

Memoria

de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales

ISSN: 0037-8518 Versión impresa

ISSN: 2443-4698 Versión electrónica

Memoria de la Fundación La Salle de Ciencias Naturales 2020 78(186): 65-118

Artículo

Flujo de partículas en la Fosa de Cariaco, resultados de dos décadas de observaciones 1995 - 2016

Patricia Ojeda, Ramón Varela, Robert Thunell (†),

Frank Muller-Karger, Eric Tappa

Resumen. Las partículas en el mar tienen un origen orgánico o inorgánico, y sedimentan hacia aguas profundas y el fondo; factor que mantiene la vida en el océano sin luz y proceso que secuestra carbono de la hidrósfera y atmósfera. En la Fosa de Cariaco, sitio de alta productividad biológica y aguas profundas anóxicas, se mantuvo un sistema de trampas de sedimentos durante 20 años. Se actualizan los resultados del flujo de partículas entre 225 a 1210 m de profundidad, midiendo componentes básicos como el carbono orgánico (C_{org}), nitrógeno (N), ópalo (sílice biogénica), carbonato cálcico ($CaCO_3$) y terrígenos (fracción de origen litogénico). El flujo estuvo relacionado con las condiciones climáticas e hidrográficas. La variabilidad fue notable, tanto estacional como a largo plazo. Aunque el flujo total no presentó tendencias significativas, las proporciones de los componentes C_{org} , N y ópalo disminuyeron, y los de $CaCO_3$ y los terrígenos aumentaron, reflejando cambios en la composición del fitoplancton, fuente principal de la materia orgánica. Hubo en general una correlación positiva del flujo de C_{org} , N y ópalo con la producción primaria y la clorofila, aunque en la época de surgencia no se registró correlación debido a una mayor tasa de reciclado de la materia orgánica. El zooplancton tuvo influencia en el transporte hacia aguas profundas anóxicas. Cerca del fondo en Cariaco llega un flujo de materia en partículas de $9,32 \pm 5,47 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$, del cual $0,82 \pm 0,35 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$ es C_{org} , un $2,37\% \pm 1\%$ del C fijado en superficie.

Palabras clave: Sedimentología; flujos biogénicos; carbono orgánico; sedimentos marinos; mar Caribe; Venezuela.

Particle flux in the Cariaco Basin, results of two decades of observations 1995 – 2016

Abstract. The particles in the sea have an organic or inorganic origin, and sediment towards deep waters and the bottom; factor that maintains life in the dark ocean and process that sequesters C from the hydrosphere and atmosphere. In the Cariaco Basin site with high biological productivity and deep anoxic waters, an array of sediment traps was maintained for 20 years. The results of the particle flux between 225 to 1210 m depth were updated, measuring the basic components, organic C, N, opal (biogenic silica), carbonates ($CaCO_3$) and terrigenous (fraction of lithogenic origin). The flux was related to the climatic and hydrographic conditions. The variations were notable, both seasonal and long-term. Although the total flux did not show significant trends in the time series, the proportions of the organic carbon (C_{org}), nitrogen (N) and opal components decreased over time, while calcium carbonate ($CaCO_3$) and terrigenous materials increased, reflecting changes in the composition of phytoplankton as the bulk origin of organic matter. There was a general positive correlation of C_{org} , N, and opal flux with primary production and chlorophyll at the surface, although in the upwelling season there was no correlation due to a higher recycling rate of organic matter. Zooplankton had influence on transport to anoxic deep water. Near the bottom in Cariaco comes a flux of particulate matter of $9.32 \pm 5.47 \text{ g m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ of which $0.82 \pm 0.35 \text{ g m}^{-2} \text{ month}^{-1}$ is C_{org} , which represents $2.37\% \pm 1\%$ of the C fixed on the surface.

Key words: Sedimentology; biogenic flux; organic carbon; marine sediments; Caribbean Sea; Venezuela

A la memoria de Bob Thunell quien nos trajo las trampas de partículas a Cariaco, su amplio conocimiento y su destreza para transferirlo.

Introducción

Las aguas marinas contienen una compleja mezcla de partículas que se encuentran en suspensión, vinculadas con la actividad biológica, química, geológica y física del medio marino. En su mayor parte son producidas en el mar derivadas del plancton, otras provienen de fuentes alóctonas desde las cuencas de los ríos o por vía atmosférica. Suelen presentar una composición equilibrada de materia orgánica e inorgánica. Las partículas incluyen fitoplancton, pequeños metazoos marinos vivos, agregados de bacterias, y diversos restos y excretas de todo tipo de ser vivo que habite en el mar, desde virus hasta mamíferos. Estas partículas ubicuas y abundantes se incluyen en la cadena alimenticia del mar, como fuente de nutrientes que consumen bacterias y diversos organismos filtradores. Buena parte se degradan por descomposición bacteriana y generan compuestos que se disuelven en el agua, e intervienen en el ciclo y distribución de los elementos y numerosos compuestos químicos. Una fracción de estas partículas que no llegan a desintegrarse totalmente terminan sedimentándose en el fondo del mar, donde sus compuestos pueden permanecer por mucho o poco tiempo, dependiendo de los procesos físicos, químicos, biológicos y geológicos que las desplacen, remuevan, consuman, o transformen (o no) por diagénesis en el sedimento marino (Buesseler *et al.* 2007, Honjo *et al.* 2008).

La mayoría de las partículas poseen una densidad superior a la del agua, por lo que tienden a hundirse. La cantidad y composición de las partículas que se originan, se transforman y sedimentan, desde la capa iluminada del mar hasta el fondo, es una cuestión clave en las ciencias marinas y depende de diversos factores. El flujo y el proceso de desagregación y descomposición de partículas en su traslado hacia el fondo son mecanismos de transporte de nutrientes y minerales, además de energía a zonas donde no llega la luz solar. Los organismos presentes en determinado tiempo afectan las variaciones en la cantidad y composición de las partículas en el mar, tanto las orgánicas como algunas minerales, como la sílice amorfa (ópalo) y los carbonatos generados por seres vivos. Luego el proceso de degradación y re-mineralización de la materia orgánica en su trayecto hacia fondo está catalizado y activado en buena parte por micro-organismos heterótrofos. Por tanto, estos controlan la disponibilidad de nutrientes y carbono disueltos a diferentes profundidades (Wakenham *et al.* 2012, Calvert *et al.* 2015, Raven *et al.* 2016, Jürgens y Taylor 2018). En consecuencia, el flujo de materia orgánica lleva a que una parte del carbono quede fuera del ciclo atmosférico, al disolverse en aguas profundas, y el que se mantiene en las partículas que no se degradan se incorpora al sedimento del fondo por largo tiempo. Aunque este proceso tiene efectos sutiles, dada su magnitud oceánica estos flujos tienen un gran impacto en la composición de la biosfera terrestre y en sistemas a gran escala que controlan el clima. La proporción del carbono fijado por la fotosíntesis en aguas someras del mar que llega a aguas profundas es pequeña, se estima un 1-2% a una profundidad de 1000 m (Berger *et al.* 1988, Thunell *et al.* 2000).

Las preguntas sobre qué transformaciones acontecen a las partículas en su desplazamiento hacia el fondo, y cómo esto afecta la química del agua de mar y la cadena trófica marina, han sido clave en el campo de la oceanografía desde la década de 1950. Los estudios sobre estas transformaciones biogeoquímicas se aceleraron con el desarrollo de la tecnología de las trampas de partículas o sedimentos. Estos equipos son conos o tubos colocados a diferentes profundidades de modo que interceptan las partículas en su caída hacia el fondo durante periodos determinados (Honjo y Doherty 1988, Buesseler *et al.* 2007). Muchos estudios se han llevado a cabo en aguas marinas abiertas, oxigenadas, pero hay un interés especial en estos procesos en áreas con mínimos de oxígeno disuelto o anóxicas, pues los procesos biogeoquímicos y los micro-organismos presentes son diferentes según el ambiente, aunque la eficiencia de la degradación de la materia orgánica resulta similar (Thunell *et al.* 2000). Además, los sedimentos en condiciones anóxicas tienen ventajas significativas en lo que se refiere a estudios de paleoclimatología, ya que se acumulan en el fondo en ausencia permanente de oxígeno, en consecuencia no están alterados en su estructura por la ausencia de macrofauna que remuevan, excaven o formen galerías en el sedimento. Más aún, los sedimentos anóxicos y euxínicos conservan mejor los compuestos químicos orgánicos, al estar inhibida la oxidación y ser posible la sulfuración de la materia orgánica (Canfield 1989, Raven *et al.* 2016). Esto es básico para la interpretación de los análisis de los sedimentos en aguas profundas, que contienen información y señales fechables por la formación de varvas (capas de diferente grosor y composición formadas en tiempos diferentes, una sobre otra).

Se busca relacionar los procesos de generación y desagregación de partículas en las aguas superficiales con la composición que presentan, y al final con lo que queda preservado en los sedimentos. Todavía es poco conocido cuánto se produce o se pierde de este material en un ciclo estacional o a más largo plazo. La relación entre la composición y abundancia de partículas a diferentes profundidades, tiene que interpretarse en el marco de condiciones ambientales cambiantes, y en la medida posible con la cantidad y tipo de organismos presentes. De particular importancia son la diversidad, abundancia y productividad del bacterio-, fito-, y zoo-plancton en la capa superficial del mar. Las transformaciones que suceden en la composición de las partículas en diferentes niveles de profundidad definen y están definidas por la biología y la química de aguas marinas, y esto a su vez determina qué es lo que se deposita en el fondo del mar.

En el oriente del mar Caribe venezolano se encuentra la Fosa de Cariaco, donde se llevó a cabo un estudio intensivo de las transformaciones del flujo vertical de partículas durante el proyecto Serie de Tiempo Oceanográfica CARIACO (Muller-Karger *et al.*, 2013, 2019). Desde noviembre de 1995 a mayo 2016 el proyecto tuvo como uno de sus objetivos medir la cantidad y composición del flujo de material particulado en descenso, desde el límite de la zona eufótica hasta el fondo de la fosa. Estas mediciones se realizaron de modo casi continuo durante 20 años, empleando una serie de trampas ancladas en el sector oriental de la fosa que interceptaban el flujo de partículas. Estas mediciones documentaron la variabilidad estacional e interanual debida a condiciones hidrográficas y climáticas, y proveyeron datos críticos para una mejor interpretación y calibración de las varvas de los sedimentos en registros paleo-climáticos.

Basados en estas muestras se publicaron un número de trabajos que abarcaron diversos aspectos: 1- Sobre el análisis y variación del flujo de partículas y sus componentes (Thunell *et al.* 2000, 2007, Goñi *et al.* 2003, 2009, Smoak *et al.* 2004, Woodworth *et al.*, 2004; Lorenzoni, *et al.* 2009, 2012, Montes *et al.* 2012); 2- El estudio de foraminíferos y quistes de dinoflagelados y sus relaciones con cambios ambientales, de alcance en paleo-climatología (Tedesco *et al.* 2007, McConnell *et al.* 2009, Werjnet *et al.* 2013, Wurtzel *et al.* 2013, Marshall *et al.* 2013, 2015, Bringué *et al.* 2018, 2019); 3- El análisis de compuestos orgánicos clave para obtener pruebas de la presencia de determinados micro-organismos en las aguas tanto del fitoplancton como de bacterias (Goñi *et al.* 2004, Wakenham *et al.* 2010, 2012, Turich *et al.* 2013); 4- Ensayos sobre la actividad microbiana sobre las partículas en sedimentación (Taylor *et al.* 2009); 5- El estudio detallado de los compuestos con elementos nutrientes esenciales C, N, Si, P, S entre otros, en su desplazamiento hasta el fondo (Muller-Karger *et al.* 2000, 2004, Thunell *et al.* 2004, 2008 Benitez-Nelson *et al.* 2004, 2007, Li *et al.* 2011, Montes *et al.* 2013, McParland *et al.* 2015, Calvert *et al.* 2015); 6- Se hizo un aporte novedoso sobre la sulfuración de la materia orgánica en las partículas y su preservación en los sedimentos y el registro fósil (Raven, *et al.* 2016); 7- Los tipos de compuestos minerales de origen terrígeno en las partículas y los sedimentos (Martinez *et al.* 2007, 2010, Elmore *et al.* 2009), y 8- La interpretación paleo-climática de los análisis realizados en la Fosa (Peterson y Haug, 2006, Goñi *et al.* 2006; Black *et al.* 2004, 2011). Un compendio de los resultados generales, hidrográficos, químicos, microbiológicos y sedimentológicos se publicó recientemente por Muller-Karger *et al.* (2019).

El presente trabajo muestra una actualización de los resultados de las mediciones básicas de flujo de partículas en la Fosa de Cariaco, que aporta doce años más de nueva información a lo ya publicado (Thunell *et al.* 2007). Nuestro enfoque ha sido en determinar las variaciones estacionales en el flujo y la composición de las partículas, las tendencias a largo plazo en estas variables, y su relación con los cambios ambientales de las aguas superficiales. En particular nos enfocamos en variables biológicas de la zona eufótica, como la producción primaria y la biomasa del plancton, que en buena parte definen las características del flujo, donde se aprecian variaciones que dependen de la dinámica de las poblaciones de esa comunidad.

Materiales y métodos

Descripción de la zona

La Fosa de Cariaco es una formación geológica peculiar, se trata de una depresión extendida de este a oeste originada y limitada por una serie de fallas transversales, confinada en la plataforma continental al suroriente del mar Caribe, que alcanza los 1400 m de profundidad (Schubert 1982, Macsotay *et al.* 2009). La Fosa se delimita al sur por la plataforma de Unare, y por el norte con una dilatada prominencia submarina desde la isla de Margarita hasta el cabo Codera (~200 km) la cual emerge en la isla de La Tortuga (figura 1). Umbral que en su mayor parte es menor a 100 m de profundidad, con dos

pasos de 145 y 135 m, lo que permite el intercambio amplio del agua superficial del mar Caribe suroriental. En cambio, las aguas profundas están aisladas en una cuenca que inhibe el movimiento horizontal, y el intercambio de agua por difusión vertical es limitado por una fuerte pycnoclina debido al gradiente de temperatura. De hecho, se estima que la renovación de las aguas profundas ocurre en lapsos variables de hasta 200 años (Scranton *et al.*, 1987). A causa de ese pobre intercambio la Fosa de Cariaco se ha mantenido anóxica al menos desde la última glaciación (~12.000 años, Peterson y Haug, 2006). Este déficit de oxígeno es además consecuencia de la alta productividad en aguas superficiales, por efecto de la surgencia costera que se manifiesta en varias localidades en el sur del Caribe (Rueda-Roa y Muller-Karger 2013, Lorenzoni *et al.* 2017). Esta producción primaria del fitoplancton y su consumo por el zooplancton generan partículas de origen orgánico, mientras que la proximidad al continente aporta una porción significativa de material de origen terrígeno. La influencia de estas dos fuentes de partículas distintas se alterna estacionalmente en un ciclo anual relacionado a procesos atmosféricos que impactan en la oceanografía regional. En conjunto causan un flujo de material en partículas, donde una fracción se incorpora a los sedimentos del fondo quedando allí registrada la alternancia estacional (Thunell *et al.* 2000, Martinez *et al.* 2007, Lorenzoni *et al.* 2009; 2019, Bout-Roumazelles *et al.* 2013).

La surgencia a lo largo del margen sur del mar Caribe es un fenómeno oceanográfico que marca el cambio estacional en la región. Depende de la intensidad de los vientos alisios del NE acorde con la posición latitudinal de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). La ubicación de la ZCIT regula además el régimen de

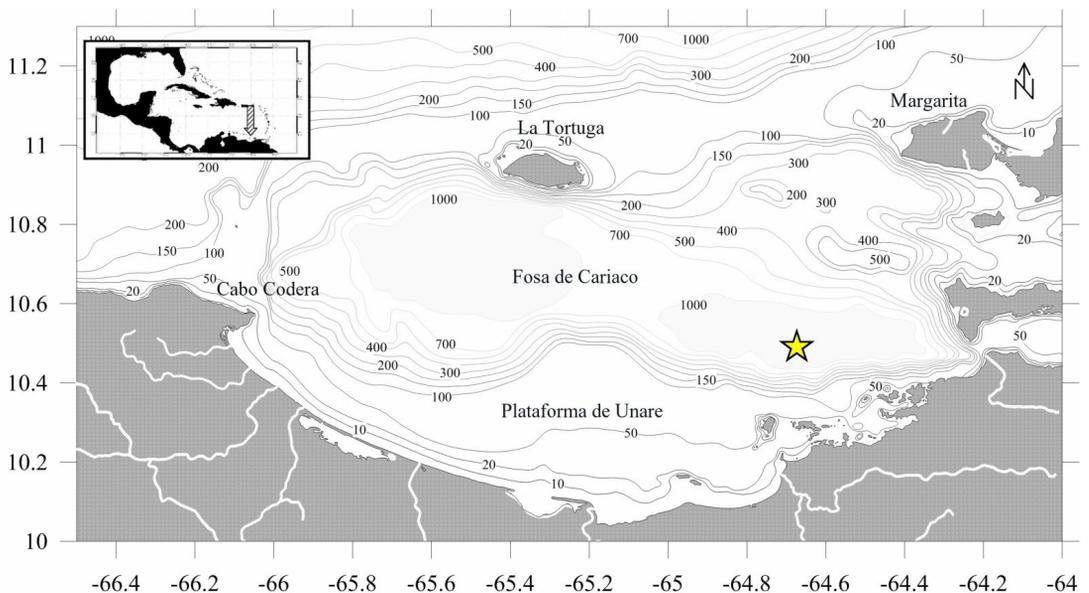


Figura 1. Mapa de la región de la Fosa de Cariaco con las curvas de batimetría del fondo marino en metros. La estrella indica la posición que ocuparon las trampas de partículas, próxima a la estación de la serie de tiempo oceanográfica CARIACO 10° 30' N 64° 40' O.

precipitación anual en el norte del continente suramericano, y por tanto los aportes de agua dulce y sedimentos terrígenos hacia el mar (Varela y Velásquez 2017). Los procesos oceanográficos regionales y las condiciones geológicas locales definen tres sistemas en la Fosa de Cariaco. Uno es la capa superficial hasta los ~250 m de profundidad, con un ecosistema similar al del mar Caribe sur, que varía según los cambios atmosféricos y climáticos. La siguiente capa es una estrecha zona de transición óxido-reductora entre los ~ 250 m y ~ 350 m, esta transición va desde aguas hipóxicas hasta llegar a la anoxia. En esta zona se ordenan en profundidad distintos tipos de microorganismos, en función del gradiente de oxígeno (O_2) y sulfhídrico (H_2S). Se nutren de productos de la descomposición de materias disueltas y en partículas. Actúan con diversos ciclos metabólicos típicos de ambientes hipóxicos y anaerobios, que utilizan óxidos de N, Fe, Mn y S. Un grupo de estas bacterias crecen por quimiosíntesis estimulada por compuestos reductores de sulfuro (Jürgens y Taylor 2018, Taylor *et al.* 2018, Suter *et al.* 2018, Louca *et al.* 2019). En la zona debajo de la capa de transición, desde los ~350 m hasta el fondo las aguas son anóxicas, que por el incremento progresivo del H_2S y el CH_4 se consideran euxínicas. Aquí se encuentran aguas pobladas solo por arquea, bacteria, virus y protozoarios adaptados a esas condiciones con una baja actividad biológica. Esta zona profunda muestra variaciones mínimas en la temperatura, salinidad y compuestos químicos (NH_4^+ , $PO_4^{=}$, CO_2 , y $Si(OH)_4$) que se incrementan muy lentamente con los años, pero donde al menos el H_2S fluctúa debido a cambios físicos por eventos de oxidación súbita, como ventilaciones por intrusiones de agua externa con oxígeno o deslizamientos de sedimentos por causas sísmicas (Scranton *et al.* 2001; Scranton *et al.* 2006, Scranton *et al.* 2014).

