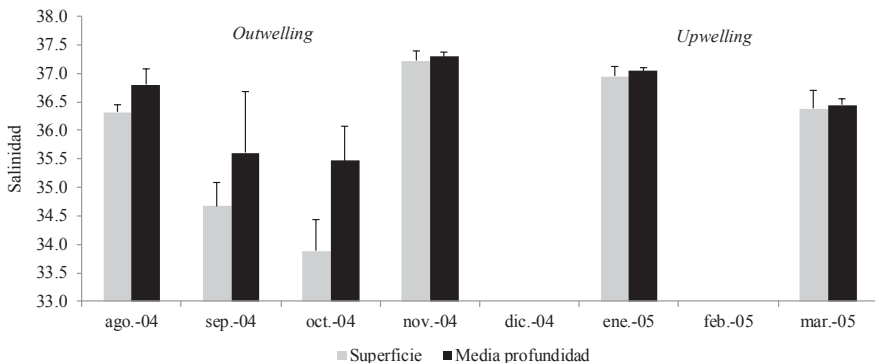


Figura 3. Salinidad promedio del agua en la bahía de Santa Marta entre agosto de 2004 y marzo de 2005. Valores medidos en 40 estaciones a dos profundidades. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Temperatura

Presentó un promedio general de 27.55 ± 1.59 °C ($n = 240$) en superficie y 27.08 ± 1.49 °C ($n = 240$) a media profundidad, con mínimos y máximos de 24.9 a 30.8 °C y 24.6 a 30.0 °C, en superficie y media profundidad, respectivamente. Las variaciones horizontales en superficie y media profundidad fueron mínimas a lo largo del estudio. En la época de transición la temperatura superficial promedio fue 28.43 ± 0.40 °C ($n = 40$) y a media profundidad 27.72 ± 0.33 °C ($n = 40$). En la época lluviosa el promedio en superficie fue 28.77 ± 0.23 °C ($n = 40$) y a media profundidad 28.39 ± 0.26 °C ($n = 40$). En octubre se incrementó con promedio en superficie y a media profundidad de 29.81 ± 0.31 °C ($n = 40$) y 29.11 ± 0.32 °C ($n = 40$) respectivamente, observándose los valores más altos de todo el estudio. En noviembre la temperatura disminuyó con promedios de 26.29 ± 0.18 °C ($n = 40$)

en superficie y $25.98 \pm 0.22^\circ\text{C}$ ($n = 40$) a media profundidad. En la época seca la temperatura disminuyó, $25.30 \pm 0.21^\circ\text{C}$ ($n = 40$) y $24.85 \pm 0.17^\circ\text{C}$ ($n = 40$) en superficie y media profundidad, respectivamente (Figura 4).

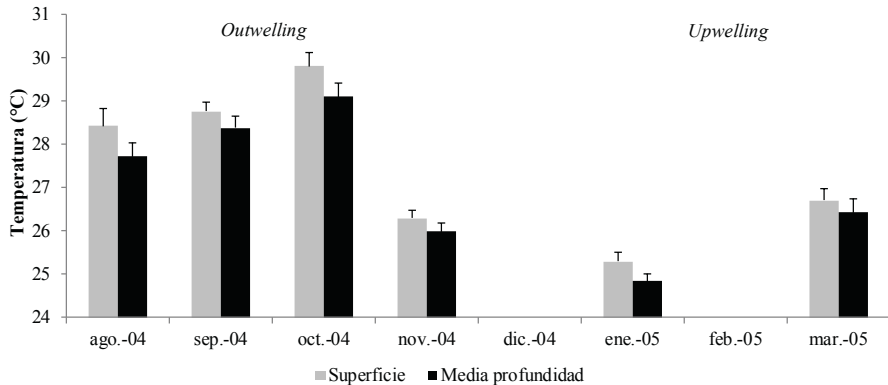


Figura 4. Temperatura ($^\circ\text{C}$) promedio del agua en la bahía de Santa Marta entre agosto de 2004 y marzo de 2005. Valores medidos en 40 estaciones a dos profundidades. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Densidad (σ^t)

Expresada como sigma-t, presentó un promedio general de $23.2 \pm 1.42 \text{ kg/m}^3$ ($n = 240$) y $23.7 \pm 1.13 \text{ kg/m}^3$ ($n = 240$) en superficie y media profundidad respectivamente, con ámbitos entre 18.5 kg/m^3 y 25 kg/m^3 en superficie y 18.5 kg/m^3 y 25.1 kg/m^3 a media profundidad. En la época de transición climática la densidad del agua fue $23.2 \pm 0.23 \text{ kg/m}^3$ ($n = 40$) en superficie y de $23.7 \pm 0.36 \text{ kg/m}^3$ ($n = 40$) a media profundidad, indicando estratificación en la columna de agua. En la época de lluvia la densidad disminuyó a $21.9 \pm 0.33 \text{ kg/m}^3$ ($n = 40$) en superficie y $22.6 \pm 0.91 \text{ kg/m}^3$ ($n = 40$) a media profundidad, conservándose la estratificación. En noviembre aumentó, el promedio en superficie fue $24.6 \pm 0.16 \text{ kg/m}^3$ ($n = 40$) y a media profundidad $24.7 \pm 0.11 \text{ kg/m}^3$ ($n = 40$), pero la estratificación se rompió, mezclándose la columna de agua. En enero la densidad aumentó levemente con promedios de $24.7 \pm 0.16 \text{ kg/m}^3$ ($n = 40$) y $24.9 \pm 0.08 \text{ kg/m}^3$ ($n = 40$), en superficie y media profundidad. En marzo disminuyó a promedios de $23.8 \pm 0.27 \text{ kg/m}^3$ ($n = 40$) y $23.9 \pm 0.14 \text{ kg/m}^3$ ($n = 40$) en superficie y a media profundidad, respectivamente, indicando buena mezcla vertical (Figura 5).

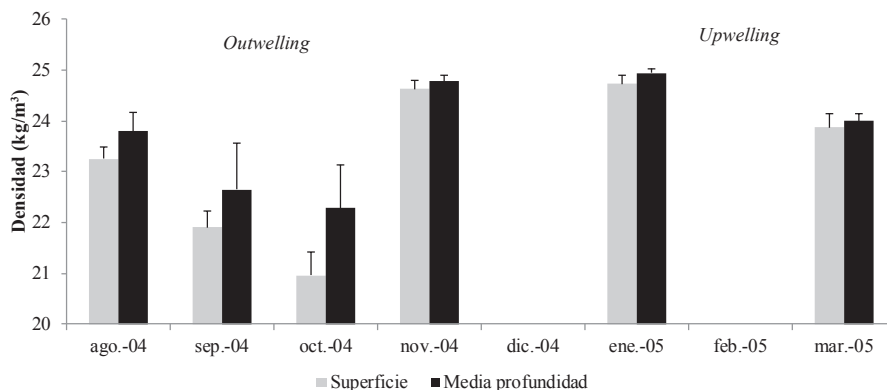


Figura 5. Densidad promedio del agua en la bahía de Santa Marta entre agosto de 2004 y marzo de 2005. Valores medidos en 40 estaciones a dos profundidades. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Oxígeno disuelto

Presentó un promedio general de 5.16 ± 0.99 mg/L (65.74 \pm 12.56% saturación de oxígeno) (n = 240) y 5.06 ± 0.98 mg/L (64.03 \pm 12.35% saturación de oxígeno) (n = 240) en superficie y media profundidad respectivamente, con ámbitos de 1.8 mg/L (22.19% saturación) a 7.1 mg/L (87.54% saturación) y 1.7 mg/L (20.60% saturación) a 7.1 mg/L (86% saturación) en dichas profundidades, respectivamente. En la época de transición climática el promedio fue 5.6 ± 0.42 mg/L (73.4 \pm 5.4% saturación) (n = 40) en superficie y 5.3 ± 0.27 mg/L (68 \pm 3.4 % saturación) (n = 40) a media profundidad. En la época de lluvia disminuyó a 4.4 ± 0.46 mg/L (57 \pm 5.8% saturación) (n = 40) en superficie y 4.3 ± 0.47 mg/L (56.5 \pm 6.1% saturación) (n = 40) a media profundidad. En octubre aumentó a promedios de 5.2 ± 0.29 mg/L (69 \pm 3.8% saturación) en superficie, 5.2 ± 0.37 mg/L (68.6 \pm 5.1% saturación) a media profundidad (n = 40), continuando su incremento en noviembre 5.6 ± 0.33 mg/L (71 \pm 4.1% saturación) en superficie (n = 40) y 5.5 ± 0.36 mg/L (69 \pm 4.6% saturación) media profundidad (n = 40). No obstante, en enero la concentración de oxígeno disminuyó a 4.2 ± 1.8 mg/L (52.7 \pm 22.2% saturación) en superficie y 4.2 ± 1.9 mg/L (51.7 \pm 22.6% saturación) a media profundidad (n = 40), para volver a subir en marzo, 5.6 ± 0.14 mg/L (70.9 \pm 1.8% saturación) (n = 40) en superficie y 5.5 ± 0.22 mg/L (69.8 \pm 2.9% saturación) (n = 40) a media profundidad (Figura 6).

