

BACTERIOPLANCTON EN BAHÍA GAIRA, MAR CARIBE (COLOMBIA): COMPARACIÓN DE LA VARIABILIDAD EN ABUNDANCIA Y BIOMASA BACTERIANA DURANTE DIFERENTES PERÍODOS

Rafael G. Barragán G.¹, Amparo Canosa¹ y Juan P. Niño²

1 Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Programa de Biología Marina, Grupo de Microbiología Acuática, Carrera 4 No. 22-61, Bogotá, Colombia. rafael.barragan@utadeo.edu.co (R.G.B.G), amparo.canosa@utadeo.edu.co (A.C.)

2 Universidad de Antioquia, Escuela de Microbiología, Calle 67 No. 53-108, Medellín, Colombia. mjuanp@udea.edu.co

RESUMEN

Se estimaron abundancia, biomasa, biovolumen y forma del bacterioplancton en tres estaciones de la bahía de Gaira (costa Caribe colombiana) en los períodos definidos para este estudio como: “lluvioso” (julio, agosto; 2003), “transición” (abril, octubre; 2004) y “seco” (febrero, marzo; 2004). Las muestras del bacterioplancton fueron tomadas a 0.5 y 42 m de profundidad, filtradas sobre filtros de policarbonato de 0.22 μm y cuantificadas utilizando microscopía de epifluorescencia con naranja de acridina y análisis de imagen. La abundancia bacteriana varió entre 1.3×10^5 - 2.9×10^6 células mL^{-1} en el período lluvioso, 8.8×10^4 - 2.2×10^6 células mL^{-1} en el período de transición y 6.7×10^4 - 3.9×10^5 células mL^{-1} en el período seco, la abundancia promedio fue de 4.4×10^5 células mL^{-1} . Las diferencias en abundancia fueron estadísticamente significativas entre períodos, estaciones y profundidades, las diferencias en biovolumen fueron significativas entre períodos y estaciones, finalmente, las diferencias en biomasa fueron significativas entre estaciones y profundidades (ANOVA, $p < 0.05$). Predominaron las células cocoides y de biovolumen pequeño (0.01 - $0.08 \mu\text{m}^3$ célula⁻¹). Durante el muestreo la biomasa bacteriana promedio varió entre 0.88 y $32.1 \mu\text{g C L}^{-1}$, el valor máximo se observó durante el período lluvioso. Los resultados sugieren que los valores de abundancia y biomasa bacterianas se incrementan en el período lluvioso, probablemente como consecuencia del incremento en la descarga del río Gaira y de la Ciénaga Grande de Santa Marta. La hipótesis planteada señala que la dinámica de la comunidad bacteriana en la bahía está siendo afectada por la disponibilidad de nutrientes orgánicos (COD).

PALABRAS CLAVE: Bacterioplancton, Biomasa, Biovolumen, Estacionalidad, Caribe colombiano.

ABSTRACT

Bacterioplankton in Gaira Bay, Caribbean Sea (Colombia): Comparison of abundance and biomass variability during different periods. Marine bacterioplankton abundance, biomass, biovolume and shape were quantified in three stations within Gaira Bay at the Colombian Caribbean coast over three periods defined for this study as: “rainy” (July, August, 2003), “transition” (April, October 2004) and “dry” (February, March, 2004). Bacterioplankton samples were collected from 0.5 and 42 m depths, filtered onto 0.22 μm polycarbonate filters and quantified using epifluorescence microscopy with Acridine Orange staining and image analysis. Average bacterial abundance ranged between 1.3×10^5 - 2.9×10^6 cells mL^{-1} during the rainy period, 8.8×10^4 - 2.2×10^6 cells mL^{-1} during the transition period and 6.7×10^4 - 3.9×10^5 cell mL^{-1} at the dry period, with a mean abundance of 4.4×10^5 cells mL^{-1} . The differences in abundance were statistically significant between sampling periods, stations and depths, the differences in biovolume were statistically significant between sampling periods and stations, finally, the differences in biomass were statistically significant between stations and water depths (ANOVA, $p < 0.05$). Most of the cells had a coccoid shape and a small biovolume (0.01 - $0.08 \mu\text{m}^3$ cell $^{-1}$). Over the sampling period, the mean bacterial biomass ranged between 0.88 and $32.1 \mu\text{g C L}^{-1}$, with the maximum observed during the rainy period. The results suggest that bacterial biomass increases during the rainy period, probably as a consequence of increased water discharge originating from the Gaira River and the Ciénaga Grande de Santa Marta lagoon. We hypothesize that the temporal dynamics of bacterial communities in Gaira Bay are being driven by the availability of organic nutrients (DOC).

KEY WORDS: Bacterioplankton, Biomass, Biovolume, Seasonality, Colombian Caribbean.

INTRODUCCIÓN

Los microorganismos procariotas desempeñan un papel importante como mediadores y recicladores de nutrientes en el medio marino a través de la asimilación del carbono orgánico disuelto (COD) principalmente el sintetizado por los productores primarios ya que entre el 20 y el 50 % del carbono fijado mediante fotosíntesis es movilizado a través de microorganismos heterótrofos (Azam *et al.*, 1983; Shiah y Ducklow, 1994; Wommack *et al.*, 1999; Choi *et al.*, 2001; Valencia *et al.*, 2003). En los sistemas costeros y lénticos la reserva de carbono orgánico autóctono del sistema se puede subsidiar con el ingreso de compuestos orgánicos por escorrentía. Una vez asimilado por las bacterias, el carbono orgánico disuelto se convierte en particulado y pasa a constituir la comunidad bacteriana. Al ser incorporado permanece disponible y puede ser transferido por consumo a los bacterívoros y a partir de ellos ser exportado del sistema (Thingstad *et al.*, 1993; Bratbak *et al.*, 1998; Thingstad, 2000).

El estudio del bacterioplancton y la utilización de COD requieren la medición y observación de diferentes parámetros en el contexto trófico. Algunos parámetros comúnmente empleados incluyen el número de células presentes y la determinación de la cantidad de materia orgánica que representan. En general, la mayoría de los trabajos publicados sobre redes tróficas acuáticas proviene en gran parte de la investigación realizada en sistemas de latitudes altas y es poco lo que se conoce al respecto para sistemas tropicales. En Colombia son escasos los estudios

en los que se integre a los microorganismos como parte del ecosistema marino, no obstante, se ha registrado una activa participación de las bacterias en la degradación de materia orgánica en la Ciénaga Grande de Santa Marta (Steubing, 1971; Hoppe *et al.*, 1983; Gocke *et al.*, 2003, 2004). El presente trabajo es el primer acercamiento desde el punto de vista ecológico al bacterioplancton en la bahía de Gaira, ofrece información sobre la abundancia y la biomasa de esta comunidad en las aguas de la bahía durante un año de muestreo.