Toma de muestras y análisis de las variables

El proyecto CARIACO inició un estudio de serie de tiempo oceanográfica en la cuenca oriental de la Fosa de Cariaco en noviembre de 1995 (figura 1) (Muller-Karger, *et al.* 2019). El objetivo era examinar los cambios de las condiciones hidrográficas del mar y del flujo vertical partículas hacia el fondo a largo plazo. La estación CARIACO se estableció a $10^{\circ}30'N$ y $64^{\circ}40'O$, la cual se visitó con relevante regularidad una vez al mes con el B/O Hermano Ginés, dotado de un equipo de roseta con botellas Niskin de 8 L y un CTD SBE-25, para la obtención de muestras de agua para análisis químicos y medición de variables físicas. Durante estos cruceros se recolectaron muestras de fitoplancton y zooplancton. Además, hubo cruceros bianuales independientes para el estudio de la biogeoquímica y microbiología en las aguas profundas con metodología específica para esos estudios (Taylor *et al.* 2006).

Para la medición del flujo de partículas se empleó el anclaje de una línea con cuatro trampas de partículas del tipo Mark VI *McLane Research Laboratories Inc.* (figura 2), que estuvo en operación por periodos consecutivos de seis meses, fondeada a 1380 m y situada a $1^{\circ} 30'$ al este de la estación hidrográfica. La línea con las trampas se mantuvo en posición vertical mediante una boya sumergida, conjunto que se separaba del lastre por medio de liberadores acústicos de marca *Benthos* para su recuperación. Las trampas estuvieron ubicadas en las profundidades de 225, 410, 810, 1210 m, por tanto en la zona hipóxica – anóxica – euxínica. En los primeros siete años de registro, la ubicación de las trampas en la línea varió

entre 230 – 275 m; 410 – 455 m; 810 – 930 m y 1200 – 1255 m; consideramos que estas diferencias no tienen inferencia en el examen de los resultados a cada nivel de profundidad y se tomó un criterio uniforme. Una quinta trampa a 152 m fue añadida a la línea a partir de noviembre de 2003 pero sus resultados no fueron incluidos en los análisis que se muestran en este trabajo, ya que esta trampa frecuentemente tenía otros organismos invasores vivos, que contaminaban la muestra al morir en la trampa a consecuencia de formalina añadida. Además, la diferencia en años de muestreo no era aplicable para el objetivo de comparar con la serie de tiempo más larga de las otras trampas.

Estas trampas en forma de embudo interceptaron el flujo de partículas durante 14 días de modo automático y sincronizado a diferente profundidad. El área de la boca superior del embudo que colecta las partículas era de 0,5 m² (figura 2). Al final del embudo un envase receptor recibía el material fijándose en formalina neutralizada con bórax disuelto en agua de mar hiper-salina, que previamente contenía el recipiente. Cada trampa tenía una serie de 13 envases que permitían tomar muestras de modo continuo durante seis meses. Inicialmente se usaron envases de 500 mL, pero luego del primer año se cambiaron a envases de 1 L para evitar que se llenaran completamente durante los picos de masivos de flujo detectados al final de la época de surgencia (ver más adelante las causas). Al cumplir los seis meses se soltaban las trampas al accionar los liberadores acústicos y se traían a la superficie para recuperar las muestras. En cada salida de recuperación también se le dio mantenimiento al equipo, se colocaron nuevos envases, y se volvió a lanzar el anclaje para el siguiente ciclo de muestreo.

En algunos meses el sistema estuvo expuesto a flujos abundantes que atascaron la salida del embudo. Estos episodios bloquearon la recolección de partículas en los envases de las trampas, llegando a causar el fracaso de varias muestras

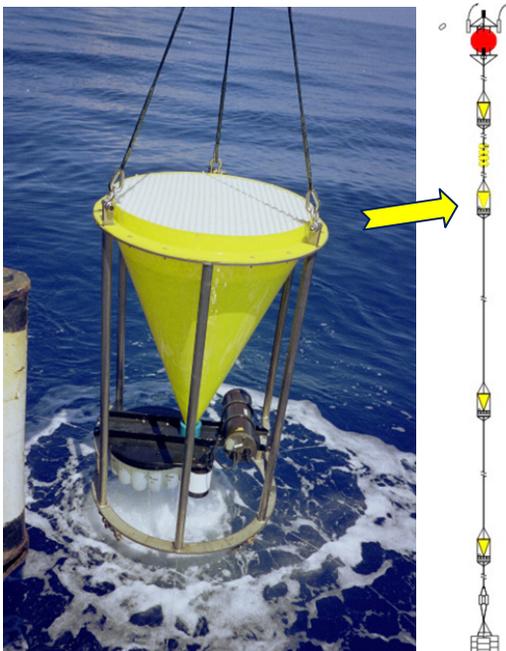


Figura 2. Trampa de partículas Mark VI (*McLane Research Laboratories Inc.*) utilizada en la serie de tiempo CARIACO. La boca del embudo tiene un área de 0,5 m² y un panel deflector para reducir la turbulencia en el interior de la trampa. El cono dirige las partículas hacia un carrusel de envases colocados en la base. Cada 14 días un nuevo envase se coloca en rotación automática para recolectar el material del siguiente periodo de muestreo. El sistema utilizó 4 trampas colocadas en una línea fondeada a 1380 m de profundidad, y con una boya sumergida que la mantenía vertical y posibilitaba su recuperación.

consecutivas. Este impedimento técnico fue el motivo de cambiar a envases receptores con el doble de volumen, pero aún eso no fue suficiente en algunas ocasiones. Otros incidentes eventuales fueron por problemas en el mecanismo de rotación de los envases de la trampa, fallo de los liberadores, o incluso una rotura de la línea. En la tabla 1 se especifican los períodos de toma de muestras con inconvenientes. No obstante, se obtuvieron muestras completas continuas durante periodos prolongados de hasta 63 meses. Se contó con unas 700 muestras, y cada una de estas dio origen a 6 registros de los componentes básicos.

Las muestras se mantuvieron preservadas en una solución de formalina al 3% tamponada a pH 8,0 y refrigeradas, salvo durante el transporte internacional por courier, hasta proceder al análisis en los laboratorios del "Department of Geological Sciences, University South Carolina, Columbia". Cada muestra se fraccionó de forma precisa y un cuarto de la misma fue para los análisis biogeoquímicos. Previo al análisis químico, se enjuagaron las muestras con agua des-ionizada y con centrifugación moderada para lavar las sales y la formalina, luego se examinaron las muestras al microscopio y todos los organismos que se estimó que llegaron a las muestras nadando (vivos) fueron extraídos al no considerarse parte del flujo. Esta sub-muestra se secó mediante calor en un horno a 50°C o por liofilización para determinar el peso seco total del material en partículas. El flujo se calculó en las unidades $\text{g m}^{-2} \text{ día}^{-1}$. Para estimar la fracción de carbono orgánico (C_{org}) en la muestra primero se procedió a acidificarla, para remover el carbono inorgánico asociado con el CaCO_3 , y posteriormente se utilizó un analizador *Perkin-Elmer 2400 Elemental Analyzer* para medir el CO_2 producido por combustión a alta temperatura. El contenido total de N en el material en partículas también se midió con ese equipo. La sílice opalina de origen biogénico se determinó con la técnica de lixiviación química, el ópalo ($\text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$) se estima como 2,4 veces el peso porcentual del silicio disuelto ($\% \text{Si}_{\text{opal}}$). El C total inorgánico y el contenido en el CaCO_3 asociado de origen biogénico, se cuantificó mediante un analizador automático por acidificación al vacío y transformación a CO_2 , evaluado por diferencia de presión. Material mineral de origen litogénico, denominado aquí como terrígeno, se determinó por diferencia en el balance del ópalo, carbonatos de procedencia biogénica y materia orgánica en referencia al flujo total. Se estimó en este caso a la materia orgánica como 2,4 veces la cantidad de C orgánico medido. Los métodos detallados, sus errores promedio, y verificación de las estimaciones para estas variables se encuentran en Goñi *et al.* 2003; 2009 y Thunell *et al.* 2007; 2008.

La cantidad y composición de las partículas que conforman el flujo vertical de material orgánico se relacionaron con variables atribuibles a organismos vivos o sus restos, sobre todo del plancton, que viven en la capa superior del mar. Para evaluar la abundancia de fitoplancton se empleó la concentración de clorofila *a* medida por el método fluorométrico en extractos en metanol. La producción primaria del fitoplancton se estimó por el método de asimilación de ^{14}C mediante incubación *in situ*. Ambas mediciones se reportan integradas por m^2 hasta 100 m de profundidad, designadas como [Chl-*a*] y [PP]. Se hicieron también medidas del C orgánico presente en las partículas en suspensión en el mar integradas hasta los 160 m, denotado como [POC]. Los métodos de obtención de muestras y de

análisis para las variables indicadas se describen en detalle en el manual de métodos del proyecto (Astor, *et al.*, 2013). Se consideró además la biomasa de zooplancton (peso seco en g m^{-2}) integrada en los primeros 200 m de profundidad [B_{Zoo}], obtenida con un bongo aparejado con dos redes con mallas de 200 μm y 500 μm . Las mediciones indicadas en este párrafo fueron realizadas durante un día cada mes entre noviembre 1995 y abril 2016 (a partir de octubre 2001 para el zooplancton).

Proceso de los datos.

Los datos de flujo de partículas, concentración de clorofila y POC, productividad primaria, y de variables ambientales como temperatura, salinidad y densidad, están disponibles en la base de datos de CARIACO *Ocean Time Series data, Master_Hydrography and Sediment trap* (http://imars.marine.usf.edu/WebPageData_CARIACO/). Se empleó la información difundida para febrero 2018. Un análisis de las variables hidrográficas y sus tendencias para el periodo que abarca este trabajo se presenta en Astor, *et al.* 2017 y Muller-Karger *et al.* 2019. En la base de datos las mediciones del flujo total y por componente del material en partículas se expresan en $\text{g m}^{-2} \text{d}^{-1}$. Para el presente trabajo los valores del flujo se llevaron a $\text{g m}^{-2} \text{mes}^{-1}$ para todas las variables o componentes. Los valores de flujo se promediaron a un periodo mensual para facilitar los cálculos de las tendencias en las series de tiempo y la comparación con las variables biológicas obtenidas cada mes. Los cálculos de los flujos mensuales se basaron en los valores obtenidos de las muestras sucesivas obtenidas cada 14 días de muestreo continuo. El valor mensual es la integración de las mediciones diarias por del número de días de cada lapso de muestreo circunscritos dentro cada mes. Para efectos de comparaciones entre los valores mensuales y diarios (de uso más frecuente en la bibliografía) se puede emplear el factor 30,416.

Se calcularon once fracciones cuyos cocientes se aplican como índices utilizando los valores de flujo mensual por componente, que aportan información sobre las relaciones entre los componentes. Estas fracciones fueron: C_{org}/N ; $F_{\text{total}}/T_{\text{errig}}$; $\text{Opalo}/C_{\text{org}}$; $\text{Opalo}/\text{CaCO}_3$; $\text{CaCO}_3/C_{\text{org}}$; $T_{\text{errig}}/\text{CaCO}_3$; $F_{\text{total}}/\text{CaCO}_3$; $T_{\text{errig}}/C_{\text{org}}$; $T_{\text{errig}}/\text{Opalo}$; $F_{\text{total}}/C_{\text{org}}$; $F_{\text{total}}/\text{Opalo}$. Se analizó luego la estacionalidad y la tendencia a largo plazo en los cocientes de esas fracciones.

Para el cálculo de promedios y correlaciones se utilizaron todos los valores disponibles, en cambio, para la series de tiempo se consideraron solo aquellas mediciones hasta octubre 2014 por la falta de registros más continuos luego de esa fecha (tabla 1). Para determinar las tendencias en las series de tiempo de los diferentes parámetros se des-estacionalizaron previamente las mediciones, restando el valor promedio de la serie de tiempo (1995 – 2014) del mes correspondiente al valor medido. También se calculó el grado de significancia estadística de la tendencia y la tasa anual lineal por el método de mínimos cuadrados. Otros cálculos estadísticos incluyeron análisis de frecuencia en series de tiempo, correlaciones y regresiones múltiples, selección de valores extremos mediante cajas Wishker, test de comparación de variables Mann Whitney y análisis de componentes principales. Para éstos últimos estadísticos se empleó el programa *Statgraphics Centurion*®.

Tabla 1. Cronograma de la toma de muestras en la estación CARIACO. Áreas en blanco son meses en los cuales se obtuvieron las muestras completas. Indicándose en negro aquellos meses sin ningún registro, y en gris los meses con mediciones incompletas por faltar en alguna profundidad o variable.

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
1996					■	■	■	■	■	■	■	
1997					■							
1998					■							
1999					■	■	■	■	■	■	■	
2000					■	■	■	■	■	■	■	
2001					■	■	■	■	■	■	■	
2002			■	■	■	■	■					
2003												
2004												
2005												
2006												
2007										■	■	
2008		■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2009	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2010											■	■
2011				■	■	■	■					
2012					■	■						
2013	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2014	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2015	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
2016	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
Nº meses	1	1	1	3	8	5	4	3	4	3	5	2
Nº meses	4	5	6	5	3	2	2	4	3	5	2	3
■	Sin datos											
■	Datos incompletos por variable o profundidad											

Resultados

Flujo total y por componente de la masa en partículas

Los valores promedio del flujo total de partículas y de sus componentes en función de la profundidad se muestran en la tabla 2, basados en el periodo noviembre 1995 a abril 2016. La masa del flujo total fue de $26,45 \pm 9,89 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$ en la trampa a 225 m y disminuyó a $9,32 \pm 5,47 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$ en la más profunda. El flujo de C orgánico (C_{org}) fue de $2,08 \pm 0,76 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$ en la trampa superior y descendió a $0,82 \pm 0,35 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$ en la situada a 1210 m. Los flujos de ópalo y carbonato mostraron valores de similar magnitud entre ambos, de 1,13 a $3,54 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$. El flujo de terrígenos fue el componente que más aporta, constituyendo la mitad o más en relación al flujo total (promedio $57,1 \pm 7,5\%$). El flujo de C_{org} , ópalo, nitrógeno total (N) y terrígenos, mostró una merma similar en profundidad en referencia a los 225 m (60,3% – 62,5%), que en el caso de los carbonatos fue algo mayor (67,8%). La disminución del flujo con la profundidad se considera que presenta un decrecimiento exponencial en el mar (Pace *et al.* 1987, Thunell *et al.* 2000), distribución que se registró en CARIACO en buena parte de los meses, en particular de julio a diciembre. Sin embargo, en CARIACO se encontraron variaciones al patrón general que se manifestaron de modo periódico. Así, los flujos a 410 m resultaron similares o mayores a los de 225 m en el promedio de los meses de febrero, marzo y abril (época de surgencia), se apreció un decrecimiento lineal en el promedio de enero, y el flujo a 810 m igualó al de 410 m en el mes de noviembre. En la figura 3 se muestran las variantes encontradas en los perfiles del flujo de masa de partículas en base a los promedios mensuales.

Tabla 2. Flujos de la masa total de partículas y de sus componentes en $\text{g m}^{-2} \text{mes}^{-1}$ en la estación CARIACO (en **negritas**), basados en los promedios y su desviación estándar mensuales entre noviembre 1995 y abril 2016: **n obs** = número de observaciones; **prof** = profundidad en m; **Corg** = carbono orgánico; **N** = nitrógeno total; **Ópalo** = sílice de origen biogénico; **CaCO₃** = carbonatos; **Terrígenos** = componente mineral de origen terrestre o litogénico. Se muestran además los promedios separados por semestre (enero – junio, julio – diciembre) y el porcentaje de **variación** de esos promedios entre semestres. Se indica el porcentaje de **disminución** del flujo entre la trampa superior A y la más profunda D.

Trampa, n obs.	prof (m)	Flujo total	Corg	N	Ópalo	CaCO ₃	Terrígenos
A (n=169/174)	225	26,45 ± 9,89	2,08 ± 0,76	0,30 ± 0,11	2,91 ± 1,16	3,54 ± 1,25	14,94 ± 6,22
A 1er semestre		28,71 ± 14,05	2,46 ± 0,90	0,36 ± 0,13	3,58 ± 1,17	3,65 ± 1,82	15,73 ± 8,92
A 2do semestre		25,31 ± 3,68	1,80 ± 0,41	0,26 ± 0,06	2,39 ± 0,78	3,63 ± 0,61	14,66 ± 2,31
B (n=171/175)	410	19,74 ± 6,14	1,52 ± 0,60	0,22 ± 0,09	2,31 ± 1,22	2,56 ± 0,65	11,22 ± 3,65
B 1er semestre		24,32 ± 4,84	1,98 ± 0,48	0,29 ± 0,08	3,18 ± 1,00	2,99 ± 0,47	13,46 ± 3,72
B 2do semestre		16,19 ± 3,86	1,11 ± 0,26	0,16 ± 0,04	1,48 ± 0,65	2,23 ± 0,54	9,72 ± 2,57
C (n=162/171)	810	13,69 ± 5,14	1,09 ± 0,40	0,15 ± 0,06	1,72 ± 0,78	1,65 ± 0,61	7,76 ± 3,36
C 1er semestre		16,42 ± 4,08	1,40 ± 0,19	0,20 ± 0,03	2,29 ± 0,40	1,80 ± 0,65	8,82 ± 3,37
C 2do semestre		11,61 ± 4,76	0,83 ± 0,31	0,11 ± 0,04	1,21 ± 0,59	1,58 ± 0,58	7,03 ± 3,12
D (n=154/178)	1210	9,32 ± 5,47	0,82 ± 0,35	0,12 ± 0,05	1,13 ± 0,58	1,14 ± 0,65	5,60 ± 3,73
D 1er semestre		11,18 ± 5,95	1,03 ± 0,24	0,15 ± 0,04	1,44 ± 0,36	1,27 ± 0,77	6,20 ± 4,19
D 2do semestre		8,66 ± 4,90	0,67 ± 0,34	0,09 ± 0,05	0,89 ± 0,59	1,14 ± 0,60	5,40 ± 3,37
% disminución de 225 a 1210 m		64,7%	60,3%	61,1%	61,3%	67,8%	62,5%
% variación entre semestres							
A	225	12,8%	31,4%	31,9%	40,7%	0,7%	7,1%
B	410	41,2%	57,3%	61,2%	73,2%	29,4%	33,3%
C	810	35,1%	52,2%	53,7%	62,6%	13,1%	23,1%
D	1210	26,5%	44,7%	47,7%	48,8%	10,9%	14,3%

La variación del flujo promedio mensual de la masa total y de sus componentes presentó un ciclo estacional, con similitudes y diferencias entre profundidades y componentes (figura 4). El máximo a 225 m se produjo en mayo para todas las variables, al final de la temporada de surgencia y de alta producción primaria, en cambio los valores mínimos se registraron en febrero o abril para el flujo total, CaCO₃ y terrígenos, y en octubre para el C_{org}, ópalo y N, al final del período de estabilidad y baja producción. Las trampas a 410 y 810 m muestran un patrón similar con máximos en mayo para el flujo total, CaCO₃ y terrígenos, y en marzo para el C_{org}, ópalo y N. Los mínimos para todas las variables se dieron en octubre a 410 m y en septiembre a 810 m. A 1210 m los resultados fueron uniformes con máximos en mayo y mínimos en octubre para todas las variables. Destacan una disminución relativa del flujo en abril anterior al máximo de mayo a 225 y 410 m, y un incremento del flujo total de 2 a 6 veces de octubre a diciembre a 810 y 1210 m, mientras que a 225 y 410 m solo aumentó en un factor entre 1,2 y 1,6. Si se analizan los valores de flujo promediados por semestre se aprecian ciertas diferencias (tabla 2). El flujo total, terrígenos, y en mayor medida el carbonato muestran una menor diferencia estacional en comparación con la del ópalo, el C_{org} y N; diferencias que son más pronunciadas en las trampas por debajo de 225 m. Los registros en las tres trampas profundas muestran una mayor fluctuación a frecuencias más altas que la estacional, comparado con la trampa superior.