pH

Los valores fueron en general muy homogéneos tanto en la distribución horizontal como vertical a lo largo del tiempo de observación. El pH presentó un promedio general de 8.23 ± 0.13 (n = 240) y 8.22 ± 0.13 (n = 240) en superficie y media profundidad respectivamente, con ámbitos entre 7.80 y 8.57 para aguas superficiales

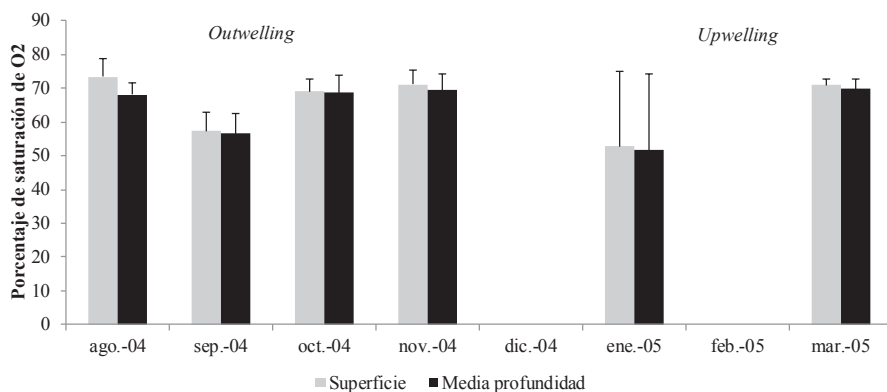


Figura 6. Promedio del porcentaje de saturación de oxígeno en la bahía de Santa Marta entre agosto de 2004 y marzo de 2005. Valores medidos en 40 estaciones a dos profundidades. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

y 7.70 y 8.50 para media profundidad. En la época de transición, el promedio fue 8.18 ± 0.01 en superficie, 8.18 ± 0.02 a media agua ($n = 40$). En la época de lluvia se presentaron los valores más altos de todo el estudio, 8.43 ± 0.08 ($n = 40$) promedio en superficie y 8.44 ± 0.06 ($n = 40$) en media agua, mientras que en octubre el pH presentó los valores más extremos con tendencia general a disminuir; los promedios fueron 8.16 ± 0.16 ($n = 40$) en superficie y 8.10 ± 0.14 ($n = 40$) en media profundidad. En la época seca el pH promedio subió a 8.18 ± 0.02 ($n = 40$) tanto en superficie como en media profundidad, incrementándose levemente en marzo a 8.27 ± 0.02 ($n = 40$) en superficie y 8.26 ± 0.02 ($n = 40$) en media profundidad (Figura 7).

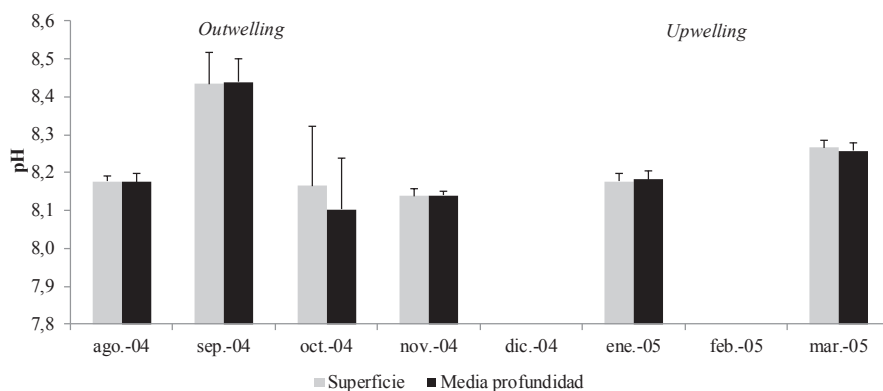


Figura 7. Concentración promedio del pH del agua de la bahía de Santa Marta entre agosto de 2004 y marzo de 2005. Valores medidos en 40 estaciones a dos profundidades. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Transparencia

El promedio general fue 6.30 ± 1.89 m ($n = 200$), es decir, 16.70 ± 5.70 m de profundidad fótica, lo que corresponde al 39% de la columna de agua. En la época de transición la profundidad promedio de la capa fótica fue 19.59 ± 4.81 m ($n = 40$), es decir, una transparencia promedio de 7.23 ± 1.78 m ($n = 40$) (46% de la columna de agua), mostrando además una distribución homogénea en la BSM. En la época de lluvia la profundidad promedio de la capa fótica y la transparencia disminuyeron drásticamente con promedios de 12.02 ± 0.97 y 3.90 ± 1.43 m ($n = 40$) (22% de la columna de agua), respectivamente, valores más bajos que los de todos los meses observados. En octubre la profundidad fótica promedio fue 13.98 ± 3.87 m ($n = 40$) y la transparencia promedio del agua fue 5.16 ± 1.43 m ($n = 40$), es decir, 33% de la columna de agua. En noviembre el valor promedio de la capa fótica se incrementó a 15.89 ± 4.74 m ($n = 40$), y el de transparencia a 5.87 ± 1.75 m ($n = 40$), disminuyendo ligeramente en enero a 15.79 ± 4.31 m ($n = 40$) y 5.83 ± 1.59 m ($n = 40$), respectivamente. En marzo, la profundidad promedio de la capa fótica y la transparencia aumentaron significativamente, obteniéndose los máximos valores de 20.11 ± 5.05 m ($n = 40$) y 7.43 ± 1.87 m ($n = 40$), respectivamente, correspondiente al 49% de la columna de agua (Figura 8).

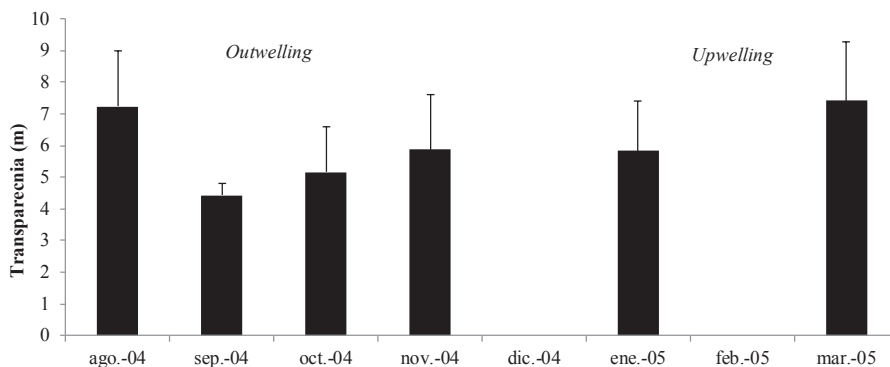


Figura 8. Transparencia (m) promedio de la bahía de Santa Marta entre agosto de 2004 y marzo de 2005. Valores medidos en 40 estaciones. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Amonio

En general la concentración promedio fue 3.67 ± 3.26 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 240$) y 3.30 ± 2.57 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 240$) en superficie y media profundidad, respectivamente, con un ámbito entre 0 y 14.7 $\mu\text{g-at/L}$. En la época de transición se obtuvieron las concentraciones más bajas de todo el estudio 0.65 ± 1.62 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) en superficie y 0.31 ± 0.56 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) a media profundidad. En la época de lluvia hubo una entrada de amonio a la BSM

y los valores fueron los más altos registrados en el tiempo de observación, 7.68 ± 1.82 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y 5.86 ± 1.39 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) en superficie y a media profundidad, respectivamente. A partir de octubre de 2004 y hasta marzo de 2005 las concentraciones de amonio disminuyeron progresivamente sin presentarse diferencias significativas entre superficie y fondo, con valores entre 6.19 ± 3.51 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y 1.79 ± 1.35 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$), indicando que no hubo entradas significativas de amonio al sistema (Figura 9).

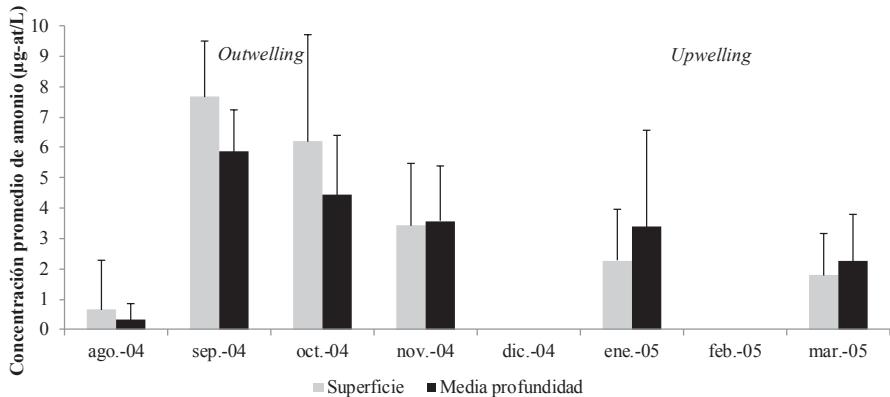


Figura 9. Concentración promedio de amonio ($\mu\text{g-at N-NH}_4^+/\text{L}$) de la bahía de Santa Marta entre agosto de 2004 y marzo de 2005. Valores medidos en 40 estaciones a dos profundidades. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Nitritos

Presentó un promedio general en los seis muestreos de 1.27 ± 1.49 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 240$) y 1.40 ± 1.66 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 240$) en superficie y media profundidad respectivamente, variando entre valores no detectables y máximos de 7.78 $\mu\text{g-at/L}$. En la época de transición se midieron los valores más bajos 0.34 ± 0.47 $\mu\text{g-at/L}$ en superficie ($n = 40$) y 0.08 ± 0.21 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) a media profundidad. En la época de lluvia el promedio fue de 1.78 ± 0.61 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) en superficie y 1.77 ± 1.39 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) en media agua. En octubre la concentración de nitritos disminuyó a 0.53 ± 0.66 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) en superficie y 0.65 ± 0.75 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) en media profundidad, para luego subir nuevamente en noviembre [2.72 ± 2.14 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y 2.03 ± 1.69 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$)] y mantenerse así hasta el mes de enero, donde los promedios en superficie y media profundidad fueron de 1.67 ± 1.66 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y 2.36 ± 2.43 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$), respectivamente. En marzo la concentración de nitritos nuevamente disminuyó a 0.54 ± 0.78 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y 1.49 ± 1.29 $\mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) en superficie y media profundidad, respectivamente (Figura 10).