ÁREA DE ESTUDIO

La bahía de Gaira, ubicada al sur de la ciudad de Santa Marta (Magdalena) en la costa Caribe colombiana a $11^{\circ}12'00''\text{N}$ - $74^{\circ}14'30''\text{W}$ (Figura 1), presenta el efecto de las estribaciones de la Sierra Nevada de Santa Marta al tener el perfil batimétrico característico con ensenadas profundas, una corta plataforma continental y una disposición geográfica que periódicamente favorece la surgencia de aguas sub-superficiales (Blanco, 1988; Ramírez, 1990; Díaz *et al.*, 1991; INVEMAR, 2003). El continuo relevo de los períodos climáticos determina escenarios diferentes y establece las condiciones fisicoquímicas de la columna de agua en la zona de la bahía. Durante los meses de mayo a noviembre predominan corrientes con dirección sur-norte enriquecidas con la carga de la escorrentía continental, mientras que en los meses de diciembre a marzo predomina el efecto de la surgencia local debida a la dirección del viento, las corrientes superficiales y a la orientación de la costa (Blanco, 1988; Ramírez, 1990; Díaz *et al.*, 1991; INVEMAR, 2003; Franco, 2005).

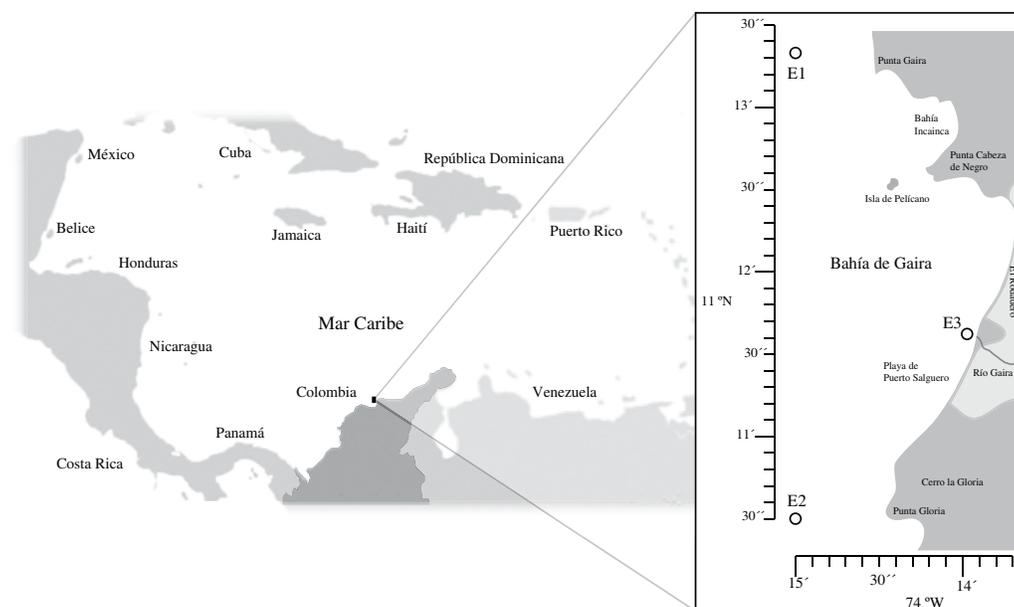


Figura 1. Bahía de Gaira. Los círculos indican la posición de las estaciones de muestreo. Tomado y modificado de Plancha COL244, Centro de Investigaciones Oceanográficas e Hidrográficas Agustín Codazzi-CIOH.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestreo

Se realizaron seis muestreos entre julio de 2003 y octubre de 2004 agrupados en tres períodos definidos para este estudio en consideración a los resultados de coeficiente de extinción de luz y temperatura (Figura 2), período lluvioso (julio, agosto; 2003), período de transición (abril, octubre; 2004) y período seco (febrero, marzo; 2004), en tres estaciones sobre la bahía, desde punta Gloria hasta punta Gaira (Figura 1). La estación 1 (E1) y la estación 2 (E2) se localizaron sobre una línea paralela a la línea de costa que coincidió con el meridiano 74° 15' W después de la isobata de 50 m, la estación 3 (E3) se localizó frente a la desembocadura del río Gaira.

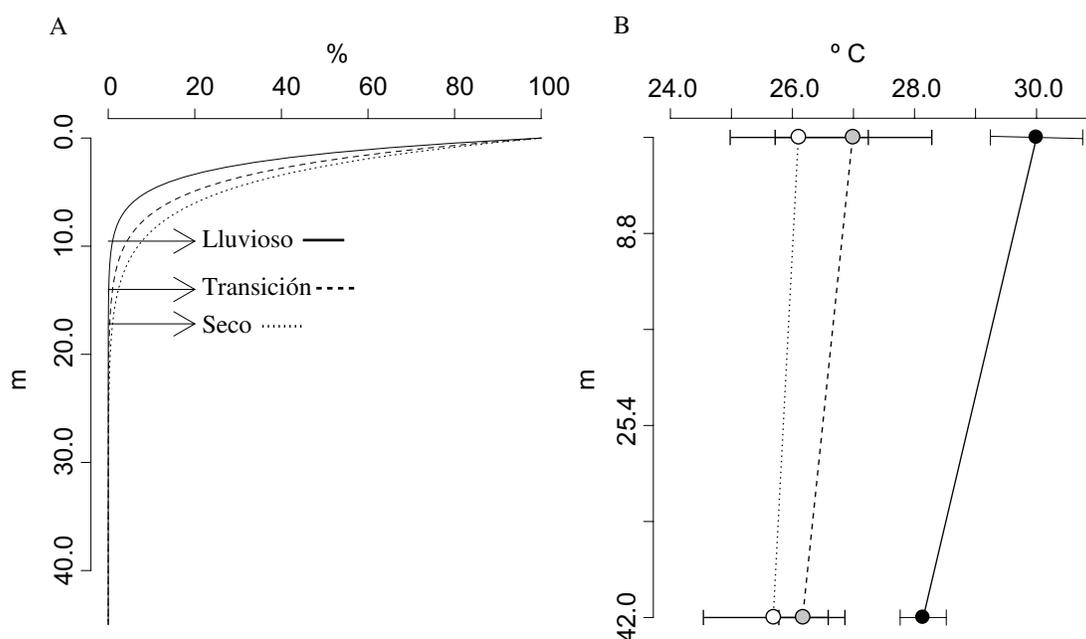


Figura 2. Perfil de extinción de luz (A) y perfil de temperatura en la columna de agua (B). Período lluvioso (julio, agosto); período de transición (abril, octubre); período seco (febrero, marzo). Las flechas indican la profundidad de la capa eufótica en cada período.

