

Variabilidad estacional e interanual del carbono inorgánico disuelto y nutrientes en la fosa de Cariaco

Yrene Astor, Frank Muller-Karger, Richard Bohrer,
Luis Troccoli y Jonathan García

Resumen. Se presentan las características físico-químicas (temperatura, carbono inorgánico disuelto (CO_2T), fugacidad del dióxido de carbono ($f\text{CO}_2$), amonio, nitritos, nitratos y fosfatos) en la fosa de Cariaco, obtenidas de observaciones mensuales entre noviembre de 1995 y diciembre del 2001 en la estación CARIACO ($10^\circ 30'\text{N}$ - $64^\circ 47'\text{O}$), del proyecto Ciclo del Carbono en un Océano Costero. El CO_2T y la $f\text{CO}_2$ se calcularon a partir de mediciones espectrofotométricas de pH y alcalinidad. Las variaciones interanuales en el ciclo de surgencia se debieron principalmente a cambios en la velocidad del viento y por eventos de ventilación ocasionales asociados con intrusiones de aguas caribeñas dentro de la fosa. El proceso de surgencia en CARIACO transportó aguas profundas y frías, con concentraciones altas de CO_2 y nutrientes a la superficie. Este fenómeno incrementó la producción primaria pero no lo suficiente para compensar los flujos elevados de CO_2 que provenían de capas profundas, caracterizando la zona como un área que actúa como fuente de CO_2 a la atmósfera. Varios procesos bioquímicos interactuaron en la columna de agua afectando las concentraciones de nitritos y nitratos especialmente en la zona de la interfase (profundidad de 200-400 m). Las aguas profundas ($Z > 400$ m) poseen concentraciones elevadas de CO_2 , amonio y fosfatos. La diferencia que existe entre $f\text{CO}_2$ de la atmósfera con la del agua controla el flujo de CO_2 , más que la intensidad del viento; por lo tanto, variables, tales como temperatura, mezcla y/o factores biológicos, que regulan esta diferencia definen el flujo.

Palabras clave. Surgencia. Serie de tiempo oceanográfica. Carbono inorgánico disuelto. Nutrientes. Fosa de Cariaco.

Interannual and seasonal variability of CO_2 and nutrients in the Cariaco Basin

Abstract. The physical and chemical characteristics of the Cariaco Basin (temperature, dissolved inorganic carbon (CO_2T), fugacity of CO_2 ($f\text{CO}_2$), ammonium, nitrites, nitrates, and phosphates) were studied using monthly observations between November 1995 and December 2001 at the CARIACO (Carbon Retention In A Colored Ocean) time series station ($10^\circ 30'\text{N}$ - $64^\circ 47'\text{O}$). CO_2T and CO_2 were calculated from pH and alkalinity spectrophotometric analysis. Interannual variations in the upwelling cycle were driven by variations in wind intensity and by events associated to the intrusion of Caribbean Sea waters. Upwelling process in CARIACO carried deep cold waters with high concentrations of CO_2 and nutrients to the surface. This phenomenon increased primary production, but the increase was not high enough to compensate the high CO_2 fluxes coming from deep waters; therefore, the upwelling region in CARIACO acted as a source of CO_2 to the atmosphere. Biochemical processes interacted in the water column affecting nitrite and nitrate concentrations especially in the interface zone (depth 200-400 m). Deep waters ($Z > 400$ m) showed high levels on CO_2 , ammonia, and phosphate. The difference between atmospheric and water CO_2 controls the CO_2 flux, more than wind intensity; therefore, variables, such as temperature, mixing and/or biological factors, that regulate the difference are the ones defining the flux.

Key words. Upwelling. Time Series. Dissolved Inorganic Carbon. Nutrients. Cariaco Basin.

Introducción

La fosa de Cariaco, situada entre cabo Codera y la península de Araya, posee características físico-químicas que favorecen la presencia de un ambiente anóxico permanente por debajo de los 250 m de profundidad. Las características anóxicas de las aguas profundas se deben al carácter restringido de los movimientos de advección y mezcla, por debajo de esta profundidad. El sector oriental de la fosa coincide con un área de surgencia costera impulsada por el viento, donde el movimiento vertical ascendente de las masas de agua subsuperficiales sigue un patrón cíclico, realizado por fenómenos de corta duración que pueden intensificar la surgencia (Muller-Karger *et al.* 2000, 2001, Astor *et al.* 2003).

El proyecto CARIACO (Ciclo del Carbono en un Océano Costero, Carbon Retention In A Colored Ocean) es un proyecto multidisciplinario y multi-institucional que opera una serie de tiempo en una estación oceanográfica establecida en la fosa de Cariaco (Muller-Karger *et al.*, en este volumen). La serie se inicia en noviembre de 1995 con un período de observaciones de seis años y medio para julio del 2002, que representan 80 meses de observaciones oceanográficas. Las observaciones básicas en la estación CARIACO incluyen hidrografía, nutrientes (especies disueltas de nitrógeno inorgánico, fosfatos, y silicatos), oxígeno disuelto, concentración del carbono inorgánico (CO_2T) y fugacidad del dióxido de carbono ($f\text{CO}_2$), carbono y nitrógeno orgánico particulado, composición del fitoplancton, clorofila y producción primaria entre otras variables.

Varios eventos naturales notables ocurrieron en la región a través del estudio. Uno de los más importantes fue el terremoto del 9 de julio de 1997 que causó grandes daños en el oriente de Venezuela. Este terremoto cambió significativamente algunas características físico-químicas de las aguas profundas de la fosa (Thunnell *et al.* 1999, Scranton *et al.* 2001). En 1998 ocurrió el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENOS), durante el cual se alteraron el patrón de vientos, la surgencia y los niveles de producción primaria en el área (Nerem *et al.* 1999, Muller-Karger *et al.* 2001, Astor *et al.* 2003). Entre 1997 y 1998, la presencia de giros (remolinos) que transitaban por el Mar Caribe cerca de la plataforma continental venezolana causaron eventos de ventilación en la fosa. Dependiendo de sus características, estos giros pueden incrementar la intensidad de la surgencia, causar máximos de producción primaria de carácter anómalo, alterar el patrón de distribución vertical de parámetros químicos, e inducir hundimiento del agua a profundidades mayores dentro de la fosa (Astor *et al.* 2003). Por último, ocurrieron lluvias torrenciales en las costas venezolanas en diciembre de 1999 causando cambios significativos en la salinidad a nivel superficial.

En este trabajo se presenta un resumen de las características físico-químicas observadas desde el inicio de la serie de tiempo hasta octubre del 2001. Los datos de concentración y fugacidad del dióxido de carbono sólo llegan hasta diciembre del 2000 debido a fallas con el equipo durante el año 2001. No se presentan aquí observaciones del fitoplancton, materia particulada, clorofila y producción primaria.

Estos datos están disponibles en la base de datos de CARIACO a través de la página <http://imars.usf.edu>.

