

CARACTERÍSTICAS OCEANOGRÁFICAS DE LA SURGENCIA FRENTE A LA ENSENADA DE GAIRA, DEPARTAMENTO DE MAGDALENA, ÉPOCA SECA MENOR DE 2006

Damián Leonardo Arévalo-Martínez y Andrés Franco-Herrera

Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Ciencias Naturales, Programa de Biología Marina, Carrera 2 No. 11-68, El Rodadero, Santa Marta, Magdalena, Colombia. damian_arevalo84@yahoo.com (D.L.A.M); andres.franco@utadeo.edu.co (A.F.H.)

RESUMEN

Con el propósito de determinar la influencia de la dinámica del acoplamiento océano-atmósfera sobre la presencia de eventos de surgencia por transporte de Ekman y por acción de vientos continentales, así como el posible efecto de fertilización mediante el aporte de nutrientes inorgánicos de dicho proceso sobre las aguas costeras de la ensenada de Gaira, departamento de Magdalena, durante el período climático seco menor de 2006, se realizaron mediciones de variables atmosféricas, oceanográficas y biológicas, mediante la implementación del método Eurliano. En total se efectuaron cuatro muestreos, entre los cuales dos presentaron condiciones océano-atmosféricas que evidencian la ocurrencia de eventos de surgencia en las 48 horas previas, ante la presencia de fuertes vientos provenientes del noreste (Alisios) y del continente, mientras que los otros dos presentaron características similares a aquellas que se han registrado durante la época lluviosa. Durante el estudio, tanto la velocidad como la dirección del viento presentaron valores adecuados para que se presentaran afloramientos de aguas profundas, causados por transporte de Ekman y acción de vientos continentales (> 4.5 m/s, 26° y 120° , respectivamente), generando sobre las capas superficiales del océano, niveles de stress suficientes para desplazar las masas de agua costera hacia mar afuera (1.2 dinas/cm²). En días posteriores a eventos de afloramiento se observaron anomalías en las características físicas y químicas del agua, que presentó bajas temperaturas (26.1 ± 1.1 °C), alta salinidad (36.0 ± 0.5) y en consecuencia alta densidad (σ_t 26.31 ± 0.50), así como bajos niveles de oxígeno disuelto (4.04 ± 0.29 mL/L) y subsaturación predominante (84.3 ± 6.1 %). La concentración de nutrientes inorgánicos presentó un comportamiento relativamente homogéneo, siendo bajos durante todos los muestreos los niveles de nitritos (0.35 ± 0.02 µM) y fosfatos (0.30 ± 0.01 µM), mientras que la concentración media de amonio fue relativamente alta (1.08 ± 0.11 µM). Por el contrario, los niveles de nitratos fueron altos durante todos los muestreos, correspondiendo los mayores valores a aquellos bajo el influjo de la surgencia (9.48 ± 0.49 µM), aunque la variación no fue estadísticamente significativa. La biomasa fitoplanctónica respondió moderadamente a la fertilización, con concentraciones de clorofila *a* cercanas a 0.54 ± 0.50 mg/m³, siendo menores a las registradas durante muestreos en los cuales se presentó influencia fluvial. No obstante, al examinar la relación clorofila *a* / feopigmento *a*, se encontró que es predominantemente superior a 1, indicando la presencia de comunidades



jóvenes y fotosintéticamente activas en las aguas afloradas, luego de un tiempo de 48 h. En general, tanto la información atmosférica y oceanográfica, como la biomasa fitoplanctónica, sugieren un incremento moderado en la fertilización de las aguas costeras de la ensenada de Gaira, a causa del afloramiento de aguas profundas pertenecientes a la Masa de Agua Subtropical Sumergida (MASS), lo que permite clasificar el evento de surgencia local como mesotrófico, en lugar de oligotrófico como se acepta tradicionalmente.

PALABRAS CLAVE: Surgencia, Alisios, Nutrientes, Fertilización, Clorofila *a*.

ABSTRACT

Oceanographic features of the upwelling in front of Gaira's inlet, Magdalena department, minor dry season of 2006. In order to determine the influence of the ocean and atmospheric coupling dynamics on upwelling events, caused by Ekman's transport and by continental winds, as well as the possible fertilization effect produced by the increasing of the concentration of inorganic nutrients in coastal waters of Gaira's inlet, Magdalena department, during the minor dry season of 2006, atmospheric, oceanographic, and biological variables were measured by the implementation of the Eurlerian method. A total of four samplings were carried out, among which two presented atmospheric and oceanic conditions that evidence the occurrence of upwelling events 48 hours before in response to strong winds coming from northeast (trade winds) and from the continent, whereas the other two samplings presented similar characteristics to those typical of rainy seasons. During this study, wind velocity and direction presented expected values during upwelling events caused by Ekman's transport and by continental winds (> 4.5 m/s, 26° y 120° , respectively), generating enough stress levels in the sea surface layer that could move it offshore (1.2 dynes/cm²). During the days following the upwelling events, anomalies in water physical and chemical characteristics were observed, presenting low temperatures (26.1 ± 1.1 °C), high salinity (36.0 ± 0.5) and, as a consequence, high densities (σ_t 26.31 ± 0.50), as well as low dissolved oxygen levels (4.04 ± 0.29 mL/L) and predominant subsaturation (84.3 ± 6.1 %). Inorganic nutrient concentration showed a relatively homogeneous behavior, keeping low nitrite (0.35 ± 0.02 μM) and phosphate (0.30 ± 0.01 μM) levels during all samplings, whereas the mean ammonium concentration was relatively high (1.08 ± 0.11 μM). In contrast, nitrate levels were high during all samplings, with higher values corresponding to upwelling events (9.48 ± 0.49 μM), although variation was not statistically significant. Phytoplanktonic biomass showed a moderate response to fertilization with chlorophyll *a* concentrations close to 0.54 ± 0.50 mg/m³, which are lower to the obtained in samplings executed after continental fluvial influence. Nevertheless, such behavior is more evident examining chlorophyll *a*-phaeopigment *a* quotient, in which values are predominantly higher than 1, indicating the presence of young and photosynthetically active communities in upwelled waters after 48 h. In general, atmospheric, oceanographic, and phytoplanktonic biomass information suggests a moderate increase in the fertilization of Gaira's inlet coastal waters, caused by the deep waters upwelling, which belong to the Submerged Subtropical Water (SSW), allowing to classify this local upwelling event as mesotrophic instead of oligotrophic, as traditionally accepted.

KEY WORDS: Upwelling, Trade winds, Nutrients, Fertilization, Chlorophyll *a*.

INTRODUCCIÓN

Las surgencias son reconocidas como procesos oceanográficos caracterizados por el ascenso de aguas subsuperficiales con alto contenido de nutrientes (Barnes y Mann, 1998). Esta condición genera impactos notables en áreas donde su intensidad es mayor, como en los bordes orientales de los océanos, consolidando sistemas en los cuales la energía cinética del mar es particularmente efectiva al favorecer la producción primaria, en la medida en que se establecen condiciones que definen ecosistemas sobrealimentados (Margalef, 1985). De esta forma, las alteraciones físicas y químicas producidas en las aguas superficiales durante el afloramiento, originan como consecuencia la presencia de redes tróficas cortas y de eficiencia relativamente baja, así como altos niveles de biomasa fitoplanctónica y elevada producción primaria (Longhurst, 1981; Margalef, 1985; Lalli y Parsons, 1997).

De acuerdo con los trabajos de Longhurst (1981), Brink (1985) y Bakun y Mendelssohn (1989), la generación de los grandes frentes de divergencia marina como producto de la surgencia, depende esencialmente de la intensidad y dirección del viento a lo largo de la costa, aunque factores como la batimetría submarina y la presencia de una termoclina más somera (característica de los márgenes continentales occidentales), son importantes en el establecimiento de condiciones favorables para el movimiento vertical de aguas subsuperficiales hacia la superficie oceánica. Al efectuar estudios sobre surgencia costera es necesario considerar no sólo la variabilidad inherente al evento mismo, tanto en la escala espacial como temporal, sino también la hidrodinámica de la zona y sus características meteorológicas, dado que los eventos que se generan en el componente atmosférico (*e.g.* alteraciones en los campos de vientos) influyen el comportamiento de las masas de agua adyacentes, siendo en algunos casos de acuerdo con su intensidad y duración, un factor determinante en la generación de “eventos” que favorecen la presencia del afloramiento (Estrada y Blasco, 1985; Franco-Herrera, 2005). En este sentido, a pesar de que el mar Caribe colombiano se encuentra ubicado sobre el margen oriental del continente americano, las particularidades climáticas y topográficas – en especial de las zonas centro y norte –, favorecen la presencia estacional de eventos de surgencia causados por transporte de Ekman y por acción de vientos continentales, lo cual genera un campo de estudio de particular interés, debido a que aún falta información sobre el potencial de este proceso como generador de recursos eventualmente explotables, a pesar de que trabajos previos han evidenciado los mecanismos por medio de los cuales la atmósfera y el océano actúan sinérgicamente estimulando la dinámica de la producción primaria (Bula-Meyer, 1977, 1985; Corredor, 1977; Blanco, 1988; Díaz-Pulido y Garzón-Ferreira, 2002).



Para el mar Caribe colombiano, se ha encontrado que la surgencia ocurre con mayor intensidad entre Punta Gallinas y Puerto Colombia, aunque su 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 (Fajardo, 1979), y que se caracterizan por presentar temperaturas de 19 a 25 °C , salinidad > 36.5 y densidad de aproximadamente 24 g/L (Fajardo, 1979; Bula-Meyer, 1990; Cabrera y Donoso, 1993). 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 (Gil y Olcina, 1997).

Con base en la dinámica de vientos y teniendo en cuenta las fases transicionales del desplazamiento de la ZCIT, se han definido para el área cuatro periodos climáticos, correspondiendo las épocas de sequía a los lapsos de tiempo durante los cuales se presenta la surgencia. De esta forma se diferencian: seco mayor (diciembre-abril) influenciado por las mayores intensidades de los Alisios y cuya acción se fortalece por eventos locales como el ciclo diario de vientos, que se dirigen del mar hacia la tierra en el día y de la tierra hacia el mar durante la noche (Márquez, 1982; Bula-Meyer, 1990), lluvioso menor (mayo-junio) cuando hay un debilitamiento de los vientos, seco menor (julio-agosto), también conocido como el “Veranillo de San Juan” caracterizado por el ligero incremento en la velocidad del viento a lo largo de la costa y finalmente el lluvioso mayor (septiembre-noviembre), en el que se produce el grueso de la precipitación anual (Blanco, 1988; Bula-Meyer, 1990; Corredor, 1992; Andrade, 1993; Franco-Herrera, 2005).

Esta variabilidad estacional hace importante examinar si dichas alteraciones conjuntas tienen capacidad real de modular la producción de las aguas costeras superficiales de la ensenada de Gaira. Si bien en la zona se han efectuado determinaciones del comportamiento de la surgencia por transporte de Ekman mediante la medición del stress del viento (Blanco, 1988) y, específicamente en la ensenada, el trabajo de Franco-Herrera (2005) recopila los aspectos más importantes de las investigaciones realizadas por el autor sobre las características océano-meteorológicas de la misma, hasta ahora no se han descrito objetivamente afloramientos causados por acción de vientos continentales, ni se ha evaluado el efecto de dichos procesos en la franja comprendida entre 0 y 50 m de profundidad. Con base en estos antecedentes, se consideró pertinente examinar la dinámica del acoplamiento océano-atmósfera y su influencia para el desarrollo de eventos de surgencia, evaluando el posible efecto de fertilización en la capa de mezcla, mediante el aporte de nutrientes inorgánicos de dicho proceso sobre las aguas costeras de la ensenada de Gaira, durante el período climático seco menor de 2006, empleando para ello el método Eurliano.

Al considerar que los productores primarios son la base de las redes tróficas marinas, y que de la dinámica de dichos arreglos dependen actividades pesqueras y por ende una fuente directa de sustento humano, es importante su estudio de manera global, identificando los mecanismos subyacentes y consecuencias en las aguas costeras de la zona, así como los organismos que a esta se asocian. El propósito de este estudio fue determinar si la dinámica del acoplamiento océano-atmósfera es un agente propiciador de las condiciones necesarias para que ocurran procesos de surgencia y si existe una fertilización de las aguas costeras de la ensenada de Gaira a causa del ingreso de nutrientes inorgánicos que estimulen la respuesta en la biomasa fitoplanctónica, comparando dicho efecto con el que se produce bajo las condiciones que se observan durante la época lluviosa.