En cada estación se midió la temperatura con un termómetro de campo y la profundidad Secchi. A partir de esta última se calculó el coeficiente de extinción de luz (k) con la ecuación: $k = 1.45/d$, en donde “d” es la máxima profundidad Secchi (Tait, 1987) (Figura 2A). En todas las estaciones seleccionadas se tomaron por duplicado muestras de agua superficial a 0.5 m de profundidad (200 mL directamente con frasco estéril). Además en las estaciones 1 y 2 se recolectaron

por duplicado muestras a 42 m con botella Van Dorn de 6 L de capacidad. Las muestras se transportaron en frascos estériles de 200 mL protegidos de la luz y fueron mantenidas bajo refrigeración hasta ser preparadas en el laboratorio para su análisis máximo tres horas después de haber sido tomadas. 12 mL de muestra fueron fijadas con gluteraldehído (concentración final 2.5 % V/V) en tampón fosfato y se guardaron en oscuridad a 4 °C hasta su análisis.

Parámetros del bacterioplancton

Para el conteo de bacterias se utilizó el método de recuento directo por epifluorescencia, las muestras se tiñeron con naranja de acridina a una concentración final de 100 µg mL⁻¹ durante un tiempo de exposición de cinco minutos (Hobbie *et al.*, 1977; Kepner y Pratt, 1994; Canosa y Pinilla, 2001). Después de realizar las diluciones necesarias se filtraron mínimo 3 mL de cada muestra sobre un filtro Nucleopore negro de policarbonato de 0.2 µm de diámetro de poro. Se contaron mínimo 20 campos por filtro. Los filtros con células teñidas se colocaron en láminas portaobjetos con aceite de inmersión de baja fluorescencia y se almacenaron congelados a -20 °C hasta el momento del análisis. Se usó un microscopio Olympus B Max 60 con filtro de excitación azul (BP 450-480), filtro barrera (BA515) y espejo dicróico (DM500) y un sistema de análisis de imágenes Leica QWin para el procesamiento de las imágenes obtenidas a través de una cámara monocromática CCD de Cohu, adaptada al microscopio.

Para la obtención de datos de biovolumen se digitalizaron campos microscópicos tomados al azar hasta registrar mínimo 200 células por filtro, se evitaron las imágenes con grumos de materia orgánica que pudieran afectar la detección de la fluorescencia de las células teñidas. Se creó una rutina de trabajo semiautomática para editar las imágenes hasta retirar el ruido de fondo procurando no modificar la morfología celular. Además de los datos de la abundancia bacteriana se incluyeron en él variables morfométricas por célula como el largo, el ancho y la redondez [$r = (\text{perímetro}^2) / (4\pi \text{área} * C)$, C: factor de corrección del efecto de las esquinas debido a la digitalización de la imagen]. Para el cálculo del biovolumen bacteriano se utilizó la fórmula propuesta por Lee (1993) en la cual se asume que las células bacterianas son cilindros con extremos redondeados [$v = \pi ((3L-w)/3) (w/2)^2$, v: biovolumen, L: longitud y w: ancho]. Para la estimación de la biomasa celular se usaron los datos del biovolumen y un factor de conversión alométrico en el cual el contenido de carbono en fg carbono célula⁻¹ está dado por la ecuación: $m = 120(v)^{0.72}$, en donde v es el volumen celular en µm³ (Posch *et al.*, 2001). La biomasa bacteriana

($\mu\text{g C L}^{-1}$) fue estimada al multiplicar la abundancia de células (células ml^{-1}) por la biomasa celular (fg C célula^{-1}).

Se realizaron comparaciones mediante análisis de varianza (ANOVA, $n= 66$) para los factores período, estación y profundidad después de utilizar las transformaciones necesarias, verificar los supuestos y evaluar los efectos de los modelos con interacción y sin interacción entre los factores. Los datos de biomasa ($\mu\text{g C L}^{-1}$) y biovolumen ($\mu\text{m}^3 \text{ célula}^{-1}$) fueron transformados utilizando raíz cuadrada. Para los datos de abundancia bacteriana se utilizó el logaritmo natural (R Development Core Team, 2008).

RESULTADOS

Temperatura y coeficiente de extinción de la luz

Los valores promedio de temperatura y el valor del coeficiente de extinción de la luz variaron entre períodos y profundidades. La temperatura osciló en un ámbito de 23 a 30 °C, con aguas significativamente más cálidas en el período lluvioso (ANOVA, $p<0.05$), en el cual se detectaron diferencias entre las temperaturas superficial y profunda (ANOVA, $p<0.1$), que sugirieron una leve estratificación térmica (Figura 2B). Las temperaturas fueron similares a lo largo del perfil vertical durante el período seco señalando unas condiciones relativamente homogéneas. La temperatura promedio más alta se encontró en la desembocadura del río Gaira. Los valores del coeficiente de extinción de luz (k) oscilaron entre 0.16 y 0.48 m^{-1} , se registraron los menores valores durante el período seco, el perfil vertical mostró una zona eufótica de 9.5 m en el período lluvioso, 13.9 m en el período de transición y 17.2 m en la período seco (Figura 2A). Particularmente, la estación de Punta Gaira presentó siempre los valores de coeficiente de extinción de luz más bajos que se traducen en una zona eufótica más profunda.

Biovolumen bacteriano y morfometría celular

El biovolumen celular promedio osciló entre 0.01 μm^3 y 0.08 μm^3 , sin embargo se registraron células de morfología filamentosa que alcanzaron los 48.6 μm^3 . En general las células más voluminosas se encontraron en las muestras tomadas en la estación 2 (Punta Gloria), a 42 m de profundidad y en el período lluvioso (Figura 3B). Las diferencias en términos de biovolumen celular entre estaciones y períodos fueron significativas (ANOVA, $p<0.05$), pero no entre profundidades.