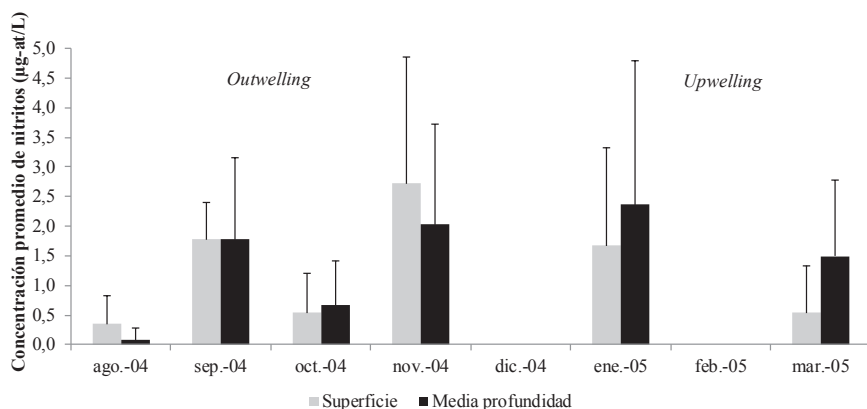


Figura 10. Concentración promedio de nitritos ($\mu\text{g-at N-NO}_2^{-1}/\text{L}$) de la bahía de Santa Marta entre agosto de 2004 y marzo de 2005. Valores medidos en 40 estaciones a dos profundidades. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Fosfatos

El promedio general fue $0.61 \pm 0.76 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 240$) en superficie y $0.88 \pm 0.69 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 240$) a media profundidad, con valores entre no detectables y máximos de $3.4 \mu\text{g-at/L}$ y $5.0 \mu\text{g-at/L}$ en superficie y media profundidad, respectivamente. En la época de transición el promedio fue $0.33 \pm 0.35 \mu\text{g-at/L}$ en superficie y $0.33 \pm 0.42 \mu\text{g-at/L}$ a media profundidad ($n = 40$), uno de los más bajos de todo el estudio. En la época de lluvia hubo entradas de fósforo a la BSM y si bien se presentó una amplia variabilidad espacial, los promedios tanto en superficie como a media profundidad subieron a $0.73 \pm 0.90 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y $1.11 \pm 0.93 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) respectivamente y se mantuvieron igualmente altos en octubre, donde se registraron promedios de $0.85 \pm 0.16 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y $1.39 \pm 0.22 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) en superficie y media profundidad, respectivamente. En noviembre la concentración de fosfatos disminuyó, el promedio en superficie y a media profundidad fue de $0.72 \pm 0.25 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y $0.91 \pm 0.41 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$), respectivamente. En enero se incrementó a promedios de $0.89 \pm 1.41 \mu\text{g-at/L}$ ($n=40$) y $1.32 \pm 0.55 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$). En marzo se registraron los valores más bajos $0.12 \pm 0.11 \mu\text{g-at/L}$ ($n=40$) y $0.20 \pm 0.15 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$), en superficie y a media profundidad, respectivamente (Figura 11).

Silicatos

Presentó promedio general de $18.88 \pm 13.59 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 240$) en superficie y $14.16 \pm 12.21 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 240$) a media profundidad y un amplio ámbito de variación entre $0.30-0.39 \mu\text{g-at/L}$ y $56.94-59.96 \mu\text{g-at/L}$ en superficie y media profundidad, respectivamente. En la época de transición climática se presentaron los valores más bajos $0.74 \pm 0.28 \mu\text{g-at/L}$ en superficie ($n = 40$) y $0.47 \pm 0.10 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) a media agua. En la época de lluvia se incrementó considerablemente la concentración de silicatos, que

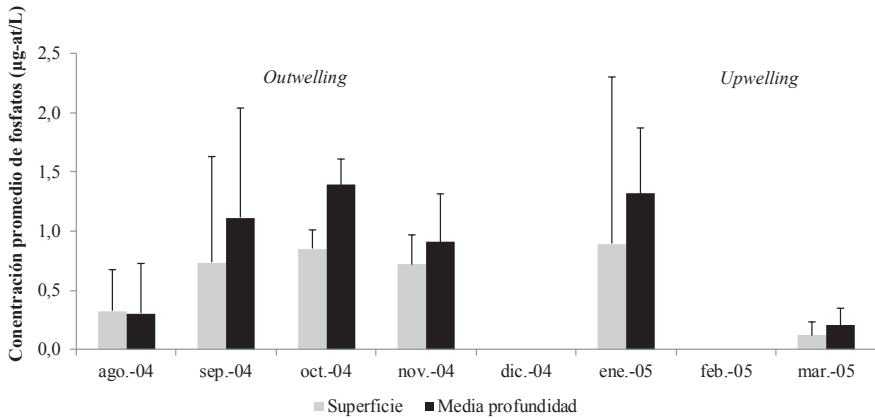


Figura 11. Concentración promedio de fosfatos ($\mu\text{g-at P-PO}_4^{-2}$ /L) de la bahía de Santa Marta entre septiembre de 2004 y marzo de 2005. Valores medidos en 40 estaciones a dos profundidades. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

en promedio alcanzó concentraciones de $24.68 \pm 7.15 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) en superficie y $18.67 \pm 11.31 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) a media agua, indicando claramente la entrada de masas de agua del continente. Estos valores altos se mantuvieron, con tendencia a incrementar en el mes de octubre, donde se registraron promedios, en superficie y a media profundidad de $29.31 \pm 16.35 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y $24.19 \pm 9.74 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$), respectivamente. De noviembre a enero la concentración de silicatos en la BSM se mantuvo estable, obteniéndose promedios de superficie y media profundidad de $22.87 \pm 7.43 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y $10.68 \pm 6.88 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) en noviembre y $22.91 \pm 8.96 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y $14.98 \pm 11.51 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) en enero. En marzo los valores disminuyeron a $12.76 \pm 11.10 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) y $16.00 \pm 13.36 \mu\text{g-at/L}$ ($n = 40$) (Figura 12).

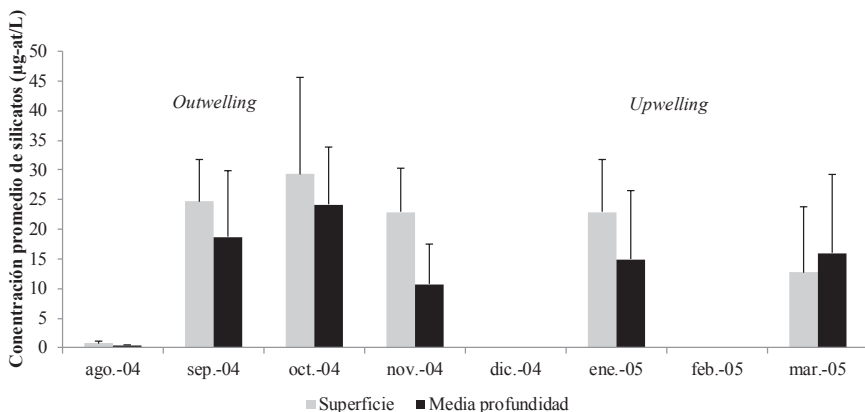


Figura 12. Concentración promedio de silicatos ($\mu\text{g-at Si-Si(OH)}_4$ /L) de la bahía de Santa Marta entre agosto de 2004 y marzo de 2005. Valores medidos en 40 estaciones a dos profundidades. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Clorofila *a*

Presentó un promedio general de $1.16 \pm 0.65 \mu\text{g/L}$ ($n = 160$) y $0.86 \pm 0.71 \mu\text{g/L}$ ($n = 1.60$) en superficie y media profundidad respectivamente, con valores mínimos de $0.18 \mu\text{g/L}$ y máximos de $3.84 \mu\text{g/L}$ en superficie y $6.67 \mu\text{g/L}$ en media profundidad. En la época de transición climática se obtuvieron los valores más bajos, $0.53 \pm 0.20 \mu\text{g/L}$ ($n = 40$) y $0.60 \pm 0.29 \mu\text{g/L}$ ($n = 40$), en superficie y media profundidad, respectivamente; mientras que en la época de lluvias se presentaron concentraciones más altas de clorofila *a* en superficie [con promedio de $1.54 \pm 0.75 \mu\text{g/L}$ ($n = 40$)] que a media profundidad [$0.69 \pm 1.09 \mu\text{g/L}$ ($n = 40$)]. Durante este mes hubo una amplia variabilidad espacial en la distribución de clorofila y una clara diferenciación entre superficie y media profundidad. En noviembre la concentración de clorofila se mantuvo alta, tanto en superficie como a media profundidad, los promedios fueron $1.52 \pm 0.68 \mu\text{g/L}$ ($n = 40$) y $1.21 \pm 0.70 \mu\text{g/L}$ ($n = 40$) respectivamente. En la época seca la concentración de clorofila *a* empezó a disminuir presentando promedios de $1.07 \pm 0.28 \mu\text{g/L}$ ($n = 40$) en superficie y $0.95 \pm 0.24 \mu\text{g/L}$ ($n = 40$) a media profundidad (Figura 13).