Materiales y Métodos

CARIACO comenzó sus muestreos mensuales en noviembre de 1995 en la cuenca oriental de la fosa de Cariaco a 10°30'N-64°40'O, donde la profundidad alcanza los 1380 m. Los cruceros se realizaron a bordo del buque oceanográfico (B/O) Hermano Ginés. Durante cada crucero se realizaron de cuatro a cinco perfiles donde se recolectaron muestras de agua a 19 ó 20 profundidades, desde la superficie hasta los 1310 m de profundidad.

Los datos hidrográficos se recolectaron usando un sistema de Conductividad-Temperatura-Profundidad (CTD), marca SeaBird con sensores adicionales para medir oxígeno, fluorescencia de la clorofila y el coeficiente de atenuación de la luz a 660 nm. Los detalles y especificaciones se describen en Astor *et al.* (2003).

Para calcular CO₂T se emplearon mediciones de pH y alcalinidad sobre muestras discretas recolectadas durante el perfil de ascenso. El análisis de pH se realizó a bordo del barco, empleando un método espectrofotométrico desarrollado por Clayton y Byrne (1993). El análisis de alcalinidad se efectuó por el método desarrollado por Breland y Byrne (1993), el cual fué modificado para CARIACO por recomendaciones del Dr. Yao Wensheng de la Universidad del Sur de Florida.

El CO₂T y fCO₂ se calcularon a partir de los parámetros de pH y alcalinidad. Para los cálculos se emplearon las constantes de equilibrio para la disociación del ácido carbónico en agua de mar reportadas por Mehrbach *et al.* (1973) para K₁ y K₂, y reajustadas por Dickson y Millero (1987). Para el resto de los parámetros se usaron las constantes sugeridas por Millero (1995).

Se realizó una intercalibración para la alcalinidad y el CO₂T con el laboratorio del Dr. Chris Sabine (University of Princeton) con el fin de verificar la calidad de los datos. Se observó una diferencia promedio entre las mediciones de alcalinidad de CARIACO y las de Sabine de 1,77 µmol kg⁻¹, con un error estándar de ± 2,38, y una correlación de 0,997. La precisión de nuestras observaciones fué de 5 µmol kg⁻¹. Para el CO₂T, la diferencia promedio fue de 9,2 µmol kg⁻¹, con un error estándar de ± 2,59 y una correlación de 0,995. La precisión analítica para el pH fue de ± 0,003.

El análisis de nutrientes se ha realizado en tres diferentes laboratorios a través del tiempo: específicamente en el Instituto Oceanográfico de Venezuela, en la Escuela de Ciencias Aplicadas del Mar y en la Universidad del Sur de Florida (University of South Florida/USF, Laboratorio del Dr. Kent Fanning). Los dos primeros forman parte de la Universidad de Oriente/UDO, el primero está en Cumaná, Estado Sucre, y el segundo en Boca de Río, Estado Nueva Esparta. Los laboratorios de la UDO se encargaron del análisis de nutrientes desde noviembre de 1995 hasta diciembre de 1997, y a partir de 1998 hasta la fecha, el laboratorio del Dr. Kent Fanning ha realizado estos análisis.

Las muestras de nutrientes (amonio, nitrito, nitrato, y fosfato) se recolectaron en botellas de polietileno, se filtraron a través de filtros de $0,7\ \mu\text{m}$ y se congelaron hasta el momento del análisis (1 a 4 meses). Lo prolongado de la preservación pudo inducir algunas imprecisiones en los resultados. Los análisis se basaron en Strickland y Parsons (1972), siguiendo las recomendaciones de Gordon *et al.* (1993) para el proyecto WOCE WHP (World Ocean Circulation Experiment-World Hydrographic Program). A cada nutriente se le realizó una serie de cálculos estadísticos por profundidad con el fin de evaluar la calidad de los datos y las discrepancias entre los laboratorios. La base de datos de nutrientes se estableció con los datos más confiables con los cuales se construyeron las figuras que muestran los cambios espacio-temporales de la distribución de nutrientes.

Las muestras de aguas profundas (500, 750, 1000 y 1310 m) que provienen de la fosa de Cariaco poseen concentraciones relativamente constantes a través del tiempo. El incremento anual es de $0,037\ \text{mM}$ para los fosfatos y de $0,28\ \text{mM}$ para el amonio (Millero 1996). Por lo tanto, la variabilidad entre los valores de nutrientes de las muestras profundas puede usarse como un estimado de la imprecisión de las mediciones de nutrientes lo que permite controlar la calidad de los datos analíticos. Esta metodología es similar a la que se implementa en el estudio de Serie de Tiempo Atlántica en Bermuda (Bermuda-Atlantic Time Series/BATS; Michaels *et al.*, 1994). La variabilidad calculada refleja la acumulación de errores debido al análisis, captación, almacenamiento, variaciones entre cruceros y la variabilidad natural del parámetro. La tabla 1 muestra esta variabilidad y los valores medios para cada profundidad.

Los valores de amonio reportados por los laboratorios de la UDO mostraron una variabilidad muy alta, en consecuencia se decidió eliminar todos los datos anteriores a diciembre de 1997 y sólo analizar la variable amonio con los datos de la USF. La evaluación sistemática con respecto a las aguas profundas no es posible con las mediciones de nitritos y nitratos, ya que estos nutrientes no están presentes en las aguas profundas de la fosa de Cariaco. Las bacterias, presentes en las aguas anóxicas de la fosa, utilizan todos los nitritos y nitratos disponibles en el agua, a través del proceso de desnitrificación.

Resultados

La variabilidad estacional e interanual de la temperatura en la fosa de Cariaco se muestran en la figura 1, donde se aprecia el movimiento vertical de la isoterma de $21\ ^\circ\text{C}$, la cual presenta un ciclo estacional muy definido. El patrón que sigue la variabilidad se ha descrito previamente en Muller-Karger *et al.* (2000, 2001) y Astor *et al.* (1998, 2003). La temperatura superficial del agua en la estación CARIACO osciló entre $21,79$ y $29,15\ ^\circ\text{C}$ para todo el periodo de muestreo. Cada año estuvo presente un rango de $5,3$ a $6,6\ ^\circ\text{C}$.

Tabla 1. Comparación entre laboratorios de las muestras de nutrientes de aguas profundas. Media y desviación estándar.