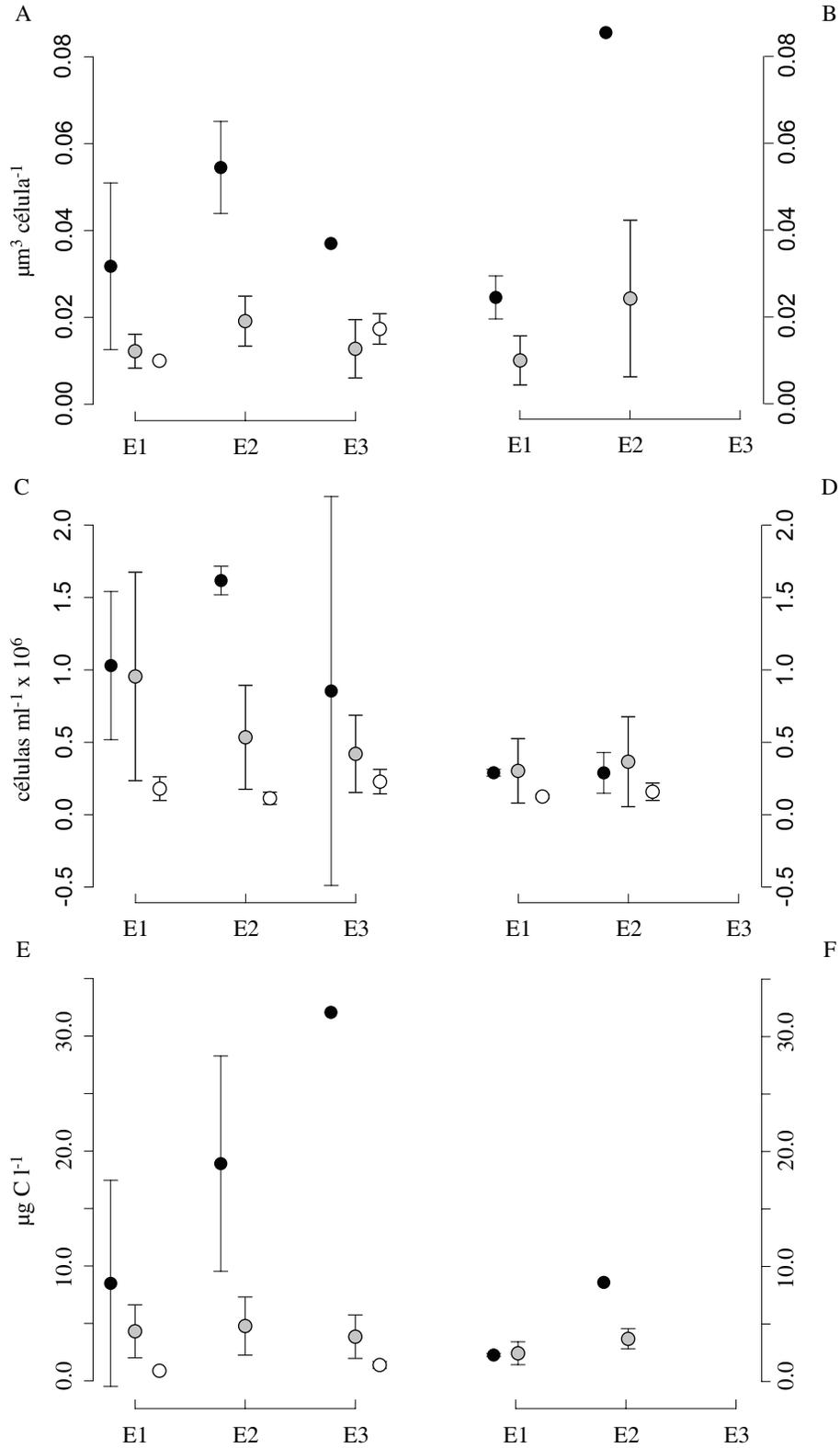


Figura 3. Valores promedio y desviación estándar a 0.5 metros (A, C, E) y 42 metros de profundidad (B, D, F) para biovolumen (A, B), abundancia (C, D) y biomasa (E, F). Con círculos de color negro el período lluvioso (julio, agosto); de color gris el período de transición (abril, octubre); de color blanco el período seco (febrero, marzo). E1: Punta Gloria; E2: Punta Gaira; E3: Desembocadura del río Gaira.

Se encontraron pocas variaciones en la estructura morfológica del bacterioplancton (Figura 4), aproximadamente el 60 % de las células tuvieron una redondez menor a 1.5; lo cual permite considerarlas esféricas (Psenner y Sommaruga 1992). No obstante, esta propiedad celular se utilizó para explorar los cambios en la comunidad bacteriana en los tres períodos, mostrando un aumento en el número de células de mayor volumen y alargadas durante el período lluvioso (Figura 4A), lo que muestra un efecto climático sobre la diversidad morfológica que tiende a disminuir durante el período seco (Figura 4B).

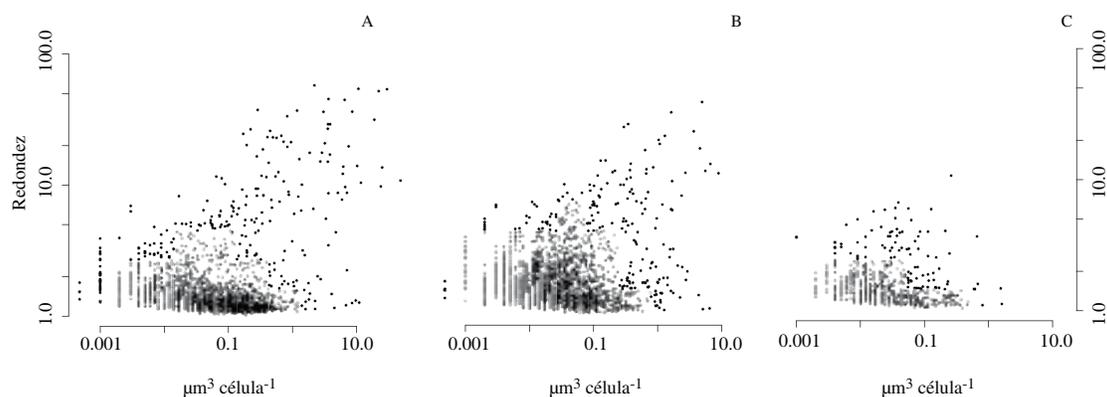


Figura 4. Gráficos de dispersión en escala logarítmica de los valores de redondez y biovolumen celular en (A) el período lluvioso (julio, agosto), (B) el período de transición (abril, octubre), (C) el período seco (febrero, marzo).