ÁREA DE ESTUDIO

La ensenada de Gaira se ubica aproximadamente a 6 km del suroeste de Santa Marta, capital del departamento de Magdalena, entre punta Gloria a los 11° 10' 44" N y 74° 14' 42" W y punta Gaira a los 11° 13' 24" N y 74° 14' 43" W (Franco-Herrera, 2005; Figura 1). Se caracteriza por presentar aguas tranquilas todo el año, clima cálido y seco con un período de lluvias corto; temperatura ambiente promedio de 28 °C y precipitación media anual de 578 mm. En la ensenada, se presentan dos fenómenos estacionales; uno de surgencia costera, sugerido inicialmente por Márquez (1982) ante el patrón de los vientos en la zona, en el cual, según este autor, el afloramiento causado por los Alisios del NE al soplar de forma paralela a la línea de costa, podría ser complementado por eventos de surgencia por acción de vientos continentales, debido al efecto del relieve costero. Así mismo, los estudios de Franco-Herrera (2005), indican, a partir de evidencias atmosféricas (*e.g* velocidad y dirección del viento) y oceanográficas (*e.g* temperatura, salinidad, densidad), la posibilidad de que se presente dicho proceso, considerando que el área se encuentra influenciada por la acción de los vientos Alisios del NE. De otro lado, en la ensenada, al igual que en todo el Caribe colombiano, se presenta el influjo de una contracorriente salobre de mar adentro (contracorriente Panamá – Colombia) que se desplaza en sentido SE-NE, durante el segundo semestre del año, favorecida por la disminución de la intensidad de los vientos Alisios del NE sobre la costa y el desplazamiento del anillo nuboso de la ZCIT en dirección norte (Pujos *et al.*, 1986; Gil y Olcina, 1997). La principal característica del relieve oceánico de esta zona es la ausencia de una plataforma continental típica, debido a que el relieve montañoso de la Sierra Nevada de Santa Marta (SNSM) se prolonga en el mar. Desde punta Gloria hasta el Parque Nacional Natural Tayrona (PNNT) la plataforma es angosta y está dominada



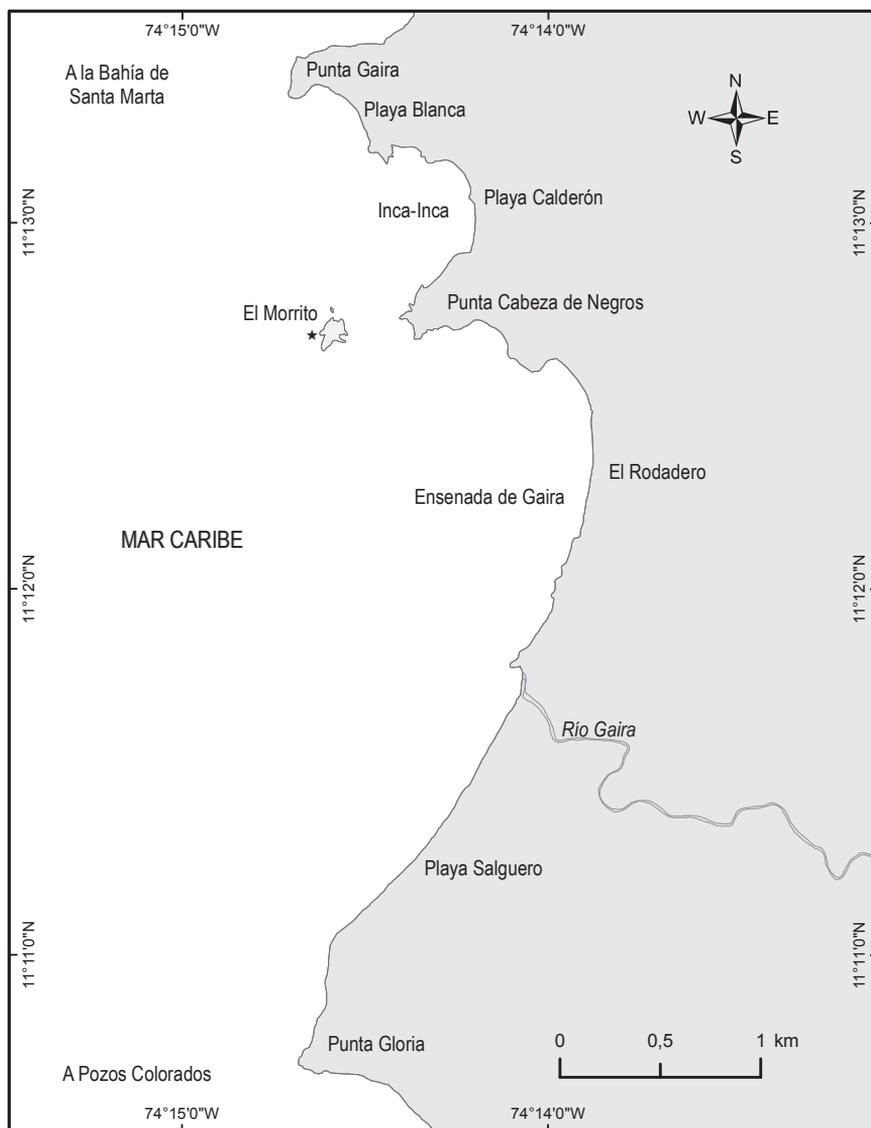


Figura 1. Área de estudio. La estrella indica las coordenadas del punto de muestreo donde se siguió el método Eureliano (Modificada de Franco-Herrera, 2005).

por fondos rocosos que corresponden a las estribaciones de la SNSM (Blanco, 1988). De otro lado, Bula-Meyer (1990) describe la zona como de baja profundidad y con una playa llana con plataforma corta que favorece el influjo de aguas subsuperficiales sobre la costa.

MATERIALES Y MÉTODOS

Diseño muestral

Se efectuaron cuatro salidas de campo entre julio y septiembre de 2006 a la ensenada de Gaira, específicamente a una estación fija ubicada a los $11^{\circ} 12' 48''$ N y $74^{\circ} 14' 43''$ W, al noroeste del Morro de Gaira (Figura 1), siguiendo el método Eurliano, por lo cual se efectuaron determinaciones de todas las variables a medir en campo en un solo punto (Cognetti *et al.*, 2001). Con base en información suministrada de velocidad y dirección del viento de la estación meteorológica de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Sede Santa Marta (UBJTLSSM), y los registros del Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas de la Armada Nacional de Colombia (CIOH, 2005, 2006), se determinaron las fechas en las cuales las condiciones océano-meteorológicas indicaban la presencia de eventos de surgencia costera (velocidad > 4 m/s y dirección NE) o, por el contrario, la ocurrencia de precipitaciones aisladas y descargas continentales; de esta forma, dos salidas correspondieron a condiciones de época seca (*i.e* con afloramiento), mientras las otras dos se asemejaron al patrón de la época lluviosa. Cada sesión de muestreo (*i.e* M-I, M-II, M-III y M-IV), efectuada 48 horas después periodos de alta intensidad de viento o de lluvia, estuvo conformada por dos ciclos de medición, separados entre sí por un espacio de una hora (M-I-1, M-I-2, M-II-1, M-II-2, etc.). En cada salida, se colectaron muestras de agua mediante botella Van Dorn de capacidad nominal 6 L manipulada mediante un wincher manual, a 0, 10, 20, 30, 40 y 50 m. Luego de tomar la muestra en cada profundidad, al subir la botella a la embarcación, esta fue abierta para efectuar la medición de temperatura con un termómetro de mercurio (± 0.1). Simultáneamente, se llenó una botella Winkler de 100 mL mediante una manguera plástica para estimar la concentración de oxígeno mediante dicho método. A cada muestra de agua se le adicionaron en el sitio de colecta sulfato de manganeso (MnSO_4) y solución yoduro-alcalina ($\text{KI}+\text{NaOH}^+$), con el propósito de fijar en campo el oxígeno presente, para después almacenarla en una nevera de 80 L y transportarla al laboratorio. Adicionalmente, se colectaron 2.5 L de agua de cada profundidad en un recipiente plástico oscurecido, almacenado en frío (0°C) y que luego fue transportado al laboratorio, en donde se cuantificaron variables fisicoquímicas (salinidad, pH), nutrientes (NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , $\text{HPO}_4^{=}$) y pigmentos fotosintéticos mediante técnicas estándar de colorimetría.



Variables atmosféricas

Se recolectó información de dirección y velocidad del viento de la estación meteorológica Davis-Wizard III, ubicada a 10 msnm, en la UBJTLSSM durante todo el año 2006 a las 08:00 y 16:00. Adicionalmente, en los cuatro días previos a cada muestreo, se registró la información en intervalos de cuatro horas. De igual forma, se consideraron las imágenes satelitales del GOES-11 para nubosidad y velocidad del viento de los sistemas de información del IDEAM (disponible *on-line*: www.ideam.gov.co) y el servicio SARPAN del CIOH (disponible *on-line*: www.cioh.org.co), para describir los campos de vientos y en consecuencia las condiciones atmosféricas de la zona durante el periodo de estudio. Se realizó un análisis exploratorio (*i.e* media y coeficiente de variación) de los registros de velocidad y dirección del viento, con el fin de describir la tendencia anual y durante los días previos a los muestreos, evaluando si los posibles eventos de surgencia estuvieron asociados con el transporte de Ekman o con la acción de vientos continentales. Finalmente, se describió el comportamiento anual de la velocidad del viento (Figura 2).

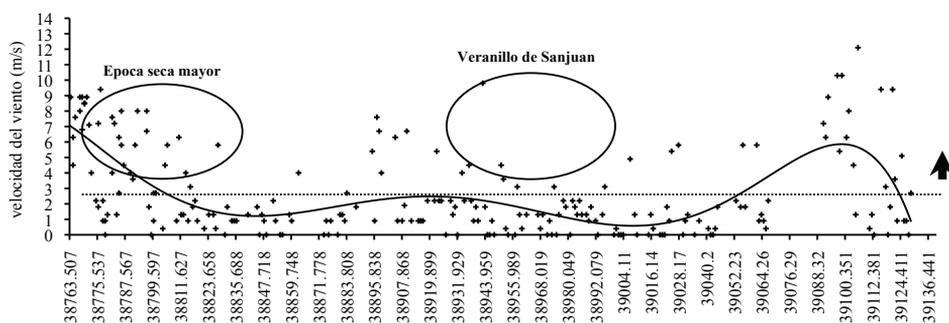


Figura 2. Velocidad del viento a 10 msnm en la ensenada de Gaira, Caribe colombiano, entre las 08:00 y 10:00 horas, entre febrero de 2006 y febrero de 2007. Las líneas concéntricas destacan los valores máximos de velocidad obtenidos durante la época seca mayor y el Veranillo de Sanjuán. Las flechas señalan las fechas de muestreo (Modificada de Franco-Herrera, 2007).

Variables oceanográficas y biológicas

A partir de la información atmosférica, se calculó la tensión del viento (τ) sobre la superficie del mar y se siguió el modelo de espiral de Ekman para establecer la profundidad de Ekman (δ_E , Pond y Pickard, 1983). Se efectuaron determinaciones *in situ* de temperatura y *ex situ* de salinidad y pH (sonda multiparámetros WTW-330), así como de oxígeno disuelto, porcentaje de saturación y densidad, para cada profundidad de muestreo, construyendo a partir de dicha información perfiles de profundidad para cada una, lo cual permitió describir su comportamiento en la columna de agua. Con el propósito de cuantificar las concentraciones de nutrientes inorgánicos (*i.e* NO_3^- , NO_2^- , NH_4^+ , HPO_4^-), se siguió la metodología propuesta por INVEMAR (2003) para cada uno de ellos, transportando

las muestras en nevera al laboratorio para su procesamiento y realizando las lecturas en un espectrofotómetro de luz visible Spectronic 21D. Los pigmentos fotosintéticos se determinaron mediante la técnica estándar de extracción con acetona al 90 %, propuesta por Strickland y Parsons (1972) con las modificaciones sugeridas en INVEMAR (2003).