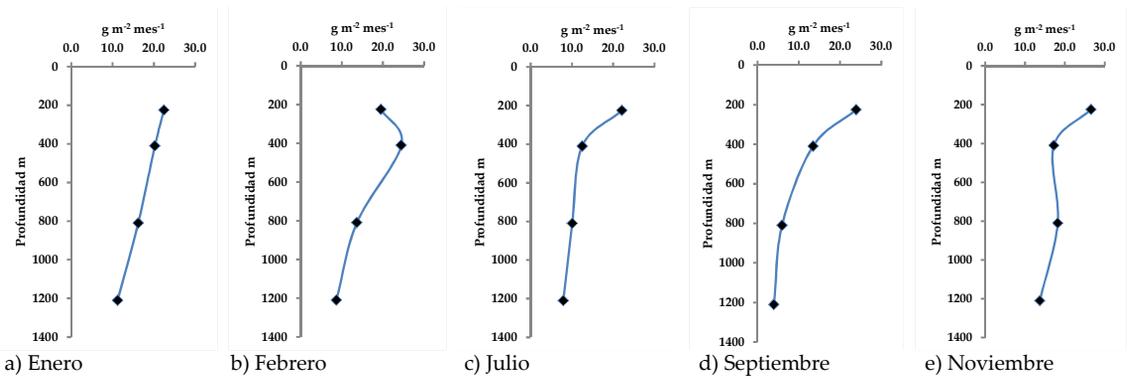


Figura 3. Tipos de perfiles empleando los promedios mensuales del flujo de la masa total de partículas por profundidad: a) perfil con una tasa de disminución lineal obtenido con los datos de enero; b) trazo que indica un flujo mayor en la trampa a 410 m para los promedios de febrero, marzo y abril; c) perfil con un flujo relativamente mayor a 225 m observado con los promedios de mayo a julio, en octubre y diciembre; d) trazo exponencial típico generado con los valores de agosto y septiembre; e) perfil con un flujo similar a 410 y 810 m de profundidad para el promedio de noviembre.

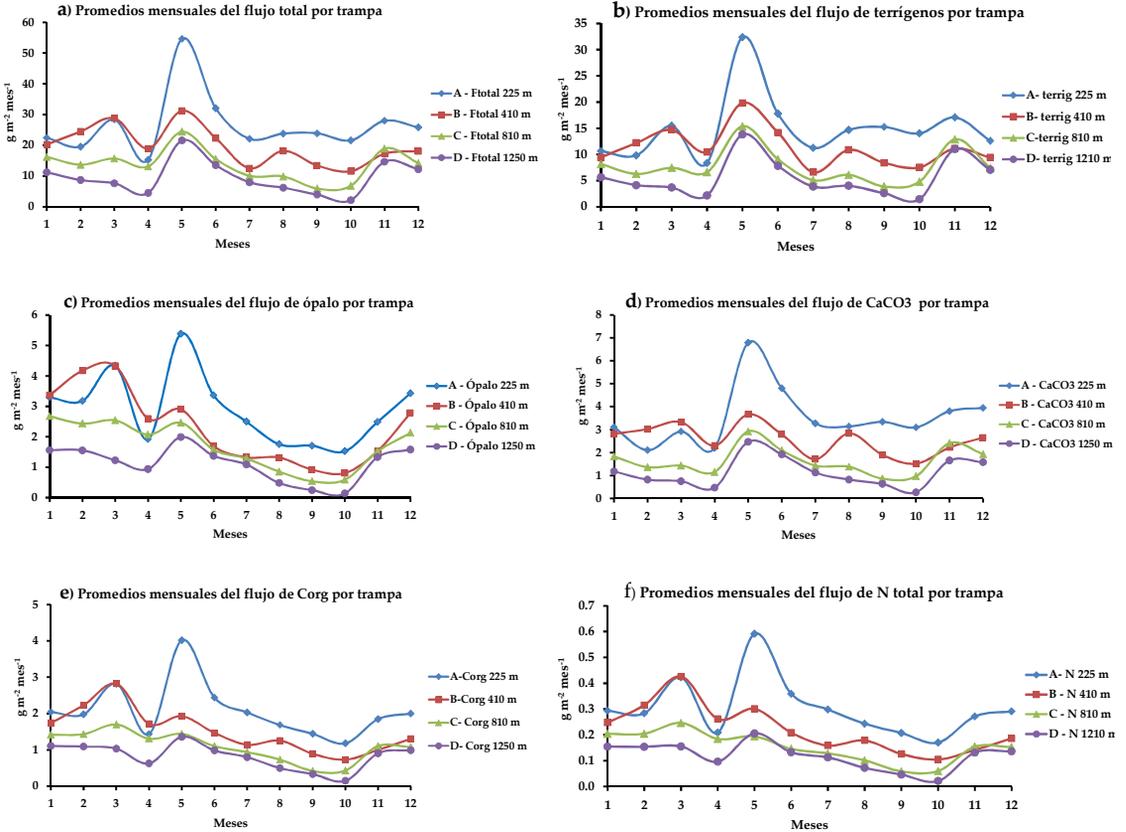


Figura 4. Variación anual promedio del flujo total de partículas y de sus componentes a cuatro profundidades (A: 150 m, B: 410 m, C: 810 m, y D: 1210 m). Gráficas: (a) masa total; (b) terrígenos; (c) ópalo; (d) carbonatos; (e) C orgánico y (f) N total. Promedios basados entre 154 a 178 mediciones con las trampas de partículas en la estación CARIACO de noviembre de 1995 a abril de 2016.

La variación del flujo de partículas a largo plazo se mostró irregular, tanto para la masa total como la de sus componentes, como se aprecia en las series de tiempo de las cuatro trampas (Anexo 1 a 4 págs. 109 - 112). Con el fin de determinar si existen tendencias en los flujos a largo plazo se tomaron en cuenta los datos disponibles desde noviembre de 1995 a julio de 2014, ya que las mediciones en los dos años siguientes fueron incompletas o bien inexistentes durante varios meses sucesivos (tabla 1). Se realizaron análisis de estimación lineal por mínimos cuadrados a los datos de flujo des-estacionalizados, para determinar tendencias en las seis variables de flujo en las cuatro profundidades. Los resultados indicaron que solo el carbonato en las tres trampas más profundas mostró tendencias significativas. Así a 410 m se calculó una tasa de incremento anual del 5,1% ($p=0,001$), a 810 m fue de 3,4 % anual ($p=0,020$) y a 1210 m 3,7 % anual ($p=0,014$). No obstante, en la serie de tiempo se apreció que las tasas fueron variables, cambiando de sentido en etapas de varios años. Así hubo una tendencia al aumento del flujo del carbonato, masa total y terrígenos en las trampas intermedias de 1996 hasta el año 2009. Pero al incorporar los valores de los años 2011 - 2014 estos descendieron, y esa tendencia dejó de ser significativa excepto para el carbonato. Los componentes relacionados con la materia orgánica, como el C_{org} y ópalo no mostraron tendencias evidentes en ningún sentido.

Los componentes que definen la composición de la masa de las partículas estuvieron correlacionados entre sí a todas las profundidades. La tabla 3 muestra que las relaciones más estrechas ocurrieron entre el flujo de carbono y nitrógeno, y entre el flujo total y el de los terrígenos. Las correlaciones más laxas se establecieron entre el ópalo con los terrígenos y carbonatos, y estos últimos con el C_{org} . En todos los casos las correlaciones son significativas. En la figura 5 se muestran cuatro ejemplos del nivel de correlación encontrados entre variables.

Tabla 3. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre las variables del flujo de partículas para las trampas colocadas en la Fosa de Cariaco a cuatro profundidades con los datos disponibles desde 1995 a 2016. Número de observaciones ($n=153-172$ según profundidad) todos los coeficientes son significativos ($p<0,05$). C_{org} = carbono orgánico, N= nitrógeno total, Ópalo= sílice biogénica, $CaCO_3$ = carbonatos, Terrig.= componente de partículas de origen terrígeno, litogénico.

A 225 m	C_{org}	N	Ópalo	$CaCO_3$	Terrig.	C 810 m	C_{org}	N	Ópalo	$CaCO_3$	Terrig.
F total	0,848	0,836	0,681	0,877	0,963	F total	0,835	0,823	0,703	0,861	0,964
C_{org}		0,995	0,816	0,730	0,699	C_{org}		0,992	0,799	0,659	0,697
N			0,810	0,717	0,685	N			0,803	0,638	0,685
Ópalo				0,629	0,486	Ópalo				0,621	0,518
$CaCO_3$					0,799	$CaCO_3$					0,796
B 410 m						D 1210 m					
F total	0,874	0,888	0,734	0,866	0,948	F total	0,820	0,813	0,704	0,840	0,970
C_{org}		0,994	0,828	0,715	0,716	C_{org}		0,992	0,789	0,697	0,706
N			0,818	0,719	0,742	N			0,777	0,684	0,702
Ópalo				0,720	0,502	Ópalo				0,595	0,567
$CaCO_3$					0,762	$CaCO_3$					0,792

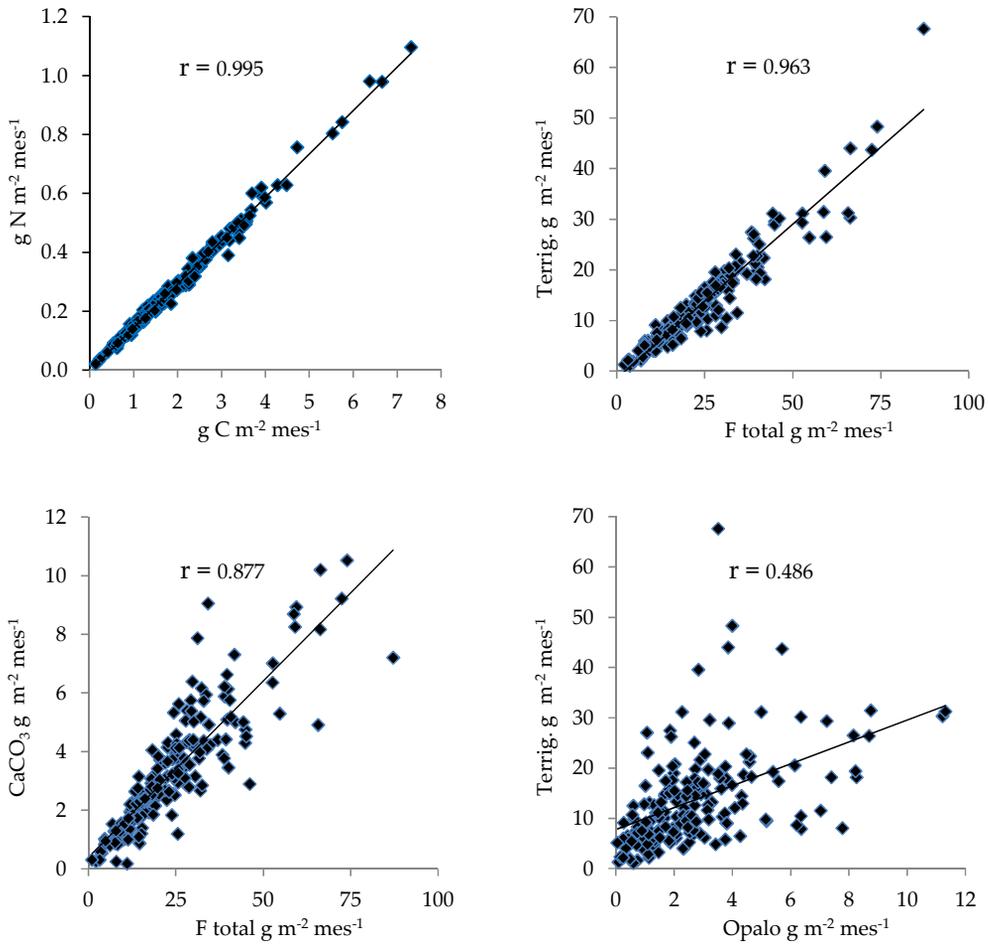


Figura 5. Ejemplos con diferentes niveles de correlación entre las variables del flujo de partículas para la profundidad de 225 m. a) relación entre el flujo de C orgánico y N en partículas; b) entre el flujo total y el de terrígenos; c) entre el flujo total y el de carbonatos; d) entre el flujo de ópalo y el componente terrígeno.

Relaciones entre los componentes del flujo

Para cuantificar la variabilidad relativa entre los componentes del flujo, se calcularon once fracciones o razones entre los valores de flujo mensuales a cada profundidad que se indican en la figura 6. Se examinó la amplitud en los cocientes obtenidos, su variación estacional y las tendencias a largo plazo. Para estos cálculos no se tomó en cuenta aquellos registros de flujo ocasionales tres veces mayores que la mediana, ni eventuales valores en extremo altos o bajos del cociente seleccionados mediante un gráfico de cajas Whisker. En las figuras 6 y 7 se visualizan los rangos en los cocientes calculados. Aquellos en los que intervino el flujo total o de terrígenos en relación con el C_{org} y el ópalo, presentaron una amplia variabilidad y estacionalidad anual. Estos fueron más bajos en enero – abril y elevados en septiembre – noviembre (figura 7 a y b). En cambio, las razones

entre los flujos total y de terrígenos con el CaCO_3 aunque con una variabilidad amplia no mostraron una clara estacionalidad (figura 7 c y d). Otras razones variaron poco en su cociente como: Ftotal/Terrig ; $\text{Opalo/C}_{\text{org}}$ y Opalo/CaCO_3 (figura 6), pero estos casos mostraron una diferencia significativa en el ciclo anual, con un máximo de enero a abril y un mínimo en agosto – octubre (figura 7 e y f). La fracción $\text{CaCO}_3/\text{C}_{\text{org}}$ mostró al contrario un cociente mínimo en los primeros meses y máximos en octubre y noviembre (figura 7 g), mientras que el cociente $\text{C}_{\text{org}}/\text{N}$ tendió a ser constante estacionalmente (figura 7 h). Estas características indicadas y su variación anual fueron similares en todas las profundidades para cada una de las combinaciones y cuyo resultado se resume en la tabla 4.

Se calculó las tendencias en los cocientes de las once fracciones establecidas empleando el análisis de regresión lineal en referencia al tiempo (años) con los datos mensuales de 1995 al 2014. Aunque hubo una amplia variabilidad en los valores, la mitad de las razones tuvieron una tendencia significativa. Un resumen de los resultados se presenta en la tabla 4 donde se indica el sentido de la tendencia y la tasa de variación anual para cada trampa o profundidad. Las fracciones con tendencias significativas ($p < 0,05$) a todas las profundidades fueron: $\text{Ftotal}/\text{C}_{\text{org}}$; $\text{CaCO}_3/\text{C}_{\text{org}}$; $\text{Terrig}/\text{C}_{\text{org}}$ y $\text{Ftotal}/\text{Terrig}$, las tres primeras positivas y la última negativa. La razón $\text{CaCO}_3/\text{C}_{\text{org}}$ es la que más cambió a largo plazo, con tasa de incremento anual entre el 3,8% y el 11%, con marcada diferencia con la profundidad, mayor en la trampa más profunda. De modo similar la fracción $\text{Terrig}/\text{C}_{\text{org}}$ igualmente presentó tasas altas de 3,4% a 6% anual. En tres de las razones señaladas interviene el C orgánico mostrando signo positivo, en cambio para el $\text{Ftotal}/\text{Terrig}$ la tendencia fue negativa. Excepto para $\text{Terrig}/\text{Opalo}$ que presentó tasas significativas en las trampas más profundas, otras razones en las que interviene el ópalo revelan tendencias bajas en sus cocientes o no llegan a ser significativas (tabla 4).

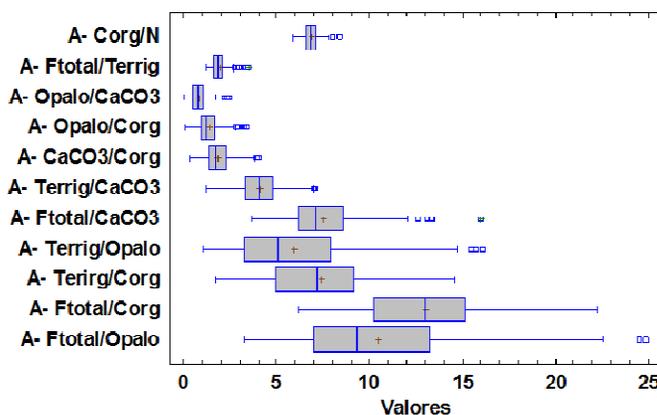


Figura 6. Comparación de los valores que toman los cocientes de 11 razones que relacionan los componentes del flujo de partículas en la Fosa de Cariaco a 225 m de profundidad (trampa A).

Ftotal = flujo de masa total de partículas, C_{org} = carbono orgánico, N = nitrógeno, Terrig = flujo total del componente de origen terrígeno o litogénico, CaCO_3 = flujo de carbonatos., Opalo = flujo del componente de ópalo o sílice biogénica. Los resultados de las trampas más profundas muestran características y valores similares.