Abundancia bacteriana

Se encontró aproximadamente cuatro veces más abundancia bacteriana en la superficie que en el fondo de las aguas de la bahía de Gaira, (Figura 3B). El ámbito total de variación para la abundancia de células procariotas fue de 1.3×10^5 y 2.9×10^6 células mL^{-1} en el período lluvioso, 8.8×10^4 y 2.2×10^6 células mL^{-1} en el período de transición y 6.7×10^4 y 3.9×10^5 células mL^{-1} en el período seco. En el período lluvioso se registraron abundancias mayores y una mayor variación (Figura 3B), las diferencias debidas a períodos, profundidades y a los efectos de la interacción período:profundidad fueron significativas (ANOVA, $p < 0.05$).

Biomasa bacteriana

La cantidad promedio de carbono por célula varió entre 4.2 y 20.4 $\mu\text{g C célula}^{-1}$ sin que las diferencias registradas fueran significativas entre sitios de muestreo, períodos o profundidades ($p > 0.05$). Sin embargo, la biomasa de la comunidad bacteriana promedio de $18.4 \mu\text{g C L}^{-1}$ fue mayor en el período lluvioso que en el de transición ($4.9 \mu\text{g C L}^{-1}$) o el seco ($1.2 \mu\text{g C L}^{-1}$) (Figura 3C).

La exploración de los datos de biomasa en escala temporal permitió asociar el incremento observado con el período lluvioso entre julio-agosto (Figura 3E,

Figura 3F). Durante este período fue registrada una coloración verde en las aguas de la bahía como consecuencia de la pluma del río Gaira específicamente en el mes de agosto. El análisis de varianza señaló que las diferencias debidas al período y la profundidad fueron significativas (ANOVA, $p < 0.05$), es decir que estos dos factores también fueron determinantes en la distribución de la biomasa bacteriana en la bahía, como ocurrió en términos de abundancia celular.

DISCUSIÓN

Los valores de abundancia bacteriana registrados en este trabajo fueron comparados con los de diferentes sistemas alrededor del mundo desde oligotróficos, como el mar de los Sargazos (Ducklow, 1999), hasta hipereutróficos como la Ciénaga Grande de Santa Marta (Gocke *et al.*, 2004). Se encontró que los valores fueron similares a los de otros sistemas marinos en diferentes latitudes, incluso los ubicados en las zonas templadas (Shia y Ducklow, 1994; Fukuda *et al.*, 1998). La abundancia de bacterioplancton en las aguas de la bahía de Gaira, es similar a la de zonas costeras, más alta que la de sistemas oligotróficos y más baja que la de estuarios muy productivos, es decir, los datos de la bahía de Gaira son muy parecidos a los registrados para sistemas mesotróficos (Tabla 1).

Tabla 1. Valores de abundancia de células bacterianas registradas para diferentes sistemas indicando valor mínimo (Mín) y máximo (Máx).

| Sistema | Células ml ⁻¹ x 10 ⁴ | | Fuente |
|--------------------------------------|--|-----|-----------------------------------|
| | Min | Max | |
| Plataforma continental del Atlántico | 7 | 22 | |
| Corriente del Golfo | 2 | 15 | |
| Costa de Georgia | 20 | 110 | |
| Estuario Delawer, EU | 10 | 80 | |
| Estuario Parker, EU | 90 | 146 | |
| Golfo de Aden, Mar Rojo | 5 | 9 | |
| Limfjord, Dinamarca | 50 | 152 | |
| Mar de los Sargazos | 2 | 9 | Sanders <i>et al.</i> , (1992) |
| Mar del Norte | 1 | 27 | |
| Pluma del Chesapeake, EU | 11 | 91 | |
| | 13 | 34 | |
| | 30 | 171 | |
| Bahía Chesapeake | 27 | 113 | |
| | 22 | 68 | |
| | 21 | 101 | |
| Pluma del río Mississippi | 10 | 205 | Jochem, (2001) |
| Golfo de México | 90 | 135 | |
| Ciénaga Grande de Santa Marta | 65 | 905 | Gocke <i>et al.</i> , (2004) |
| Bahía Gaira, Colombia | 7 | 287 | Presente estudio |

Por otra parte, el promedio de los valores de biomasa celular fue bajo en comparación a los registrados en diferentes sistemas alrededor del mundo, fueron similares a los que se presentan en las situaciones de oligotrofia, lo que podría indicar una limitación para la biosíntesis de biomasa procariota (fg C célula^{-1}) en las aguas de la bahía (Tabla 2). La alternancia de los períodos climáticos principales de la región podría generar diferencias en las fuentes y en la concentración de nutrientes, ya sea como consecuencia de la esorrentía en el período lluvioso o de la surgencia en el período seco. En el período lluvioso la mayor turbidez del agua se registró como un cambio en el coeficiente de extinción de la luz y se acompañó de un aumento en la abundancia y la biomasa bacteriana. Un comportamiento similar fue registrado por Gocke *et al.* (2004) en la Ciénaga Grande de Santa Marta y por Jochem (2001) en el Golfo de México. La variación temporal en abundancia de células y en consecuencia en la biomasa bacterioplanctónica ($\mu\text{g C l}^{-1}$) sugiere un efecto importante de este ciclo sobre la dinámica de la comunidad bacteriana en la zona. El clima como modelador clave del ecosistema, a través de la variación hidro-climática, podría afectar los aportes de nutrientes al cambiar su cantidad, su disponibilidad y la capacidad de las células para asimilarlos, una situación que finalmente generaría cambios en la producción bacteriana (Psenner, 1993; Koch, 1996; Church *et al.*, 2000; La Ferla *et al.*, 2004), el efecto es determinante en los sistemas costeros como la bahía de Gaira, ya que en los meses de lluvias reciben periódicamente aportes de ríos que han lavado una cuenca considerable y transportan altas cargas de materiales en suspensión, situación que fue evidente en la bahía al observar directamente cuando las aguas del río Gaira generaron la pluma al mezclarse con las aguas costeras y en los valores del coeficiente de extinción de luz en la columna de agua (Figura 2).