Profundidad	Fosfatos (μM)		
	IOV ^a	ECAM ^b	USF ^c
500	3,23 \pm 0,22	3,14 \pm 0,70	3,12 \pm 0,11
750	3,52 \pm 0,20	3,41 \pm 0,75	3,42 \pm 0,17
1000	3,62 \pm 0,22	3,50 \pm 0,85	3,57 \pm 0,09
1310	3,77 \pm 0,27	3,73 \pm 1,06	3,72 \pm 0,24
Profundidad	Amonio (μM)		
	IOV ^a	ECAM ^b	USF ^c
500	13,09 \pm 3,54	13,12 \pm 3,34	13,50 \pm 1,12
750	15,27 \pm 4,46	18,01 \pm 4,36	19,20 \pm 0,99
1000	16,36 \pm 4,87	19,24 \pm 4,51	21,60 \pm 0,96
1310	17,15 \pm 6,03	21,64 \pm 5,13	23,21 \pm 1,57

^a IOV: Instituto Oceanográfico de Oriente^b ECAM: Escuela de Ciencias Aplicadas del Mar^c USF: Universidad del Sur de Florida

Seis épocas de surgencia y seis de estabilidad se registraron desde el inicio de CARIACO. El viento alcanzó niveles de velocidad máximos alrededor de $8\text{--}9\text{ m s}^{-1}$, entre febrero y marzo, y valores mínimos ($< 4\text{ m s}^{-1}$) entre septiembre y octubre (Astor *et al.*, 2003). La mayor intensidad de la surgencia se observó en marzo durante los períodos de 1996-1997 y 2000-2001 cuando la isoterma de $21\text{ }^{\circ}\text{C}$ alcanzó la profundidad de 18 y 25 m respectivamente (Figura 1a). Durante los períodos de 1995-1996 y 1999-2000, el máximo de surgencia se observó en mayo cuando la isoterma se ubicó a 30 m. Durante los períodos de 1997-1998 y 1998-1999 (Figura 1b) se presentó una menor intensidad en la surgencia y mucha irregularidad.

La distribución vertical de O_2 presentó cambios significativos por debajo de los 200 m de profundidad en diferentes ocasiones. Esto es producto del fenómeno llamado ventilación (Holmen y Rooth 1990, Astor *et al.* 1998, Scranton *et al.* 2001, Astor *et al.* 2003). La ventilación se caracteriza por una inversión en los niveles de oxígeno por debajo de los 200 m. El aumento puede ser significativo ($\sim 40\text{ }\mu\text{M}$ en enero de 1997) lo que permite rastrear la penetración de agua “nueva” dentro de la fosa a profundidades intermedias. La ventilación puede estar asociada con el aumento en la intensidad de la surgencia; sin embargo, también puede ocurrir durante las épocas de estabilidad. La figura 2 ilustra la evidencia de una intrusión de agua de profundidad intermedia en la fosa, que muestra la relación del O_2 con sigma potencial para diciembre de 1996 y enero de 1997. Se observa como el O_2 se incrementa a densidades entre 26,35 y 26,40 en enero, cuando ocurre una intrusión de aguas caribeñas.

En septiembre se observaron valores mínimos superficiales de CO_2T ($< 2020\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$) y valores más altos ($> 2100\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$) durante la época de surgencia (Figura 3). En general, los valores más bajos se encontraron en la superficie aumentando rápidamente con la profundidad hasta la zona de la interfase óxica-anóxica, para luego estabilizarse y mantenerse constantes ($\sim 2400\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$) por debajo de los 1000 m.

Una mayor producción de CO_2 existe a mayor profundidad debido al efecto acumulativo de la descomposición bacteriana, lo cual libera iones de hidrógeno libres lo que causa la disminución del pH.

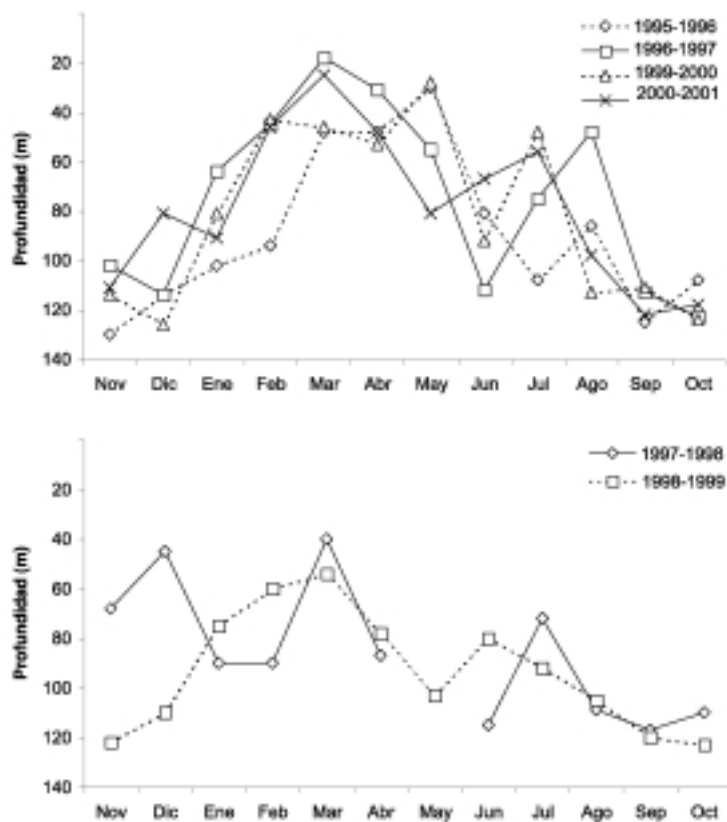


Figura 1. Profundidad de la isoterma de 21 °C. El panel superior (1a) muestra los períodos 1995-1996, 1996-1997, 1999-2000 y 2000-2001. El panel inferior (1b) muestra los períodos anómalos de 1997-1998 y 1998-1999.

La $f\text{CO}_2$ (Figura 4) fué más baja durante los meses de surgencia (enero a mayo), en los primeros 25 m, que en los meses de estabilidad (septiembre y octubre), coincidiendo con el incremento de la productividad primaria y los meses de menor temperatura en el agua (Muller-Karger *et al.* 2000, Muller-Karger *et al.* 2001). Sin embargo, los valores calculados para todo el año fueron normalmente mayores que la presión parcial de CO_2 ($p\text{CO}_2$) atmosférico ($366 \mu\text{atm}$), a excepción de enero, marzo y mayo 1997, marzo 1998 y enero 1999, cuando los valores de $f\text{CO}_2$ superficial fueron menores a $366 \mu\text{atm}$.

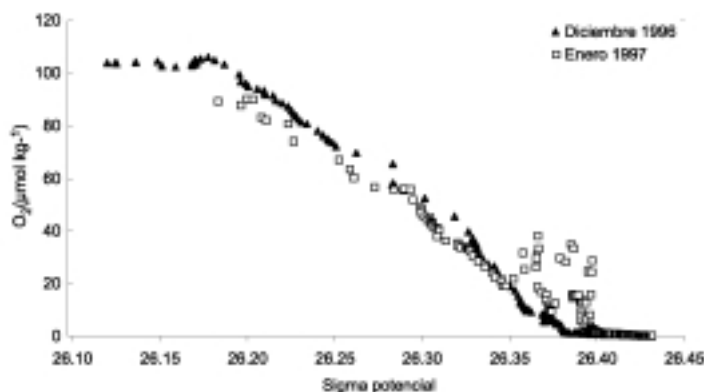


Figura 2. Oxígeno disuelto (μM) vs. sigma potencial entre las profundidades de 200 y 400 m durante diciembre de 1996 y enero de 1997.