Manejo de datos

La información en conjunto se analizó preliminarmente desde un punto de vista descriptivo, determinando valores máximos, mínimos y calculando medias y coeficientes de variación para cada variable, contribuyendo de esta forma a determinar si las propiedades del agua aflorada corresponden a las de la MASS, que se caracterizan por presentar baja temperatura, alta salinidad y bajos valores de oxígeno disuelto (Fajardo, 1979; Márquez, 1982; Brink, 1985; Bula-Meyer, 1985, 1990; Ramírez, 1990; Corredor, 1992; Alongi, 1998; Barnes y Mann, 1998; Andrade y Barton, 2004). Adicionalmente se construyeron perfiles de variación con respecto a la profundidad con el propósito de ilustrar dichas tendencias y se calcularon valores conjuntos entre muestreos con y sin efectos de surgencia (Tabla 1). Para nutrientes y pigmentos fotosintéticos, se estimó la concentración integrada en la columna de agua a fin de establecer el contenido neto de cada sustancia entre 0 y 50 m. Con el fin de determinar si existían diferencias estadísticamente significativas en los resultados obtenidos entre los dos ciclos de cada sesión de muestreo y entre los cuatro muestreos, se efectuaron pruebas t-student o Mann-Whitney, previa determinación de si los datos se ajustaban a los criterios de la estadística paramétrica o no paramétrica. La normalidad se determinó en todos los casos (siempre y cuando el tamaño de muestra fuese igual o superior a 10) mediante la prueba de Shapiro-Wilks. Lo anterior, permitió agrupar adecuadamente los ciclos que hacen parte de un mismo muestreo, así como los muestreos bajo condiciones de surgencia (*i.e* M-I y M-III), con el propósito de efectuar las comparaciones y análisis necesarios. En el caso de variables en las cuales los datos no reflejaron comportamiento uniforme entre muestreos, se realizaron las pruebas ANOVA o Kruskal-Wallis, de acuerdo con el resultado de la prueba de normalidad y se aplicaron los test de múltiples rangos de Tukey o Dunn, según el caso. Posteriormente, las variables oceanográficas y biológicas se sometieron a un análisis de componentes principales (ACP), para determinar las diferencias espaciales (similitud con base en la distancia euclidiana) entre variables en cada profundidad contribuyendo de esta forma a determinar si las propiedades fisicoquímicas de la columna de agua durante los eventos de surgencia corresponden a las de la MASS. Con el propósito de evaluar el grado de correlación entre variables, se calculó para cada par el coeficiente de correlación de Spearman con un nivel de confianza de 95 %. El manejo estadístico de la información se desarrolló a partir de la implementación de los paquetes estadísticos STATGRAPHICS Plus 5.1® y STATISTIX 8.0®.



Tabla 1. Promedio conjunto calculado para los muestreos de surgencia (M-I M-III) y no surgencia (M-II M-IV) en cada una de las variables de estudio. Los valores aparecen acompañados por su desviación estándar.

VARIABLE	CONDICIÓN	
	Surgencia (M-I M-III)	No Surgencia (M-II M-IV)
Oceanográficas		
Fisicoquímicas		
Temperatura (°C)	26.1 ± 1.1	28.2 ± 0.6
Salinidad	36.0 ± 0.5	36.4 ± 1.1
Densidad (σ_t)	23.6 ± 0.5	23.4 ± 0.9
Oxígeno disuelto		
- concentración (mL/L)	4.04 ± 0.29	4.23 ± 0.19
- porcentaje de saturación	84.3 ± 6.1	92.2 ± 4.1
pH	7.9 ± 0.1	8.1 ± 0.03
Nutrientes		
Nitratos (μM)	9.48 ± 0.49	9.15 ± 0.59
Nitritos (μM)	0.36 ± 0.02	0.35 ± 0.02
Amonio (μM)	1.06 ± 1.20	1.12 ± 1.03
Fosfatos (μM)	0.30 ± 0.01	0.29 ± 0.003
Biológicas		
Clorofila <i>a</i> (mg/m^3)	0.54 ± 0.50	0.64 ± 0.61
Feopigmento <i>a</i> (mg/m^3)	0.16 ± 0.23	0.76 ± 1.11
Clorofila <i>b</i> (mg/m^3)	0.14 ± 0.34	0.33 ± 0.51
Clorofila <i>c</i> (mg/m^3)	0.20 ± 0.38	0.69 ± 1.85
Carotenoides (mg/m^3)	0.17 ± 0.13	0.23 ± 0.12

RESULTADOS

Variables atmosféricas

Velocidad y dirección del viento

La velocidad promedio del viento para el ciclo anual fue de 2.4 ± 2.6 m/s, fluctuando entre 0 y 9.8 m/s en horas de la mañana, con ráfagas de viento ocasionales superiores a 4.5 m/s, debidas a la influencia de los vientos Alisios sobre la ensenada. De otro lado, los campos de vientos presentaron una dirección de salida promedio de $223 \pm 59.5^\circ$ en el ciclo anual, que corresponde con la orientación NE-SO, favoreciendo de esta forma la ocurrencia de eventos de afloramiento, especialmente durante la época seca de 2006 cuando la intensidad de vientos fue mayor. Así mismo, en los muestreos efectuados,

la orientación predominante del viento fue NE-SO, indicando la presencia de los Alisios, que promueven el ascenso de aguas subsuperficiales por transporte de Ekman, durante la época seca menor o “Veranillo de Sanjuán” (Figura 2). En el primer muestreo (M-I), tanto la dirección (paralela a la línea de costa) como la velocidad del viento fueron adecuados (7.2 ± 0.9 m/s y $27.5 \pm 6.9^\circ$), mientras que en el segundo muestreo (M-II), la velocidad disminuyó (2.8 ± 0.6 m/s) impidiendo el ascenso de aguas subsuperficiales. Por otro lado, en el tercer muestreo (M-III), la velocidad se intensificó (5.8 ± 1.5 m/s), aunque en este caso la dirección predominante fue en sentido perpendicular a la línea de costa ($120^\circ - 300^\circ$), favoreciendo eventos de afloramiento a causa de vientos provenientes del continente. En el cuarto muestreo (M-IV), se presentaron vientos de orientación E-NE con baja intensidad, condiciones que impidieron la génesis de eventos de surgencia (Figura 3, Tabla 2).

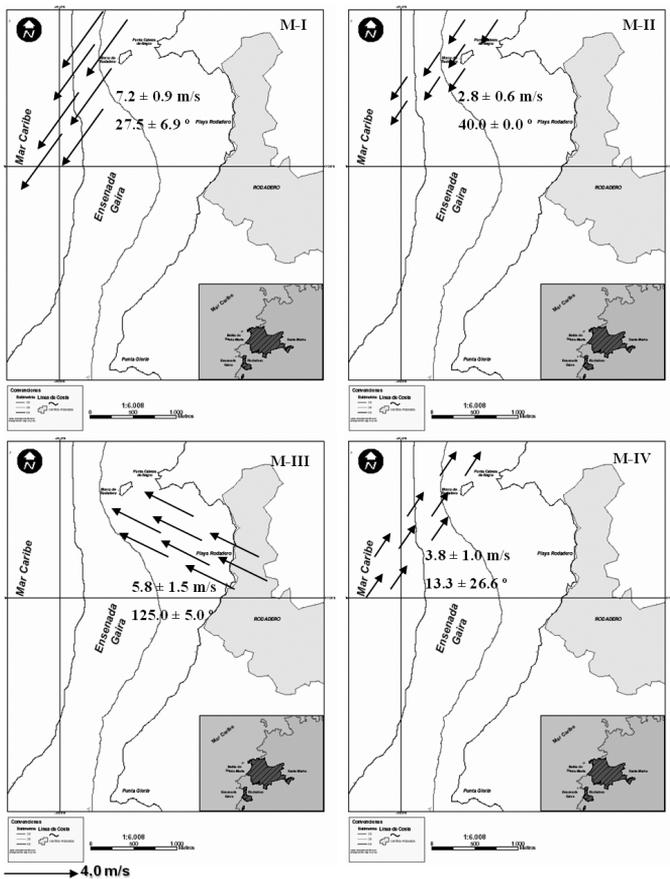


Figura 3. Dirección promedio del viento durante las 48 horas previas a los muestreos realizados entre julio y septiembre en la ensenada de Gaira.

Tabla 2. Condiciones atmosféricas y oceanográficas promedio, medidas durante los cuatro días previos a los muestreos realizados entre julio y septiembre de 2006, siguiendo el método Eurliano; v = Velocidad, d = dirección del viento, τ = tensión o stress del viento y δ_E = profundidad de Ekman. * Muestreos en los cuales se presentaron eventos de surgencia.

	v (m/s)	d (°)	τ (Pa)	δ_E (m)
M-I*	7.2 ± 0.9	27.5 ± 6.9	0.12 ± 0.02	71.3 ± 9.2
M-II	2.8 ± 0.6	40.0 ± 0.0	0.03 ± 0.01	27.0 ± 6.8
M-III*	5.8 ± 1.5	125.0 ± 5.0	0.12 ± 0.05	57.2 ± 15.3
M-IV	3.8 ± 1.0	13.3 ± 26.6	0.05 ± 0.02	37.9 ± 10.3

Stress del viento

Para M-I, las velocidades del viento promedio en días previos generaron un stress de 0.12 ± 0.02 Pa en la superficie del agua, lo cual produjo como resultado una profundidad de Ekman de 71.3 ± 9.2 m. En M-II, por el contrario, la velocidad del viento fue menor, provocando la disminución de la tensión generada sobre la superficie del agua hasta 0.03 ± 0.01 Pa y en consecuencia la reducción en la profundidad de Ekman hasta 27.0 ± 6.8 m, lo que impidió el ascenso de aguas subyacentes a la termoclina. En M-III, favorecido por el incremento en la velocidad del viento, el stress sobre la superficie del mar aumentó hasta 0.12 ± 0.05 Pa, produciendo una profundidad de Ekman tal que superó la profundidad de la termoclina permanente (45 m, según el trabajo de Blanco *et al.*, 1994). En M-IV, de forma opuesta, ante la disminución de la intensidad de los vientos, la tensión del viento decreció a 0.05 ± 0.02 Pa, condición que resultó insuficiente para producir una profundidad de Ekman adecuada para la surgencia (Tabla 2). En síntesis, de acuerdo con las condiciones océano-atmosféricas, se considera que los muestreos uno y tres (M-I y M-III) correspondieron a condiciones favorables para el afloramiento, mientras que los muestreos dos y cuatro (M-II y M-IV) se asemejaron al patrón de la época lluviosa en la ensenada de Gaira, ante la presencia de precipitaciones en los días previos.

Variables oceanográficas y biológicas

Temperatura y salinidad

La temperatura promedio para todo el estudio fue de 27.1 ± 1.4 °C, con valores mínimos y máximos de 24.8 y 29.7 °C, respectivamente. La temperatura más baja se presentó en M-III a 50 m de profundidad, mientras que la más alta se observó en superficie durante M-II. Entre los cuatro muestreos, aquellos efectuados bajo condiciones de surgencia (*i.e* M-I y M-III) presentaron las temperaturas más bajas (25.6 ± 0.4 °C y 26.7 ± 1.3 °C, respectivamente), mientras que en M-II y M-IV este parámetro osciló entre 27.0 y 29.7 °C (promedio 28.2 ± 0.6 ; Figura 4a), presentándose diferencias significativas entre aquellos muestreos en los cuales se evidenciaron eventos de surgencia y en los que no ($p < 0.05$, Test

de Mann-Whitney). La salinidad fue variable a lo largo de los cuatro muestreos, oscilando entre 34.7 y 38.0 (promedio 36.2 ± 0.9), siendo el valor más bajo el del nivel superficial en M-II, y el más alto aquel obtenido en M-IV entre 30 y 50 m de profundidad (Figura 4b). En general los valores de este parámetro fueron más altos en M-I y M-III (promedio 36.0 ± 0.4 y 36.1 ± 0.7 , respectivamente). De manera opuesta, en M-II, con condiciones del agua marcadamente diferentes, los valores de salinidad fueron más bajos que en los otros dos muestreos oscilando entre 34.7 y 36.0 (promedio 35.4 ± 0.3); entre tanto, en M-IV este parámetro osciló entre 36.0 y 38.0, siendo el valor promedio 37.3 ± 0.7 . No obstante, no se encontraron diferencias significativas entre los muestreos con surgencia y aquellos con condición lluviosa ($p > 0.05$, Test de Mann-Whitney).