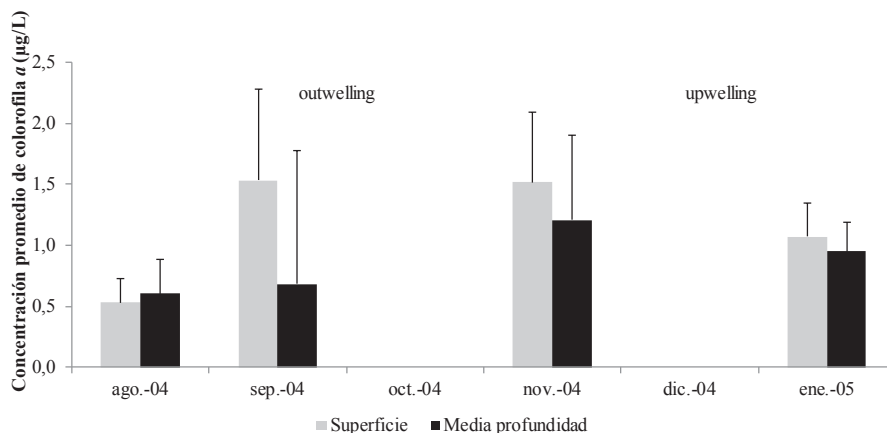


Figura 13. Concentración promedio de clorofila *a* ($\mu\text{g/L}$) de la bahía de Santa Marta entre agosto de 2004 y marzo de 2005. Valores medidos en 40 estaciones a dos profundidades. Las barras de error corresponden a la desviación estándar.

Variabilidad temporal anual

El test de Kruskal-Wallis indicó diferencias significativas entre los meses de muestreo en cada una de las variables y en ambas profundidades (Tabla 1), mientras el análisis de componentes principales permitió establecer que durante la época de transición climática, la densidad, salinidad y temperatura del agua explican en mayor medida (50%) la variabilidad general del sistema, constituyendo el primer

componente principal. Si bien la columna de agua se encuentra estratificada para esta época, los valores de nutrientes inorgánicos disueltos son igualmente bajos en superficie y a media profundidad y consecuentemente las concentraciones de clorofila *a* son bajas a lo largo de la profundidad. Durante la época de lluvias (septiembre y octubre), la variación de la densidad y salinidad del agua siguen explicando en gran medida el comportamiento de las otras variables consideradas. Al inicio del periodo de lluvias (septiembre), la temperatura ya no es un buen indicador de variabilidad, mientras que las concentraciones de oxígeno disuelto, fosfatos y clorofila *a*, sí hacen parte del primer componente principal, es decir, explican junto con densidad y salinidad la variabilidad general de las masas de agua de la BSM.

Tabla 1. Test de Kruskal-Wallis para muestras independientes y prueba de la mediana. H = estadístico de contraste de homogeneidad; N = número de datos; p1 = probabilidad prueba Kruskal-Wallis; χ^2 valor prueba de Chi-cuadrado; p2 = probabilidad prueba de la mediana. Para ambas pruebas el número de grados de libertad para cada variable es 11;5 para la variable transparencia.

Variable	H	N	p1	mediana	χ^2	p ²
Salinidad	447.170	480	0.000	36.50	440.709	0.000
Temperatura	459.178	480	0.000	27.30	451.792	0.000
% Saturación de oxígeno	185.922	480	0.000	68.82	171.600	0.000
pH	321.933	480	0.000	8.19	306.021	0.000
Clorofila <i>a</i>	0.00000	320	1.000	0.879	134.493	0.000
Amonio	272.781	480	0.000	2.663	207.800	0.000
Nitritos	131.411	480	0.000	0.906	126.502	0.000
Silicatos	261.133	480	0.000	15.935	182.000	0.000
Fosfatos	237.770	480	0.000	0.622	256.296	0.000
Densidad	450.543	480	0.000	23.875	381.193	0.000
Transparencia	70.879	216	0.000	6.00	74.190	0.000

Análisis histórico

La recopilación de datos históricos en la BSM reveló que la salinidad y la temperatura son las variables que mayor número de registros presentan desde 1979 (Escobar, 1981; Salzwedel y Müller, 1983; Ramírez, 1983, 1990a; Bioservice, 2001, 2002, 2003). Con base en esta recopilación se pudo establecer que los promedios multianuales de salinidad registrados para la BSM han oscilado entre 33.2 y 36.5, con un valor promedio histórico anual de 35.3 ± 1.33 . Así mismo, que en un ciclo anual la salinidad tiene una distribución bimodal y sus picos guardan estrecha relación con los períodos de lluvia y sequía. Un primer descenso de la salinidad ocurre en mayo, mes en el que históricamente se presenta un período lluvioso, mientras que el mayor descenso de la salinidad ocurre en los meses de octubre y noviembre (Figura 14), meses con los mayores promedios de precipitación.

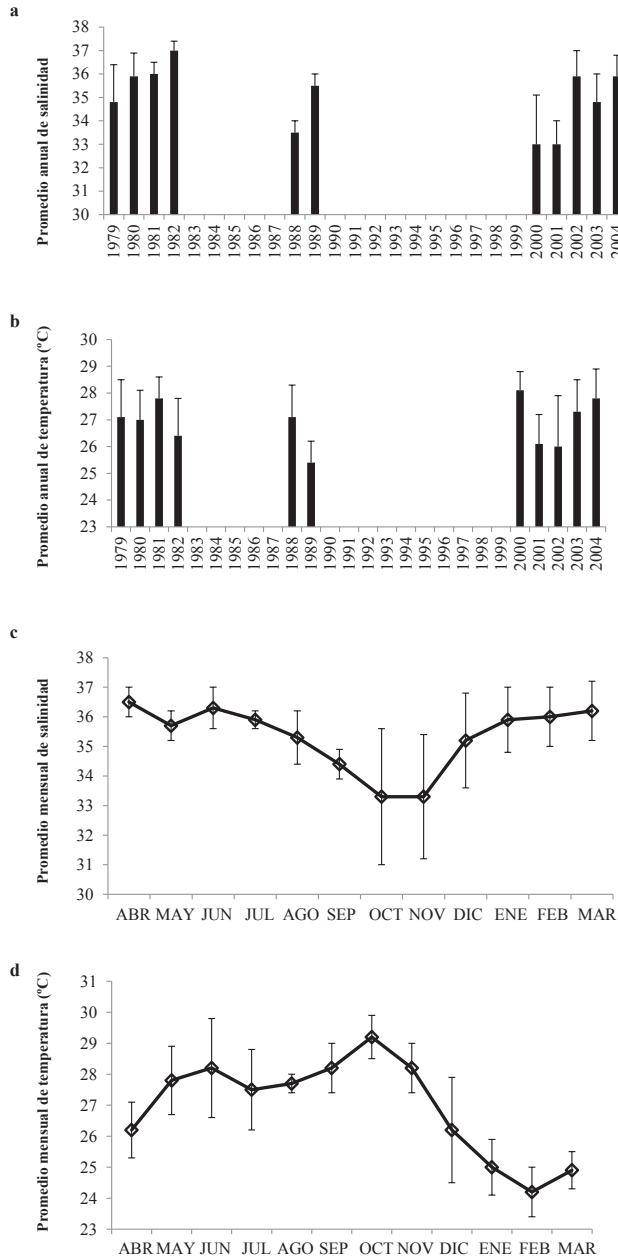


Figura 14. Variación histórica de la salinidad y la temperatura superficial del agua en la bahía de Santa Marta entre 1979 y 2004. Promedio anual de la salinidad (a) y la temperatura (b); promedio mensual multianual de la salinidad (c) y la temperatura (d). Las barras corresponden a intervalos de confianza del 95% (no incluye los años 1983 a 1987 ni 1990 a 1999). Datos tomados de Escobar (1981), Ramírez (1983, 1990a), Salzwedel y Müller (1983), Bioservice (2001, 2002, 2003).

Los promedios multianuales de temperatura superficial del agua han variado entre 25.38 °C en 1989 y 28.14 °C en 2000. Así mismo, en un ciclo anual la temperatura del agua en la BSM muestra un comportamiento bimodal que coincide con los períodos de lluvia, de esta forma se presenta un primer pico alto en junio (28.2 °C) y otro aún más alto en octubre (29.3 °C), valores que están por encima del promedio multianual (27.8±0.84 °C). La temperatura del agua durante el presente estudio estuvo dentro de lo observado históricamente, excepto en noviembre de 2004 cuando el promedio fue más bajo que el promedio histórico y marzo 2005, cuando fue mucho más alto.