Normalmente el amonio es un compuesto que no es detectable en las aguas superficiales de la fosa de Cariaco, pero está presente en la columna de agua a partir de los 200-320 m de profundidad (Figura 5). Zhang y Millero (1993) reportan durante su breve estudio concentraciones de amonio por debajo de $1 \mu\text{M}$ en la superficie. Durante el transcurso del proyecto CARIACO, las aguas superficiales de la estación mostraron la presencia de amonio (profundidad < 30 m, concentraciones $> 0,1 \mu\text{M}$) en la zona eufótica solamente en contadas ocasiones: en febrero, marzo, septiembre y noviembre de 1998, y en enero-febrero de 1999. A partir de la profundidad donde comienza a detectarse, los niveles de amonio aumentaron marcadamente con la profundidad alcanzando valores máximos en el fondo de alrededor de $23,37 \pm 1,49 \mu\text{mol kg}^{-1}$.

A nivel de la superficie, los nitritos fueron indetectables pero se incrementaron con la profundidad hasta alcanzar valores máximos alrededor de los 40 m. Estos compuestos, por lo general, no fueron detectables entre los 50 y 100 m de profundidad (Figura 6). La presencia de nitritos se observó a mayor profundidad ocasionalmente. Estos niveles secundarios coinciden con eventos de ventilación: enero y agosto de 1997 (225 y 350 m respectivamente), marzo de 1998 (340 m) y marzo del 2001 (250 m).

La concentración de nitratos también mostró un mínimo cerca de la superficie y un incremento con la profundidad hasta alcanzar un máximo de $12 \mu\text{M}$ alrededor de los 160 m (Figura 7a). Este máximo se mantuvo a esta profundidad a través del tiempo coincidiendo con lo observado por Richards y Vaccaro (1956), Kato (1961) y Okuda *et al.* (1969). Por debajo de este máximo, los niveles de nitratos comenzaron a disminuir hasta ser indetectables. La profundidad a la cual no se detectaron variaba entre 250 a 350 m, dependiendo de los procesos dinámicos y bioquímicos que actúan en la columna de agua.

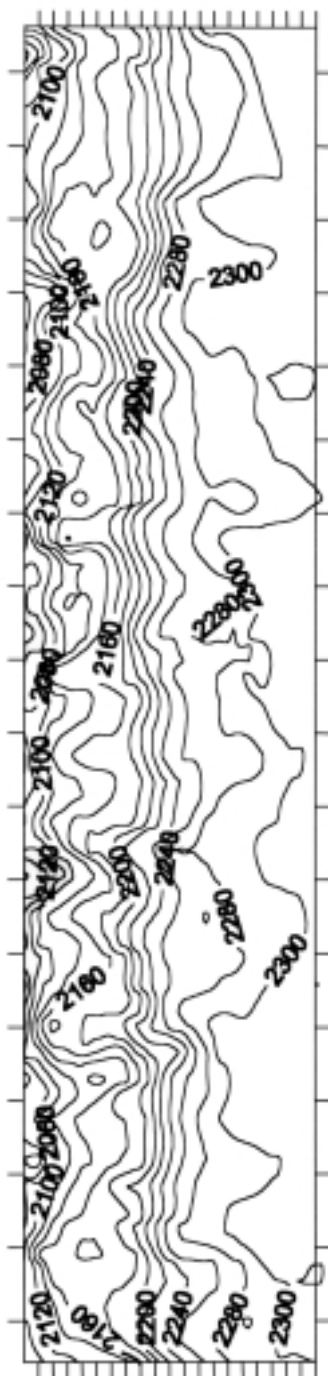


Figura 3. Serie de tiempo del CO₂T (μmol kg⁻¹) entre diciembre 1995 y diciembre del 2000.

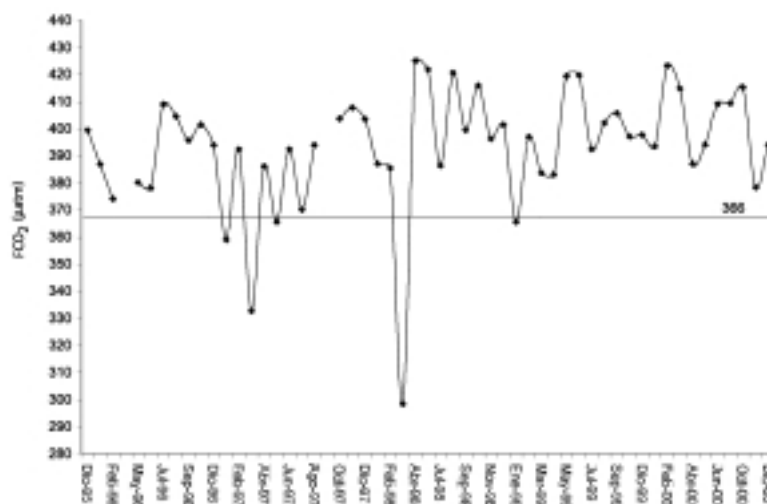


Figura 4. Variación de la $f\text{CO}_2$ (μatm) superficial entre diciembre 1995 y diciembre del 2000.

La concentración de fosfatos en las aguas superficiales se mantuvo por debajo de los $0,3 \mu\text{M}$ siendo en ocasiones indetectable (Figura 7b). Un gradiente marcado se presentó entre la superficie y la interfase óxica-anóxica, donde los niveles alcanzaron valores entre $2,3$ y $2,4 \mu\text{M}$, por debajo de donde, continuaron aumentando hasta valores de $3,75 \pm 0,19 \mu\text{M}$ a 1310 m .

Discusión

Hidrografía

La intensidad de la surgencia en la estación CARIACO se puede detectar analizando los cambios en la temperatura superficial del mar, y mediante el movimiento vertical de la isoterma de 21°C a lo largo del año. La surgencia en dicha estación presenta variaciones interanuales, además de diferencias estacionales. También se observan “eventos de surgencia”, que sugieren intensificación del fenómeno en una escala de tiempo de sólo unos días, causando una producción primaria inusualmente elevada durante este período.

Por lo general, el mecanismo que activa la surgencia costera en Venezuela es el viento. Los vientos alisios soplan en una dirección casi paralela a la dirección general de la costa (E-NE), lo que se presta a una situación idónea para que el efecto de transporte Ekman genere surgencia costera. Por lo tanto, varios autores a través del tiempo han sugerido que la surgencia en esta región es una respuesta directa a cambios estacionales en la intensidad del viento (Richards y Vaccaro 1956, Richards 1960, Richards 1975, Herrera y Febres-Ortega 1975, Muller-Karger y Aparicio 1994).