Tabla 2. Valores de cantidad de carbono celular registrados para diferentes sistemas acuáticos, indicando valor promedio, máximo (Máx) y mínimo (Mín). R-X: Microanálisis con rayos X; CHN: Análisis del contenido de nitrógeno y carbono; CP: conteo de partículas; MEF: Microscopía de epifluorescencia; HTCO: Oxidación catalítica a alta temperatura; LPS: Determinación de lipopolisacáridos.

| Sistema | Metodología | fg C célula ⁻¹ | | | Fuente |
|------------------|-------------|---------------------------|-------|-------------|---------------------------------|
| | | Min | Max | Promedio | |
| Raunefjorden | R-X | - | - | 9 -19 | |
| Bahía Otsuchi | CHN, CP | - | - | 17.3 - 53.3 | |
| Golfo de México | CHN, MEF | - | - | 150 | Fukuda <i>et al.</i> , (1998) |
| Bahía Otsuchi | HTCO, MEF | - | - | 15.7 - 33.1 | |
| Bahía de Tokio | HTCO, MEF | - | - | 47.9 | |
| Mar Mediterráneo | MEF | 1.4 | 240.3 | 19.19 | La Ferla <i>et al.</i> , (2004) |
| | LPS | 6.4 | 63 | 23.24 | |
| Bahía Gaira | MEF | 0.8 | 1967 | 8.7 | Presente estudio |

Durante el desarrollo de este trabajo se registró un cambio en la coloración del agua con la llegada de las lluvias que coincide con un aumento en la cantidad de clorofila *a*, no obstante en las aguas de la bahía la biomasa del fitoplancton puede mantenerse alta, bien sea por los aportes continentales o gracias a la surgencia, según la época del año (Franco, 2005). Es razonable pensar que el aporte continental tanto de sustratos orgánicos como inorgánicos sumado al incremento en la producción del fitoplancton durante el período lluvioso, conducirían un incremento en la abundancia de células y de biomasa bacteriana. La comunidad bacteriana heterotrófica depende de la disponibilidad de sustratos orgánicos, siendo un factor limitante y uno de los mecanismos de control más importantes de la producción bacteriana (Cole *et al.*, 1982; Psenner y Sommaruga, 1992; Bratbak *et al.*, 1998; Eiler *et al.*, 2003). La comunidad bacteriana puede aprovechar los pulsos productivos, compitiendo con el fitoplancton en términos de cantidad de carbono total, como en algunos sistemas oligotróficos (Fuhrman *et al.*, 1989)

La dinámica registrada sugiere que podría existir un acople entre fitoplancton y bacterioplancton durante el período de lluvias en la bahía de Gaira en la zona eufótica, que abarca entre el 25 % y el 50% de la columna de agua dependiendo de la época climática. Este posible acoplamiento podría ocurrir como consecuencia de la entrada de nutrientes provenientes del río Gaira y la Ciénaga Grande de Santa Marta que favorecería el desarrollo de la comunidad planctónica autotrófica, de esta forma el bacterioplancton podría no estar limitado por las fuentes de carbono disponibles pero habría limitación por nutrientes inorgánicos consecuencia de la competencia por estos con el fitoplancton, una situación que ha sido estudiada en otros sistemas (Vrede *et al.*, 1999; Joint *et al.*, 2002). Se esperaría que en este sistema las células bacterianas asimilaran rápidamente los sustratos orgánicos cuando estén disponibles (período de lluvias), su actividad favorecería el reciclaje de materia orgánica en la columna de agua a través del anillo microbiano y mantendría la materia orgánica disponible para niveles tróficos superiores.

La dominancia de células bacterianas pequeñas en la bahía de Gaira, especialmente durante el período seco, puede ser consecuencia de la limitación por nutrientes orgánicos (COD), argumento que se apoya en la observación muy frecuente de células de forma esférica durante todo el período de muestreo (Figura 4). Cuando los procariontes crecen en ambientes sin limitación por nutrientes orgánicos, aparecen células de mayor volumen y si están limitadas por nutrientes inorgánicos aparecen formas alargadas, pero cuando están limitadas por carbono, se presentan tamaños más pequeños (Morita, 1993; Fukuda *et al.*, 1998; Vrede *et al.* 2002). No obstante, la bacteriovoría es otro factor que afecta la distribución de tamaños y biomasa de la comunidad bacteriana, cuando el control por depredación es más importante que la

disponibilidad del sustrato, la comunidad bacteriana puede favorecer la presencia de una mayor abundancia de células más pequeñas y activas (Psenner y Sommaruga, 1992).

Sin embargo, el control por disponibilidad de sustratos y depredación actúa en forma conjunta modelando la estructura de la comunidad bacteriana, lo que hace difícil concluir satisfactoriamente sin tener estimaciones de estas variables (Choi *et al.*, 2001). Por lo tanto, una aproximación que permita ver el efecto de la depredación sobre la producción bacteriana, teniendo en cuenta no solamente tamaño y forma, sino también otras propiedades de los procariotas planctónicos que los hacen ser consumidos por los depredadores es indispensable para proponer una hipótesis sobre la importancia del bacterioplancton en la bahía de Gaira (Pernthaler *et al.*, 1997; Šimek *et al.*, 1997, Matz y Jurgens, 2001). Además, los cambios en abundancia y tamaño de las células reflejan la variación de la biomasa, dependiendo si se logra establecer un balance entre la producción bacteriana y las tasas de depredación y lisis viral (Thingstad *et al.*, 1993; Bratbak y Heldal, 1995; Malits *et al.*, 2004). Cualquiera que sea el caso, la interacción entre la disponibilidad de sustratos, la lisis viral y la bacteriovoría tienen un efecto sobre la abundancia, el tamaño y la forma de las células y finalmente sobre la composición taxonómica de la comunidad bacteriana (Psenner y Sommaruga, 1992; Šimek *et al.* 1997; Šimek *et al.*, 2001; Makino y Cotner, 2004) lo cual constituye otro interrogante en la caracterización del bacterioplancton marino en Colombia.

Los resultados obtenidos en el presente trabajo revelaron que los procariotas planctónicos presentes en la bahía de Gaira constituyen hasta $32 \mu\text{g C L}^{-1}$ con abundancias de hasta 2.9×10^6 células mL^{-1} y varían influenciados por la dinámica hidrológica de la zona. De acuerdo con el tamaño que exhibió la mayoría de las células del bacterioplancton (menos de $0.08 \mu\text{m}^3$), parecería que esta comunidad, al interactuar con los demás componentes del plancton, cumple en la bahía de Gaira un rol fundamental en la red trófica pelágica. Además, presenta una base para asumir que la biomasa de los procariotas planctónicos presentes en la bahía Gaira podría representar un reservorio importante de carbono. No obstante, la necesidad latente de información sobre la participación del bacterioplancton en las redes tróficas marinas en Colombia y la importancia de entender el rol de las comunidades procariotas en cuanto a las tasas de productividad y reciclaje del carbono es una invitación para que los grupos y las nuevas generaciones de investigadores dirijan sus esfuerzos y recursos al estudio de esta problemática.