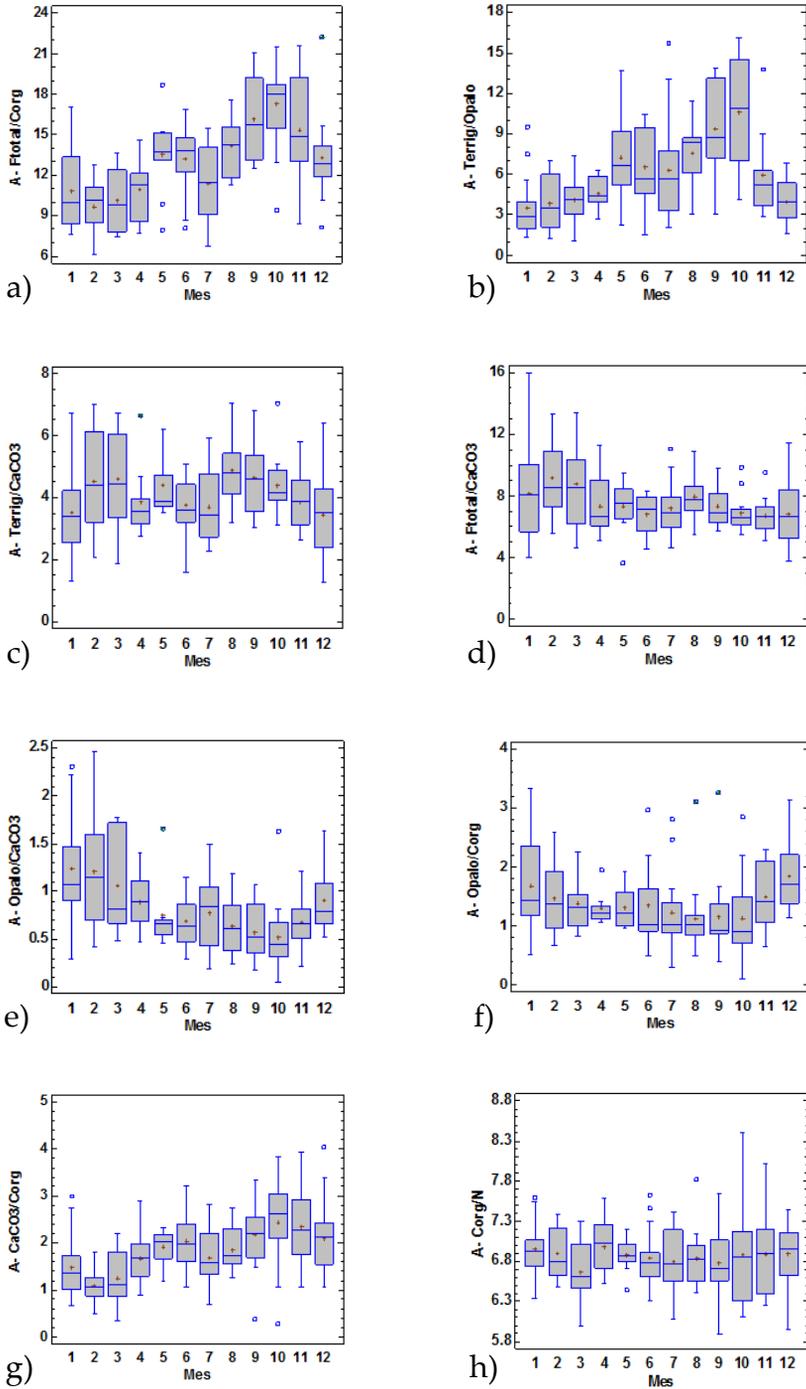


Figura 7. Variaciones mensuales de los valores de ocho de las razones entre los componentes del flujo de partículas en la Fosa de Cariaco a 225 m (trampa A); (a y b) valores que varían ostensiblemente de modo estacional con máximos de septiembre a noviembre; (c y d) cocientes variables pero sin una estacionalidad evidente; (e y f) razones que presentan una estacionalidad significativa, con mínimos de agosto a octubre; (g) el cociente $\text{CaCO}_3/\text{Corg}$ presenta una variación moderada y se incrementa de febrero a octubre; (h) la razón Corg/N es casi constante en el tiempo.

Tabla 4. Resumen de las razones entre componentes del flujo de partículas en la estación CARIACO, indicando si muestran o no variaciones en un ciclo estacional, determinado como significativo mediante un análisis de Kruskal-Wallis ($p < 0,05$). Cálculos basados en la serie de tiempo de 1995 a 2014 del registro de las trampas a cuatro profundidades (A 225 m, B 410 m, C 810 m, D 1210 m). Se indica el semestre en el cual se presentan las épocas de máximos y mínimos en los valores de los cocientes, en la mayor parte de los casos centrados en febrero y octubre. Las tendencias a largo plazo de estas razones se indican como tasa anual (%) para cada trampa o profundidad en el caso que esa variación sea significativa ($p < 0,05$), Fttotal= masa del flujo total, Corg= carbono orgánico, N= nitrógeno, Ópalo= sílice biogénico, CaCO₃= carbonatos, Terrig= componente de partículas de origen terrígeno o mineral.

Razón (Cociente)	Variación	Ciclo estacional	máximo mínimo		Tendencias en el valor del cociente Tasa % anual por trampa
			semestre		
Corg/N	baja	Ausente			A +0.23%; B -ns; C +ns; D -ns
Opalo/Corg	baja	Presente	1er	2do	A +ns; B +ns; C +2.36%; D +ns
Ftotal/Corg	alta	Presente	2do	1er	A+2.36%; B +3.23%; C +3.58%; D +4.32%
Ftotal/Opalo	alta	Presente	2do	1er	A +ns; B +ns; C +ns; D +3.84%
Ftotal/CaCO ₃	intermedia	Ausente			A -ns; B -1.55%; C -ns; D -2.03%
Opalo/CaCO ₃	baja	Presente	1er	2do	A -ns; B -2.85%; C -ns; D -ns
CaCO ₃ /Corg	intermedia	Presente	2do	1er	A+3.79%; B +6.97%; C +6.70%; D +10.86%
Terrig/CaCO ₃	intermedia	Ausente			A -ns; B -ns; C +ns; D +ns
Terrig Corg	alta	Presente	2do	1er	A+3.92%; B +4.89%; C +6.15%; D +6.06%
Terrig/Opalo	alta	Presente	2do	1er	A+ns; B +3.00%; C +3.78%; D +4.41%
Ftotal/Terrig	baja	Presente	1er	2do	A -0.80%; B -1.20%; C -1.46%; D -1.46%
			1er semestre del año		A 225 m, B 410 m, C 810 m, D 1210 m
			2do semestre del año		ns = tendencia no significativa

Proporciones de los componentes en relación al flujo total

Las variaciones en los promedios mensuales de la proporción de los componentes del flujo en referencia al flujo total se muestran en la figura 8. El patrón de variación anual para cada componente fue similar en todas las profundidades. En el ciclo se observó que el porcentaje promedio de C_{org} en las muestras (trampas A, B y C) fue máximo en febrero – abril (10%), disminuyó en mayo (7%), con un despunte secundario en julio (10%) y luego descendió a un mínimo en octubre – noviembre (6%). Destaca que a 1210 m (trampa D) la proporción de C_{org} fue mayor entre el 6% y el 14%, y también se apreció una disminución de abril a mayo, más notable que en las trampas superiores. El CaCO₃ mostró una variación inversa, se encontró en menor proporción entre febrero y marzo (10%) y aumentó en el segundo semestre del año (15%) a 225 m en diciembre, y entre junio y septiembre a más profundidad. Para este componente, la variación en las dos trampas superiores fue menor que en las más profundas, con valores del 9% al 17%. El ópalo se presentó en mayor proporción en enero – febrero (17%) y menor durante el segundo semestre del año (7%), incrementándose en diciembre a un 15%. Una variación similar se apreció en todas las profundidades, aunque a 1210 m se observaron dos repuntes en el mes de abril y julio. En el caso de los terrígenos su proporción fue alta

en el segundo semestre del año, octubre – noviembre (70%) y baja en enero – febrero (47%), notándose en este caso una caída en la proporción de terrígenos en julio en sentido contrario a las otras variables (figura 8 d). Se indica que el % de N en referencia al flujo de masa total mostró unas variaciones idénticas a las del C orgánico.

Si bien las correlaciones entre la masa de los componentes del flujo fueron significativas en todos los casos (tabla 3), las correlaciones entre el valor proporcional de los componentes mostraron algunas correlaciones no significativas dependiendo de las variables y la profundidad (tabla 5). El porcentaje de C_{org} , N y de ópalo no mostraron una correlación significativa con el de $CaCO_3$ a 225 m, y a su vez éste no presenta correlaciones significativas con los terrígenos a 410, 810 y 1210 m. Los signos de las correlaciones indicaron una relación inversa del porcentaje de $CaCO_3$ y terrígenos con el de los otros componentes. En cambio el porcentaje de C_{org} , N y ópalo mostraron correlaciones directas entre sí (tabla 5).

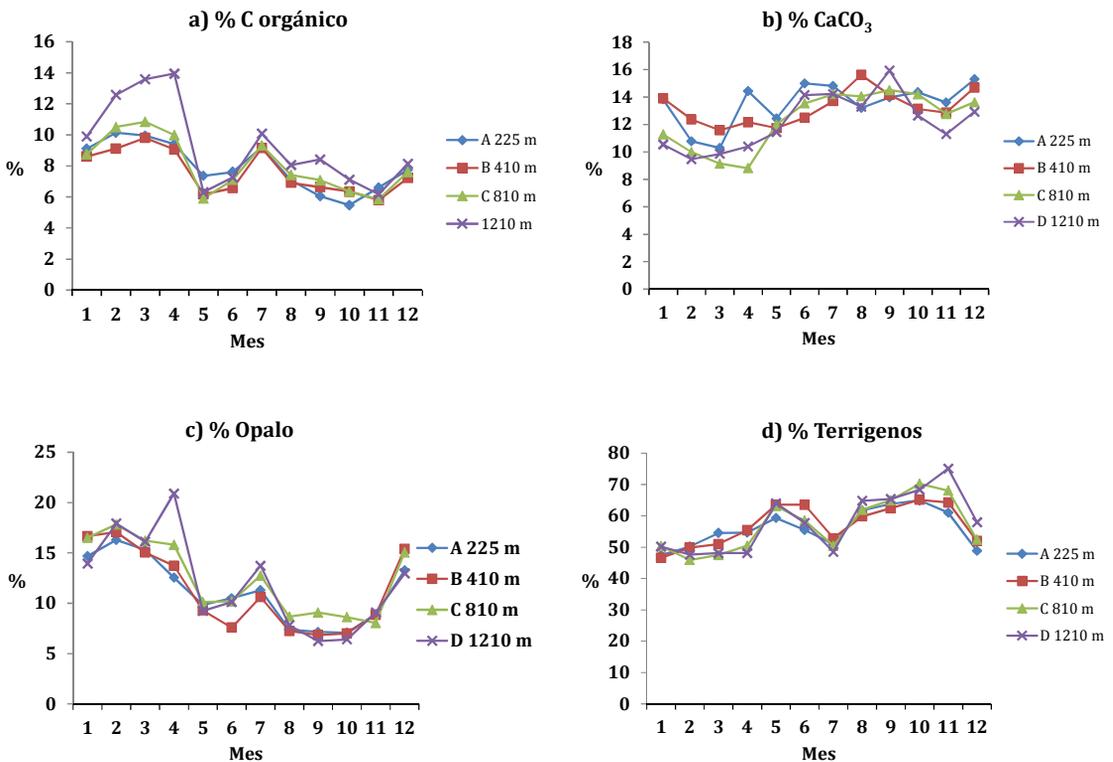


Figura 8. Proporción promedio por mes de los componentes a) C orgánico, b) $CaCO_3$, c) Ópalo, y d) Terrígenos en relación al flujo total a cada profundidad. Basado en 165 a 178 mediciones mensuales en la Fosa de Cariaco desde noviembre de 1995 a mayo de 2016.

Tabla 5. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre los porcentajes de los componentes en el flujo en las cuatro profundidades en la estación CARIACO. Las correlaciones significativos ($p < 0,05$) están resalta-das en negra, en cursiva las no significativas. Datos de noviembre 1995 a octubre 2014 ($n = 141 - 171$).

225 m				810 m					
% C org	% N	% Ópalo	% CaCO ₃	% C org	% N	% Ópalo	% CaCO ₃		
0,980	0,456	<i>-0,130</i>	<i>-0,775</i>	0,967	0,396	<i>-0,383</i>	<i>-0,697</i>		
% N	0,416	<i>-0,104</i>	<i>-0,752</i>	% N	0,395	<i>-0,386</i>	<i>-0,688</i>		
% Ópalo		<i>-0,058</i>	-0,810	% Ópalo		-0,218	-0,672		
% CaCO ₃			-0,328	% CaCO ₃			<i>0,041</i>		
410 m				1210 m					
% C org	0,972	0,483	-0,412	-0,728	% C org	0,966	0,411	-0,268	-0,820
% N		0,462	-0,440	-0,683	% N		0,372	-0,264	-0,782
% Ópalo			<i>-0,034</i>	-0,853	% Ópalo			-0,181	-0,701
% CaCO ₃				<i>-0,123</i>	% CaCO ₃				<i>-0,095</i>

Se observaron tendencias en las proporciones de los componentes en el periodo noviembre de 1995 - octubre de 2014 (Anexo 5 a 8 págs. 113 - 116) mostrando diferencias con las de los valores absolutos de flujo, donde solo el CaCO₃ había registrado tendencias significativas (Anexo 1 a 4 págs. 109 - 112). Así, el porcentaje de C_{org} disminuyó de modo significativo en las muestras a todas las profundidades en el transcurso de 19 años desde un aporte del 10 - 12% a un 6 - 7% (tabla 6); aunque la cantidad de C_{org} en términos de masa no cambió de modo manifiesto. El nitrógeno (N) mostró la misma tendencia que el C_{org}. En el caso del CaCO₃ este aumentó su proporción sobre todo en las trampas a 410 m y más profundas; de un 10% a 15% (tabla 6). El porcentaje de ópalo no mostró tendencia significativa a 225 m pero disminuyó de un 14% a un 10% en las trampas más profundas. Los terrígenos mostraron tendencias significativas con incrementos de un 10% (del 15% a 1210 m). Para todos los componentes las variaciones fueron menores en la trampa a 225 m, siendo mayores y similares entre las profundas (> 400 m, tabla 6). Hubo por tanto una disminución en la proporción de los componentes relacionados con la materia orgánica (C_{org} y N aprox. -2,2% anual) y del ópalo (-1,3%), y una ganancia en la de CaCO₃ (+2,4%) y terrígenos (+1,2%) en relación al flujo inicial. Aplicando un análisis de componentes principales los porcentajes el C_{org} y el ópalo están directamente relacionados, e inversamente con el de terrígenos, mientras que el de CaCO₃ no mostró relación con las otras variables (figura 9).

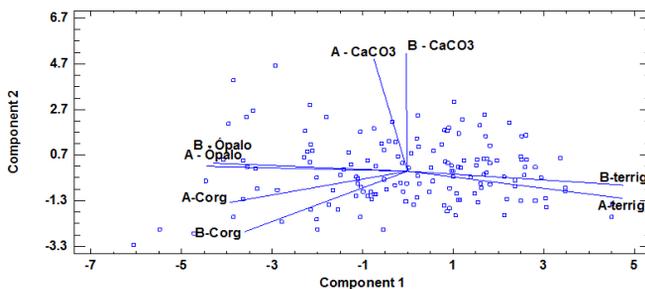


Figura 9. Análisis de componentes principales de los porcentajes del flujo del C orgánico, ópalo, CaCO₃ y terrígenos en referencia al flujo total para las trampas en la estación CARIACO, A 225 m y B 410 m.

Tabla 6. Variación del promedio mensual de la proporción de los componentes en la masa total de partículas en CARIACO, de noviembre de 1995 a octubre de 2014, en las cuatro profundidades. Tasa de variación anual calculada por mínimos cuadrados, en negrita valores significativos para $p < 0,05$

Profundidad	Variación %	Tasa anual %	Variación %	Tasa anual %	Variación %	Tasa anual %
	C org		N		Terrig	
225 m	9,7 - 6,7	-1,6	1,4 - 1,0	-1,7	50,8 - 57,8	0,7
410 m	10,2 - 5,9	-2,2	1,4 - 0,9	-2,2	49,7 - 60,4	1,1
810 m	11,4 - 6,1	-2,5	1,6 - 0,9	-2,4	48,9 - 61,5	1,4
1210 m	12,4 - 6,2	-2,6	1,8 - 0,9	-2,6	45,6 - 60,4	1,7
	CaCO₃		Opalo			
225 m	12,7 - 15,1	1,0	12,1 - 11,6	-0,7		
410 m	10,4 - 15,8	2,8	14,1 - 9,6	-1,7		
810 m	10,1 - 14,6	2,3	14,1 - 10,8	-1,2		
1210 m	10,1 - 14,6	3,3	14,4 - 9,7	-1,7		

Relaciones del flujo con las variables biológicas.

Se efectuaron cálculos de correlación (r) entre las variables del flujo de partículas con cuatro variables relacionadas con los elementos vivos en el mar, su dinámica o sus restos, se contó con: la concentración de clorofila [Chl-*a*]; la producción primaria [PP]; la cantidad de C orgánico en las partículas en suspensión [POC] y la biomasa de zooplancton [B_{Zoo}], obtenida mediante redes con dos tamaños de malla; todas estas en unidades integradas de superficie. Las tres primeras variables biológicas mostraron estrechas correlaciones entre sí, pero fueron más débiles con la [B_{Zoo}]. No obstante, más y mejores correlaciones se obtuvieron con la [B_{Zoo}] del mes siguiente a los valores de las otras variables biológicas, en este caso todas fueron significativas. Como esto tiene lógica, debido a la demora en la tasa en que aumentan o disminuyen las poblaciones de zooplancton, se muestran también las correlaciones del flujo con la [B_{Zoo}] del mes siguiente.

Entre las variables biológicas y los componentes del flujo, la mayor parte muestra correlaciones significativas con los flujos del C_{org} , N y ópalo. (tabla 7). Mientras que los flujos de la masa total, de $CaCO_3$ y terrígenos fueron los que mostraron menor correlación con las variables biológicas. Destaca que hubo correlaciones positivas entre la [B_{Zoo}] y todas las variables del flujo a 410 m, y a 1210 m si se considera la [B_{Zoo}] del siguiente mes, manifestándose en todas las profundidades una estrecha relación con el C_{org} , N y ópalo (tabla 7).

Se calculó el índice de exportación dividiendo el flujo de C_{org} a una determinada profundidad y la producción primaria integrada [PP] en la estación CARIACO (*e-ratio*, Murray *et al.* 1989, "índice-e" = flujo C_{org} /[PP]).