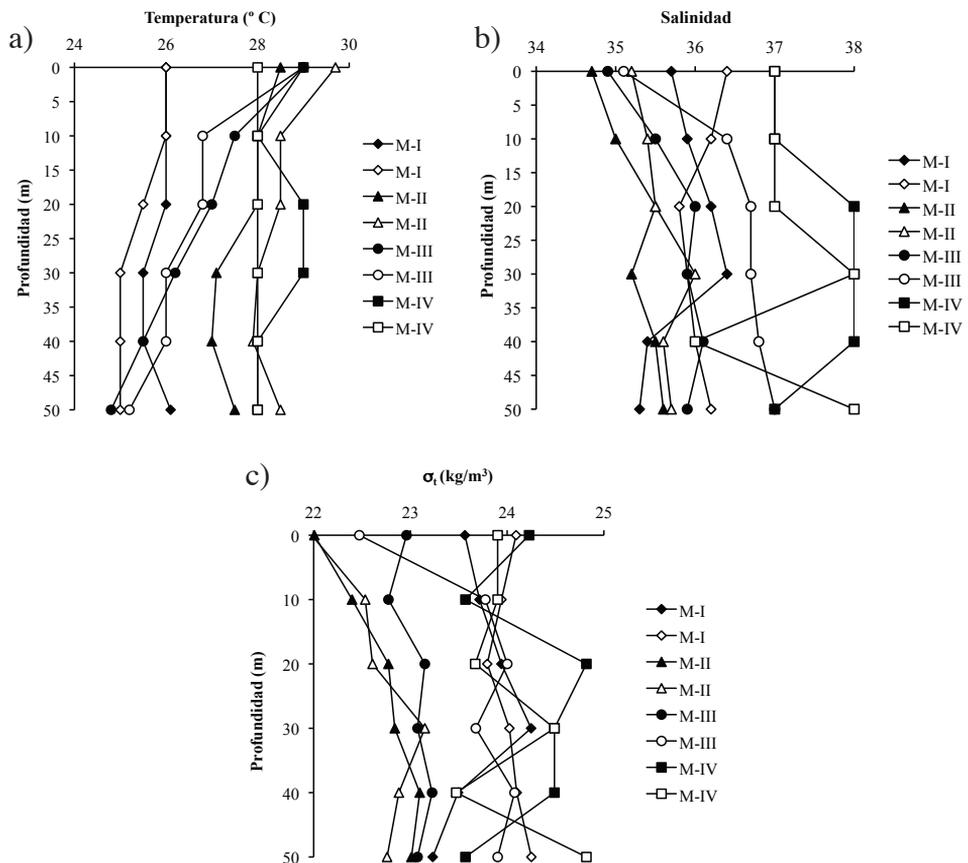


Figura 4. Perfiles de temperatura (a), salinidad (b) y densidad del agua (c) entre 0 y 50 m de profundidad frente a la ensenada de Gaira, en condiciones posteriores a eventos de surgencia (M-I y M-III) y precipitaciones (M-II y M-IV), entre julio y septiembre de 2006 (original \blacklozenge y réplica \diamond).

Densidad del agua

El valor medio de esta variable fue $23.3 \pm 0.7 \text{ kg/m}^3$, oscilando entre 21.9 y 24.8 kg/m^3 . En general, las mayores densidades se obtuvieron en M-I y M-III ($23.6 \pm 0.5 \text{ kg/m}^3$), en comparación con M-II y M-IV ($23.4 \pm 0.9 \text{ kg/m}^3$), muestreos durante los cuales se observó influencia de descargas continentales luego de que se presentaran condiciones de lluvia. A pesar de que el comportamiento de esta variable no refleja claramente la segregación entre muestreos (Figura 4c), si se encontraron diferencias significativas entre todos los muestreos tanto de surgencia como aquellos con condición lluviosa ($p < 0.05$, ANOVA), sin que se presente asociación entre grupos, excepto entre M-I y M-IV (Test Tukey HSD $\alpha = 0.05$).

Oxígeno disuelto superficial, porcentaje de saturación y pH

Las concentraciones medidas fluctuaron entre 3.44 mL/L y 4.97 mL/L. El valor mínimo se presentó en M-III, a una profundidad de 40 m, mientras que el máximo se encontró a 10 m en M-II. Así mismo, al comparar los niveles promedio de oxígeno entre los cuatro muestreos, se observó que son más bajos en M-I y M-III ($4.24 \pm 0.19 \text{ mL/L}$ y $3.84 \pm 0.22 \text{ mL/L}$, respectivamente), aunque en general, las menores concentraciones se presentaron en M-III. En contraste, M-II presentó la mayor concentración promedio de oxígeno disuelto durante este estudio ($4.33 \pm 0.22 \text{ mL/L}$). Dicha variación generó diferencias significativas entre los muestreos M-I - M-III (bajo efectos de surgencia) y M-II - M-IV (bajo efectos de lluvia; $p < 0.05$, Test de Mann-Whitney). Por otro lado, en todos los muestreos se presentaron niveles de saturación relativamente altos, con valores que oscilaron entre 71.9 y 108.4 %, siendo predominante la condición de subsaturación (promedio $88.2 \pm 6.6 \%$). En general, el comportamiento de esta variable es similar al observado para el oxígeno disuelto y difiere significativamente entre muestreos posteriores a condiciones de surgencia y aquellos antecedidos por periodos de lluvia ($p < 0.05$, Test de Mann-Whitney; Figura 5). De forma consistente con el comportamiento del O_2 , se encontraron diferencias significativas en el pH entre condiciones de época seca y lluviosa ($p < 0.05$, Test de Mann-Whitney), presentando bajos valores promedio en M-I y M-III, con respecto a los registrados en M-II y M-IV (7.9 ± 0.1 y 8.1 ± 0.03 , respectivamente), indicando el ascenso de aguas con bajo contenido de oxígeno durante la surgencia.

Nutrientes

En general, las concentraciones de NO_2^- fueron homogéneas a lo largo de los muestreos, con un promedio de $0.35 \pm 0.02 \mu\text{M}$ y picos en M-III entre 20 y 30

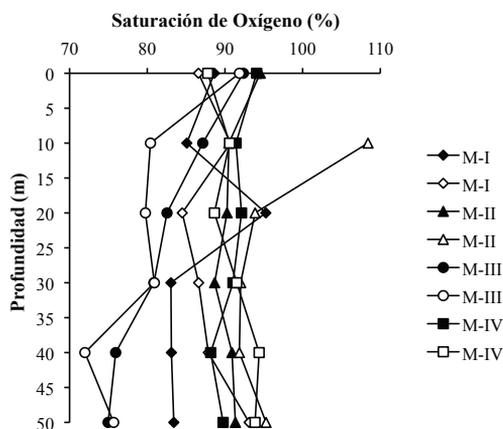


Figura 5. Perfil de saturación de oxígeno (original \blacklozenge y réplica \diamond) entre 0 y 50 m de profundidad frente a la ensenada de Gaira, en condiciones posteriores a eventos de surgencia (M-I y M-III) y precipitaciones (M-II y M-IV), entre julio y septiembre de 2006 (original \blacklozenge y réplica \diamond).

m de profundidad. No se presentaron diferencias significativas entre los muestreos correspondientes a eventos de surgencia y aquellos que presentaron condiciones de lluvia ($p > 0.05$, Mann-Whitney), lo cual no permite evidenciar una fertilización superior por surgencia sobre la zona. De otro lado, el valor medio del NH_4^+ fue $1.08 \pm 1.11 \mu\text{M}$, aunque los valores más altos se presentaron en M-III. En este caso se encontraron diferencias significativas entre todos los muestreos ($p < 0.05$, Kruskal-Wallis) y no existen agrupaciones consistentes con la diferenciación de muestreos entre surgencia y no surgencia (Test de Dunn, $\alpha = 0.05$). Por otro lado, las concentraciones de NO_3^- fueron relativamente altas con un valor medio de $9.32 \pm 0.56 \mu\text{M}$, oscilando entre 8.2 y 10.3 μM . Los mayores niveles de este nutriente se presentaron en M-I y M-III, siendo su valor medio conjunto superior al de M-II y M-IV (9.48 ± 0.49 y $9.15 \pm 0.59 \mu\text{M}$, respectivamente). Dicha tendencia es notoria al considerar la concentración integrada de nitratos en la columna de agua entre 0 y 50 m de profundidad, cuyo patrón permite observar que, efectivamente en los muestreos con surgencia, los niveles de este nutriente fueron mayores que en aquellos influidos por aguas continentales (Figura 6). Sin embargo, se encontró que no existen diferencias significativas entre los valores obtenidos en muestreos bajo ambas condiciones ambientales ($p > 0.05$, t-student, Tabla 3). En cuanto a la concentración de PO_4^{3-} , se encontraron niveles relativamente bajos y poco variables con concentraciones que fluctuaron entre 0.29 y 0.32 μM . El valor promedio en la masa de agua fue $0.29 \pm 0.01 \mu\text{M}$ y no se observó una segregación clara de los cuatro muestreos, siendo los valores medios muy similares ($p > 0.05$, Mann-Whitney, Tabla 3).

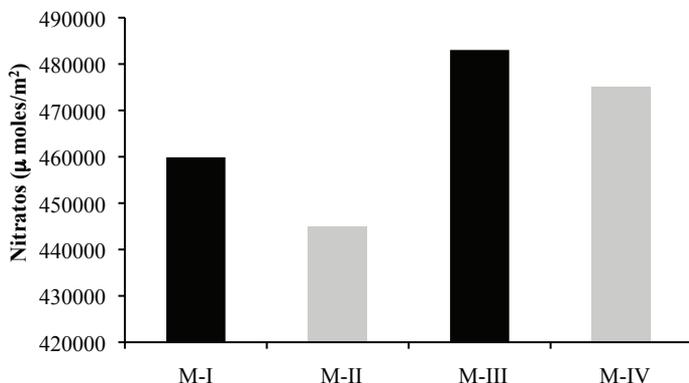


Figura 6. Concentración integrada de nitratos (NO_3^-) en la columna de agua, entre 0 y 50 m de profundidad, frente a la ensenada de Gaira, en condiciones posteriores a eventos de surgencia (M-I y M-III) y precipitaciones (M-II y M-IV), entre julio y septiembre de 2006 (original \blacklozenge y réplica \diamond).

Tabla 3. Variables fisicoquímicas y concentración media de nutrientes inorgánicos, medidas durante los cuatro muestreos efectuados siguiendo el método Eureliano, entre julio y septiembre de 2006, frente a la ensenada de Gaira, Caribe colombiano ($n = 48$). P = Promedio, S = Desviación estándar, C.V. = coeficiente de variación.