CONCLUSIONES

Los valores de abundancia de células y biomasa total se vieron afectados por la dinámica hidro-climática en la bahía de Gaira. Las mayores abundancias registradas en el período lluvioso (julio y agosto) sugieren que se presentó un aporte de nutrientes a la bahía seguramente a través de las descargas del río Gaira y de la Ciénaga Grande de Santa Marta.

Los resultados sugieren que el bacterioplancton (Bacteria y Archaea) presente en la bahía de Gaira se encuentra limitado por nutrientes orgánicos ya que los valores de abundancia de células y cantidad de carbono celular registrados coinciden con los registrados en la bibliografía para zonas mesotróficas y oligotróficas, respectivamente.

La diversidad morfológica y el predominio de células bacterianas esféricas de tamaños menores a $0.05 \mu\text{m}^3$ registrados en la bahía respaldan la idea de que la comunidad bacteriana está limitada por la disponibilidad de nutrientes principalmente orgánicos.

AGRADECIMIENTOS

El desarrollo del proyecto fue posible gracias al patrocinio que el Grupo de Microbiología Acuática de la Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano (UJTL) brindó con fondos, materiales y reactivos remanentes de otros proyectos, con la intención de abordar el estudio del componente microbiano marino. Igualmente se contó con el apoyo del Decano del Programa de Biología Marina, Dr. Iván Rey y con el soporte en campo del Dr. Andrés Franco. El tema del proyecto estuvo adscrito a la línea de Participación de Microorganismos en Cadenas Tróficas. Finalmente gracias a los profesores y personal de Laboratorios de la UJTL.

BIBLIOGRAFÍA

- Azam, F., T. Fenchel, J. Field, S. Gray, A. Meyer-Reil y F. Thingstad. 1983. The ecological role of water-column microbes in the sea. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 10: 257-263.
- Blanco, J. 1988. Las variaciones ambientales estacionales en las aguas costeras y su importancia para la pesca en la región de Santa Marta, Caribe colombiano. Tesis de Maestría en Ciencias. Universidad Nacional de Colombia, Santa Marta. 50 p.
- Bratbak, G. y M. Heldal. 1995. Viruses – the new players in the game; their ecological role and could they mediate genetic exchange by transduction?. 249-264. En: Joint, I. (Ed.). *Molecular ecology of aquatic microbes*. NATO ASI Series. Vol. G38. Springer-Verlag, Berlín.
- Bratbak, G., A. Jacobsen y M. Heldal. 1998. Viral lysis of *Phaeocystis pouchetii* and bacterial secondary

- production. *Aquat. Microb. Ecol.*, 16: 11–16.
- Canosa, A. y G. Pinilla. 2001. Total bacterial populations in three lentic water bodies of the Colombian Andes using the epifluorescence technique. *Lakes Reserv. Res. Manage.*, 6: 169-174.
- Choi, K., F. Dobbs y R. Cowen. 2001. Short-term temporal and spatial dynamics of bacterioplankton near Barbados in the Caribbean Sea. *Aquat. Microb. Ecol.*, 25: 43-53.
- Church, M., D. Hutchins y H. Ducklow. 2000. Limitation of bacterial growth by dissolved organic matter and iron in the Southern Ocean. *Appl. Environ. Microbiol.*, 66 (2): 455-466.
- Cole, J., G. Likens y D. Strayer. 1982. Photosynthetically produced dissolved organic carbon: An important carbon source for planktonic bacteria. *Limnol. Oceanogr.*, 27 (6): 1080-1090.
- Díaz, J. M., J. Blanco y G. Guillot. 1991. Síntesis ecológico ambiental del sector costero. 1-6. En: CORPES Perfil ambiental del Caribe colombiano. Documento de Trabajo número 9, Santa Marta.
- Ducklow, H. W. 1999. The bacterial component of the oceanic euphotic zone. *FEMS Microbiol. Ecol.*, 30: 1-10.
- Eiler, A., S. Langenheder, S. Bertilsson y L. Tranvik. 2003. Heterotrophic bacterial growth efficiency and community structure at different natural organic carbon concentrations. *Appl. Environ. Microbiol.*, 69 (7): 3701-3709.
- Franco, A. 2005. Oceanografía de la ensenada de Gaira – El Rodadero, más que un centro turístico en el Caribe colombiano. Univ. Jorge Tadeo Lozano, Bogotá. 58 p.
- Fuhrman, J. A., T. D. Thomas, C. A. Carlson y L. M. Proctor. 1989. Dominance of bacterial biomass in the Sargasso Sea and its ecological implications. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 57: 207-217
- Fukuda, R., H. Ogawa, T. Nagata y I. Koike. 1998. Direct determination of carbon and nitrogen contents of natural bacterial assemblages in marine environments. *Appl. Environ. Microbiol.*, 64 (9): 3352–3358.
- Gocke, K., J. Mancera y A. Vallejo. 2003. Heterotrophic microbial activity and organic matter degradation in coastal lagoons of Colombia. *Rev. Biol. Trop.*, 51 (1): 85-98.
- Gocke, K., C. Hernández, H. Giesenhagen y H. Hoppe. 2004. Seasonal variations of bacterial abundance and their relation to phytoplankton in the hypertrophic tropical lagoon Ciénaga Grande de Santa Marta, Colombia. *J. Plankton Res.*, 26 (12): 1429-1439.
- Hobbie, J., R. Daley y S. Jasper. 1977. Use of nucleopore filters for counting bacteria by fluorescence microscopy. *Appl. Environ. Microbiol.*, 33: 1225-1228.
- Hoppe, H., K. Gocke, D. Zamorano y R. Zimmermann. 1983. Degradation of macromolecular organic compounds in a Tropical lagoon (Ciénaga Grande, Colombia) and its ecological significance. *Int. Rev. Gesamten Hydrobiol.* 68: 811-824.
- INVEMAR. 2003. Informe del estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia. <http://www.invemar.org.co>. 01/12/03
- Jochem, F. J. 2001. Morphology and DNA content of bacterioplankton in the northern Gulf of Mexico: Analysis by epifluorescence microscopy and flow cytometry. *Aquat. Microb. Ecol.*, 25: 179-194.
- Joint, I., P. Henriksen, G. A. Fonnes, D. Bourne, T. F. Thingstad y B. Riemann. 2002. Competition of inorganic nutrients between phytoplankton and bacterioplankton in nutrient manipulated mesocosms. *Aquat. Microb. Ecol.*, 29 (2): 145-159
- Kepner, R. y J. Pratt. 1994. Use of fluorochromes for direct enumeration of total bacteria in environmental