Tabla 7. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre las variables biológicas y los componentes del flujo de partículas medidos en la estación CARIACO a cuatro profundidades para el periodo 1995-2016: clorofila, producción primaria, POC (carbono orgánico en partículas en suspensión), biomasa del zooplancton (peso seco) [B_{Zoo}] obtenida con malla de dos tamaños 200 μm y 500 μm ; y los flujos de Fttotal = Flujo de masa total, Corg = carbono orgánico, CaCO₃ = carbonatos, Ópalo (sílice biogénica), Terrig = componente de origen terrígeno mineral, N = nitrógeno. El número total de observaciones por variable y profundidad estuvo entre unas 140 a 160. El número total de observaciones por profundidad donde interviene la biomasa de zooplancton [B_{Zoo}] fue de 90 a 100. En el caso de la biomasa del zooplancton se presentan dos grupos de correlaciones, uno correspondiente a la medición de la biomasa el mismo mes del flujo y otro con la biomasa del siguiente mes. Las correlaciones significativas ($p < 0,05$) están resaltadas en negrita, en cursiva las no significativas.

	Clorofila	Producción	POC	Mediciones mismo mes		Mediciones mes siguiente	
				BioZoo 500	BioZoo 200	BioZoo 500	BioZoo 200
225 m							
A-Ftotal	0.017	-0.022	0.056	0.144	0.206	0.224	0.218
A-Corg	0.145	0.188	0.245	0.169	0.237	0.335	0.259
A-CaCO ₃	-0.141	-0.160	-0.133	0.041	0.074	0.083	0.100
A-Ópalo	0.186	0.263	0.271	0.169	0.258	0.405	0.363
A-Terrig	-0.025	-0.118	-0.006	0.138	0.202	0.135	0.163
A- N	0.127	0.177	0.232	0.161	0.226	0.325	0.251
410 m							
B-Ftotal	0.152	0.123	0.102	0.393	0.266	0.335	0.334
B-Corg	0.356	0.324	0.335	0.387	0.302	0.336	0.325
B-CaCO ₃	-0.028	-0.007	-0.096	0.342	0.204	0.308	0.266
B-Ópalo	0.279	0.340	0.191	0.399	0.328	0.434	0.400
B-Terrig	0.042	-0.014	0.016	0.334	0.210	0.251	0.270
B- N	0.355	0.353	0.349	0.409	0.323	0.355	0.329
810 m							
C-Ftotal	0.069	0.089	-0.009	0.111	0.106	0.188	0.261
C-Corg	0.281	0.377	0.238	0.204	0.209	0.348	0.337
C-CaCO ₃	-0.141	-0.062	-0.232	-0.074	-0.103	0.054	0.084
C-Ópalo	0.217	0.316	0.174	0.284	0.254	0.402	0.378
C-Terrig	-0.024	-0.058	-0.101	0.079	0.064	0.117	0.197
C- N	0.288	0.398	0.254	0.217	0.221	0.346	0.345
1210 m							
D-Ftotal	0.057	0.054	-0.008	0.006	0.033	0.159	0.310
D-Corg	0.282	0.370	0.284	0.101	0.116	0.356	0.351
D-CaCO ₃	-0.103	-0.034	-0.121	0.102	0.075	0.272	0.305
D-Ópalo	0.195	0.271	0.189	0.085	0.103	0.345	0.314
D-Terrig	-0.023	-0.083	-0.114	0.119	0.138	0.313	0.420
D- N	0.286	0.362	0.276	0.127	0.135	0.374	0.368

Este índice es controlado en gran medida por la tasa a la cual el C_{org} es regenerado en la columna de agua. Unos valores bajos, implican una mayor tasa de reciclado del C orgánico en partículas a C inorgánico disuelto por arriba de la profundidad de la medición del flujo, y por tanto menor carga de C_{org} en las partículas que sedimentan. Valores altos indican una menor pérdida del C_{org} fijado por fotosíntesis, lo que implica una relativa mayor abundancia en las partículas. El índice-e en CARIACO fue bajo y varía, con valores promedio de $0,063 \pm 0,022$ a 225 m y disminuyó progresivamente con la profundidad hasta $0,024 \pm 0,010$ a 1210 m, (tabla 8). Lo que implica que en promedio un $2,37\% \pm 1\%$ del C fijado en la superficie alcanzó los 1210 m, que calculado de este modo equivale a un flujo promedio de $0,90 \pm 0,27 \text{ g C m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$, basado en una producción primaria media global en el sitio de $38,12 \pm 11,56 \text{ g C m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$. La cifra del flujo de C_{org} concierda con el medido directamente por la trampa a 1210 m ($0,82 \pm 0,35 \text{ g C m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$, tabla 2).

En promedio el índice-e cambia de modo estacional (figura 10). A 225 m la variación del índice fue amplia, mientras que a las otras profundidades fue menor. A 225 m hubo dos máximos, el más marcado en mayo y otro secundario en noviembre, y con mínimos en los cuatro primeros meses del año y en octubre; mes en que se observó el valor más bajo en las otras profundidades. A 410 m los resultados difieren en que un máximo se presenta en marzo. A mayor profundidad el índice varió poco con un incremento de octubre a noviembre, que coincidió con un aumento del flujo (figuras 4 y 10). Si se compara el índice-e a 225 m con las mediciones de la producción primaria integrada, se hizo evidente un cambio cíclico anual en la eficiencia de la re-mineralización del C_{org} (tabla 8, figura 10). En los dos primeros meses del año con una elevada producción primaria el índice fue bajo (0,042) lo que implica un alto reciclado y un relativo bajo flujo de C_{org} , luego asciende al máximo de mayo (0,116) indicador de menor tasa de regeneración y un relativo alto flujo de C_{org} . En los meses siguientes el índice descendió progresivamente (0,083) hasta el mes de octubre (0,046), pero ahora con un menor nivel de producción, que indica de nuevo un relativo bajo flujo de carbono, pero mejor correlacionado con el nivel de producción.

Tabla 8. Promedios del índice de exportación (Índice-e = flujo de C_{org} /[PP]); DS= desviación estándar; % del C fijado PP = porcentaje promedio del C_{org} captado con las trampas de partículas en referencia al C fijado por la producción primaria [PP]. Promedios generales basados en 148 – 151 mediciones mensuales de noviembre de 1995 a febrero de 2016.

Prof.	Índice-e			% C fijado PP	rango %
	Índice-e	DS.	ene - abr may - ago sep - dic		
225 m	0,063	0,022	0,045 0,083 0,062	6,33	4,11 - 8,55
410 m	0,045	0,012	0,050 0,049 0,036	4,48	3,34 - 5,62
810 m	0,031	0,009	0,033 0,034 0,027	3,10	2,15 - 4,04
1210 m	0,024	0,010	0,020 0,029 0,021	2,37	1,38 - 3,73

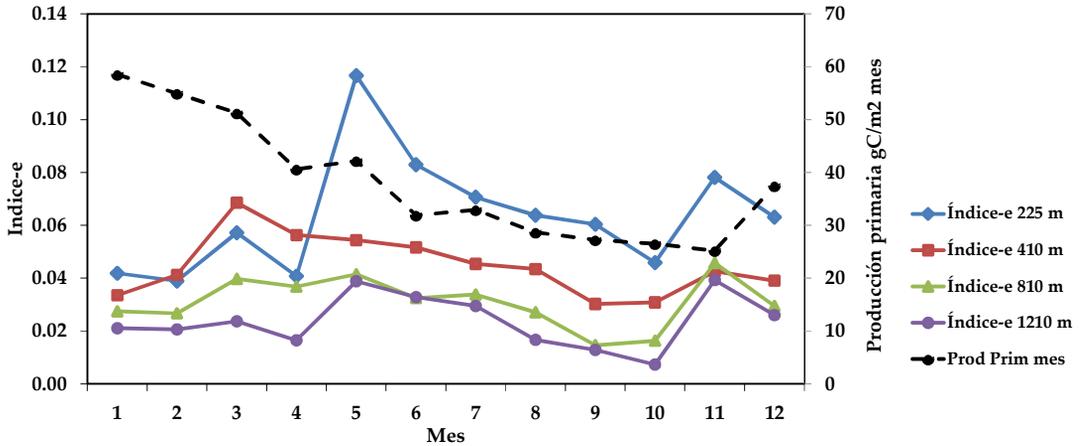


Figura 10. Variación de los promedios mensuales del “Índice-e” de exportación, calculado a partir del promedio mensual de la producción primaria integrada hasta 100 m y el flujo de C_{org} a las profundidades de las trampas en cada mes. Se compara con los valores promedio mensuales de la producción primaria integrada.

Discusión

La mayor cantidad de partículas en el mar se suele encontrar en la capa superficial (0 – 100 m) y en la proximidad del fondo. En aguas superficiales, la distribución de las partículas está relacionada con el plancton y las condiciones hidrográficas, y si está cercana la tierra influyen además el clima, las características geológicas de la costa y la descarga de cuencas hidrográficas. Una mayor concentración cerca del fondo puede ser efecto de corrientes marinas, deslizamientos de sedimentos, o también por la actividad de animales escarbando en el fondo. Si bien las condiciones de las aguas superficiales en el área de la Fosa de Cariaco son similares al resto de la región costera del Caribe sur, las aguas profundas y el fondo marino difieren, pues no hay animales metazoos que puedan remover partículas dada la falta de oxígeno disuelto, y donde además los movimientos del agua son débiles.

Variación del flujo de partículas con la profundidad

Los flujos de partículas en los márgenes continentales son muy variables y en promedio mayores que en el océano abierto. Los flujos totales en la plataforma continental del Pacífico mexicano, evaluados con el mismo método que en CARIACO, muestran a 400 – 500 m un promedio más elevado en Santa Bárbara ($2,241 \pm 1,33 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) y menor en Guaymas ($0,416 \pm 0,23 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) que en la Fosa de Cariaco ($0,630 \pm 0,57 \text{ g m}^{-2} \text{ d}^{-1}$). El flujo de C orgánico en CARIACO de $55 \pm 4 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (a 410 m) es igualmente intermedio al de Santa Bárbara $96 \pm 5 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, Guaymas $21 \pm 1 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Thunell *et al.* 2007) y Bahía de La Paz $38 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Silverberg *et al.* 2007). El flujo de C_{org} a 250 m en CARIACO es de $74 \pm 40 \text{ mg C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Thunell *et al.* 2007) y es superior a los flujos en estaciones oceánicas que varían

de 9 a 20 mg C m⁻² d⁻¹ a 200 m en HOT y BATS, en Hawái y Las Bermudas (Karl, *et al.* 2001, Lutz *et al.* 2002). La variación en el flujo es también mayor en las estaciones próximas al continente, como en CARIACO, donde la producción primaria es alta y estacional, y el flujo de carbono orgánico es 7,5 a 10 veces más elevado que el promedio para el océano abierto de $7,2 \pm 3,6$ mg C m⁻² d⁻¹ entre 250 y 500 m (Lutz *et al.*, 2002).

El flujo del C_{org} y N en CARIACO disminuyó con la profundidad un 60 % entre los 225 m y 1200 m (tabla 2 pág 75). Por arriba, entre los 50 y 225 m, un 80% del material orgánico en partículas que deja la zona eufótica se disgrega y remineraliza (Montes *et al.* 2012). Las mediciones que aquí se analizan se obtuvieron por debajo de la zona eufótica productiva que fue de 42 ± 13 m (Lorenzoni, *et al.* 2011) y donde la trampa ubicada a 225 m estuvo en el límite superior de la zona anóxica. Como en el resto del océano, la magnitud del flujo de C_{org} decrece exponencialmente con la profundidad, e igual sucede con los otros componentes. Sin embargo, en CARIACO, una disminución progresiva del flujo con la profundidad no tuvo un patrón constante. El 29% de las mediciones mensuales presentaron un flujo a 410 m mayor que a 225 m. Esto se produjo con más frecuencia de febrero a abril, cuando fue más intensa la surgencia (figuras 3 y 4 pág 76). También se apreciaron inversiones en las trampas a mayor profundidad (810 y 1210 m) en un 12% de las medidas. Las causas pueden ser diversas, la más factible es que la trampa a 410 m estaría interceptando partículas provenientes de áreas más cercanas a la costa o del talud continental, llevadas por debajo de la trampa a 225 m por advección lateral en capas nefeloides (Lorenzoni *et al.* 2009, 2012, 2019, Zonneveld *et al.* 2010). Se puede considerar además que la trampa superior está sujeta a una mayor variabilidad debido a estar más expuesta a corrientes marinas lo que dispersa en mayor grado las partículas sobre ella (Buesseler *et al.* 2007). En Cariaco la hidrodinámica en aguas profundas debería ser mínima y no afectar a las otras trampas (Alvera-Azcárate *et al.* 2009). Otra causa a considerar es la migración vertical diaria del zooplancton, que supera los 250 m de amplitud y penetra en aguas anóxicas por lo que hay un transporte activo de partículas (Virmani y Weisberg 2009, Montes *et al.* 2012). También se ha planteado que en la capa de transición óxido reductora (250 – 350 m) donde la fosa es hipóxica a anóxica, la producción bacteriana por quimiosíntesis es importante, generando nueva materia orgánica (Taylor *et al.* 2001, 2018; Wakeham *et al.* 2012). Las ventilaciones en esta capa producto de la entrada de aguas externas con más oxígeno favorecen la eficiencia de la oxidación de materia orgánica y la posterior fijación de C en oscuridad en esta capa intermedia (Scranton *et al.* 2001, Muller-Karger *et al.* 2019). Aunque estas partículas sean de muy pequeño tamaño pudieran formar agregados por coagulación o ser consumidas por organismos de mayor tamaño (Zonneveld *et al.* 2010, McParland *et al.* 2015). Otros procesos químicos en las aguas anóxicas como la sulfuración pueden favorecer la generación de agregados, o proteger a la materia orgánica de la degradación y formar partículas más permanentes (Raven *et al.* 2016). Hay evidencia que apoya esta generación de nueva materia orgánica proveniente del bacterioplancton por el incremento de fósforo en las partículas de la interfase (McParland *et al.* 2015). Sin embargo, las anteriores razones no explican el hecho que el flujo de compuestos relacionados con el fitoplancton también aumentan en la misma proporción en la trampa a 410 m (Goñi *et al.* 2003). De modo que la

generación de materia orgánica por vía de quimiosíntesis bacteriana posiblemente no influya sustancialmente en la formación de nuevas partículas de suficiente tamaño como para incorporarse al material que precipita a este nivel.

Algunos casos de inversiones en el flujo fueron consecuencia de fallas en la toma de las muestras. Se apreció que en períodos de abundante flujo las trampas llenaron completamente el envase receptor atascándose la salida del embudo, lo que provocó la pérdida de las siguientes muestras. En otros casos el embudo se obstruyó antes de llenar el envase receptor, y esto se revela al observar flujos en extremo bajos en la trampa superior, cuando las profundas presentaron una alta cantidad de material. Al menos en ocho de los meses estas fallas fueron manifiestas y no se tomaron en cuenta esos registros en los cálculos. Pero en ocasiones esto pudo producirse de forma parcial y no ser distinguible de un hecho natural. Se ha observado que los niveles de flujo pueden llegar a ser tan cuantiosos que llegan a atascar no solo la trampa menos profunda, sino también las situadas a 410 y 810 m. Por tanto, estos eventos de gran flujo no pudieron ser medidos de modo adecuado en todas las oportunidades en que acontecieron; aun cuando en las trampas para CARIACO se duplicó el volumen de los frascos colectores para atenuar ese problema.

Variaciones estacionales y a largo plazo en el flujo

La variabilidad mensual del flujo total y por componente es amplia, pero los promedios indican estar presente un ciclo estacional, con diferencias en función de la profundidad (figura 4 pág 76). Mayo fue el mes con los mayores promedios de flujo a 225 m. Esto ocurre al final de la época de surgencia, se propone como causa el cese de la fuerza de ascensión de las aguas, en consecuencia las partículas tanto minerales como orgánicas retenidas en suspensión por acción hidrodinámica se van al fondo de un modo masivo (Smoack *et al.*, 2004, Lorenzoni *et al.* 2009, Bringué *et al.* 2019). Los flujos copiosos al comienzo o durante la surgencia fueron poco frecuentes (diciembre - abril); aunque picos esporádicos del flujo total ($> 40 \text{ g m}^{-2} \text{ mes}^{-1}$) se registraron en la serie de tiempo en cualquier mes excepto en abril y julio. Los promedios mínimos para el C_{org} , ópalo y N se dieron en octubre. A 410 m la distribución fue diferente, se apreció que en los cinco primeros meses del año el flujo es mayor, con máximos en marzo para el C_{org} , N y ópalo, y mayo para el total, CaCO_3 y terrígenos; siendo menor en el segundo semestre con mínimos en septiembre y octubre. La trampa a 410 m reflejó mejor las variaciones estacionales hidrográficas y de biomasa en la superficie que la más superficial. Las trampas a 810 m y a 1210 m muestran unas características similares a la de 410 m. Estas dos trampas más profundas mostraron una menor variabilidad y un aumento relativo del flujo hacia final de año (noviembre - diciembre) en los promedios, por causas no identificables (figura 4).

No hubo tendencias significativas en 19 años en el flujo total y, entre los componentes solo el carbonato mostró un incremento en el tiempo a 410, 810 y 1210 m. Sin embargo, hubo tendencias significativas en la proporción de los componentes en relación al flujo total. El porcentaje de C_{org} , N y ópalo mostró una clara tendencia a disminuir, al contrario los carbonatos y terrígenos se incrementaron en una proporción similar (tabla 6 pág 84). Los valores relativos de los componentes

también variaron estacionalmente, el porcentaje de C_{org} , N y ópalo tuvo una mayor proporción durante el primer semestre del año y menor en el segundo, mientras que para el $CaCO_3$ y los terrígenos ocurrió lo inverso (figura 8 pág 82). Esto indica un enriquecimiento de materia orgánica proveniente principalmente de las diatomeas en el periodo de surgencia, mientras que otros grupos aportan la materia orgánica en la época de estabilidad, con una proporción menor de ópalo y biomasa reducida por dominar células de menor tamaño (Romero *et al.* 2009, Mutshinda *et al.* 2013). El pico de flujo que se registra en mayo a 225 m, presentó una merma en la proporción del C_{org} , N y ópalo, compensado por un incremento de la proporción de los terrígenos y en menor cuantía del $CaCO_3$, lo que presume que el flujo masivo en mayo es consecuencia del aporte de sedimentos por capas nefeloides, que traen un material terrestre que actúa como lastre mineral sobre las partículas orgánicas marinas retenidas durante la surgencia en la capa superior del mar (Montes *et al.* 2012). Luego en julio hubo un decrecimiento en los terrígenos y un aumento relativo del C_{org} , N y ópalo (figura 8). Este cambio puede ser efecto del evento estacional de surgencia secundaria descrito para la zona (Rueda-Roa y Muller-Karger, 2013).