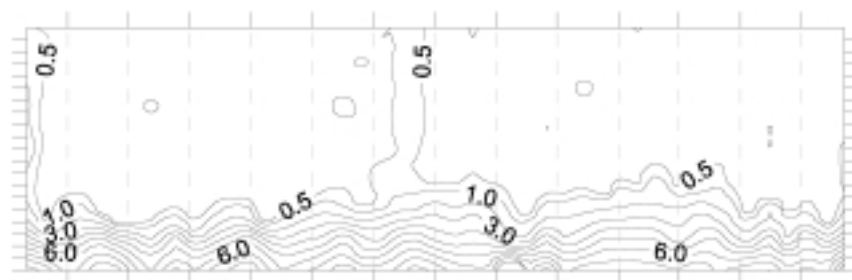


Figura 5. Serie de tiempo de amonio (μM) entre febrero de 1998 y octubre del 2001.

Aunque la surgencia costera y el viento están estrechamente relacionados, el movimiento vertical de las masas de agua también se muestra asociado con otros factores externos que la modifican. La intensidad de la surgencia es alterada eventualmente por eventos de escala global como es ENOS, el cual está relacionado con la reducción de la velocidad de los vientos alisios en el Atlántico (Enfield y Mayer 1997, Enfield 1996). La alteración que se observa en CARIACO ocurre en el período de 1997-1998 presentándose un patrón anómalo en el desarrollo de la surgencia con respecto a los otros períodos, lo cual influye en la intensidad y podría representar una posible conexión con ENOS (Astor *et al.* 2003).

Cambios en la distribución vertical de las condiciones del agua se producen debido a fenómenos a escala media, los cuales son independientes de las modificaciones espaciales y temporales del viento. Alteraciones en el patrón de surgencia ocurren debido a ondas atrapadas en la costa (“coastal-trapped waves”) y a remolinos que migran hacia la costa. En el Mar Caribe se ha observado la presencia de remolinos fluyendo hacia el noroeste con la corriente del Caribe (Pauluhn y Chao 1999). En ocasiones, estos remolinos circulan paralelos a y cerca de la plataforma continental venezolana siendo su origen variable. Algunos giros se generan fuera del Mar Caribe, al desprenderse de la zona de retroflexión de la corriente norte de Brasil, y otros se desarrollan a partir de la corriente del Caribe. Según Carton y Chao (1999), el traslado de estos remolinos que circulan de este a oeste por el Caribe sur puede ser la causa de fluctuaciones en el nivel del mar observadas en registros de La Guaira. Las fluctuaciones afectan la estructura vertical de las masas de agua, en la plataforma continental venezolana, influyendo en la intensidad de la surgencia (Astor *et al.* 2003).

El efecto de este tipo de eventos a escala media es evidente en la distribución vertical del O_2 y de nitratos. Este fenómeno induce la intrusión de aguas del Caribe a la fosa sobre el umbral del canal de La Tortuga. Esta agua procedente de la zona de la termoclina introduce agua con oxígeno y nitratos a profundidades intermedias en la fosa, profundidades a las cuales estos parámetros están normalmente ausentes.

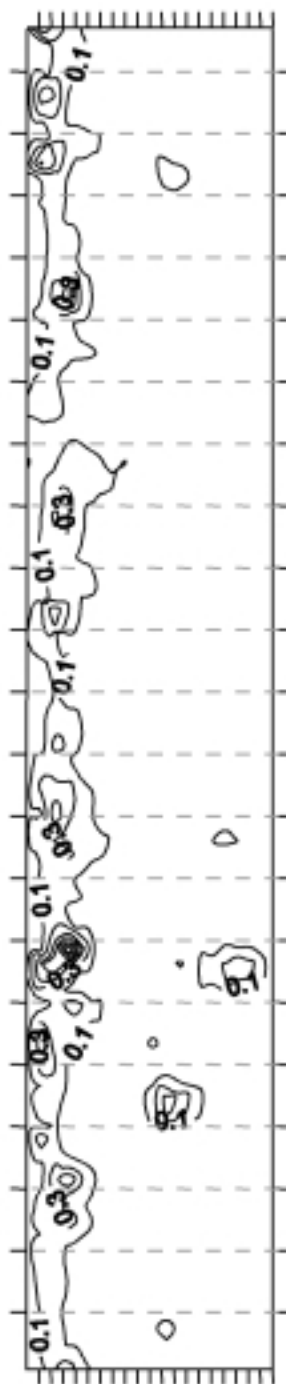


Figura 6. Serie de tiempo de nitritos (μM) entre diciembre de 1995 y octubre del 2001.

Sistema carbonato-bicarbonato

En cuencas donde la circulación y la mezcla restringen el intercambio de agua, la descomposición de la materia orgánica causa eventualmente la anoxia, y la acumulación de CO_2 es mayor que en aguas abiertas a similares profundidades. El incremento de las concentraciones de CO_2T en la columna de agua de CARIACO (aprox. 15%) resulta mayor que el aumento normal (4-8%) presente en aguas de mar abierto, pero no así con lo observado en el Mar Negro (40%, Goyet *et al.* 1991). Esta acumulación refleja la falta de renovación de aguas indicando que el aporte de CO_2T en la fosa es mayor que en mar abierto debido a la oxidación de la materia orgánica a través de la reducción de sulfatos y la disolución de CaCO_3 . El agua con alto contenido de CO_2T a profundidades entre 100-200 m se eleva hacia la superficie durante los meses de surgencia incrementando las concentraciones superficiales de CO_2T .

La $f\text{CO}_2$ equivale a la presión parcial del gas en el agua, y depende de la relación entre CO_2T y el coeficiente Bunsen de solubilidad del CO_2 atmosférico en agua de mar. El hecho que la fugacidad sea mayor que la presión parcial o $p\text{CO}_2$ atmosférica indica que las aguas en Cariaco tienden a actuar como una fuente de CO_2 a la atmósfera, algo similar a lo que ocurre en la zona de surgencia ecuatorial del Atlántico y del Pacífico (Watson 1995). Debido a que la $p\text{CO}_2$ atmosférica en Cariaco no es medida directamente sino que es calculada, existe cierta incertidumbre al determinar cuando la fosa actúa como un sumidero de CO_2 . De cinco ocasiones, cuando los niveles de $f\text{CO}_2$ se encuentran por debajo de $p\text{CO}_2$ atmosférica, solamente en dos (marzo de 1997 y 1998) se puede asegurar, que la fosa actúa como sumidero de CO_2 .