PARÁMETRO	M-I	M-II	M-III	M-IV	P \pm S	C.V. (%)
Fisicoquímicos						
Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	25.6 \pm 0.4	28.1 \pm 0.7	26.7 \pm 1.3	28.3 \pm 0.5	27.1 \pm 1.4	5.0
Salinidad	36.0 \pm 0.4	35.4 \pm 0.3	36.1 \pm 0.7	37.3 \pm 0.7	36.2 \pm 0.9	2.4
Densidad (σ_t)	23.9 \pm 0.3	22.7 \pm 0.4	23.4 \pm 0.5	24.1 \pm 0.50	23.3 \pm 0.7	3.1
Oxígeno disuelto (mL/L)	4.24 \pm 0.19	4.33 \pm 0.22	3.84 \pm 0.22	4.13 \pm 0.10	4.13 \pm 0.26	6.31
Saturación de oxígeno (%)	87.3 \pm 4.0	93.4 \pm 5.4	81.2 \pm 6.5	91.1 \pm 2.3	88.2 \pm 6.6	7.4
pH	7.9 \pm 0.1	8.1 \pm 0.02	7.9 \pm 0.1	8.0 \pm 0.03	7.9 \pm 0.12	1.47
Nutrientes						
Nitritos (μM)	0.36 \pm 0.02	0.35 \pm 0.02	0.35 \pm 0.00		0.35 \pm 0.02	4.64
Nitratos (μM)	9.34 \pm 0.63	8.84 \pm 0.65	9.62 \pm 0.28	9.46 \pm 0.35	9.32 \pm 0.56	5.99
Amonio (μM)	0.30 \pm 0.27	1.12 \pm 1.03	1.82 \pm 1.29		1.08 \pm 1.11	102.92
Fosfatos (μM)	0.30 \pm 0.01	0.29 \pm 0.00	0.29 \pm 0.00	0.29 \pm 0.00	0.29 \pm 0.01	2.12

Variables biológicas

Pigmentos fotosintéticos

La clorofila *a* osciló entre 0.00 y 2.22 mg/m^3 , con un valor medio de 0.59 ± 0.55 mg/m^3 , siendo M-II y M-III los muestreos en los cuales se presentaron los mayores valores (0.86 ± 0.54 y 0.56 ± 0.41 mg/m^3 , respectivamente, Tabla 4). En conjunto, se observó que el nivel medio de este pigmento fue menor en los muestreos que correspondieron con

eventos de surgencia, en comparación con el obtenido como resultado de la fertilización por aporte continental (0.54 ± 0.50 y 0.64 ± 0.61 mg/m³); sin embargo, no se encontraron diferencias significativas entre las concentraciones de clorofila *a* entre los muestreos bajo ambas condiciones ($p > 0.05$, Test de Mann-Whitney). El feopigmento *a*, presentó un valor medio de 0.48 ± 0.85 mg/m³ y se caracterizó por una alta variabilidad, oscilando entre 0.014 y 5.38 mg/m³. Su comportamiento fue muy similar al registrado para la clorofila *a*, de manera que, en promedio, las máximas concentraciones de este compuesto se obtuvieron en M-II y M-IV (0.48 ± 0.64 y 1.04 ± 1.41 mg/m³). Sin embargo, en este caso se encontró que existen diferencias significativas entre los muestreos M-I - M-III y M-II - M-IV ($p < 0.05$, Test de Mann-Whitney), indicando mayores niveles de degradación de clorofila *a* en los muestreos en los cuales no se presentaron eventos surgencia (*i.e* M-II y M-IV). En atención a lo anterior, fue necesario examinar el resultado del cociente entre las concentraciones de clorofila *a* y dicho pigmento (Figura 7). En general, se observó que sí hay un efecto de fertilización por surgencia en M-I y M-III, debido a que en estos la magnitud de esta razón tiende a ser mayor, en comparación con M-II y M-IV, muestreos en los cuales se presentaron los menores valores entre todos los ciclos de muestreo. Así mismo, se observaron tendencias similares en el comportamiento de las clorofilas *b* y *c*, y carotenoides, en los cuales las menores concentraciones de pigmento coincidieron con los eventos de surgencia (*i.e* M-I y M-III). Este patrón es claro, al considerar que se presentan diferencias significativas en las concentraciones de dichos compuestos entre muestreos posteriores a eventos de surgencia y aquellos posteriores a períodos de lluvia ($p < 0.05$, Test de Mann-Whitney, Tabla 4).

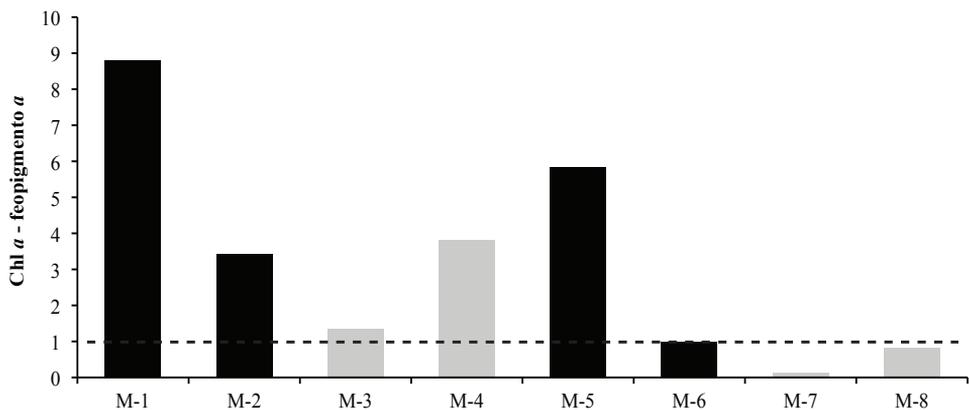


Figura 7. Relación clorofila *a* / feopigmento *a* en la columna de agua entre 0 y 50 m de profundidad para los cuatro muestreos realizados durante eventos de surgencia (barras negras) y no surgencia (barras claras), entre julio y septiembre de 2006. La línea punteada indica el valor de 1 para el cociente entre los dos pigmentos. M-I = M-1 y M-2, M-II = M-3 y M-4, M-III = M-5 y M-6, M-IV = M-7 y M-8.

Tabla 4. Concentración media de pigmentos fotosintéticos (mg/m³) evaluados durante los ocho ciclos de los cuatro muestreos efectuados, siguiendo el método Eurliano, entre julio y septiembre de 2006, frente a la ensenada de Gaira, Caribe colombiano (n = 48). P = Promedio, S = Desviación estándar, C.V. = coeficiente de variación.

PIGMENTO	M-I	M-II	M-III	M-IV	P ± S	C.V. (%)
Clorofila <i>a</i>	0.51±0.59	0.86±0.54	0.56±0.41	0.41±0.61	0.59±0.55	94.30
Feopigmento <i>a</i>	0.09±0.02	0.48±0.64	0.24±0.32	1.04±1.41	0.48±0.85	183.20
Clorofila <i>b</i>	0.22±0.48	0.08±0.02	0.07±0.02	0.59±0.64	0.24±0.44	185.20
Clorofila <i>c</i>	0.31±0.51	0.09±0.03	0.09±0.07	1.29±2.52	0.44±1.34	302.68
Carotenoides	0.14±0.13	0.28±0.08	0.20±0.12	0.17±0.12	0.20±0.12	62.97

Análisis de componentes principales

Se seleccionaron cinco componentes principales que, en conjunto reunieron el 82 % de la varianza total de los datos (Tabla 5), siguiendo el criterio de Pla (1986); no obstante se considerarán para el análisis los dos primeros, que reúnen la mayor variabilidad con respecto al total (Figura 8). Se encontró que la temperatura, la salinidad, el pH y la saturación de oxígeno de condiciones de surgencia y no surgencia se correlacionan negativamente, así como también ocurre con los fosfatos, clorofila *a* y pigmentos accesorios (clorofilas *b*, *c* y carotenoides). La única variable que no muestra claramente esta segregación, es la concentración de nitratos. De igual forma, al efectuar el análisis para las sesiones de muestreos realizadas, se seleccionaron cinco componentes principales que reunieron, en conjunto, el 84.5 % de la varianza total (Tabla 6), encontrando la clara segregación de los muestreos efectuados bajo condiciones ambientales de surgencia y aquellos realizados luego de que se presentaran eventos de lluvia con flujo de aguas continentales hacia la ensenada; de este modo, se formaron tres grupos: uno de surgencia y dos de condición lluviosa, como se ilustra en la figura 9.

Tabla 5. Valores propios del ACP y proporción de la varianza explicada por cada componente.

Componente	Valor propio (Eigen)	Porcentaje de variación explicada	
		Absoluta	Acumulada
1	5.19931	28.885	28.885
2	3.75938	20.885	49.770
3	2.51376	13.965	63.736
4	1.80767	10.043	73.778
5	1.47567	8.198	81.977

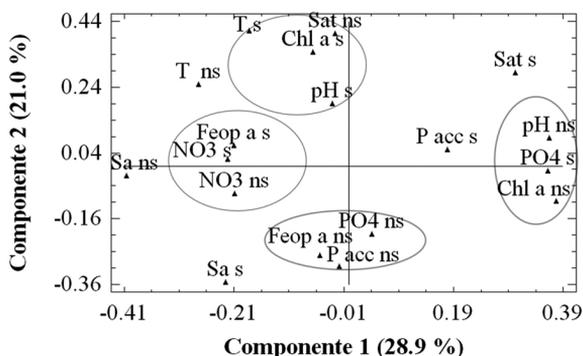


Figura 8. Gráfico bivariado representando los valores de los dos primeros componentes principales para cada observación al aplicar ACP a las variables oceanográficas y biológicas evaluadas durante el estudio en la ensenada de Gaira. Las letras s y ns corresponden a la condición en la cual se midieron las variables, a saber, surgencia y no surgencia. T = temperatura, Sa = salinidad, pH = pH, Sat = porcentaje de saturación de O₂, NO₃ = nitratos, PO₄ = fosfatos, Chl a = concentración de Clorofila a, Feop a = concentración de feopigmentos, Pacc = pigmentos accesorios (Chl b, Chl c y carotenoides).

Tabla 6. Valores propios del ACP aplicado a las sesiones de muestreo efectuadas entre julio y septiembre frente a la ensenada de Gaira y proporción de la varianza explicada por cada componente.

Componente	Valor propio (Eigen)	Porcentaje de variación explicada	
		Absoluta	Acumulada
1	2.65638	29.515	29.515
2	1.91862	21.318	50.883
3	1.22108	13.568	64.401
4	1.05147	11.683	76.084
5	0.75572	8.397	84.481

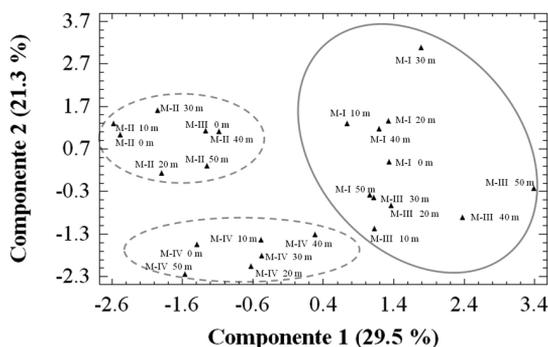


Figura 9. Distribución de las sesiones de muestreo realizadas entre julio y septiembre, frente a la ensenada de Gaira, en los dos primeros componentes principales. Las líneas continuas incluyen a los muestreos que corresponden a mediciones posteriores a eventos de surgencia (M-I y M-III) y las líneas fragmentadas encierran a aquellas que se efectuaron en días posteriores a precipitaciones (M-II y M-IV).

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Variables atmosféricas

En general, fue notorio que las condiciones océano-atmosféricas presentes en la ensenada de Gaira tanto en el ciclo anual, como en las fechas durante las cuales se efectuaron las sesiones de muestreo, corresponden al patrón bimodal descrito por autores como Márquez (1982), Bula-Meyer (1990), Corredor (1992) y Andrade (1993), en el cual las mayores intensidades de los vientos Alisios durante la estación seca coinciden con el evento de surgencia. Tanto la velocidad (> 4.0 m/s) como la dirección promedio fueron adecuadas para promover el movimiento ascensional de aguas subsuperficiales, por transporte de Ekman (26°) y por acción de vientos continentales (120°), lo cual permitió determinar que las anomalías físicas y químicas del agua medidas en campo, corresponden a eventos de surgencia en M-I y M-III, con base en el criterio propuesto a partir de las observaciones de Corredor (1981) y Franco-Herrera (2005).

De acuerdo con Blanco (1988), la energía del viento al actuar sobre la superficie del mar se convierte en tensión eólica, cuya variación en magnitud evidencia el efecto potencial del viento para promover el transporte e inducir anomalías superficiales en las aguas costeras regionales durante el año. En este sentido, el incremento en la velocidad del viento durante los días previos a los muestreos M-I y M-III indica el establecimiento de condiciones adecuadas para que se produzcan eventos de surgencia, a pesar de lo propuesto por Sverdrup *et al.* (1942), quienes señalan que a velocidades del viento inferiores a 6 ó 7 m/s, la tensión generada por el mismo es de poca importancia; esto puede explicarse por el carácter teórico del argumento de los autores, quienes parten del supuesto de que la superficie del mar es completamente lisa, haciendo despreciable la poca rugosidad que presenta. En este estudio, velocidades superiores a 4.0 m/s mostraron ser suficientes para generar el ascenso de aguas procedentes de profundidades inferiores a la termoclina permanente que se ubica entre 40 y 50 m (Blanco *et al.*, 1994).