DISCUSIÓN

Teniendo en cuenta que los meses muestreados representan relativamente bien el comportamiento histórico de la región y que, según el análisis de componentes principales (ACP), la salinidad y la temperatura, con signo contrario en el componente 1, explican en un 50% la variabilidad general de los datos (Figura 15), se propone un modelo conceptual de distribución estacional de masas de agua de la BSM con base en el análisis histórico de las variables salinidad y temperatura del agua y en los datos obtenidos durante el presente estudio. La BSM se encuentra influenciada tanto por aguas continentales como oceánicas, estas últimas regidas por dos corrientes diferentes que presentan un comportamiento estacional estrechamente relacionado con los vientos que afectan la región (Castro, 2003). Durante la época seca la corriente Caribe reforzada por los vientos alisios provenientes del noreste (NE), influye en la circulación de la BSM al generar una surgencia local (*upwelling*), mientras que durante la época lluviosa, la corriente Panamá-Colombia con dirección contraria a la Caribe es fortalecida por vientos húmedos provenientes del sur-suroeste, causando cambios considerables en las condiciones fisicoquímicas del agua de la bahía (*outwelling*). La demarcación de las épocas no es siempre reproducible y pueden variar de un año a otro en iniciación, duración e intensidad (Ramírez, 1990a). En el presente estudio, dado que la precipitación disminuyó en noviembre, se sugiere que la época seca tuvo un adelanto para finales de 2004.

Asociando los valores medidos en la época seca con masas de agua de media agua y fondo, se encuentra que esta época se caracteriza por disminución de temperatura e incremento de salinidad y transparencia del agua, fenómeno que constituye la surgencia local, que aporta masas de agua de salinidad alta (> 37), y de temperatura más baja con relación a la época lluviosa (< 25 °C) (Ramírez, 1983, 1990a; Salzwedel y Müller, 1983). La presencia de estas masas de agua más densas y claras es explicada por varios autores. Según Escobar (1981), durante la época de mayor fuerza de los vientos alisios del NE la corriente Caribe aporta a la BSM aguas

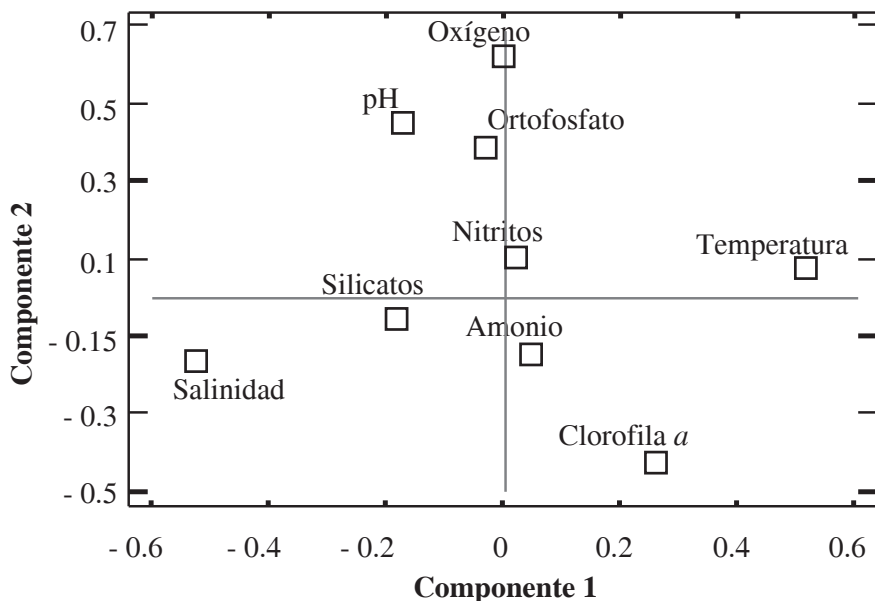


Figura 15. Análisis de componentes principales (ACP), entre las variables fisicoquímicas y nutrientes medidos en la columna de agua en 40 estaciones, en la bahía de Santa Marta

provenientes de la surgencia localizada en La Guajira. Contrariamente, Bula-Meyer (1985) sostiene que en la BSM se presenta una surgencia local debida a la dinámica de los vientos alisios durante la época seca (diciembre-abril), que trae a la superficie aguas de mayor densidad y concentración de nutrientes. Blanco (1988) plantea que los vientos procedentes de la Sierra Nevada de Santa Marta empujan el agua de la BSM mar afuera, mientras que Andrade y Duarte (1992) consideran que el fenómeno es producto de la circulación ciclónica en la cercana bahía de Salamanca que aleja las aguas de la línea de costa. Estos autores consideran que las aguas de la surgencia de la BSM corresponden a masas de agua de naturaleza oceánica; no obstante, las evidencias en este estudio indican una situación diferente.

Los datos registrados de salinidad, temperatura, densidad y transparencia para la época seca, muestran que el agua superficial de la BSM proviene del fondo y presenta características costeras más que oceánicas, además los vientos que influyen en la zona favorecen igualmente el desplazamiento de la masa de agua mar afuera, por acción de la fuerza de Coriolis, proceso conocido como transporte de Ekman (Franco-Herrera, 2005), ayudando así a que esta masa de agua profunda se desplace a la superficie. Debido a la configuración de la costa y a la orientación, intensidad y constancia de los vientos alisios que, según algunos autores, durante

esta época pueden alcanzar hasta 16.7 m/s (Salzwedel y Müller, 1983; Andrade, 2001; García-Hoyos *et al.*, 2010), el fenómeno de surgencia o ascenso de masas de agua subtropical sumergidas entre 100 y 200 m de profundidad se refleja en toda la bahía (Bula-Meyer, 1985).

Durante agosto, época de transición, el valor de transparencia es el más alto, algunos autores sugieren que una masa de agua oceánica hace incursión en la costa durante la época previa al inicio de la temporada mayor de lluvias. Los valores promedio de porcentaje de saturación de oxígeno en esta época presentan valores altos, coincidiendo con la mayor transparencia que se asocia a aguas abiertas ricas en oxígeno. Es posible que sea el mismo caso para noviembre, en donde se alcanzan valores cercanos a 70% de saturación de oxígeno. El modelo conceptual señala una zona influenciada por las descargas de aguas servidas que se presenta durante esta época (> 650 L/s) (Metroagua, 2003); por tanto, las concentraciones bajas de oxígeno durante la época seca, pueden estar relacionadas con esta actividad. No obstante, en estudios previos Salzwedel y Müller (1983) anotan que el contenido y la saturación de oxígeno presentan valores ligeramente más bajos durante la estación seca, comparada con la estación lluviosa y añaden que el fenómeno ha de ser atribuido a un contenido bajo de oxígeno de aguas de surgencia.

El efecto de los vientos muy probablemente fue positivo sobre la concentración de oxígeno disuelto; sin embargo, llama la atención enero de 2005, cuando en promedio la concentración de oxígeno disminuyó a valores similares a los obtenidos en la época de lluvias, solo que con una mayor variabilidad en la distribución de los datos, sugiriendo sitios de gran consumo de oxígeno en la BSM. Esta anomalía del oxígeno en enero, coincide con anomalías en la concentración de nutrientes, cuando se obtuvieron valores promedio altos de fósforo y nitritos. Estos valores promedio altos se midieron en la profundidad de media agua y coincidieron con una gran dispersión de los datos, sugiriendo entradas de estos nutrientes muy puntuales a la BSM. Cabe recordar que para la época seca la ciudad de Santa Marta se encuentra en temporada turística alta (15 de diciembre a 31 de enero, Canchano *et al.*, 1996). La localización de los valores anómalos de oxígeno, nutrientes y clorofila *a*, sugieren que en el mes de enero la principal fuente de entrada a la BSM es el emisario submarino. Vale la pena indagar sobre el efecto de estas entradas de agua al sistema y su relación con eventos de muerte masiva de organismos, como el ocurrido a mediados de febrero de 2009, en el que cerca de 1 tm de alevinos de *Mugil incilis* que viajaba en dirección sureste hacia la Ciénaga Grande de Santa Marta murió aparentemente por asfixia.

En la época seca la concentración promedio de amonio disminuye, posiblemente debido al consumo del mismo por parte del fitoplancton que lo utiliza

de manera preferente en sus procesos metabólicos (Furnas, 1992). Durante la época seca se aprecia un aumento notable de nitrógeno inorgánico posiblemente debido a los procesos de surgencia. En noviembre se presenta un pico en la concentración de nitritos a nivel superficial, un patrón similar fue registrado por Ramírez (1990b). En noviembre se observa una relación entre clorofila *a* y nitrógeno, que sugiere a este último como el elemento limitante de la productividad primaria en la BSM.

La más baja concentración promedio de silicatos se da en la época de transición, cuando apenas empiezan las lluvias y los silicatos se encuentran agotados. En la época seca los silicatos tienen un incremento que pueden estar relacionado con las aguas servidas, que aumentan su volumen durante la temporada turística, hasta los 1100 L/s (Castro, 2003). En marzo comienza nuevamente a ser baja la concentración de silicatos a medida que este nutriente es utilizado por las diatomeas y otras formas del plancton, sin que se renueven por ausencia de material meteorizado de origen continental. El ámbito de concentración de silicatos encontrado en este estudio es parecido al registrado por Ramírez (1990b) (0.16-60.1 $\mu\text{g-at/L}$) para la BSM y por Rodríguez-Ramírez y Garzón-Ferreira (2003) para la bahía de Chengue en el Parque Tayrona ($< 0.1\text{-}39.4 \mu\text{g-at/L}$).