La fijación de carbono por medio de procesos biológicos influye en gran medida en la transferencia de CO_2 entre el agua y la atmósfera, ya que un incremento significativo en la producción primaria reduce las concentraciones de CO_2 en la superficie y por lo tanto reduce la $f\text{CO}_2$. Sin embargo, el proceso de surgencia, que es responsable por los incrementos significativos en la producción, lleva aguas frías profundas y cargadas de CO_2 a la superficie. Aunque el fitoplancton fija parte de este CO_2 a través de la fotosíntesis, la $f\text{CO}_2$ es normalmente más alta que la $p\text{CO}_2$ atmosférica. Mientras se encuentra en la superficie, esta agua tiende a calentarse, y el incremento de temperatura aumenta la presión parcial del CO_2 y baja el porcentaje de saturación, lo que facilita la liberación del gas a la atmósfera. Aunque la actividad biológica y por lo tanto la remoción de CO_2 en estas áreas es bastante intensa en las épocas de surgencia, la liberación del gas es dominante debido al aumento de la temperatura y al flujo constante de CO_2 de capas más profundas hacia la superficie. Por lo tanto, esta zona de surgencia, aún con tasas de producción elevadas que exceden los 500 gC m^{-2} por año en una región tropical es un área de evasión de CO_2 del océano a la atmósfera.

Nutrientes

La fuerte picnoclina que se presenta en las aguas de la fosa de Cariaco durante

todo el año inhibe la mezcla entre las aguas superficiales y profundas. Así también, las restricciones en la advección horizontal a profundidades mayores al umbral de la fosa, actúan como limitaciones en la difusión del O_2 a las capas profundas, y promueven que la tasa de consumo del O_2 supere el aporte. El estancamiento de las aguas profundas de la fosa favorece el desarrollo de su condición anóxica. En este tipo de ambiente, los nutrientes presentan una distribución inusual en comparación a la que se observa en mar abierto. La descomposición de la materia orgánica en las capas superficiales (profundidades por encima de los 160 m) ocurre a través de la respiración aerobia. A mayores profundidades, el O_2 decae rápidamente, y la desnitrificación (reducción de nitratos) se activa. Los nitratos, y en su defecto los nitritos, disminuyen a medida que las bacterias los utilizan como receptores finales de electrones en el proceso de respiración. A mayores profundidades, una vez que los compuestos nitrogenados oxidados desaparecen de la columna de agua, la reducción de sulfatos prevalece, y al incrementarse aún más la profundidad, la reducción de la materia orgánica a metano está presente. Cada uno de estos procesos tiene un rango de profundidades en el cual ocurre de manera óptima dentro de la fosa de Cariaco.

Debido a la desnitrificación, los nutrientes como los nitritos y los nitratos desaparecen de la columna de agua después de los 200 a 400 m de profundidad (dependiendo de la profundidad de la interfase óxica-anóxica). La desaparición de estos compuestos a estas profundidades reflejan claramente la influencia bacteriana y no la de la fotosíntesis, ya que estas aguas se encuentran muy por debajo de la zona eufótica.

La distribución vertical de nitritos y nitratos está fuertemente influenciada principalmente por los procesos que afectan las tasas de nitrificación (oxidación del amonio y nitritos) y desnitrificación en la columna de agua. La rapidez con que descienden los niveles de oxígeno en la fosa con la profundidad influye en cambios significativos en el metabolismo de la comunidad bacteriana. La respiración aerobia comienza a ser sustituida por la respiración del nitrógeno oxidado. El primer máximo de nitritos que se observa a 40 m, es el resultado de la nitrificación *in situ* o la excreción del fitoplankton (Lipschultz y Lomas 2002). La tasa de nitrificación comienza a decaer cuando las concentraciones de O_2 disminuyen por debajo de $60 \mu M$. La interacción de los procesos de nitrificación y desnitrificación es factible en la zona de la columna de agua donde el O_2 es deficiente. Hashimoto *et al.* (1983) encuentra que el proceso de nitrificación en la fosa continúa normalmente, mientras existan concentraciones mínimas de O_2 de $6 \mu M$. La inhibición total del proceso de nitrificación no ocurre hasta que se alcanzan niveles de O_2 de $2,5 \mu M$ (Lipschultz *et al.* 1990). Estos niveles de O_2 se alcanzan relativamente cerca de los 200 m en la fosa, excepto cuando un evento de ventilación extiende la profundidad de la interfase a niveles más profundos. En la figura 7a se puede observar como la porción de la columna de agua que contiene nitratos se expande hacia capas más profundas durante los eventos de ventilación de 1997 y 1998.

El máximo secundario de nitritos que se observa en algunos muestreos a profundidades mayores a los 200 m, puede ser producto de la reducción de nitratos.

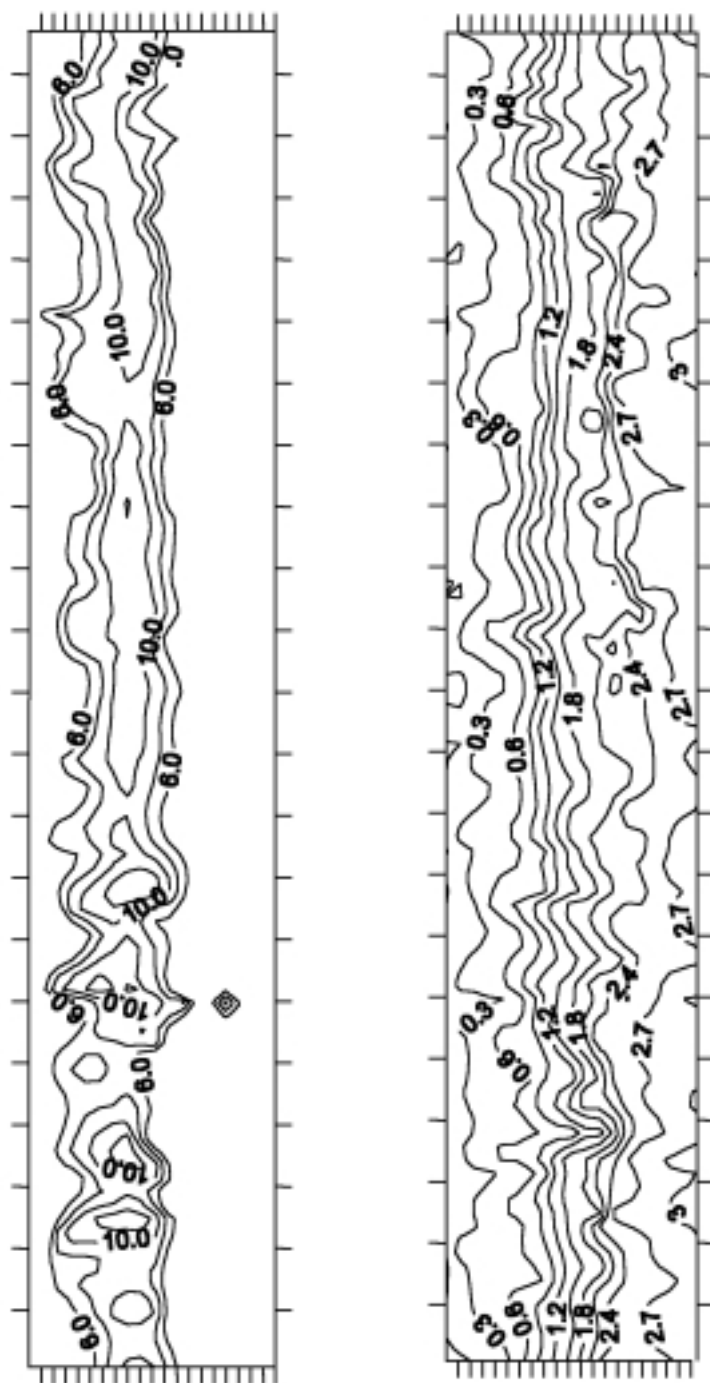


Figura 7. Serie de tiempo de nitratos (a) y fosfatos (b) entre diciembre de 1995 y octubre del 2001.