Carbono orgánico y Nitrógeno

El flujo del C_{org} es una medida indirecta de la cantidad de materia de origen orgánico que precipita a través de la columna de agua, con el alcance que esto tiene en el cálculo de la tasa del C que queda retenido en el sedimento del fondo, fuera del ciclo atmosférico y oceánico. La relación entre el C y el N es una constante en la materia orgánica (figura 5 pág 78), aunque su valor depende de su origen. En CARIACO la proporción C:N (molar) en la materia orgánica en partículas suspendidas en aguas superficiales es $\sim 6,5$ (molar), que sería la “fracción de Redfield”. Mientras que las partículas acumuladas en las trampas (> 200 m) mostraron valores con promedio 8,0 (molar) a 225 m, y se incrementaron ligeramente en la zona anóxica profunda (8,3 molar), a causa de un empobrecimiento en N de las partículas, debido a su reciclado más rápido que el C en el proceso de degradación (Montes *et al.* 2012). Por los valores que toma este índice comparado con la gama de valores en vegetación terrestre y suelos (C:N molar de 9 a más de 20), por el análisis de $\delta^{13}C$ realizados por Thunell *et al.* (2000) y Woodworth *et al.* (2004), y por el análisis de biomarcadores orgánicos de origen terrígeno como la lignina (Goñi *et al.*, 2009), se determina que la materia orgánica que sedimenta en CARIACO es mayormente de origen marino, y se infiere que es poca la materia orgánica de origen terrestre que alcanza la posición de la estación. El cociente del C_{org}/N en promedio no mostró un ciclo estacional evidente (figura 7 h pág 80) y a largo plazo solo a 225 m tuvo una tendencia positiva cuando la proporción C:N se incremento de 7,8 a 8,2 (en mol) de 1995 a 2016 (tabla 4 pág 81).

Los flujos de C_{org} y N disminuyen en profundidad siguiendo un patrón exponencial que genera un perfil similar al de otras áreas del océano en condiciones aerobias. Estas observaciones llevan a la conclusión que en este medio anóxico la eficiencia de degradación de la materia orgánica es similar al de las aguas con oxígeno (Thunell *et al.* 2000). Al igual que el flujo total para estos elementos también se apreció variaciones a este patrón, donde un 24% de los registros mostraron un

mayor flujo en la trampa a 410 m que en la situada a 225 m, lo cual se manifestó como una característica frecuente en Cariaco. Por otra parte, los valores del flujo de C_{org} y N no presentaron tendencias a largo plazo, pero la contribución relativa de estos elementos en las muestras se redujo en el lapso de 19 años. (tabla 6 pág 84).

Los flujos del C_{org} y N están bien correlacionados con los otros componentes (tabla 3 pág 77), pero las razones entre estos elementos y las otras variables difieren. Con el ópalo y el $CaCO_3$ son más estrechas, lo contrario se observa con los terrígenos y el flujo total con una amplia variación en los cocientes (figura 6 pág 79). En términos de porcentaje el C_{org} y N muestran una fuerte correlación con el ópalo, mientras que es más laxa con el $CaCO_3$, y poco relacionada con los terrígenos (figura 9 pág 83). Por tanto una extrapolación de la cantidad de C_{org} a partir del flujo total conlleva una mayor incertidumbre.

El C abunda en las aguas marinas pero el N suele ser un elemento limitante para la vida en ese medio. Thunell *et al.* (2004) y Montes *et al.* (2013) realizaron estudios de la dinámica del N en Cariaco. Este elemento proviene de la fijación del N_2 atmosférico, transportado por la masa de agua desde el Atlántico Subtropical, o bien por fijación local, o de origen continental por la descarga de los ríos. La primera fuente predomina durante el período de surgencia cuando dicha masa de agua entre 100 y 250 m se aproxima a la superficie; las otras fuentes tienen más influencia durante el período de lluvia y estabilidad. La química del N en las aguas anóxicas muestra particular complejidad en la interacción con otros elementos en la columna de agua, en especial el O_2 , P y S, y con distintas rutas del metabolismo bacteriano (Jürgens y Taylor 2018). Estos orígenes y procesos dejan señales que quedan registradas en las partículas como $\delta^{15}N_{org}$ y compuestos químicos estables en los sedimentos, donde se graba información sobre la fuente, los cambios estacionales e interanuales de la dinámica del N, y por tanto de la variabilidad hidrográfica del lugar. Este es otro análisis que indica influencia de terrígenos en el pico de flujo en mayo (Montes *et al.* 2013, McParland *et al.* 2015, Raven *et al.* 2016).

Ópalo

El flujo de ópalo (silicato biogénico) es el componente que mostró la mayor variación estacional de un 40% a 225 m hasta un 73% a 410 m (tabla 2 pág 75) siguiendo el ciclo surgencia – estabilidad (figura 4 pág 76). La proporción promedio del ópalo en el flujo total igualmente mostró la variación anual, con máximos al comienzo de la surgencia y mínimos hacia octubre, marcando un repunte en julio por un posible efecto de la surgencia secundaria (figura 8 pág 82). En consecuencia el ópalo también varió de modo estacional en su relación con los demás componentes (tabla 4, Figura 7b, e, f págs 81 y 80). Esto está directamente relacionado con el dominio de las diatomeas en el fitoplancton al comienzo y en plena época de surgencia. En CARIACO la cantidad de diatomeas disminuye en la segunda parte del año, cuando aumenta la proporción de otros grupos de microalgas en el plancton (Mutshinda *et al.* 2012, Irwin *et al.* 2015, Pinckney *et al.* 2015).

Thunell *et al.* (2008) realizan un estudio exhaustivo del ciclo del silicio (Si) en las aguas de Cariaco. El Si es un elemento que las diatomeas agotan en las aguas

superficiales durante la surgencia, y no vuelve a recuperarse hasta el siguiente ciclo. Es por tanto un nutriente regulador de la productividad y relacionado con el N por la dinámica hidrográfica de la región. Durante la surgencia estos elementos se inyectan a la capa superficial como $\text{Si}(\text{OH})_4$ y NO_3^- , el fitoplancton consume más rápido el Si y este elemento pasa a ser limitante. Durante la estabilidad ambos disminuyen pero entonces es el N el que limita el crecimiento del fitoplancton. En las partículas se reflejan las variaciones hidrográficas, las proporciones Si:C y Si:N (molar) son más altas durante la surgencia y se incrementan con la profundidad, indicando una mayor exportación de Si relativa al C_{org} y N, los cuales se reciclan más rápidamente en la zona con oxígeno.

El carbonato y en menor medida el ópalo y los terrígenos suelen considerarse como componentes “lastre” pues intervienen en el acarreo de la materia orgánica en el océano, favoreciendo un rápido y efectivo transporte del C y N hacia el fondo. De otro modo la mínima diferencia de la densidad de la materia orgánica en referencia al agua marina haría casi nula la sedimentación (densidad de la materia orgánica = $1,06 \text{ g cm}^{-3}$, Archer 2003). No obstante, en CARIACO Thunell *et al* (2007) encuentran que el acarreo está equilibrado entre los dos minerales biogénicos con cierto predominio del ópalo; esto basado en de los primeros nueve años de la serie. Ahora, con mayor cantidad de datos se determina que el coeficiente de acarreo del ópalo es mayor que la del carbonato y los terrígenos (tabla 9).

Carbonato

El flujo del carbonato (CaCO_3) mostró diferencias en comparación con los de C_{org} y ópalo, como fue su disminución con la profundidad a una tasa más alta (67,8%) (tabla 2 pág 75); atribuible a la mayor disolución de los carbonatos con la profundidad (Goñi *et al.* 2003, Archer 2003, Muller-Karger *et al.* 2019). En la serie de tiempo el flujo de CaCO_3 fue el único componente que mostró tendencia significativa a incrementarse a 410; 810 y 1210 m (anexos 2, 3 y 4 pág 110). Sentido que también se apreció con su valor porcentual en relación al flujo total para todas las profundidades (tabla 6 pág 84). Así, a largo plazo en los 19 años de estudio, las partículas se enriquecieron en CaCO_3 y se empobrecieron en C_{org} y en ópalo. Reflejado en la razón $\text{CaCO}_3/\text{C}_{\text{org}}$ que tiende a incrementarse debido la mayor proporción de CaCO_3 en el tiempo (tabla 4 pág 81).

Tabla 9. Coeficientes de regresión múltiple entre el flujo del C orgánico y los componentes minerales que actúan de lastre. $\text{R}^2\%$ = coeficiente de correlación (r^2) en porcentaje; n = número de observaciones. Basado en los valores de flujo de partículas en la estación CARIACO, desde 1995 a 2016.

Trampa, prof (m)	CaCO_3	Ópalo	Terrígenos	$\text{R}^2 \%$	n
A 225	0,041	0,358	0,038	78,8	171
B 410	0,080	0,351	0,058	81,7	170
C 810	0,034	0,292	0,041	74,9	161
D 1210	0,092	0,322	0,024	73,0	153

La estacionalidad del flujo del CaCO_3 fue poco marcada y similar a la del flujo de terrígenos, presentando escasa diferencia entre épocas a 225 m (tabla 2 pág 75). Sin embargo, con los valores porcentuales se observó una clara estacionalidad, el porcentaje de CaCO_3 aumentó en referencia al flujo total en el segundo semestre del año, al contrario de las variables C_{org} y ópalo (figura 8 pág 82). En el ciclo anual las razones en las que interviene el CaCO_3 con el ópalo y el C_{org} variaron de modo apreciable (figura 7 e y g pág 80), por las mayores diferencias en el flujo del ópalo y C_{org} según la época del año. Estas tendencias y observaciones ya fueron presentadas por Goñi *et al.* (2009) disponiendo de una menor cantidad de mediciones.

Explicar la variación del flujo de CaCO_3 no es evidente pues presenta tendencias disímiles con el C_{org} y el ópalo, aunque igualmente se trata de un compuesto en su mayor parte de origen biológico marino (figura 9 pág 83). Las interacciones entre el N, Si y CO_3^{2-} pueden en parte explicar las diferencias. Con la surgencia hay un aporte de NO_3^- y Si(OH)_4^- a las aguas superficiales lo que promueve el crecimiento de las diatomeas, grupo con especies adaptadas a condiciones de inestabilidad, que al tiempo agotan ambos nutrientes. La competencia de las diatomeas no favorece el crecimiento de otros grupos del fitoplancton, en particular el que genera CaCO_3 (ej. cocolitofóridos). Lo que explicaría la menor proporción de CaCO_3 durante la surgencia y su alza durante la estabilidad, cuando la Si está agotada y se desarrollan grupos adaptados a bajas concentraciones de nutrientes. El CaCO_3 es un componente clave en el flujo de partículas en todos los ámbitos marinos, y con frecuencia está en relación con la cantidad de cocolitofóridos en el fitoplancton (Archer 2003, Silverberg *et al.* 2007). Sin embargo, en CARIACO los cocolitofóridos muestran baja incidencia en comparación con los foraminíferos en las muestras de las trampas (Goñi *et al.* 2003, Woodworth, *et al.* 2004). Estos últimos son más abundantes al final del periodo de surgencia en mayo, y aunque en noviembre también se incrementa la proporción de CaCO_3 , esto no parece estar en relación con los foraminíferos (Montes *et al.* 2012, Bringué *et al.* 2019). Posiblemente también pueden influir otros grupos del micro-zooplancton, como los pterópodos que se observan frecuentemente en estas aguas, pero aún no evaluados.

El control de los compuestos de N y Si también pudiera explicar la tendencia al incremento del CaCO_3 con los años, debido al debilitamiento de la surgencia, con un menor aporte de nutrientes (Muller-Karger *et al.* 2019). En consecuencia, los cambios observados pueden relacionarse con la composición y abundancia de los grupos dominantes del fitoplancton. En general, se apreciaron cuatro etapas: una inicial de 1995 – 1999 con alta población de diatomeas, seguida de otra con mayor incidencia de cocolitofóridos y cianofíceas 2000 – 2002; la composición se hace más equilibrada a partir del 2003 pero con dominio del nanno-plancton, ya que después de 2004 la densidad del micro-fitoplancton llega a mínimos (100 veces menor) y no se incrementa hasta el 2014 (Troccoli, datos no publicados, Pinckney *et al.* 2015, Muller-Karger *et al.* 2019). Estos cambios plurianuales del fitoplancton se manifestaron de modo súbito, y tienen relación con variaciones notables en la meteorología e hidrografía que influyeron en las variables físicas, químicas y biológicas (Taylor *et al.* 2012, Astor *et al.* 2017, Rueda-Roa *et al.* 2017, Muller-Karger *et al.* 2019).

El carbonato de los caparazones de los foraminíferos se ha empleado en los estudios de paleo-climatología realizados en CARIACO para determinar condiciones hidrográficas pasadas. Al poder ser calibradas las relaciones $\delta^{13}\text{C}$ y $\delta^{18}\text{O}$ en las moléculas de CaCO_3 de los caparazones interceptados en las trampas, pues se conocen las condiciones ambientales durante su formación (Black *et al.* 2007, Tedesco *et al.* 2007, McConnell *et al.* 2009, Black *et al.* 2011, Marshall *et al.* 2013, Wurtzel *et al.* 2013, Werjnet *et al.* 2013,).

Terrígenos

El componente terrígeno lo constituyen las partículas de origen terrestre o litogénico, aportando alrededor de la mitad del flujo total en peso, por lo que ambos flujos covarían en el ciclo anual, con un máximo en mayo y un mínimo en septiembre - octubre (figura 4 pág 76). Los estudios realizados a este componente mineral indican que proviene de las cuencas de los ríos situados al sur de la fosa, con un bajo aporte de material por transporte eólico (< 10%), y atribuyen su variación al régimen estacional de las lluvias (Martinez *et al.* 2007, Elmore *et al.* 2009). Sin embargo, el flujo de terrígenos es similar o superior en el semestre de sequía en relación al de lluvias entre julio y diciembre (tabla 2 pág 75), y se dificulta explicar el máximo de terrígenos registrado en los promedios durante mayo - junio al final de la época de sequía. En cambio, los valores porcentuales de terrígenos presentaron diferencia significativa entre las dos épocas (Kruskal-Wallis test $p= 0,000$), con un aumento de 47% al 65% en el segundo semestre del año; esta variación estacional fue más notoria a 810 y 1210 m del 47% al 75% (figura 8d pág 82). Esto puede atribuirse a que la materia mineral no se disuelve o disgrega con facilidad a diferencia de la materia orgánica, por tanto aumenta su proporción en el segundo semestre y a mayor profundidad. Durante la surgencia secundaria de corta duración en julio la proporción de terrígenos disminuye.

Se ha planteado que las partículas terrígenas alcanzan la estación acarreadas por capas nefeloides intermedias y del fondo de la plataforma continental, y aunque están en relación con las descargas de los ríos, su mayor influencia se observa en mayo, cuando la surgencia se relaja y las capas nefeloides contenidas sobre la plataforma se dispersan sobre la fosa, lo cual manifiesta una influencia terrestre incluso mayor que para octubre en época de lluvias. (Lorenzoni *et al.* 2009, Montes *et al.* 2012, 2013). Pero es evidente que flujos esporádicos de terrígenos de gran magnitud ocurrieron durante las copiosas lluvias de los meses de noviembre - diciembre de 1999; así también un máximo en mayo de 2004 puede ser atribuido a abundantes precipitaciones fuera de época durante ese año en el que no hubo época de sequía en la región (Varela y Velásquez 2017). La variación del flujo de terrígenos depende de otras causas además de las meteorológicas, pues también pueden influir cambios en las corrientes marinas en la capa superficial y por movimientos sísmicos, como en julio de 1997 y septiembre 2008, cuando se captaron notables incrementos de partículas en la trampa más profunda (Thunell *et al.* 1999, Lorenzoni *et al.* 2012).

El flujo de material terrígeno en 19 años se registró con variaciones sin una tendencia significativa. En cambio, el porcentaje de terrígenos en las muestras se incrementó a todas las profundidades al igual que el de CaCO_3 , aunque este último

a una tasa mayor (+1,2% vs. +2,3 % tabla 6 pág 84). La causa puede ser una tendencia a años con viento débil y más lluviosos a partir de 2005 y en especial en 2008 y de 2010 a 2012 (Varela y Velásquez, 2017) con el consecuente debilitamiento de la surgencia (Astor *et al.* 2017, Muller-Karger *et al.* 2019).

La relación de los terrígenos con los otros componentes fue muy variable, excepto con el flujo total (figura 6 pág 79). Siendo estacionales con aquellos dependientes de la materia orgánica como el C_{org} y el ópalo (figura 7 b pág 80), y no así con el $CaCO_3$ (figura 7d). Estas relaciones variaron a largo plazo: Terrig/ C_{org} y Terrig/Opalo incrementaron su cociente de modo significativo (tabla 4 pág 81); y Terrig/ $CaCO_3$ no presentaron variación. Estos resultados fueron consecuencia de una menor proporción de C_{org} y el ópalo en las muestras y una mayor del $CaCO_3$.

La variación del flujo de componentes terrígenos es lo que induce el cambio visible en las varvas de los sedimentos en la fosa de Cariaco, con la formación de las bandas oscuras anuales y las implicaciones que esto tiene en el análisis de la paleo-climatología (Hughen *et al.* 1996). La influencia de los terrígenos en el sedimento ha sido estudiada con detalle. Los elementos Fe, Ti, Al, K entre otros y la composición química de las arcillas han sido utilizados para determinar el origen del componente mineral en la Fosa de Cariaco y su relación con las cuencas fluviales, las lluvias y el transporte eólico (Peterson y Haug 2006; Martínez *et al.* 2007, Elmore *et al.* 2009, Bout-Roumzeilles *et al.* 2013). También se ha determinado cuantiosos aportes de terrígenos que provienen de movimientos del sedimento sobre la plataforma continental, por deslaves, sismos, o corrientes (Lorenzoni *et al.* 2009 y 2012, 2019). Los trabajos hasta ahora realizados indican que si bien hay un aporte mineral importante desde tierra no se presenta en cambio una contribución significativa de material orgánico de origen terrestre (Woodworth *et al.* 2004, Goñi *et al.* 2009). Los terrígenos se consideran un factor clave en el lastre de la materia orgánica, en particular debido a la adsorción por las arcillas (Archer *et al.* 2003) pero su contribución se muestra baja en CARIACO (tabla 9 pág 92).

Efecto de las variables biológicas en el flujo

Para determinar la influencia de los organismos del plancton vivos sobre el flujo, por su abundancia y capacidad de generar partículas, se emplearon como parámetros disponibles los valores integrados hasta 100 m de: producción primaria ([PP] $g\ C\ m^{-2}\ mes^{-1}$); biomasa de fitoplancton ([Chl-*a*] $mg\ clorofila\ a\ m^{-2}$) y de zooplancton ([B_{Zoo}] peso seco, $g\ m^{-2}$); así como la cantidad de C_{org} en las partículas en suspensión en el agua hasta 160 m ([POC] $g\ C\ m^{-2}$). La tabla 7 (pág 85) muestra los coeficientes de correlación de los componentes del flujo con las variables biológicas a todas las profundidades durante el periodo 1995–2016. El flujo mensual del C_{org} , N y el ópalo ($g\ m^{-2}$) están correlacionados con la [Chl-*a*], [PP] y [POC] a todas las profundidades, excepto a 225 m para la clorofila; y no presentan correlaciones significativas con el flujo total, terrígenos y $CaCO_3$ (excepto a 810 m con el [POC]).