Así mismo, la evaluación del stress generado por el viento, y en consecuencia el transporte y profundidad de Ekman producidos, permite evidenciar que cuando la interacción con la superficie del agua logra la intensidad adecuada se promueve dicho evento. Esta aseveración está basada en el criterio propuesto por Estrada y Blasco (1985), quienes señalan que un evento de surgencia corresponde con un período de tiempo en el cual las condiciones atmosféricas (*i.e* velocidad y dirección del viento) favorecen el ascenso de aguas subsuperficiales. Durante este estudio, los eventos de surgencia originados tanto por transporte de Ekman como por acción de vientos continentales se presentaron como producto de niveles de stress de 1.2 dinas/cm², valor muy similar al registrado por Blanco (1988) para Santa Marta y áreas aledañas, cuyos valores oscilan entre 0.70 y 1.3 dinas/cm²

para los mismos meses durante los cuales se ejecutó este estudio (época seca menor). De este modo, como se ha definido para esta investigación, en los muestreos M-I y M-III se presentaron eventos de surgencia costera, mientras que en M-II y M-IV no ocurrió de esta forma. Adicionalmente, puede afirmarse a partir de los datos disponibles que en M-I se presentó surgencia costera causada por transporte de Ekman, mientras que en M-III este evento correspondió a un efecto causado por la acción de vientos continentales que, como describen Herrmann (1970) y Márquez (1982), descienden hacia el mar en forma de un viento muy fuerte (brisa), luego de entrar al valle del río Piedras y llegar hacia el cerro de las Bóvedas atravesando la SNSM, manifestándose con especial intensidad en la bahía de Santa Marta y la ensenada de Gaira.

Variables oceanográficas

En general, se observó que las condiciones de las aguas costeras de la ensenada de Gaira presentan variaciones en respuesta a un fenómeno de surgencia causado por transporte de Ekman y por acción de vientos continentales. En M-I y M-III, la información proporcionada por las variables atmosféricas (*i.e* velocidad, dirección y stress del viento, así como profundidad y transporte de Ekman) permitió establecer que las condiciones del mar se ajustaban a las características de procesos de surgencia. De manera opuesta, en M-II dichos indicadores evidencian la influencia continental, que de forma particular se presenta durante la época lluviosa en el área (Márquez, 1982; Blanco, 1988; Franco-Herrera, 2005). Durante los muestreos M-I y M-III, la temperatura promedio del agua (26.1 ± 1.1 °C) fue más baja y difirió significativamente de la registrada durante M-II y M-IV, lo cual coincide con lo esperado, pues las aguas de afloramiento en la zona usualmente presentan temperaturas bajas, como lo han encontrado los estudios de Müller (1979), Ramírez (1983), Salzwedel y Müller (1983), Bula-Meyer (1985) y Díaz-Pulido y Garzón-Ferreira (2002). No obstante, menores temperaturas han sido registradas para la zona de surgencia de la península de la Guajira por trabajos como los de Fajardo (1979), Bula-Meyer (1985), Corredor (1992) y Cabrera y Donoso (1993), quienes reportan descensos hasta los 21-22 °C. De otro lado, los valores de salinidad obtenidos en M-I y M-III coinciden con lo registrado por Müller (1979), Ramírez (1983) y Salzwedel y Müller (1983) en la bahía de Santa Marta y Fajardo (1979) en la surgencia de la Guajira, quienes registran incrementos notorios en el valor de este parámetro durante la época seca, en comparación con la época lluviosa. De acuerdo con Kennish (2001), la salinidad varía localmente con las descargas continentales, la evaporación y la precipitación. De esta forma, el resultado obtenido en M-II y M-IV evidencia no sólo la posible influencia del aporte fluvial en las aguas costeras de la ensenada, sino que también puede ser resultado de la marcada reducción en la velocidad del viento en los días previos a los muestreos



que, sumada a la presencia de nubosidad convectiva en la zona, generaría condiciones inadecuadas para el afloramiento.

Los resultados obtenidos al medir la densidad del agua, son consistentes con los obtenidos para la temperatura y la salinidad, de manera que en M-I y M-III, bajo efectos de aguas afloradas (Figuras 4a, 4b, 4c), el valor de este parámetro en el agua tiende a ser mayor que en M-II y M-IV - que corresponden al patrón de lluvia -, variación que se ajusta a lo esperado, de acuerdo al comportamiento sugerido por Riley y Chester (1989) para esta variable. Previamente, Ramírez (1983) había demostrado para la bahía de Santa Marta, mediante el cálculo de la estabilidad en la columna de agua ($\Delta_E \times 10^8$), que durante la época seca se evidenciaban procesos de surgencia debido a que las aguas superficiales presentaban mayor densidad que las subsuperficiales (*i.e* inestabilidad), lo cual es consistente con los resultados obtenidos en este estudio. De esta forma, la densidad de las aguas costeras de la ensenada durante M-I y M-III sugiere el ascenso de aguas con las características fisicoquímicas similares a las descritas para la MASS (Fajardo, 1979), sí bien la segregación de los muestreos no es clara, en parte por las condiciones que se presentaron en M-IV, debido a que septiembre de 2006 fue considerado como un mes atípico en la medida en que la pluviosidad fue anormalmente baja en todo el litoral colombiano, a causa de la influencia del Fenómeno del Niño (CIOH, 2006). Ante la ausencia de lluvias en el área y considerando las características de aridez de la región, así como las altas temperaturas ambientales registradas (Márquez, 1982; Salzwedel y Müller, 1983; Franco-Herrera, 2005), es probable que la evaporación haya incrementado generando aumentos en la salinidad y, consecuentemente, en la densidad del agua.

De acuerdo con Riley y Chester (1989), el oxígeno como el dióxido de carbono son gases que a diferencia de otros se ven influenciados por la actividad biológica, de manera que su dinámica depende en gran medida de las comunidades presentes. Lo anterior hace importante su determinación en un ecosistema con particularidades físicas, químicas y biológicas como el de surgencia. En general, los niveles de oxígeno disuelto permanecieron bajos, siendo la concentración promedio obtenida, menor a la registrada por Ramírez (1983). En atención a lo anterior, puede inferirse que la cantidad de oxígeno de la masa de agua corresponde a las condiciones típicas de procesos de surgencia, caracterizada por el ascenso de aguas frías, con alta salinidad y bajo contenido de oxígeno (Meadows y Campbell, 1978; Barnes y Mann, 1998; Kennish, 2001). Los resultados obtenidos son consistentes con el comportamiento registrado para el pH, de manera que en M-I y M-III las bajas concentraciones de oxígeno coinciden con mayores cantidades de CO₂ en razón del ascenso de aguas subsuperficiales, mientras que en M-II, la ausencia del ascenso de aguas subsuperficiales, permite la presencia de mayores niveles de oxígeno disuelto, que no varían notablemente con la profundidad, si bien permanecen en la mayoría de los casos

en la subsaturación. La marcada estratificación térmica y halina de las aguas del mar Caribe, genera como resultado un gradiente de densidad, cuya principal consecuencia es la alta estabilidad de la columna de agua (Codispoti, 1983; Corredor, 1992). Bajo dichas condiciones donde hay ausencia de un proceso que produzca desplazamiento vertical del agua, sumado al consumo biológico del oxígeno y a la baja solubilidad por el incremento en la temperatura del agua, es de esperar que se produzca una marcada disminución del contenido de dicho gas. No obstante, el resultado obtenido se debe probablemente a que la ausencia de mezcla vertical no permaneció suficiente tiempo en la masa de agua como para generar una estratificación de la misma, como ocurre en la época lluviosa (Ramírez, 1983). En general, el comportamiento de la saturación de oxígeno es similar al observado para el oxígeno disuelto y es consistente con lo propuesto por Müller (1979) y Ramírez (1983), quienes señalan que en la bahía de Santa Marta este gas permanece en niveles relativamente estables y condiciones de subsaturación a lo largo de todo el año, debido a la baja solubilidad del oxígeno en aguas frías como las que afloran durante la época seca y a la estratificación térmica de la columna de agua durante la época de lluvias.

A excepción de los nitratos, los demás nutrientes inorgánicos cuantificados en las aguas costeras de la ensenada de Gaira, no reflejan claramente la fertilización por surgencia. La concentración promedio de nitritos obtenida en este estudio es similar a la registrada por Ramírez (1990) en la bahía de Santa Marta ($< 0.3 \mu\text{M}$) y por Blanco *et al.* (1994) en el Golfo de Salamanca ($< 0.09 \mu\text{M}$). No obstante, aunque dichos autores indican que esta cantidad aumenta en meses con eventos de surgencia, en este caso la variación es mínima y por lo tanto no es concluyente. Este resultado puede explicarse al considerar que los nitritos son una forma intermedia en los procesos de nitrificación o denitrificación, de manera que es usual encontrar valores bajos durante todo el año; así mismo, cabe resaltar que es una especie química altamente inestable que reacciona rápidamente oxidándose hacia nitrato (Kaplan, 1983; Riley y Chester, 1989; Franco-Herrera, 2005). De otro lado, la concentración promedio de amonio fue relativamente alta, pero no varió significativamente con afloramientos de aguas subsuperficiales, así que no se considera un buen indicador del fenómeno en este estudio. No obstante, dichos niveles constituyen un argumento adicional en favor de la explicación de la dinámica de compuestos nitrogenados a partir de su oxidación propuesta por Riley y Chester (1989), debido a que la formación de amonio constituye el primer paso en el proceso de oxidación de compuestos orgánicos nitrogenados. En este sentido, si bien los niveles de este nutriente son superiores a los de nitrito, ajustándose a lo esperado en condiciones de bajo oxígeno, es de esperar que su concentración en el agua sea menor que la de nitratos, debido a que los compuestos generados como parte de la cadena de reacciones oxidativas que culminan con la formación de NO_3^- se consideran altamente inestables (Codispoti, 1983).



De manera opuesta, los niveles de nitratos en las aguas costeras superficiales de la ensenada fueron altos, superando incluso el nivel máximo registrado por Ramírez (1983) de 4 μM durante febrero bajo efectos de la surgencia y los valores máximos mencionados para la surgencia de La Guajira por Corredor (1979, 1992) (3.0 y 2.4 μM , respectivamente); en este sentido, a pesar de que no existen diferencias significativas entre los muestreos con y sin surgencia, sí puede observarse un proceso de fertilización que, en el caso de los muestreos sin surgencia, proviene probablemente de las descargas continentales que afectan la ensenada de Gaira ante condiciones de lluvia (*e.g.* río Gaira). Así mismo, este resultado puede explicarse al considerar el proceso de nitrificación descrito por Riley y Chester (1989): la oxidación del amonio que proviene de la descomposición bacteriana de organismos muertos, conduce a la formación de nitritos; un proceso posterior de oxidación origina los nitratos, que constituyen la principal forma de nitrógeno disponible para el consumo fitoplanctónico (Corredor, 1979; Codispoti, 1983; Kaplan, 1983; Lalli y Parsons, 1997). De esta forma, los bajos valores de nitritos y amonio, pueden ser el resultado de acelerados procesos de oxidación luego del afloramiento de aguas frías con bajo contenido de oxígeno, condición que, según Molina *et al.* (2005), favorece la acción oxidativa bacteriana, produciendo altos valores de nitratos. Según estos autores, este proceso se cumple si el contenido de partículas orgánicas es bajo, lo cual coincide con las características de las aguas de sistemas de surgencia, que han sido descritas como claras y con baja cantidad de compuestos orgánicos (Corredor, 1979; Margalef, 1985).

En cuanto a los fosfatos, se encontró que la concentración promedio es similar a la indicada por Ramírez (1983), y de forma consistente con dicho estudio, los niveles de este nutriente son mayores durante eventos de surgencia; no obstante, las diferencias no son significativas, lo cual puede explicarse por el alto aporte de fosfatos que supone la descarga fluvial hacia el mar, durante la cual las rocas sufren procesos erosivos que liberan los iones fosfato al agua (Riley y Chester, 1989; Kennish, 2001). Adicionalmente debe considerarse la importancia de los aportes continentales de fósforo que provienen de fertilizantes y detergentes descargados desde cultivos o como aguas servidas a cuencas de ríos como el Gaira (Franco-Herrera, 2005).