Durante la época lluviosa ingresan a la BSM por escorrentía (*outwelling*) aguas de menor densidad, mayor temperatura y mayor carga orgánica e inorgánica. La cantidad de agua que ingresa a la BSM durante estos meses está calculada en cerca de $8 \times 10^6 \text{ m}^3$, volumen necesario para diluir la salinidad de 0.1 km^3 de volumen de la BSM de 36.6 (promedio obtenido en agosto 2004) a 33.9 (promedio obtenido en octubre 2004, Ramírez, 1983; 1990a; Bioservice, 2001). Consecuentemente con la reducción de la salinidad se incrementa la diferencia entre superficie y media profundidad.

La entrada de materia orgánica al inicio de la época lluviosa genera un descenso en la concentración de oxígeno disuelto en toda la BSM. Producto de la descomposición de materia orgánica se liberan nutrientes inorgánicos que, junto con los de origen autóctono, generan condiciones para que se presente un pulso de alta producción primaria en el sistema, lo cual se evidenció con el aumento en la concentración de clorofila. Si bien en trabajos anteriores en la BSM no se ha encontrado una significativa correlación entre concentración de nutrientes y biomasa fitoplanctónica (Franco-Herrera, 2001; Campos *et al.*, 2004), no cabe duda que el incremento de clorofila *a* requiere consumo de nutrientes biodisponibles, y tal vez lo que podría explicar esta baja correlación es un alto contenido de fitopigmentos en las células de fitoplancton presentes en la BSM. El leve incremento del pH en septiembre (8.4), similar al registrado por Ramírez (1983), podría estar atribuido al incremento en la tasa fotosintética con el respectivo consumo de CO_2 y por tanto una elevación moderada del pH (Day *et al.*, 1989; Boyd, 1990; Wedler, 1998). La tasa

Tabla 2. Concentración clorofílica en diferentes ecosistemas marinos.

Tipo de ambiente	Lugar	Latitud aproximada	Longitud aproximada	Cla (mg/m ³)	Método	Fuente
Costa abierta	Lower Florida Keys, Estados Unidos	24°35'N	81°10'-81°30'W	0.4-2.62	Fluorometría	Lapointe <i>et al.</i> (2004)
Costa abierta	Lado occidental del Mediterráneo	33-30°N	25-35°W	0.09-0.43	Fluorometría	Yacobi <i>et al.</i> (1995)
Costa abierta	A lo largo de la costa occidental, Curaçao	12°10'N	68°58'W	0.1-0.7	HPLC	Van Duyl <i>et al.</i> (2002)
Costa semicerrada	Bahía de Mochima, Venezuela	10° 20' - 10°24'N	64°19'30" - 64°22'30"W	1.11-8.57	Espectrofotometría	González <i>et al.</i> (2006)
Costa abierta	Providencia y Santa Catalina, Colombia	12-16°N	78-82°W	0.057-0.85	Espectrofotometría	Campos-González (2007)
Costa abierta	Costado occidental isla de San Andrés, Colombia	12°34'N	81°43'W	0.0-0.28	Espectrofotometría	Mancera-Pineda (2010)
Costa semicerrada	Discovery Bay, Jamaica	18°27.55' - 18°28'N	77° 24' - 77°25'W	0.05-0.43	Fluorometría	Webber <i>et al.</i> (2005)
Costa semicerrada	Golfo de Salamanca, Colombia	11°11'N	74°15'W	0.76-9.61	Fluorometría	Franco-Herrera <i>et al.</i> (2006)
Costa semicerrada	Parque Nacional Tayrona, Colombia	11°16'N	74°6.4'W	0.72-7.5	Fluorometría	Franco-Herrera <i>et al.</i> (2006)
Costa semicerrada	Ensenada El Rodadero, Colombia	11°12'N	74°14.5'W	0.21-2.24		Campos <i>et al.</i> (2004)

fotosintética pudo haberse incrementado por el aumento de fitoplancton, pues para este mismo mes los valores de clorofila *a* corresponden a los más altos registrados a nivel superficial. Muchos de los modelos estadísticos propuestos para calcular tasas de producción primaria, consideran que variables como la concentración de nutrientes y las interacciones entre los componentes biológicos están integrados en el valor de biomasa o clorofila, ya que estas variables incluyen el balance entre el crecimiento a partir de la disponibilidad de nutrientes y la mortalidad debido a la herbivoría (Alongi, 1998). Los cambios por efectos de dilución de aguas lluvias o aportes de aguas dulces, no logran alterar las condiciones de concentración ácido-base, produciendo un pH casi constante a lo largo del año en la BSM, aunque se reciban descargas ácidas o alcalinas aportadas por el emisario.

Durante la época lluviosa se presenta en la BSM el máximo valor de clorofila *a*, el cual es semejante al encontrado por los mismos métodos en

cuerpos de agua similares (Tabla 2). Los valores de clorofila *a* contrastan con los máximos valores de nutrientes, principalmente fosfatos, lo cual podría deberse a varias circunstancias, entre ellas a la alta tasa de renovación del agua, debida a la amplitud de la BSM y a la baja disponibilidad de energía lumínica durante el período de fertilización del cuerpo de agua. Los bajos valores de transparencia de la época lluviosa pueden ser atribuidos a los aportes de partículas en solución y suspensión durante el invierno (Escobar, 1981). Nixon (1995, 2009) propone que la eutroficación, más que un estado trófico, es un proceso en el que se incrementa la entrada de materia orgánica a un sistema. Este incremento puede deberse a varios factores, dentro de los que se destaca el enriquecimiento de nutrientes inorgánicos, que a su vez es consecuencia directa o indirecta de las necesidades de servicios de la sociedad. La definición de Nixon (1995) resulta útil para entender el proceso de eutroficación en ecosistemas costeros, no obstante, los valores propuestos en términos de clorofila, producción o productividad para clasificar los cuerpos de agua en cuanto a su condición trófica, propuestos por varios autores, no parecen ajustarse a las condiciones tropicales. Por ejemplo, según lo propuesto por Rydning y Rast (1992), de acuerdo con las concentraciones clorofílicas obtenidas, la BSM se podría clasificar como oligotrófica-ultraoligotrófica, lo cual no parece corresponder a la realidad. Esto sugiere que es necesario desarrollar estándares propios para cuerpos de agua de la zona costera tropical.

La transparencia del agua, medida como la visibilidad del disco Secchi, ha sido reconocida como una variable importante para caracterizar calidad de aguas; contrariamente a lo que se cree, la medición con el disco Secchi es más precisa que la medición de turbidez (Davies-Colley y Smith, 2001). A través de la profundidad de Secchi es posible estimar el coeficiente de atenuación vertical de luz (*K*) (Davies-Colley y Vant, 1988). Rivera-Monroy y Mancera (2001) determinaron *K* (\pm EE) para aguas de la boca de la Barra, un sitio cercano a la BSM (10°59'N y 74°16'W), encontrando un valor de $3.37 \pm 0.29 \text{ m}^{-1}$. Empleando la constante de 4.6 propuesta por Kirk (1994) para aguas costeras y marinas ($Z_f = 4.6/K$), la profundidad de la zona fótica en la BSM sería de 1.36 m. No obstante, a profundidades de 20 m siempre se encontró clorofila *a* en 35 sitios de muestreo y durante las diferentes épocas climáticas, sugiriendo que la zona fótica debe ser mucho más profunda y, por tanto, el valor de *K* mucho menor, cercano a los valores empleados en el presente artículo cuyo promedio fue 0.313 ± 0.16 ($n = 416$).

Los máximos valores de amonio obtenidos en este estudio son comparativamente bajos con otros registrados para este mismo ecosistema (58.45 $\mu\text{g-at/L}$, Bioservice, 2002), pero altos o equivalentes a los encontrados para la ensenada de Gaira (4.78 y 7.84 $\mu\text{g-at/L}$, Barragán *et al.*, 2003; Campos *et al.*, 2004).

El amonio se encuentra fuertemente relacionado con la concentración de oxígeno disuelto, como expresión de la forma reducida del nitrógeno en medio anóxico (Furnas, 1992). Los incrementos en la época lluviosa corresponden a la entrada por escorrentía de compuestos orgánicos nitrogenados que, al ser oxidados por acción química o bacteriana en presencia de altas concentraciones de oxígeno, generan como primer producto inorgánico la forma reducida NH_4^+ (Bioservice, 2003; Franco-Herrera, 2005; Pinto, 2005). Los nitritos, al ser la forma intermedia en el proceso de nitrificación, tienden a presentar bajas concentraciones sin importar el período climático. En la época de mayor precipitación, la concentración de este nutriente es la más baja, con una concentración relativamente alta de oxígeno, favoreciendo los procesos de oxidación de la materia orgánica (nitrificación) y pasando de compuestos reducidos (NH_4^+) a compuestos más oxidados como NO_2^- y NO_3^- , los cuales son rápidamente asimilados por los microorganismos (Wetzel, 1981).