Aunque también es factible que sea producto de la intrusión de aguas caribeñas en la fosa, ya que estas aguas pueden introducir nitritos, nitratos y oxígeno a estas profundidades (Astor *et al.* 2003) para ser utilizados por las bacterias.

Una vez agotadas las fuentes de oxígeno, hay bacterias que comienzan a utilizar sulfatos como aceptor final de electrones, observándose como resultado concentraciones crecientes de H₂S después de los 250 m de profundidad hasta el fondo (Scranton *et al.* 2001).

El fósforo, en forma de fosfatos, se encuentra normalmente con concentraciones muy bajas en las capas superiores de la zona eufótica. En general, no se aprecia una distribución estacional definida, a nivel de superficie. Las concentraciones de fosfatos se mantienen por debajo de 0,1 μM la mayor parte del año excepto durante los meses de máxima surgencia (febrero y marzo), cuando se observa un incremento en los valores superficiales y en toda la columna de agua. En febrero de 1999 y 2000, las concentraciones superficiales de este compuesto superan 0,2 μM , cuando normalmente se observan por debajo de 0,05 μM . En la columna de agua no se observa la presencia de incrementos a profundidades intermedias contrario a lo que se observa en el Mar Negro (Codispoti *et al.* 1991). El nivel máximo se alcanza a 1310 m.

La surgencia en el área es reponsable en primer lugar de la inyección de nutrientes a la zona eufótica donde son aprovechados por el fitoplancton. Otros factores, como la ventilación, pueden aportar nutrientes a las capas intermedias donde las bacterias en su metabolismo aprovechan los nitratos y nitritos. La tasa a la cual estos nutrientes son aportados a la capa productiva de la columna de agua depende de la duración de los mecanismos que activan y favorecen la surgencia y la difusión vertical de los compuestos. Mecanismos como el viento no actúan en forma constante en la región sino a manera de pulsos donde períodos de vientos intensos producen una intensificación de la surgencia. Sin embargo, hay fluctuaciones en la intensidad que no necesariamente están relacionados con el viento, sino a factores dinámicos de escala media que implica fenómenos que acontecen más allá de la plataforma, tales como los giros que interactúan con el umbral de la fosa de Cariaco.

Agradecimientos. Este trabajo ha sido financiado por la National Science Foundation (NSF subvención OCE-9729284 y OCE-9216626 a Frank Muller-Karger y OCE-9415790, OCE-9711318, y OCE-9730278 a Mary Scranton y Gordon Taylor), y por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Tecnológicas (CONICIT, VENEZUELA, subvención 96280221). Estamos agradecidos al Dr. Pablo Mandazen (Hermano Ginés, Director FLASA) por su apoyo y confianza en nuestras actividades, a la tripulación del B/O Hermano Ginés (FLASA) por su apoyo en el mar, y a Ramón Varela por su liderazgo y llevar a cabo los cruceros. A Javier Gutierrez, Anadiuska Rondon, Glenda Arias, Jesús Narvaez, Juan Carlos Capelo, Federico Buitriago (todos de FLASA/EDIMAR), John Akl y Ana Lucia Odriozola (de USF) los cuales suministraron apoyo tanto en el campo como en el laboratorio. Wilfredo Patiño, Luis Sanchez, Eulogio Penot y William Senior, de la Universidad de Oriente, Cumaná, Venezuela, y Kent

Fanning de la Universidad del Sur de Florida quienes llevaron a cabo los análisis de las muestras de nutrientes.

Bibliografía.

- ASTOR, Y., F. MULLER-KARGER Y M. SCRANTON. 2003. Seasonal and interannual variation in the hydrography of the Cariaco Basin: implications for basin ventilation. *Continental Shelf Research* 25(1): 125-144.
- ASTOR, Y., J. MERI Y F. MULLER-KARGER. 1998. Variabilidad estacional hidrográfica en la Fosa de Cariaco. *Memoria Sociedad Ciencias Naturales La Salle* 53(149): 61-72.
- BRELAND, J. Y R. H. BYRNE. 1993. Spectrophotometric procedures for determination of seawater alkalinity using bromocresol green. *Deep-Sea Research* 40(3): 629-641.
- CARTON, J. A. Y Y. CHAO. 1999. Caribbean Sea eddies from TOPEX/POSEIDON altimetry and a 1/6° Atlantic Ocean model simulation. *Journal of Geophysical Research* 104(C4): 7743-7752.
- CLAYTON, T. D. Y R. H. BYRNE. 1993. Spectrophotometric seawater pH measurements: total hydrogen ion concentration scale calibration of m-cresol purple and at-sea results. *Deep-Sea Research Part I* 40(10): 2115-2129.
- CODISPOTI, L. A., G. E. FRIEDERICH, J. W. MURRAY Y C. M. SAKAMOTO. 1991. Chemical variability in the Black Sea: implications of continuous vertical profiles that penetrated the oxic/anoxic interface. *Deep-Sea Research* 38, Suppl (2): S691-S710.
- DEUSER, W. G. 1973. Cariaco Trench: oxidation of organic matter and residence time of anoxic water. *Nature* 242: 601-603.
- DICKSON, A. G. Y F. J. MILLERO. 1987. A comparison of the equilibrium constants for the dissociation of carbonic acid in seawater media. *Deep-Sea Research* 34: 1733-1743.
- ENFIELD, D. B. 1996. Relationships of inter-American rainfall to tropical Atlantic and Pacific SST variability. *Geophysical Research Letters* 23: 3305-3308.
- ENFIELD, D. B. Y D. A. MAYER. 1997. Tropical Atlantic sea surface variability and its relation to El Niño-Southern Oscillation. *Journal of Geophysical Research* 102(C1): 929-945.
- HASHIMOTO, L. K., W. A. KAPLAN, S. C. WOFSY Y M. B. McELROY. 1983. Transformations of fixed nitrogen and N₂O in the Cariaco Trench. *Deep-Sea Research* 30: 575-590.
- HERRERA, L. Y G. FEBRES-ORTEGA. 1975. Procesos de surgencia y renovación de aguas en la Fosa de Cariaco, Mar Caribe. *Boletín del Instituto Oceanográfico de la Universidad de Oriente* 14(1): 31-44.
- HOLMEN, K. J. Y C. G. ROTH. 1990. Ventilation of the Cariaco Trench, a case of multiple source competition? *Deep-Sea Research* 17(2): 203-225.
- GOYET C., A. L. BRADSHAW Y P. G. BREWER. 1991. The carbonate system in the Black Sea. *Deep-Sea Research* 38, Suplem (2): S1049-S1068.
- KATO, K. 1961. Oceanochemical studies on the Gulf of Cariaco I. Chemical and hydrographical observations in January, 1961. *Boletín Instituto Oceanográfico Universidad de Oriente* 1: 49-72.
- LIPSCHULTZ, F., S. C. WOFSY, B. B. WARD, L. A. CODISPOTI, G. FRIEDRICH Y J. W. ELKINS. 1991. Bacterial transformations of inorganic nitrogen in the oxygen-deficient waters of the Eastern Tropical South Pacific Ocean. *Deep-Sea Research* 37(10): 1513-1541.
- LIPSCHULTZ, F. Y M. W. LOMAS. 2002. A new paradigm for the formation of the primary nitrite maximum. *Eos. Transactions. Union American Geophysical AGU* 83(4), Ocean Sciences Meeting Supplement, Abstract OS-125.