En los primeros cuatro años de la serie de tiempo CARIACO se había detectado una correlación positiva entre el flujo del carbono y la producción primaria (Thunell *et al.* 2000, Muller-Karger *et al.* 2000, 2004). Pero al considerar hasta

nueve años de mediciones (1995–2004), no se apreció entonces una relación significativa con la producción (Thunell, *et al.* 2007, Muller-Karger *et al.* 2019). En un estudio con otro tipo de trampas a la deriva a niveles más superficiales durante un período corto se llegó a la misma conclusión (Montes *et al.* 2012). Trabajos estos que señalan que el lastre mineral (CaCO_3 , ópalo, terrígenos) determina el flujo de C_{org} , pues determina la sedimentación de la materia orgánica y se pierde correspondencia con la variación de la producción primaria. Ahora con una mayor cantidad de mediciones, se repasan estas relaciones entre el flujo de partículas y las condiciones biológicas superficiales; los nuevos resultados retoman la apreciación inicial.

Al analizar lo anterior se presentan conclusiones disímiles dependiendo del período a considerar. Si se calculan las correlaciones de 1995 a 2004, los coeficientes entre la [Chl-*a*] y la [PP] con los flujos de C_{org} y ópalo, no son significativas a 225 m; esto concuerda con lo señalado por Thunell *et al.* (2007). Se destacan las correlaciones con el [POC] y que para el CaCO_3 estas fueron inversas (figura 11a, y anexo 9 pág 117). En cambio, a las otras profundidades se obtienen diferentes resultados. Así, a 410 m hubo correlaciones significativas de la [Chl-*a*] [PP] y [POC] con los flujos de C_{org} y ópalo (figura 11b, anexo 9). En el siguiente periodo 2005 a 2016 el resultado de las correlaciones a 225 410 y 810 m, fueron significativas entre los flujos de C_{org} y ópalo con la [Chl-*a*] [PP] y no así con el [POC] y el CaCO_3 . Por tanto, los resultados fueron dispares entre períodos en particular a 225 m, a las otras profundidades las correlaciones con el [POC] marcaron la diferencia (figura 11, anexo 9).

Entre 2004 y 2005 se registró un salto en las condiciones o las tendencias de varios parámetros medidos en CARIACO, relativo a las condiciones observadas entre 1995 y 2003. Específicamente se captaron cambios en la hidrografía, la composición y productividad del fitoplancton, e incluso en la capa intermedia óxido-reductora y en las tenues tendencias de las aguas profundas. Estas variaciones fueron atribuidas a cambios macro-atmosféricos (Taylor *et al.* 2012, Scranton *et al.* 2014, Muller-Karger *et al.* 2019). Efectos que también se detectan en las relaciones entre las variables biológicas superficiales y las características del flujo sobre todo a 225 m.

Considerando toda la serie de tiempo resalta una diferencia en las correlaciones en función de las dos estaciones del año. Se separa la época de surgencia (diciembre – abril) de la época de estabilidad (mayo – noviembre). En los meses de surgencia la [Chl-*a*] y la [PP] no presentaron correlaciones significativas con los flujos de C_{org} , y ópalo; en cambio, en la época de estabilidad sí se causan (figura 12; y anexo 9 pág 117). Para ambas épocas las correlaciones de la [Chl-*a*], [PP] y [POC] con el flujo de CaCO_3 fueron débiles pero con relación negativa en la época de surgencia y positiva en la de estabilidad. Estas diferencias temporales pueden atribuirse a cambios en la eficiencia del reciclado del C_{org} en la columna de agua (ver apartado, exportación de carbono) y el desacople del flujo del CaCO_3 con los flujos biológicos y de material terrígeno (figura 9 pág 83).

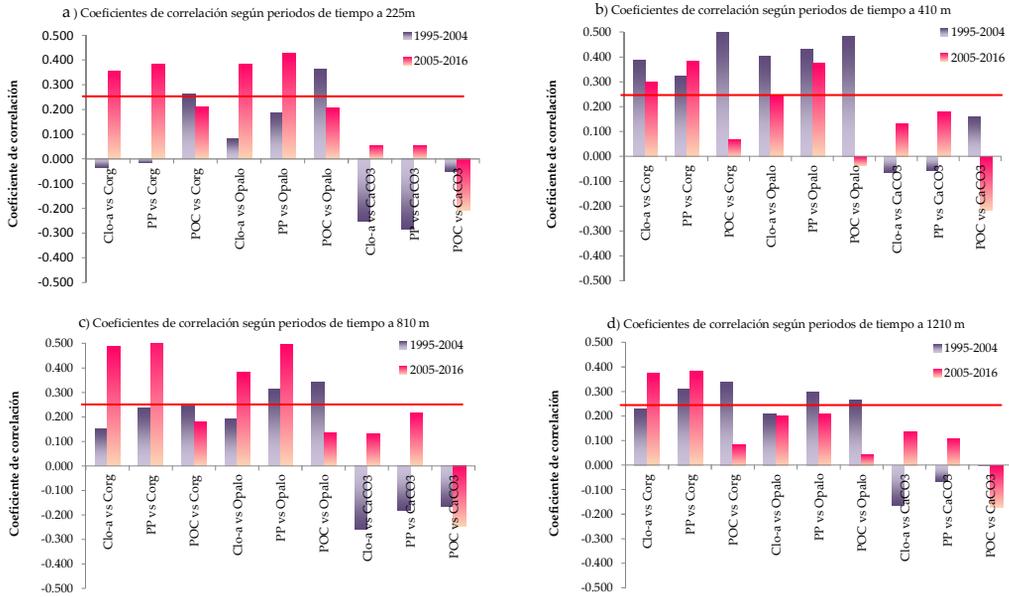


Figura 11. Comparación de los coeficientes de correlación según dos períodos de la serie de tiempo, de 1995 a 2004 y de 2005 a 2016, entre las variables biológicas: Clorofila [Chl-a]; Producción primaria [PP]; C orgánico en partículas [POC], y el flujo de C orgánico (C_{Org}), flujo de Ópalo (sílice biogénica) y flujo carbonatos (CaCO₃). Las correlaciones significativas son las que sobrepasan el valor indicado con la línea roja . Los valores numéricos de estas gráficas se presentan también en la tabla del anexo 9 pág 117.

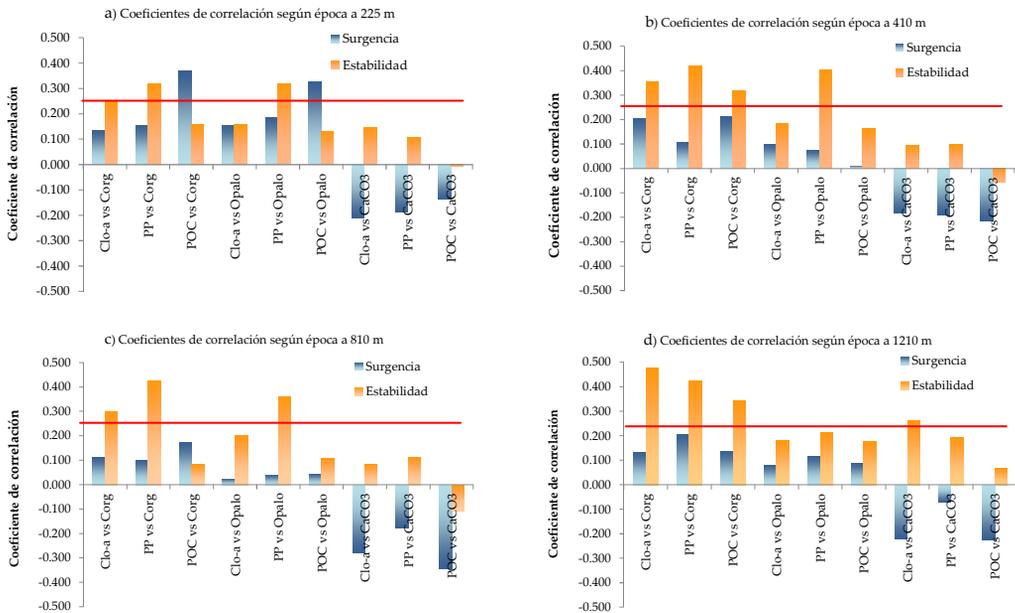


Figura 12. Comparación de los coeficientes de correlación según la época hidrográfica del año para el periodo 1995-2016, entre las variables biológicas: Clorofila [Chl-a]; Producción primaria [PP]; C orgánico en partículas [POC], y el flujo de C orgánico (C_{Org}), flujo de Ópalo (sílice biogénica) y flujo de carbonatos (CaCO₃). Las correlaciones significativas son las que sobrepasan el valor indicado con la línea roja . Los valores numéricos de estas gráficas se presentan también en la tabla del anexo 9 pág 117.

La relación de la biomasa del zooplancton [B_{Zoo}] con los componentes del flujo muestra similitudes y diferencias con las otras variables biológicas. Así, los flujos de C_{org} , N y ópalo estuvieron correlacionados con la biomasa del zooplancton a las profundidades de 225, 410 y 810 m. Destaca que a 410 m todos los componentes del flujo estuvieron estrechamente relacionados con la cantidad de zooplancton, mostrándose lo contrario a 1210 m. Se aprecia también que la biomasa obtenida con malla de 500 μ m, no mostró correlaciones significativas con los flujos a 225 m, en cambio ese tipo de muestras fueron las que mejores coeficientes presentaron a 410 m (tabla 7 pág 85).

A diferencia de las otras variables biológicas, las correlaciones del flujo con la biomasa de zooplancton muestran más relaciones significativas y coeficientes más altos, si se calculan con la biomasa [B_{Zoo}] del mes siguiente a las mediciones del flujo. Por tanto, la biomasa del zooplancton muestra una demora en relación a la biomasa y producción del fitoplancton, atribuible al hecho de requerir el zooplancton un mayor tiempo de desarrollo. La [B_{Zoo}] muestra reflejar las condiciones ambientales y biológicas del mes anterior, en consecuencia se relaciona también con el nivel de los componentes del flujo ya pasado. Es indicativo la mejor correlación del flujo en las tres trampas profundas con la biomasa del zooplancton del siguiente mes, pues esa biomasa se desarrolló en base a la productividad del mes anterior.

Explicar lo anterior va requerir de estudios más detallados de la dinámica del zooplancton, pues los resultados como la alta correlación de la [B_{Zoo}] a 410 m con todos los componentes del flujo (tabla 7 pág 85), son indicio de un evidente efecto del zooplancton en la generación, retención y transporte de partículas, factor no tomado en cuenta en anteriores estudios, aunque señalado como factible (Smoack *et al.* 2004, Goñi *et al.* 2009, Montes *et al.* 2012, Brigué *et al.* 2019). Aunque las trampas se encuentran dentro de la zona hipóxica y anóxica, allí puede llegar la influencia del zooplancton, pues se da una migración activa de organismos que la alcanzan y se mantienen en ella durante el día, como ocurre en el mar Arábigo (Childress y Seibel 1998, Whisner *et al.* 2008). En CARIACO se realizaron calados profundos entre 270 y 500 m con redes de ahorque, observaciones con ecosondas (EK500 Simrad, datos no publicados) y registros indirectos con correntómetros acústicos (Virmani y Weisberg, 2009). Estos sondeos revelaron la migración diaria de organismos del zooplancton desde la capa superficial (25 – 100 m) donde se concentran en la noche, hasta al menos 500 m de profundidad en el día. Estas migraciones probablemente tuvieron incidencia sobre el transporte activo de partículas orgánicas a la zona anóxica.

Índice de eficiencia de exportación de carbono: Índice-e

En CARIACO los promedios de los “índice-e” a las profundidades donde se midió el flujo fueron bajos ($<0,100$), esto indica un relativo menor flujo del C_{org} en relación al fijado por la producción primaria [PP], debido a una intensa remineralización o reciclado del C en las aguas superiores (tabla 8 pág 86). Los valores promedio del índice-e son similares a los calculados en otras series de tiempo como HOT y BATS aunque éstos se tratan de ambientes oceánicos aerobios (Karl *et al.*, 2001). En CARIACO el valor del índice-e y el flujo de C_{org} siguen fluctuaciones

similares según la época del año y la profundidad (figuras 4 y 10 págs. 76 y 87). Se definen tres etapas, de enero a abril la producción es alta pero también lo es el nivel de reciclado, por lo que el flujo de C_{org} es relativamente bajo en relación con el C fijado. Luego, al final de la surgencia (mayo) la producción decrece y hay un aumento súbito del flujo, el índice-e aumenta lo que señala una menor eficiencia de reciclado. Entre junio y octubre se aprecia una disminución progresiva del índice-e, ahora con unos niveles de [PP] más bajos y menores flujos de C_{org} (figura 10).

El desacople estacional que se observa entre la producción primaria y el flujo de C_{org} durante la surgencia, puede explicarse del siguiente modo. En la surgencia una mayor biomasa del fitoplancton promueve un crecimiento de microorganismos heterótrofos y del zooplancton, los primeros reciclan intensamente la materia orgánica y los segundos la concentran, crecen y retienen la materia en suspensión por un periodo más prolongado. Además, el movimiento vertical por la surgencia y la mezcla del agua por el viento mantienen por más tiempo las partículas en suspensión en la capa superficial. En consecuencia, el flujo de C_{org} es relativamente bajo en comparación con el C_{org} que se está fijando en la zona eufótica. A más profundidad el índice-e es menos variable en el ciclo anual, pues el flujo de C_{org} disminuye y sus variaciones son menores relativas a la producción primaria. El flujo masivo observado al final de la surgencia (en mayo), es indicativo de cambios físicos en el movimiento del agua en una etapa de transición, las partículas se hunden rápido y esto lleva a una menor eficiencia en la re-mineralización. Los datos de CARIACO también muestran un incremento en la diversidad de los grupos del zooplancton en esa etapa; donde se incluyen plancton gelatinoso, diatómidos, apendicularias, foraminíferos y pterópodos, todos organismos predadores relativamente grandes. Además, es posible que haya cambios en el estado fisiológico de las células de las diatomeas que influyen en la capacidad de mantener una flotación neutra y pueden formarse exo-polímeros que actúan como aglomerantes. Es conocido que luego del crecimiento masivo de fitoplancton, su biomasa colapse rápidamente al agotarse los nutrientes en especial el Si y N, y esta precipita con celeridad (Huppert et al. 2002, De La Rocha y Passow 2007, Ryneerson et al. 2013, Gemell et al. 2016, Taucher et al. 2018). En la época de estabilidad, con valores de [PP] más bajos, el flujo de C_{org} muestra una mejor correlación, y el índice de exportación se mantiene con un valor superior a lo observado durante la surgencia (a 225 m), que luego disminuye hasta alcanzar de modo progresivo un mínimo similar al de la época de surgencia en octubre (tabla 8, figura 10 pág 86-87).

Cerca del fondo en la estación CARIACO (1380 m) llega un flujo de $0,82 \pm 0,35$ g C m^{-2} mes^{-1} (tabla 2 pág 75), que totaliza $9,84$ g C m^{-2} $año^{-1}$, y es un 2,37 % de la producción primaria anual (tabla 8). Esto constituye la porción del carbono fijado por la producción primaria que queda secuestrado por un periodo de tiempo prolongado en el fondo marino. Valores que están dentro de los rangos de otros sitios en el océano a similares profundidades (Lutz et al. 2002, De la Rocha y Passow et al. 2007, Muller-Karger et al. 2004, 2005, 2019). Se estima que aproximadamente 50% de ese carbono se incorpora de modo permanente a los sedimentos de la Fosa de Cariaco (Thunell, 2000).

Conclusiones.

El flujo de partículas en CARIACO revela la estacionalidad meteorológica e hidrográfica de la capa superficial del mar en la región, en épocas de sequía con surgencia y de lluvia con estabilidad. El flujo de partículas incluso capta el efecto de una breve surgencia secundaria que suele producirse en julio o agosto. El fenómeno hidrográfico induce a una mayor productividad primaria y aumenta la cantidad de materia orgánica en partículas vivas o inertes, así como su componente mineral asociado. Estas contienen el C fijado, el Si (ópalo), N y CaCO_3 de diversos organismos del plancton.

A las partículas originadas por los organismos en el mar se les une un componente terrígeno proveniente de las cuencas hidrográficas al sur de la fosa. Se considera que las partículas mezcladas tienden a sedimentar más rápido, debido al material mineral que lastra a la materia orgánica. Esto se manifiesta sobre todo al final del periodo de surgencia y durante las lluvias. Aunque se aprecia que en Cariaco la sílice biogénica, y por tanto las diatomeas, es el componente que más influye en el acarreo de C orgánico hacia el fondo, a pesar de la alta contribución de terrígenos en las muestras.

El flujo disminuye exponencialmente con la profundidad, a una tasa similar al de mares con oxígeno. En CARIACO es frecuente encontrar inversiones y variaciones al perfil vertical del flujo. Se concluye que esto es a causa de aportes de sedimentos en suspensión por desplazamientos laterales desde la plataforma continental, y también posiblemente por producción de nueva materia orgánica por quimiosíntesis que ocurre a profundidades entre los 150 y 250 m en oscuridad, donde se encuentra la zona de transición hipóxica-anóxica. Además, se evidencia que hay un transporte activo de material por la migración del zooplancton, los cuales generan partículas (sean fecales o sus propios cuerpos) en la zona de transición. Se encuentra que la trampa situada a 410 m registra con mayor detalle esta influencia que la situada a 225 m.

La estacionalidad se manifiesta en flujos con diferente magnitud y composición. La proporción en base al flujo total de los elementos C_{org} , N y Si (ópalo) en las partículas es mayor en la época de surgencia que durante la época de estabilidad. En cambio, el flujo de CaCO_3 muestra una relación inversa. Hay una mejor correlación de los flujos total y de terrígenos con el de CaCO_3 que con los del C_{org} , N y ópalo. De modo que los carbonatos muestran variaciones que no parecen estar acopladas a los otros componentes.

A largo plazo se observaron tendencias en la serie de tiempo como la disminución en la proporción del C_{org} , N y ópalo en la masa de flujo total de partículas, y un aumento del CaCO_3 , y los terrígenos. Cuando en valores absolutos para el flujo total no hubo tendencia significativa en dos décadas.

Existen correlaciones directas entre la clorofila, producción primaria y el C orgánico en partículas en suspensión de la capa superficial, con las variables de flujo de C_{org} , N y ópalo. Aunque separadas por época estas correlaciones son más significativas durante la estabilidad que en la surgencia. Los cambios en los componentes del flujo pueden ser atribuidos a la composición del fitoplancton que es el principal origen de la materia orgánica que se sedimenta en la estación CARIACO

dada la composición y compuestos presentes en las partículas analizadas. El zooplancton revela influencia en la generación y retención de partículas, de modo que interviene en su traslado hacia aguas profundas.