Los fosfatos en los medios acuosos dependen de manera importante de la concentración de oxígeno, como expresión de la forma oxidada del fósforo en medio anóxico (Furnas, 1992). Como se afirmó anteriormente, los valores de fósforo tienden a ser altos comparados con los registrados para otros sistemas e inclusive para la BSM por otros autores (0.03 a 0.35 $\mu\text{g-at/L}$, Ramírez, 1990b). En la época lluviosa se presenta un aumento en este nutriente, asociado principalmente al aumento de materia orgánica en el sedimento y a la calidad del material potencialmente degradable (Montoya, 2003). También puede ser el resultado de diversos procesos en el que se involucran desechos metabólicos (heces fecales y otros productos de excreción), muerte de organismos e impurezas de algunos compuestos químicos (Montoya, 2003). En la costa, las bajas concentraciones de oxígeno, aumento de la acidez y condiciones especiales de óxido-reducción producen una reacción inversa y el fósforo escapa del sedimento como H_2PO_4 y HPO_4^- , entrando en la columna de agua en una forma no asimilable y no disponible para el componente biológico (Hargreaves y Tucker, 1996). El análisis de ACP muestra la relación inversa que presentan estas variables en la época seca explicando el 40% de este comportamiento sobre el componente 1. La correlación inversa que se presenta entre los fosfatos y los nitritos posiblemente se deba a la materia orgánica que ingresa a la bahía, principalmente de origen vegetal, afectando las tasas de nitrificación y liberación de nitritos (Wetzel, 1981). Los silicatos dependen de manera directa de la concentración de material meteorizado que entra a la BSM a través del río Manzanares y aguas de escorrentía, por lo tanto su mayor concentración promedio se da durante la época de lluvias.

Finalmente de acuerdo con el modelo conceptual, las condiciones climáticas que se presentaron durante este estudio se mantuvieron dentro de los ámbitos

normales históricos. El comportamiento de las variables revela la gran influencia que ejerce la entrada de aguas residuales domésticas durante los períodos lluviosos (*outwelling*), así como las aguas de escorrentía que llegan a la bahía procedentes de los ríos Manzanares y Gaira, las cuales fertilizan la BSM y explican en parte los patrones de distribución de los nutrientes inorgánicos disueltos.

En época de *upwelling* la estabilidad de la columna de agua es muy fluctuante, mientras que en *outwelling* aumenta rápidamente, indicando una distribución normal y estable, continuando así hasta diciembre (Ramírez, 1990a). De igual forma la salinidad, la temperatura y los nutrientes en la BSM están íntimamente ligados en esta época, la influencia de la desembocadura de la Ciénaga Grande de Santa Marta y de los ríos Manzanares y Gaira, así como de las aguas de escorrentía de la ciudad, intervienen en la disminución de la salinidad, aumento de la temperatura del agua, disminución de la transparencia e incremento en la concentración de nutrientes inorgánicos disueltos (Figura 16). El modelo señala que las descargas del emisario submarino constituyen un aporte importante de nutrientes y plantea como hipótesis que dichas descargas intensificarán el efecto de fertilización del *upwelling* en la primera mitad del año, con un efecto bajo en la época de *outwelling* debido a la estratificación de la columna de agua.

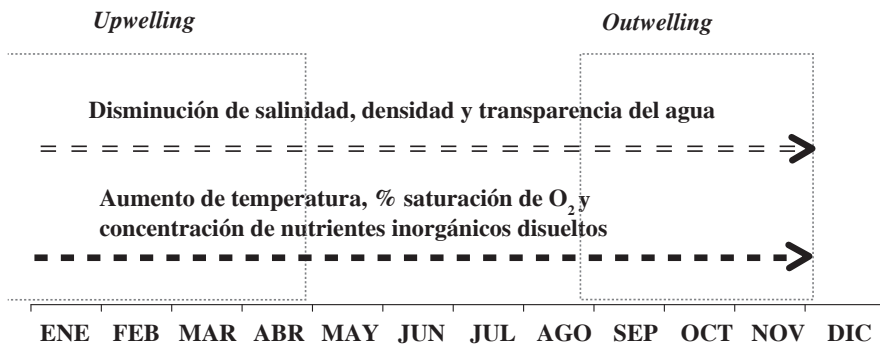


Figura 16. Modelo conceptual de los patrones de distribución estacional de masas de agua en la bahía de Santa Marta.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Instituto de Investigaciones Tropicales (Intropic) de la Universidad del Magdalena, por la gestión realizada para adelantar el proyecto “Estudio de la calidad de agua de la bahía de Santa Marta, un análisis histórico y geoestadístico dirigido a un plan de monitoreo”, a partir del cual se obtuvieron datos para el presente artículo. Así mismo, a la Universidad Nacional de Colombia y a

la Universidad del Magdalena, por la cofinanciación del Grupo de Investigación en Modelación de Ecosistemas Costeros. Igualmente agradecen a los revisores del artículo, cuyo trabajo permitió mejorarlo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alongi, D. M. 1998. Coastal ecosystem processes. CRC Press LLC. Boca Ratón, EE. UU. 419 p.
- Andrade, C. A. 2001. Las corrientes superficiales en la cuenca de Colombia observadas con boyas de deriva. *Rev. Acad. Colomb. Cienc.*, 25 (96): 321-335.
- Andrade, C. A. y A. Duarte. 1992. Estudio oceanográfico y de suelos en el golfo de Salamanca. Reporte técnico, Ecopetrol, Cartagena. 175 p.
- Barragán, R., F. Maldonado, S. Nieto y G. Pinto. 2003. Relación de la biomasa fitoplanctónica con la dinámica fisicoquímica y meteorológica de la capa de mezcla de la bahía de Gaira, Caribe colombiano, durante el período agosto a noviembre de 2003. Informe final, Seminario de investigación, Univ. Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta. 40 p.
- Bioservice. 1998. Monitoreo de la calidad del agua de mar de la bahía de Santa Marta. Marzo, 1998. Bioservice Ltda., Sociedad Portuaria de Santa Marta, Santa Marta. 45 p.
- Bioservice. 2001. Monitoreo de la calidad de agua de mar de la bahía de Santa Marta. Noviembre, 2001. Bioservice Ltda., Sociedad Portuaria de Santa Marta, Santa Marta. 52 p.
- Bioservice. 2002. Monitoreo de la calidad de agua de mar de la bahía de Santa Marta. Junio, 2002. Bioservice Ltda., Sociedad Portuaria de Santa Marta, Santa Marta. 50 p.
- Bioservice. 2003. Monitoreo de la calidad de agua de mar y sedimentos marinos de la bahía de Santa Marta. Informe aguas. Bioservice Ltda., Sociedad Portuaria de Santa Marta, Santa Marta. 50 p.
- Bioservice. 2004. Monitoreo de la calidad de agua de mar y sedimentos marinos de la bahía de Santa Marta. Enero, 2004. Informe aguas. Bioservice Ltda., Sociedad Portuaria de Santa Marta, Santa Marta. 46 p.
- Blanco, J. A. 1988. Las variaciones ambientales estacionales en las aguas costeras y su importancia para la pesca en la región de Santa Marta, Caribe colombiano. Tesis Maestría, Univ. Nacional de Colombia, Bogotá. 50 p.
- Boyd, C. E. 1990. Water quality on ponds for aquaculture. Auburn University, Auburn, EE. UU. 482 p.
- Bula-Meyer, G. 1985. Un núcleo nuevo de surgencias en el Caribe colombiano detectado en correlación con las distribuciones de las macroalgas. *Bol. Ecotrópica*, 12: 3-25.
- Campos, M., J. Orejarena y M. Palomino. 2004. Dinámica de la biomasa fitoplanctónica en la capa de mezcla y su relación con la oceanometereología de la bahía de Gaira, Caribe colombiano, Fase II; febrero-mayo de 2004. Informe final, Univ. Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta. 75 p.
- Campos-González, E. M. 2007. Fitoplancton de las islas Providencia y Santa Catalina, Caribe colombiano. Trabajo de grado Biol. Mar., Univ. Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta. 62 p.
- Canchano, M., H. Parodi y J. Serrano. 1996. Influencia del río Manzanares sobre la Bahía de Santa Marta. Monografía Especialización en Ciencias Ambientales, Univ. Magdalena, Santa Marta. 62 p.
- Castro, C. 2003. Cambios en la distribución y estructura de las unidades ecológicas de la bahía de Santa Marta, Caribe colombiano, ocurridos durante las últimas décadas. Trabajo de grado Biol. Mar., Univ. Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta. 122 p.