Según Corredor (1977) y Franco-Herrera (2005), las aguas que afloran en el mar Caribe, tienen origen en las Aguas Intermedias del Atlántico Norte (AIAN), lo cual trae como consecuencia la presencia de bajos niveles de nutrientes inorgánicos ante el escaso nivel de remineralización que transcurre desde que las aguas se hunden en el mar de Noruega y afloran en la zona de estudio. De esta forma, cabe esperar que los niveles de nutrientes aflorados con la MASS sean bajos como se observó para la mayoría en este estudio; sin embargo, las concentraciones de nitratos registradas en días posteriores a eventos de surgencia, permiten explorar la posibilidad de que las aguas que emergen en las costas de la ensenada de Gaira definan un medio meso y no oligotrófico como se acepta comúnmente.

Variables biológicas

En general, las concentraciones de clorofila *a* obtenidas son similares a las registradas por autores como Corredor (1979) y Franco-Herrera (2005) para sectores adyacentes del Caribe centro colombiano (Tabla 7). Sin embargo, la tendencia que presentan no se ajusta a lo esperado, en la medida en que la biomasa fitoplanctónica (evidenciada a partir de los pigmentos fotosintéticos) mostró ser superior en los muestreos sin surgencia. Se observó un comportamiento similar en el feopigmento *a*, aunque en este caso, sí existen diferencias importantes entre los muestreos con y sin surgencia; de esta forma, si bien en M-II y M-IV hubo mayor concentración de pigmentos, es probable que una gran proporción de los mismos se encuentre en degradación presentándose en la forma de feopigmentos (Andreo y Vallejo, 1984). En este sentido, es claro que por efecto de la surgencia se presenta una fertilización de las aguas costeras superficiales de la ensenada de Gaira, generando una respuesta moderada en la biomasa fitoplanctónica, comparable con la de la época de lluvia, a pesar de que estudios previos demuestran que durante esta temporada en el área la clorofila *a* presenta mayores niveles (Franco-Herrera, 2001; Tigreros, 2001). El efecto diferencial de la surgencia se observa cuando se considera la relación clorofila *a* / feopigmento *a* (Figura 7), pues al ser predominantemente mayor a 1 en los muestreos M-I y M-III, puede inferirse la presencia de comunidades fotosintéticamente activas, según lo proponen Margalef (1991) y Trees *et al.* (2000), adecuándose lo anterior al patrón esperado para aguas afloradas y cuya fertilización empieza a estimular la respuesta de los productores primarios ante periodos de relajación de los vientos, como lo demuestran los estudios de Estrada y Blasco (1985), Margalef (1985) y Corredor (1992).

Tabla 7. Concentraciones mínimas y máximas de clorofila *a* registradas para algunas regiones del Caribe colombiano. Referencias tomadas de Franco-Herrera (2005). * Áreas con desarrollo de surgencias estacionales.

Autor (es)	Ubicación	tipo de agua	clorofila <i>a</i> ($\mu\text{g/l}$) Min-Máx
Duarte (1996)*	Guajira continental	Oceánica	0.76-1.52
Corredor (1979)*	Península de la Guajira	Surgencia costera	0.60-3.50
Rodríguez y Varela (1987)*	Noreste de Venezuela	Surgencia costera	0.10-5.20
Franco-Herrera (2001)*	Golfo de Salamanca	Costera	0.76-9.61
	PNN Tayrona	Costera	0.72-7.50
Arias y Durán (1996)	Bahía de Cartagena	Costera	0.20-19.25
Gualteros <i>et al.</i> (1992)	PNN Corales del Rosario	Laguna insular	0.10-0.80
Presente estudio	Caribe centro colombiano	Costera	0.09-0.56
		Surgencia	0.09-1.29



Las concentraciones medidas de pigmentos accesorios (*i.e* clorofila *b*, *c* y carotenos) constituyen un argumento adicional a favor de la anterior afirmación. De acuerdo con Margalef (1991), estos pigmentos se sintetizan a una tasa más lenta que la clorofila *a*, de manera que altas concentraciones pueden indicar procesos de senescencia en una comunidad autotrófica, como ocurre en M-II y M-IV, muestreos en los cuales se presentan los niveles más altos de estos pigmentos en relación con los observados en los muestreos posteriores a eventos de surgencia (*i.e* M-I y M-III).

No obstante, al contrastar las altas concentraciones de nitratos (NO_3^-) con los bajos niveles de clorofila *a*, es evidente que hay un desacople entre la provisión del nutriente inorgánico al agua - a causa del transporte vertical - y su asimilación, que se refleja en el aumento de la biomasa fitoplanctónica. Dicha condición es consistente con los hallazgos de Corredor (1979) en la surgencia de La Guajira, sistema en el cual, la respuesta a la fertilización es moderada y tarda tiempo debido a relativa pobreza de las aguas que constituyen la fuente del agua subsuperficial que aflora (Aguas Intermedias del Atlántico Norte) y a la limitación del crecimiento fitoplanctónico, debido aparentemente a la carencia de compuestos orgánicos en el agua transportada a la superficie durante la surgencia. Algunos experimentos han mostrado cómo ciertos grupos bacterianos cuentan con la capacidad de consumir nitrógeno orgánico, degradando, por ejemplo, proteínas y/o aminoácidos hasta llevarlos a amonio, que luego de ser oxidado mediante el proceso de nitrificación se transforma a nitrato, liberando de esta forma compuestos disponibles para estimular el crecimiento fitoplanctónico (Paul, 1983); en este sentido, la carencia de sustancias como úrea o algunos aminoácidos en las aguas afloradas puede llegar a generar la respuesta moderada que se observa ante la fertilización. Sin embargo, dichos argumentos requieren experimentación específica para concluir que este fenómeno ocurre en las aguas costeras de la ensenada.

Relación de variables fisicoquímicas, nutrientes y biomasa fitoplanctónica

En general, al evaluar dos componentes principales con respecto a los resultados de las variables oceanográficas y biológicas, se encontraron correlaciones significativas que contribuyen a evidenciar las relaciones entre las alteraciones fisicoquímicas en el agua, el aporte de nutrientes inorgánicos como resultado del movimiento ascensional de aguas subsuperficiales durante la surgencia costera y la biomasa fitoplanctónica. Los grupos formados con base en el mayor número de correlaciones con respecto a los componentes y al grado de correlación entre sí, se presentan en la figura 8. En relación con el primer componente, las bajas concentraciones de oxígeno en el agua - tanto en los muestreos con surgencia como en aquellos bajo efectos de descargas continentales - produjeron como resultado niveles bajos de pH, condición que en M-I y M-III parece

indicar la presencia de aguas afloradas con alto contenido de CO_2 , mientras en el caso de M-II y M-IV, influidos por aguas continentales, puede deberse al alto contenido de materia orgánica que es sometida a procesos de oxidación, que suponen consumo activo de O_2 .

En el segundo componente se distribuyeron la temperatura, salinidad y clorofila *a*, medidas en M-I y M-III, explicando el 21 % de la variación total. La temperatura se correlacionó negativamente con la salinidad y con la densidad σ_t ($r = -0.4124$ y -0.2512 , respectivamente), ajustándose a lo esperado para aguas afloradas por debajo la termoclina, que presentan bajas temperaturas, altas salinidades y en consecuencia alta densidad (Meadows y Campbell, 1978; Bula-Meyer, 1990; Ramírez, 1990; Corredor, 1992; Kennish, 2001; Franco-Herrera, 2005). Así mismo, estos resultados son consistentes con las observaciones efectuadas durante este estudio, según las cuales los eventos de surgencia que se presentaron entre julio y septiembre en la ensenada, estuvieron caracterizados por la presencia de aguas frías ($\sim 26^\circ\text{C}$), de alta salinidad (~ 36) y así mismo alta densidad ($\sim 23.6 \text{ kg/m}^3$), condición que genera inestabilidad en la columna de agua, favoreciendo la presencia de procesos de mezcla en las aguas costeras superficiales, en concordancia con lo registrado por Ramírez (1983). Finalmente, la biomasa fitoplanctónica cuantificada a partir de la clorofila *a*, explica, junto con la temperatura, la mayor parte de la variación dentro de este componente, lo cual se observa a partir de los coeficientes o vectores propios generados con el análisis (0.375 y 0.371, respectivamente). En consecuencia, la concentración de clorofila *a* en días posteriores a eventos de surgencia, presentó altos coeficientes de correlación con las variables oceanográficas que hacen parte del segundo componente (temperatura, salinidad, y σ_t ; $r = 0.7570$, -0.6654 y -0.6046 , respectivamente, $p < 0.05$), siendo consistente con lo esperado, de manera que se evidencia la respuesta de la comunidad fitoplanctónica de las aguas costeras superficiales de la ensenada ante la perturbación ambiental que supone el transporte vertical de aguas subsuperficiales y su posterior advección, como parte de eventos de surgencia costera. No obstante, la respuesta es moderada si se considera, además del desacople $\text{NO}_3^- - \text{Chla}$, el comportamiento del pH, cuyos valores más bajos se presentaron en M-I – M-III, evidenciando no sólo el ascenso de aguas pobres en oxígeno sino también coincidiendo con los niveles más bajos de biomasa fitoplanctónica en todos los muestreos, lo cual revela la ausencia de consumo activo de CO_2 por parte de la comunidad autotrófica de fitoplancton, siendo esto una consecuencia probable del poco tiempo transcurrido entre la inyección de nutrientes inorgánicos de las aguas subsuperficiales afloradas y la absorción a nivel celular.

A partir de la observación de la distribución de coordenadas de las sesiones de muestreos efectuadas como parte de este estudio, se evidenció la clara segregación entre



los muestreos realizados bajo condiciones de surgencia y no surgencia, lo que supone que, en efecto, las alteraciones fisicoquímicas, la inyección de nutrientes y los cambios en la biomasa fitoplanctónica registradas como resultado de la surgencia costera producida por transporte de Ekman y por acción de vientos continentales, actúan sinérgicamente en la conformación de una masa de agua que se diferencia de las adyacentes, presentando propiedades semejantes a los frentes de surgencia de las grandes áreas a nivel mundial (Figura 9). En esos frentes, las variaciones en el comportamiento del viento modulan la intensidad de la surgencia costera, siendo además la principal fuente de energía exostomática que al actuar sobre la superficie marina, estimula la producción primaria (Margalef, 1985; Kokkinakis y Wheeler, 1987; Bakun y Mendelssohn, 1989; Mann y Lazier, 1996; Brzezinski *et al.*, 1997; Bruland *et al.*, 2001).

En el primer componente (29.5 % de la variación explicada) se distribuyen los muestreos que correspondieron con eventos de surgencia por transporte de Ekman (M-I) y aquellos bajo efectos de afloramiento causado por la acción de vientos del continente (M-III). Debido a la cercanía entre sí, estos dos grupos se han reunido en uno solo para agrupar a las sesiones de muestreo que evidencian la ocurrencia del proceso; no obstante, se observó que los muestreos a diferentes profundidades de M-III (excepto a 0 m), se encuentran más relacionados entre sí que con respecto a los de M-I, mostrando en todos los casos altos coeficientes de correlación estadísticamente significativos ($r > 0.80$, $p < 0.05$) y predominantemente positivos, lo cual sugiere que la mayor proporción de la variación explicada corresponde a dicho grupo de muestreos. Lo anterior se ajusta a lo esperado según las condiciones oceanográficas y biológicas descritas para áreas de afloramiento aledañas en el Caribe centro y norte colombiano por los trabajos de Bula-Meyer (1977, 1985), Fajardo (1979), Corredor (1981, 1992), Cabrera y Donoso (1993) y Franco-Herrera (2005), que, en general, definen las características del medio marino en la zona costera durante la ocurrencia de dicho proceso.