- MEHRBACH, C., C. H. CULBERSON, J. E. HAWLEY Y R. M. PYTKOWICZ. 1973. Measurement of the apparent dissociation constant of carbonic acid in seawater at atmospheric pressure. *Limnology and Oceanography* 18: 897-907.
- MICHAELS A. F., A. H. KNAP, R. L. DOW, K. GUNDERSEN, R. J. JOHNSON, J. SORESENSEN, A. CLOSE, G. A. KNAUER, S. E. LOHRENTZ, V. A. ASPER, M. TUEL Y R. BIDIGARE. 1994. Seasonal patterns of ocean biogeochemistry at the U.S. JGOFS Bermuda Atlantic Time-series Study site. *Deep-Sea Research I* 41(7): 1013-1038.
- MILLERO, F. J. 1995. Thermodynamics of the carbon dioxide system in the oceans. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59(4): 661-677.
- MILLERO, F. J. 1996. Chemical Oceanography (2nd edición). CRC Press, Boca Ratón. 469 pp.
- MULLER-KARGER, F. Y R. APARICIO. 1994. Mesoscale processes affecting phytoplankton abundance in the southern Caribbean Sea. *Continental Shelf Research* 14: 199-221.
- MULLER-KARGER, F., R. VARELA, R. THUNELL, M. SCRANTON, R. BOHRER, G. TAYLOR, J. CAPELO, Y. ASTOR, E. TAPPA, T-Y. HO, M. IABICHELLA, J. J. WALSH Y J. R. DIAZ. 2000. Sediment record linked to surface processes in the Cariaco Basin. EOS. Transactions. *American Geophysical Union* 81(45): 529, 534- 535.
- MULLER-KARGER, F., R. VARELA, R. THUNELL, M. SCRANTON, R. BOHRER, G. TAYLOR, J. CAPELO, Y. ASTOR, E. TAPPA, T-Y. HO, Y J. J. WALSH. 2001. Annual cycle of primary production in the Cariaco Basin: Response to upwelling and implications for vertical export. *Journal of Geophysical Research* 106(C3): 4527-4542.
- NEREM, R. S., D. P. CHAMBERS, E. W. LEULIETTE, G. T. MITCHUM Y B. S. GIESE. 1999. Variations in global mean sea level associated with the 1997-1998 ENSO event: Implications for measuring long-term sea level change. *Journal of Geophysical Research* 26(19): 3005-3008.
- OKUDA, T., J. BENITEZ Y E. FERNANDEZ. 1969. Vertical distribution of inorganic and organic nitrogen in the Cariaco Trench. *Boletín Instituto Oceanográfico Universidad de Oriente* 8(1 y 2): 28-34.
- PAULUHN, A. Y Y. CHAO. 1999. Tracking eddies in the subtropical north-western Atlantic Ocean. Physical Chemistry. *Earth (A)* 24(4): 415-421.
- RICHARDS, F. A. Y R. F. VACCARO. 1956. The Cariaco Trench, an anaerobic basin in the Caribbean Sea. *Deep-Sea Research* 3: 214-228.
- RICHARDS, F. A. 1960. Some chemical and hydrographic observations along the north coast of South America. I. Cabo Tres Puntas to Curacao, including the Cariaco Trench and the Gulf of Cariaco. *Deep-Sea Research* 7: 163-182.
- RICHARDS, F. A. 1975. The Cariaco Basin (Trench). *Oceanography and Marine Biology Annual Review* 13: 11-67.
- SCRANTON, M. I. 1988. Temporal variations in the methane content of the Cariaco Trench. *Deep-Sea Research* 35: 1511-1523.
- SCRANTON, M. I., Y. ASTOR, R. BOHRER, T-Y. HO Y F. MULLER-KARGER. 2001. Controls on temporal variability of the geochemistry of the deep Cariaco Basin. *Deep-Sea Research I* 48: 1605-1625.
- STRICKLAND, J. D. Y T. R. PARSONS. 1972. A practical handbook of seawater analysis. Fisheries Research Board of Canada Bulletin 167, 2nd edition. 310 pp.
- THUNELL R., E. TAPPA, R. VARELA, M. LLANO, Y. ASTOR, F. MULLER-KARGER Y R. BOHRER. 1999. Increased marine sediment suspension and fluxes following an earthquake. *Nature* 398: 233-236.

- WATSON, A. J. 1995. Are upwelling zones sources or sinks of CO₂. Pp. 321-336. *En*: Summerhayes, C. P., K-C. Emeis, M. V. Angel, R. L. Smith, y B. Zeitzschel (Eds.), *Upwelling in the ocean: modern processes and ancient records*. John Wiley and Sons, England.
- ZHANG, J. Y F. J. MILLERO. 1993. The chemistry of the anoxic waters in the Cariaco Trench. *Deep-Sea Research I* 40(5): 1023-1041.

Recibido: 19 febrero 2003

Aceptado: 14 agosto 2003

Yrene Astor¹, Frank Muller-Karger², Richard Bohrer², Luis Troccoli³ y Jonathan García¹

¹ Estación de Investigaciones Marinas de Margarita, EDIMAR. Apartado 144, Porlamar, Estado Nueva Esparta 6301, Venezuela. edimar_biomarina@unete.com.ve

² College of Marine Science. University of South Florida. 140 7th Avenue South. St. Petersburg, Florida, 33701, USA. carib@carbon.marine.usf.edu

³ Escuela de Ciencias Aplicadas del Mar. Universidad de Oriente. Boca del Río, Estado Nueva Esparta, Venezuela. ltroccoli@ne.udo.edu.ve