- Cloern, J. E. 1999. The relative importance of light and nutrient limitation of phytoplankton growth: a simple index of coastal ecosystem sensitivity to nutrient enrichment. *Aq. Ecol.*, 33: 3-16.
- Costa Jr., O. S., M. Nimmo y M. J. Attril. 2008. Coastal nutrification in Brazil: a review of the role of nutrient excess on coral reef demise. *J. South Am. Earth Sci.*, 257: 270.
- DANE. 2005. Departamento Administrativo Nacional de Estadística. <http://www.dane.gov.co>. 01/02/2010.
- Davies-Colley, R. J. y D. G. Smith. 2001. Turbidity, suspended sediment, and water clarity: A review. *J. Am. Water Res. Assoc.*, 37 (5): 1085-1101.
- Davies-Colley, R. J. y W. N. Vant. 1988. Estimation of optical properties of water from Secchi disk depths. *Water Res. Bull.*, 24 (6): 1329-1335.
- Day, J. W., C. A. S. Hall, M. Kemp y A. Yáñez-Arancibia. 1989. *Estuarine ecology*. Wiley-Interscience, Nueva York. 558 p.
- Escobar, A. 1981. Estudio de algunos aspectos ecológicos y de la contaminación bacteriana en la bahía de Santa Marta. Tesis Biología, Univ. Antioquia, Medellín. 64 p.
- Franco-Herrera, A. 2001. Estrategias de ingestión y flujo de carbono entre fitoplancton y *Eucalanus* spp. (Copepoda: Calanoida) en dos ambientes oceanográficos del Caribe central colombiano. Univ. Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta. 67 p.
- Franco-Herrera, A. 2005. Oceanografía de la ensenada de Gaira: El Rodadero, más que un centro turístico en el Caribe colombiano. Univ. Bogota Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. 56 p.
- Franco-Herrera, A., L. Castro y P. Tigreros. 2006. Plankton dynamics in the South-Central Caribbean Sea. Strong seasonal changes in a coastal tropical system. *Carib. J. Sci.*, 42 (1): 24-32.
- Furnas, M. J. 1992. The behavior of nutrients in tropical aquatic ecosystems. 29-65. En: Connell, D. W. y D. W. Wawiker (Eds.). *Pollution in tropical aquatic systems*. CRC Press, Boca Ratón, EE. UU. 272 p.
- García-Hoyos, L. M., A. Franco-Herrera, J. S. Ramírez-Barón y D. A. López-Cerón. 2010. Dinámica océano-atmósfera y su influencia en la biomasa fitoplanctónica, en la zona costera del departamento del Magdalena, Caribe colombiano. *Bol. Invest. Mar. Cost.*, 39 (2): 307-335.
- González, F., E. Zoppi de Roa y E. Montiel. 2006. Productividad primaria del fitoplancton en la bahía de Mochima, Venezuela. *Invest. Mar.*, 34 (2): 37-45.
- Guisande, C., A. Barreiro, I. Maneiro, I. Riveiro y A. R. Vergara. 2005. Tratamiento de datos. Universidad de Vigo, Vigo, España. 277 p.
- Hargreaves, J. A. y C. S. Tucker. 1996. Evidence for control of water quality in channel catfish *Ictalurus punctatus* Ponds by phytoplankton biomass and sediment oxygenation. *J. World Aquacult. Soc.*, 27 (1): 21-29.
- Kirk, J. T. O. 1994. Estimation of the absorption and the scattering coefficients of natural waters by use of underwater irradiance measurements. *App. Optics*, 33 (15): 3276-3278.
- Knauss, J. A. 2005. *Introduction to physical oceanography*. Waveland Press, Long Grove, EE. UU. 309 p.
- Lapointe, B. E., P. J. Barile y W. R. Matzie. 2004. Anthropogenic nutrient enrichment of seagrass and coral reef communities in the Lower Florida Keys: discrimination of local versus regional nitrogen sources. *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.*, 308: 23-58.
- Mancera-Pineda, J. E. 2010. Evaluación preliminar del impacto de las descargas del emisario submarino de San Andrés en agua y bentos. Universidad Nacional de Colombia sede Caribe, San Andrés. 67 p.

- Mancera, J. E. y L. A. Vidal. 2007. Informe de Colombia. 27- 30. En: Mancera, J. E. (Ed.). IOC Regional Science Planning Workshop on Harmful Algal Blooms in Iocaribe-ANCA-IV. Universidad Nacional de Colombia sede Caribe, San Andrés. 81 p.
- Metroagua. 2003. Beneficios y eficiencia del emisario submarino de la ciudad de Santa Marta. Informe ejecutivo. Metroagua, Santa Marta. 45 p.
- Montoya, M. 2003. Evaluación de las variables fisicoquímicas y biológicas en sistemas cerrados marinos (Acuario-Museo Mundo Marino, Santa Marta, Caribe colombiano). Trabajo de grado Biol. Mar., Univ. Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. 54 p.
- Nixon, S. W. 1995. Coastal marine eutrophication: A definition, social causes, and future concerns. *Ophelia*, 41: 199-219.
- Nixon, S. W. 2009. Eutrophication and the macroscope. *Hydrobiologia*, 629: 5-19.
- Pinto, G. 2005. Patrones de distribución espacial de la concentración de nitrógeno, fósforo y sílice en la bahía de Santa Marta, Caribe colombiano. Trabajo de grado Biología Marina, Univ. Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta. 99 p.
- Ramírez, G. 1983. Características físicoquímicas de la bahía de Santa Marta (agosto 1980-julio 1981). *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betín*, 13: 111-121.
- Ramírez, G. 1990a. Variación de parámetros hidrográficos y su relación con el proceso de surgencia en la bahía de Santa Marta. En: Sánchez, H. y J. M. Díaz (Eds.). Estudio del macrozoobentos de la bahía de Santa Marta. Informe final, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar), Santa Marta. 30 p.
- Ramírez, G. 1990b. Distribución de nutrientes inorgánicos en las aguas costeras de la región de Santa Marta, Caribe colombiano. *Mem. VII Sem. Nal Cienc. Tecnol. Mar, CCO, Cali*. 426 p.
- Rangel, L. M. 2007. Caracterización del fitoplancton presente en las aguas de lastre de los buques que arriban al puerto de Santa Marta, Caribe colombiano. 36-39. En: Mancera, J. E. (Ed.). IOC Regional Science Planning Workshop on Harmful Algal Blooms in Iocaribe-ANCA-IV. Universidad Nacional de Colombia sede Caribe, San Andrés. 81 p.
- Raymont, J. E. G. 1980. Plankton and productivity in the oceans, Vol. 1 Phytoplankton. Pergamon Press, Oxford. 489 p.
- Rivera-Monroy, V. H. y J. E. Mancera. 2001. Estructura y función de un ecosistema de manglar a lo largo de una trayectoria de restauración en diferentes niveles de perturbación: El caso de la región Ciénaga Grande de Santa Marta. Informe final, Colciencias, Invemar y University of Louisiana at Lafayette, Santa Marta. 244 p.
- Rodríguez-Ramírez, A. y J. Garzón-Ferreira, 2003. Monitoreo de arrecifes coralinos, pastos marinos y manglares en la bahía de Chengue (Caribe colombiano) 1993-1999. Serie de Publicaciones Especiales No. 8, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (Invemar), Santa Marta. 170 p.
- Ryding S. O. y W. Rast. 1992. El control de la eutrofización en lagos y pantanos. Unesco, Ediciones Pirámide, París. 375 p.
- Salzwedel, H. y K. Müller. 1983. A summary of meteorological and hydrological data from the Bay of Santa Marta, Colombian Caribbean. *An. Inst. Invest. Mar. Punta Betín*, 13: 67-83.
- Strickland, D. y R. Parsons. 1968. A practical handbook of seawater analysis. *Fish. Res. Bd. Can. Bull.*, 167: 1-311.
- Unesco. 1981. Background papers and supporting data on the equations of state of sea water. *Techn. Pap. Mar. Sci.*, 38, París. 192 p.

- Unesco. 1993. Nutrient analysis in tropical marine waters. Practical guidance and safety notes for the performance of dissolved micronutrient analysis in sea water with particular reference to tropical waters. Manuals and Guides 28, Unesco, París. 24 p.
- Van Duyl, F. C., G. J. Gast, W. Steinhoff, S. Kloff, M. J. Veldhuis y R. P. Bank. 2002. Factors influencing the short-term variation in phytoplankton composition and biomass in coral reef waters. *Coral Reefs*, 21: 293-306.
- Vidal, L. A., S. Vilardy, L. Saavedra, S. Pérez, G. Pinto y L. Ramos. 2005. Estudio de la calidad de agua en la bahía de Santa Marta, un análisis histórico y geoestadístico dirigido a un plan de monitoreo. Informe final, Convenio Dadma-Universidad del Magdalena 2004-2005, Santa Marta. 32 p.
- Webber, M., E. Edwards-Myers, C. Campbell y D. Webber. 2005. Phytoplankton and zooplankton as indicators of water quality in Discovery Bay, Jamaica. *Hydrobiologia*, 545: 177-193.
- Wedler, E. 1998. Introducción en la acuicultura con énfasis en los neotrópicos. Corp. Autón. Reg. Magd., GTZ, Univ. Atlántico, Univ. Magdalena, Granja Piscícola La Katía, Santa Marta. 388 p.
- Wetzel, R. G. 1981. *Limnología*. Omega, Barcelona. 679 p.
- Wiedemann, H., 1973. Reconnaissance of the Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia: physical parameters and geological history. *Mitt. Inst. Col.-Al. Invest. Cient.*, 7: 85-119 p.
- Yacobi, Y. Z., T. Zohary, N. Kress, A. Hecht, R. D. Robarts, M. Waiser, A. M. Wood y W. K. W. Li. 1995. Chlorophyll distribution throughout the southeastern Mediterranean in relation to the physical structure of the water mass. *J. Mar. Syst.*, 6: 179-190.

FECHA DE RECEPCIÓN: 25/05/2011

FECHA DE ACEPTACIÓN: 01/08/2013