De forma contrastante, en el segundo componente (21.3 % de la variación explicada) se observaron los dos grupos formados por los muestreos que presentaron condiciones oceanográficas y biológicas que corresponden a una masa de agua influenciada por la aportes fluviales del continente, luego de que se presentan precipitaciones (*i.e.* M-II y M-IV). En general, estos grupos presentan baja correlación entre sí, mientras que M-IV se encuentra más cercano al grupo de muestreos de surgencia, probablemente debido a que los valores de salinidad tienden a ser más altos (~ 37) de lo esperado para condiciones de lluvia y el oxígeno disuelto es muy similar al obtenido en condiciones de surgencia por transporte de Ekman (M-I). De otro lado, los muestreos de las profundidades comprendidas entre 0 y 50 m que constituyen uno de los grupos denominados de “lluvia”, presentan un alto número de correlaciones negativas con respecto a los componentes 1

y 2, lo cual proporciona un argumento adicional para determinar que en definitiva las condiciones de las aguas costeras de la ensenada divergen notablemente ante la presencia de eventos de surgencia. Cabe resaltar que dichas anomalías, en concordancia con lo descrito por Longhurst (1981) y Blanco (1988), corresponden a procesos de mesoescala, dependientes de procesos macroclimáticos como el régimen de vientos de la zona y el desplazamiento anual de la ZCIT, que, en conjunto, generan los cambios oceanográficos propios de la surgencia costera y que en este caso han mostrado tener un efecto relevante en la fertilización de las aguas costeras de la zona de estudio.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo estuvo enmarcado dentro del Proyecto “Dinámica física, química y planctónica de la surgencia costera frente al departamento del Magdalena, Caribe colombiano”, del Programa de Biología Marina y la Dirección de Investigaciones de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (UJTL), que financió la totalidad del estudio (Código 315R). Los autores agradecen al personal de la UJTL por su apoyo en la ejecución de la investigación y a Adolfo Sanjuan Muñoz M.Sc., por su ayuda en la revisión del documento y asesoría en campo.

BIBLIOGRAFÍA

- Alongi, D. 1998. Coastal ecosystem processes.. CRC Press LLC, Boca Ratón, E.E.U.U. 419 p.
- Andrade, C. 1993. Análisis de la velocidad del viento en el mar Caribe. Bol. Cient. CIOH, 13: 33-43.
- Andrade, C. y Barton E. 2004. The Guajira upwelling system. Cont. Shel. Res., 25 (13): 1629.
- Andreo, C. y Vallejo R. 1984. Fotosíntesis. Secretaria General de la Organización de Estados Americanos, Washington. 64 p.
- Bakun, A. y Mendelssohn R. 1989. Alongshore wind stress, 1953-1984: Correction, reconciliation and update through 1986. 77-81. En: Pauly, D., P. Muck y I. Tsukayama (Eds.). The Peruvian upwelling ecosystem: Dynamics and interactions. ICLARM Conference Proceedings 18. Callao, Perú: Instituto del Mar del Perú (IMARPE), Deutsche Gessellschaft für Technische Zusammenarbeit (GTZ), Eschborn, Eschborn, Federal Republic of Germany and International Center of Living Aquatic Resources Management (ICLARM), Manila, Filipinas. 438 p.
- Barnes, R.S.K. y K. Mann (Eds.). 1998. Fundamentals of aquatic ecology. 2nd edición. Blackwell Science, Oxford. 217 p.
- Blanco, J. 1988. Las variaciones ambientales estacionales en las aguas costeras y su importancia para la pesca de la región de Santa Marta, Caribe colombiano. Tesis M.Sc., Universidad Nacional de Colombia, Santa Marta. 62 p.
- Blanco, J., Díaz, J., Ramírez, G. y Cortés, M. 1994. El Banco de las Ánimas: una amplia formación arrecifal desarrollada sobre un antiguo delta del río Magdalena. Bol. Ecotrópica, 27: 10-18.



- Brink, K. 1985. Some aspects of physical processes in coastal upwelling. Simposio internacional sobre áreas de afloramiento en el oeste africano. Instituto de Investigaciones Pesqueras, Barcelona, 1: 5-14.
- Bruland, K., E. Rue y G. Smith. 2001. Iron and macronutrients in California coastal upwelling regimes: Implications for diatom blooms. *Limnol. Oceanogr.*, 46 (7): 1661-1674.
- Brzezinski, M., D. Phillips, F. Chávez, G. Friederich y R. Dugdale. 1997. Silica production in Monterrey, California, upwelling system. *Limnol. Oceanogr.*, 42 (8): 1694-1705.
- Bula-Meyer, G. 1977. Algas marinas bénticas indicadoras de un área afectada por aguas de surgencia en la costa Caribe de Colombia. *An. Inst. Inv. Mar. Punta Betín*, 9: 45-71.
- Bula-Meyer, G. 1985. Un núcleo nuevo de surgencia en el Caribe colombiano detectado en correlación con las macroalgas. *Bol. Ecotrópica*, 14: 3-20.
- Bula-Meyer, G. 1990. Oceanografía. 101-113. En: Reichel-Dolmatoff, G. (Ed.). Caribe Colombia. FONDO FEN-COLOMBIA, Bogotá.
- Cabrera, E. y M. Donoso. 1993. Estudio de las características oceanográficas del Caribe colombiano, Región III, Zona 1, PDCTM. *Bol. Cient. CIOH*, 13: 19-32.
- CIOH. 2006. Pronóstico carta de presión, precipitación y viento en superficie. <http://www.cioh.org.co/proserv/cartapresion.php>. 07-09/06.
- CIOH-Programa Sarpar. 2005. Sistema Automatizado de Recepción y Pronóstico del CIOH. Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas. Armada Nacional. Colombia. <http://sarpar.cioh.org.co/SARPAR/goes.php>. 07-09/06.
- Codispoti, L. 1983. Nitrogen in upwelling systems. 513-364. En: Carpenter, E. y D. Capone (Eds.). Nitrogen in the marine environment. Academic Press, London.
- Cognetti, G., M. Sarà y G. Magazzù. 2001. Biología marina. Ariel, Barcelona. 619 p.
- Corredor, J.E. 1977. Aspects of phytoplankton dynamics in the Caribbean sea and adjacent regions. FAO fisheries report No. 200. 101-114. En: Simposio sobre adelantos en las investigaciones en el Caribe y regiones adyacentes. Roma.
- Corredor, J.E. 1979. Phytoplankton response to low level nutrient enrichment through upwelling in the columbian Caribbean basin. *Deep-sea research*, 26 (A): 731-741.
- Corredor, J.E. 1981. Apuntes sobre la circulación costera en el Caribe noroccidental colombiano. *Bol. Cient. CIOH*, 3: 3-8.
- Corredor, J.E. 1992. Dinámica espacio-temporal de la surgencia de La Guajira. 206-221. En: Memorias VIII Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar. Comisión colombiana de oceanografía, Santa Marta.
- Díaz-Pulido, G. y Garzón-Ferreira, J. 2002. Seasonality in algal assemblages on upwelling-influenced coral reefs in the Colombian Caribbean. *Botánica Marina*, 45: 284-292.
- Estrada, M. y D. Blasco. 1985. Phytoplankton assemblages in coastal upwelling areas. Simposio Internacional sobre áreas de afloramiento en el oeste africano. Instituto de Investigaciones Pesqueras, Barcelona, 1: 379-402.
- Fajardo, G. 1979. Surgencia costera en las proximidades de la península colombiana de La Guajira. *Bol. Cient. CIOH*, 2: 7-19.

- Franco-Herrera, A. 2001. Estrategias de ingestión y flujo de carbono entre el fitoplancton, seston total y *Eucalanus* spp. (Copepoda:Calanoidea) en dos ambientes oceanográficos del Caribe central colombiano. Informe final, Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Facultad de Biología Marina, Santa Marta. 60 p.
- Franco-Herrera, A. 2005. Oceanografía de la ensenada de Gaira: El Rodadero, más que un centro turístico en el Caribe. Servigraphics Ltda, Bogotá. 58 p.
- Gil, A. y J. Olcina. 1997. Climatología general. Ariel, Barcelona. 572 p.
- Herrmann, R. 1970. Deutungsversuch der Entstehung der "Brisa", eines föhnartigen Fallwindes der nordwestlichen Sierra Nevada de Santa Marta, Kolumbien. Mit. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient., 4: 83-95.
- INVEMAR (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras). 2003. Manual de técnicas analíticas para la determinación de parámetros fisicoquímicos y contaminantes marinos: aguas, sedimentos y organismos. INVEMAR, Serie de documentos generales No. 13, Santa Marta. 177 p.
- Kaplan, W.A. 1983. Nitrification. 140-190. En: Carpenter, E. y D. Capone. (Eds.). Nitrogen in the marine environment. Academic, London.
- Kennish, M. 2001. Practical handbook of marine science 3rd edition. CRC Press LLC, Boca Ratón. 876 p.
- Kokkinakis, S. y P. Wheeler. 1987. Nitrogen uptake and phytoplankton growth in coastal upwelling regions. Limnol. Oceanogr., 32 (5): 1112-1023.
- Lalli, C. y T. Parsons. 1997. Biological Oceanography: An introduction. 2nd edition. Butterworth-Heinemann, Oxford. 314 p.
- Longhurst, A. (Ed.). 1981. Analysis of marine ecosystems. Academic, London. 741 p.
- Mann, K. H. y J. R. Lazier. 1996. Dynamics of marine ecosystems: Biological-physical interactions in the oceans 2nd edition. Blackwell Science, Oxford. 394 p.
- Margalef, R. 1985. Primary production in upwelling areas: Energy, global ecology and resources. Simposio internacional sobre áreas de afloramiento en el oeste africano. Barcelona. Instituto de Investigaciones Pesqueras, 1: 225-232.
- Margalef, R. 1991. Ecología. Omega, Barcelona. 951 p.
- Márquez, G. 1982. Los sistemas ecológicos marinos del sector adyacente a Santa Marta, Caribe colombiano I: generalidades. Ecología Tropical, 2 (1): 5-18.
- Meadows, P. y J. Campbell. 1978. Introducción a la ciencia del mar. Acribia, Zaragoza. 207 p.
- Molina, V., L. Farias, Y. Eissler, L. Cuevas, C. Morales y R. Escibano. 2005. Ammonium cycling. Under a strong oxygen gradient associated with oxygen minimum zone off northern Chile. Mar. Ecol. Prog. Ser., 288: 35-43.
- Müller, K. 1979. Interrelaciones entre salinidad y temperatura en la bahía de Santa Marta. An. Inst. Inv. Mar. Punta Betín, 11: 219-226.
- Paul, J.H. 1983. Uptake of organic nitrogen. 275-308. En: Carpenter, E. y D. Capone (Eds.). Nitrogen in the marine environment. Academic Press, London.
- Pla, L. 1986. Análisis multivariado: método de componentes principales. Secretaria General de la Organización de Estados Americanos OEA, Washington. 94 p.



- Pond, S. y G.L. Pickard. 1983. *Introductory dynamical oceanography*. Butterworth Heinemann, Oxford. 329 p.
- Pujos, M., J. Pagliardini, R. Steer, G. Vernet y O. Weber. 1986. Influencia de la Contra-Corriente Norte colombiana para la circulación de las aguas en la plataforma continental: su acción sobre la dispersión de los efluentes en suspensión del río Magdalena. *Bol. Cient. CIOH*, 6: 3-15.
- Ramírez, G. 1983. Características fisicoquímicas de la bahía de Santa Marta (Agosto, 1980 - Julio, 1981). *An. Inst. Inv. Mar. Punta de Betín*, 13: 111-121.
- Ramírez, G. 1990. Distribución de los nutrientes inorgánicos en las aguas costeras de la región de Santa Marta, Caribe colombiano. 244-254. En: *Memorias VII Seminario Nacional de Ciencias y Tecnologías del Mar*. Comisión Colombiana de Oceanografía, Cali.
- Riley, J. P. y R. Chester. 1989. *Introducción a la química marina*. AGT editor, México. 459 p.
- Salzwedel, H. y K. Müller. 1983. A summary of meteorological and hydrological data from the Bay of Santa Marta, Colombian Caribbean. *An. Inst. Inv. Mar. Punta Betín*, 13: 67-83.
- Strickland, D.H. y T. Parsons. 1972. *A practical handbook of sea water analysis*. Fish. Res. Board of Canada, Ottawa. 310 p.
- Sverdrup, H., M. Johnson y R. Fleming. 1942. *The oceans: Their physics, chemistry and general biology*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 1087 p.
- Tigeros, P. 2001. Biodiversidad y valoración bioquímica del fitoplancton marino en ambientes costeros mesotróficos y oligotróficos tropicales, Caribe colombiano. Tesis Biol. Mar., Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Santa Marta. 173 p.
- Trees, C., D. Clark, R. Bidigare, M. Ondrusek y Müller, J. 2000. Accessory pigments versus chlorophyll *a* concentrations within the euphotic zone: A ubiquitous relationship. *Limnol. Oceanogr.*, 45 (5): 1130-1143.

FECHA DE RECEPCIÓN: 01/03/07

FECHA DE ACEPTACIÓN: 24/08/08