- samples: past and present. *Microbiol. Rev.*, 58 (4): 603-615.
- Koch, A. L. 1996. What size should a bacterium be? A question of scale. *Annu. Rev. Microbiol.*, 50: 317-348.
- La Ferla, R., A. Giudice y G. Maimone. 2004. Morphology and LPS content for the estimation of marine bacterioplankton biomass in the Ionian Sea. *Sci. Mar.*, 68 (1): 23-31.
- Lee, S. 1993. Measurement of carbon and nitrogen biomass and biovolume from naturally derived marine bacterioplankton. 319-325. En: Kemp, P., B. Sherr, E. Sherr y J. Cole (Eds.). *Handbook of methods in aquatic microbial ecology*. Lewis Publishers, Boca Ratón, EE. UU. 777 p.
- Makino, W. y J. Cotner. 2004. Elemental stoichiometry of a heterotrophic bacterial community in a freshwater lake: implications for growth - and resource - dependent variations. *Aquat. Microb. Ecol.*, 34: 33-41.
- Malits, A., F. Peters, M. Bayer-Giraldi, C. Marrasé, A. Zoppini, O. Guadayol y M. Alcaraz. 2004. Effects of small scale turbulence on bacteria: a matter of size. *Microb. Ecol.*, 48: 287-299.
- Matz, C. y K. Jürgens. 2001. Effects of hydrophobic and electrostatic cell surface properties of bacteria on feeding rates of heterotrophic nanoflagellates. *Appl. Environ. Microbiol.*, 67 (2): 814-820.
- Morita, R. 1993. Starvation-survival strategies in bacteria. 441-445. En: Kemp, P., B. Sherr, E. Sherr y J. Cole (Eds.). *Handbook of methods in aquatic microbial ecology*. Lewis Publishers, Boca Ratón, EE.UU. 777 p.
- Pernthaler, J., T. Posch, K. Šimek, J. Vrba, R. Amann y R. Psenner. 1997. Contrasting bacterial strategies to coexist with a flagellate predator in an experimental microbial assemblage. *Appl. Environ. Microbiol.*, 63 (2): 596-601.
- Posch, T., M. Loferer-Kröbacher, G. Gao, A. Alfreider, J. Pernthaler y R. Psenner. 2001. Precision of bacterioplankton biomass determination: a comparison of two fluorescent dyes, and allometric and linear volume-to-carbon conversion factors. *Aquat. Microb. Ecol.*, 25: 55-63.
- Psenner, R. 1993. Determination of size and morphology of aquatic bacteria by atomated image analysis. 339-346. En: Kemp, P., B. Sherr, E. Sherr y J. Cole (Eds.). *Handbook of methods in aquatic microbial ecology*. Lewis Publishers, Boca Ratón, EE. UU. 777 p.
- Psenner, R. y R. Sommaruga. 1992. Are rapid changes in bacterial biomass caused by shifts from top-down to bottom-up control? *Limnol. Oceanogr.*, 37 (5): 1092-1100
- Ramírez, G. 1990. Variación de los parámetros hidrográficos y su relación con el proceso de surgencia en la Bahía de Santa Marta. 11-23. En: INVEMAR (Ed.). *Estudio del macrozoobentos de la bahía de Santa Marta*. Informe final, Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, Santa Marta.
- R Development Core Team. 2008. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Viena. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org>. 01/07/08.
- Sanders, R., D. Caron y U. Berninger. 1992. Relationships between bacteria and heterotrophic nanoplankton in marine and fresh waters: an inter-ecosystem comparison. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 86: 1-14.
- Shiah, F. y H. Ducklow. 1994. Temperature and substrate regulation of bacterial abundance, production and specific growth rate in Chesapeake Bay, USA. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 103: 297-308.
- Šimek, K., J. Vrba, J. Pernthaler, T. Posch, P. Hartman, J. Nedoma y R. Psenner. 1997. Morphological and compositional shifts in an experimental bacterial community influenced by protists with contrasting

- feeding modes. *Appl. Environ. Microbiol.*, 63 (2): 587-595.
- Šimek, K., J. Pernthaler, M. Weinbauer, K. Hornák, J. Dolan, J. Nedoma, M. Mašín y R. Amann. 2001. Changes in bacterial community composition and dynamics and viral mortality rates associated with enhanced flagellate grazing in a mesoeutrophic reservoir. *Appl. Environ. Microbiol.*, 67 (6): 2723-2733.
- Steubing, L. 1971. Contribución a la mineralización de materiales orgánicos en la isla de Salamanca. *Mitt. Inst. Colombo-Alemán Invest. Cient.* 5: 11-18.
- Tait, R. V. 1987. Elementos de ecología marina. Acribia, Zaragoza, España. 44p.
- Thingstad, T. 2000. Control of bacterial growth in idealized food webs. 229-260. En: Kirchman, D. (Ed.). *Microbial ecology of the oceans*. Wiley-Liss, EE. UU. 542 p.
- Thingstad, T. F., M. Heldal, G. Bratbak y I. Dunas. 1993. Are viruses important partners in pelagic food webs? *Trends Ecol. Evol.*, 8 (6): 209–213
- Valencia, J., J. Abalde, A. Bode, A. Cid, E. Fernández, N. González, J. Lorenzo, E. Teira y M. Varela. 2003. Variations in planktonic bacterial biomass and production, and phytoplankton blooms off a Coruña (NW Spain). *Sci. Mar.*, 67 (2): 143-157.
- Vrede, K., T. Vrede, A. Isaksson y A. Karlson. 1999. Effects of nutrients (phosphorus, nitrogen and carbon) and zooplankton on bacterioplankton and phytoplankton – a seasonal study. *Limnol. Oceanogr.*, 44 (7): 1616–1624.
- Vrede, K., M. Heldal, S. Norland y G. Bratbak. 2002. Elemental composition (C,N,P) and cell volume of exponentially growing and nutrient-limited bacterioplankton. *Appl. Environ. Microbiol.*, 68 (6): 2965-2971.
- Wommack, E., J. Ravel, R. Hill, J. Chun y R. Colwell. 1999. Population dynamics of Chesapeake Bay viroplankton: total community analysis by pulsed gel electrophoresis. *Appl. Environ. Microbiol.*, 65 (1): 231-240.

FECHA DE RECEPCIÓN: 07/11/08

FECHA DE ACEPTACIÓN: 01/09/09