El índice de exportación del C en relación a la producción primaria es bajo en la Fosa de Cariaco y análogo al registrado en mares con oxígeno a profundidades similares. Se registra que este índice varía según la época del año, con un valor menor durante la surgencia. Se concluye que durante la surgencia hay un mayor reciclaje de material orgánico en las capas superficiales, y una retención del mismo por causas hidrográficas y biológicas (incremento de la actividad heterótrofa y del zooplancton). Se produce un máximo del flujo al final del periodo de surgencia (mayo), momento que cambia de una condición de alta producción primaria a otra de menor producción y baja tasa de reciclado. En consecuencia ocurre el colapso de una biomasa que se hunde con rapidez. Esto explicaría el desacople temporal que se registra entre la fijación del C por el fitoplancton y el flujo de C_{org} en las partículas.

Sería conveniente conocer los factores que influyen en este cambio de eficiencia en el reciclado del C orgánico en las aguas superiores, cuantificando e identificando los principales microorganismos heterótrofos, el fitoplancton y los organismos del zooplancton, su dinámica poblacional, posición trófica, competencia y espectro de tallas.

La cantidad de C orgánico que llega a las aguas profundas (>1000 m) es alrededor del 2% del C fijado en superficie.

Agradecimientos: Este dilatado trabajo fue posible gracias a un equipo de decenas de profesionales, técnicos especializados y estudiantes, que a lo largo de dos décadas ayudaron en la obtención de las muestras, y abordaron los análisis necesarios. Fue esencial la particular pericia de la tripulación a bordo del B/O Hermano Ginés, en especial a los capitanes Pascual Marín y Aparicio Narváez, al oficial de máquinas Marci Millán (†) y entre los marinos a Julio González y Germán Marín, quienes hicieron posible unas 40 recuperaciones del sistema de trampas de partículas. Mención especial a Yrene Astor por el estudio de la física y química de las aguas de la Fosa, con el acertado apoyo de sus conocimientos y ayuda en la logística. Al técnico José Jesús Narváez, por su destreza y presencia en casi todas las salidas al mar, a Juan Carlos Capelo en los análisis de clorofila y producción primaria, a Javier Gutiérrez (†), Luis González, Rubén Quiñones y Jaimie Rojas que realizaron el análisis del zooplancton. Al personal de Fundación La Salle en la isla de Margarita y EDIMAR que llevó a buen término la administración y logística necesaria, en los diferentes aspectos que conlleva este tipo de trabajo. A Miguel Goñi (Oregon University, Corvallis) especialista en el tema por su revisión crítica al escrito. Recordatorio especial al Hno. Ginés (†) por su apoyo entusiasta desde los planes de inicio del proyecto, y haber forjado la idea y construido la base institucional para que un estudio de estas características pudiera llevarse a cabo. El proyecto CARIACO tuvo el apoyo financiero de la NSF de EEUU para los investigadores de las instituciones norteamericanas, y del CONICIT y luego FONACIT para los de las instituciones de Venezuela, en varias convocatorias desde 1995 hasta el 2016.

Bibliografía.

- ALVERA-AZCÁRATE, A.; A. BARTH; R. H. WEISBERG. 2009. A nested model of the Cariaco Basin (Venezuela): description of the basin's interior hydrography and interactions with the open ocean. *Ocean Dynamics*, 2009. DOI 10.1007/s10236-008-0169-y
- ARCHER D. 2003. Biological fluxes in the ocean and atmospheric pCO₂. En: Elderfield, H (ed.), *Treatise on Geochemistry, Volume 6, The Oceans and Marine Geochemistry*: Pp. 275–292.
- ASTOR, Y., L. LORENZONI, M. SCRANTON (ED.). 2013. Manual de métodos para el análisis de parámetros oceanográficos en la estación serie de tiempo CARIACO. Handbook of methods for analysis of oceanographic parameters at the CARIACO Time- Series Station. Colección Cuadernos FLASA. Serie Ciencia y Tecnología nº 12. Fundación La Salle de Ciencias Naturales. Caracas. ISBN 978-980-7090-17-9. 178 pp. http://reef01.marine.usf.edu/sites/default/files/project/cariaco/publications/CARIACO_Methods_Manual_v2.pdf
- ASTOR, Y., L. GUZMÁN, L. TROCCOLI, L. LORENZONI, F. MULLER-KARGER. 2017. Síntesis de las tendencias de los parámetros oceanográficos y ópticos en la estación serie de tiempo CARIACO (enero 1996–diciembre 2013). *Memoria Fundación La Salle de Ciencias Naturales*. 74 “2014”(181-182): 81-101.
- BENITEZ-NELSON, C. R., L. P. O'NEILL, L. KOLOWITH, P. PELLECHIA, R. C. THUNELL 2004. Phosphonates and particulate organic phosphorus cycling in an anoxic marine basin”. *Limnology & Oceanography*, 49(5), 1593-1604.
- BENITEZ-NELSON, C., L. P. O'NEILL, R. M. STYLES, R.C. THUNELL, Y. ASTOR. 2007. Inorganic and organic sinking particulate phosphorus fluxes across the oxic/anoxic water column of Cariaco Basin, Venezuela. *Marine Chemistry*. 105: 90-100
- BERGER, W., K. FISCHER, C. LAI, Y G. WU. 1988. Ocean carbon flux: Global maps of primary production and export production, p. 131–176. In C. Agegian [ed.], *Biogeochemical cycling and fluxes between the deep euphotic zone and other oceanic realms*. NOAA National Undersea Research Program Report 88-1.
- BLACK, D. E., R. C. THUNELL, A. KAPLAN, L. C. PETERSEN, E. TAPPA. 2004. A 2000-year record of Caribbean and tropical North Atlantic hydrographic variability. *Paleoceanography*, 19, PA2022, doi:10.1029/2003PA000982
- BLACK D, M. ABAHAZI, R. THUNELL, A. KAPLAN, E. TAPPA, L. PETERSON. 2007. An 8-century tropical Atlantic SST record from the Cariaco Basin: Baseline variability, twentieth-century warming, and Atlantic hurricane frequency. *Paleoceanography*. 22 (2007):PA4204.
- BLACK, D., R. THUNELL, K. WEJNERT, Y. ASTOR. 2011. Carbon isotope composition of Caribbean Sea surface waters: Response to the uptake of anthropogenic CO₂. *Geophysical Research Letters*, 38 (L16609), (2011) doi: 10.1029/2011GL048538.
- BOUT-ROUMAZEILLES, V, A. RIBOULLEAU, E. ARMYNOT DU CHÂTELET, L. LORENZONI, N. TRIBOVILLARD, R. W. MURRAY, F. MULLER-KARGER, Y. ASTOR. 2013. Clay mineralogy of surface sediments as a tool for deciphering river contributions to the Cariaco Basin (Venezuela). *Journal of Geophysical Research*, 118 (1-2): 1-12 doi:10.1002/jgrc.20079
- BUESSELER, K. O., A. N. ANTIA, M. CHEN, S. W. FOWLER, W. D. GARDNER, O. GUSTAFSSON, K. HARADA, A. F. MICHAELS, M. R. VAN DER LOEFF, M. SARIN, D. K. STEINBERG, T. TRULL, 2007. An assessment of the use of sediment traps for estimating upper ocean particle fluxes. *Journal Marine Research*. 65, 345–416.
- BRINGUÉ M., V. POSPELOVA, E. J. TAPPA, R. THUNELL. 2019. Dinoflagellate cyst production in the Cariaco Basin: A 12.5 year-long sediment trap study. *Progress in Oceanography*. 171:175-211.
- BRINGUÉ, M., R. C. THUNELL, V. POSPELOVA, J. L. PINCKNEY, O. E. ROMERO, E. J. TAPPA. 2018. Physico-chemical and biological factors influencing dinoflagellate cyst production in the Cariaco Basin. *Biogeosciences* 15, 2325–2348. <https://doi.org/10.5194/bg-15-2325-2018>.

- CALVERT, S. E., D. Z. PIPER, R. C. THUNELL, Y. ASTOR. 2015. Elemental settling and burial fluxes in the Cariaco Basin. *Marine Chemistry* 177 (4): 607–629.
- CANFIELD, D. 1989. Sulfate reduction and oxic respiration in marine sediments: implications for organic carbon preservation in euxinic environments. *Deep-Sea Research*. 36 (1), 121–138.
- CHILDRESS, J. J., Y SEIBEL, B. A. 1998. Life at stable low oxygen levels: adaptations of animals to oceanic oxygen minimum layers. *Journal Experimental Biology*. 201, 1223–1232.
- DE LARROCHA, C.L., U. PASSOW, 2007. Factors influencing the sinking of POC and the efficiency of the biological carbon pump. *Deep Sea Research Part II* 54(5)639–658.
- ELMORE, A. C., R. C. THUNELL, R. STYLES, D. BLACK, R. W. MURRAY, N. MARTINEZ, Y. ASTOR. 2009. Quantifying the seasonal variations in fluvial and eolian sources of terrigenous material to Cariaco Basin, Venezuela. *Journal of South America. Earth Science*. 27: 197–210.
- GEMMELL, B. J., G. OH, E. J. BUSKEY, T. A. VILLAREAL. 2016. Dynamic sinking behaviour in marine phytoplankton: rapid changes in buoyancy may aid in nutrient uptake. *Proceedings Royal Society. B* 283: 20161126. <http://dx.doi.org/10.1098/rspb.2016.1126>
- GOÑI, M. A., H. L. ACEVES, R. C. THUNELL, E. TAPPA, D. BLACK, Y. ASTOR, R. VARELA Y F. MULLER-KARGER. 2003. Biogenic fluxes in the Cariaco Basin: A combined study of sinking particulates and underlying sediments. *Deep-Sea Research I*. 50: 781–807.
- GOÑI, M. A., M. P. WOODWORTH, H. L. ACEVES, R. C. THUNELL, E. TAPPA, D. BLACK, F. MULLER-KARGER, Y. ASTOR, R. VARELA. 2004. Generation, transport and preservation of the alkenone-based UK'37 sea surface temperature index in the water column and sediments of the Cariaco Basin (Venezuela). *Global Biogeochemical Cycles*, 18 (GB2001), 21 pp.
- GOÑI, M., R. THUNELL, M. WOODWORTH, Y F. MULLER-KARGER. 2006. Changes in wind-driven upwelling during the last three centuries: Interocean teleconnections. *Geophysical Research Letters*. 33. 10.1029/2006GL026415
- GOÑI, M. A., H. ACEVES, B. BENITEZ-NELSON, E. TAPPA, R. THUNELL, D. BLACK, F. MULLER-KARGER, Y. ASTOR, R. VARELA. 2009. Oceanographic and climatologic controls on the compositions and fluxes of biogenic materials in the water column and sediments of the Cariaco Basin over the Late Holocene. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 56 (4): 614–640.
- HONJO, S., Y K. DOHERTY. 1988. Large-aperture time series oceanic sediment traps: Design objectives, construction and application. *Deep-Sea Res.* 35: 133–149.
- HONJO, S., S. J. MANGANINI, R. A. KRISHFIELD, R. FRANCOIS. 2008. Particulate organic carbon fluxes to the ocean interior and factors controlling the biological pump: a synthesis of global sediment trap programs since 1983. *Progress in Oceanography*. 76:217–285.
- HUGHEN, K. A., J. T. OVERPECK, L. C. PETERSON, R. F. ANDERSON. 1996. The nature of varved sedimentation in the Cariaco Basin, Venezuela, and its palaeoclimatic significance. En: Kemp A.E.S. (edt. Paleoclimatology and Palaeoceanography from Laminated Sediments. Geological Society Special Publication N° 116: 171–183.
- HUPPERT, A., B. BLASIUS Y L. STONE. 2002. A Model of Phytoplankton Blooms. *The American Naturalist*. 159 (2): 156–171.
- IRWIN, A. J.; Z. V. FINKEL, F. E. MULLER-KARGER Y LUIS TROCCOLI. 2015. Phytoplankton adapt to changing ocean environments. *PNAS* May 5, 2015 vol. 112 no. 18: 5762–5766.
- JÜRGENS, K. Y G. TAYLOR. 2018. Microbial Ecology and Biogeochemistry of Oxygen deficient Water Columns. Chapter 7. “Microbial Ecology of the Oceans”, edited by David L. Kirchman, and Josep M. Gasol, John Wiley & Sons, Incorporated, 2018. 66 p.
- KARL, D. M., J. E. DORE, R. LUKAS, A. F. MICHAELS, N. R. BATES, A. KNAPP. 2001. Building the long-term picture: The U. S. JGOFS time-series programs, *Oceanography*, 14, 6 – 17.

- LI, X. N., G. A. CUTTER, R. C. THUNELL, E. TAPPA, W. P. GILHOOLY III., T. W. LYONS, Y. ASTOR, M. L. SCRANTON, 2011. Particulate sulfur species in the water column of the Cariaco Basin. *Geochimica Cosmochimica Acta*, 75, 148-163
- LORENZONI, L., R. C. THUNELL, C. R. BENITEZ-NELSON, D. HOLLANDER, N. MARTINEZ, E. TAPPA, R. VARELA, Y. ASTOR Y F. E. MULLER-KARGER. 2009. The importance of sub-surface nepheloid layers in transport and delivery of sediments to the eastern Cariaco Basin, Venezuela. *Deep-Sea Research Part I*, 56 (2009): 2249-2262. doi:10.1016/j.dsr.2009.08.001
- LORENZONI, L., C. HU, R. VARELA, G. ARIAS, L. GUZMAN, F. MULLER-KARGER, 2011. Bio-optical characteristics of Cariaco Basin (Caribbean Sea) waters. *Continental Shelf Research*, 31: 582-593.
- LORENZONI, L., C. BENITEZ-NELSON, R. C. THUNELL, D. HOLLANDER, R. VARELA; Y. ASTOR, F. AUDEMARD, Y F. MULLER-KARGER, 2012. Potential role of event-driven sediment transport on sediment accumulation in the Cariaco Basin, Venezuela. *Marine Geology* (april, 2012) Vol. 307-310: 105- 110.
- LORENZONI, L., D. RUEDA, E. MONTES, R. VARELA, J. ROJAS, L. GUZMÁN, Y. ASTOR. F. MULLER-KARGER. 2017. Spatial variability in factors that control the sinking flux of organic and inorganic particles in the Cariaco Basin: a vision from space, *International Journal of Remote Sensing*, 38:22, 6206-6218, DOI: 10.1080/01431161.2017.1350305
- LORENZONI, L., R. C. THUNELL, C. R. BENITEZ-NELSON, E. MONTES, R. VARELA, Y. ASTOR, F. E. MULLER-KARGER. 2019. From Land to the Ocean: The Interplay between Allochthonous and Autochthonous Contribution to Particles in Nepheloid Layers of the Cariaco Basin, Venezuela. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 124. <https://doi.org/10.1029/2019JG005288>
- LOUCA, S., Y. M. ASTOR, M. DOEBELI, G. T. TAYLOR, M. I. SCRANTON 2019. Microbial metabolite fluxes in a model marine anoxic ecosystem. *Geobiology* 17 (6): 628-642. <https://doi.org/10.1111/gbi.12357>
- LUTZ, M., R. L. DUNBAR, Y K. CALDEIRA. 2002. Regional variability in the vertical flux of particulate organic carbon in the ocean interior, *Global Biogeochemical Cycles*, 16(3), 1037, doi:10.1029/2000GB001383.
- MACSOTAY, O., V. VIVAS, M. GIL. 2009. Historia geológica del golfo y la fosa de Cariaco Venezuela nororiental. Evolución de la anoxia. *Boletín Instituto Oceanográfico de Venezuela*, 48 (2): 89-108
- MARSHALL, B. J., R. C. THUNELL, M. J. HENEHAN, Y. ASTOR, K. E. WEJNERT. 2013. Planktonic foraminiferal area density as a proxy for carbonate ion concentration: A calibration study using the Cariaco Basin Ocean Time Series. *Paleoceanography*. 28 (2): 363-376.
- MARSHALL, B.J., R. THUNELL, H. SPERO, M. HENEHAN, L. LORENZONI, Y. ASTOR. 2015. Morphometric and stable isotopic differentiation in *Orbulina universa* morphotypes from the Cariaco Basin, Venezuela. *Marine Micropaleontology*. 120: 46-64. <https://doi.org/10.1016/j.marmicro.2015.08.001>
- MARTINEZ, N., R.W. MURRAY, R.C. THUNELL, L. PETERSON, F.E. MULLER-KARGER, Y. ASTOR, R. VARELA, 2007. Modern climate forcing of terrigenous deposition in the tropics (Cariaco Basin, Venezuela). *Earth and Planetary Science Letters* 264 (2007), 438-451
- MARTINEZ, N. C., R. W. MURRAY, R. C. THUNELL, L. C. PETERSON, F. E. MULLER-KARGER. L. LORENZONI, Y. ASTOR, R. VARELA. 2010. Local and regional geochemical signatures of surface sediments from the Cariaco Basin and Orinoco Delta, Venezuela. *Geology*, Vol. 38 (2): 159-162. doi: 10.1130/G30487.1

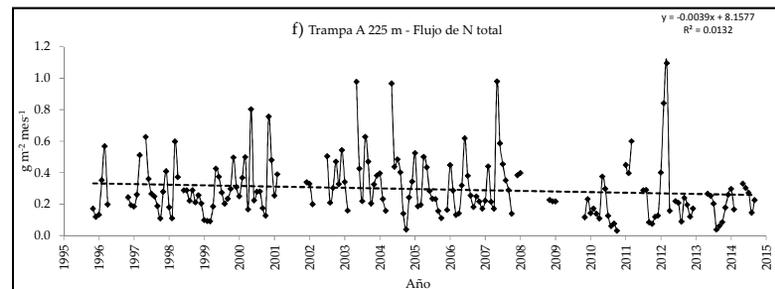
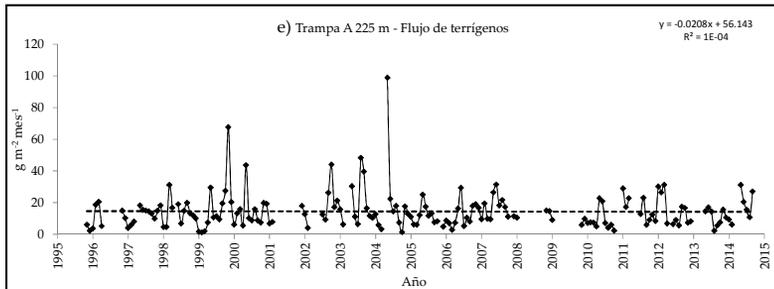
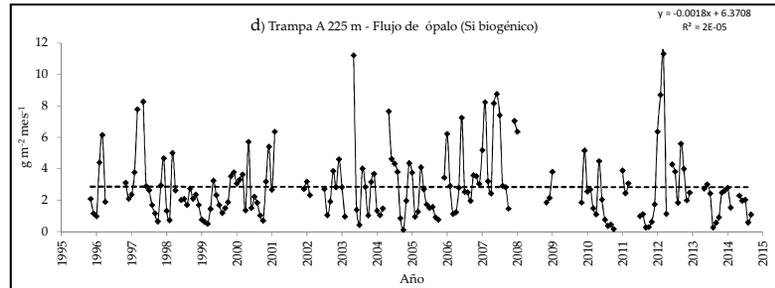
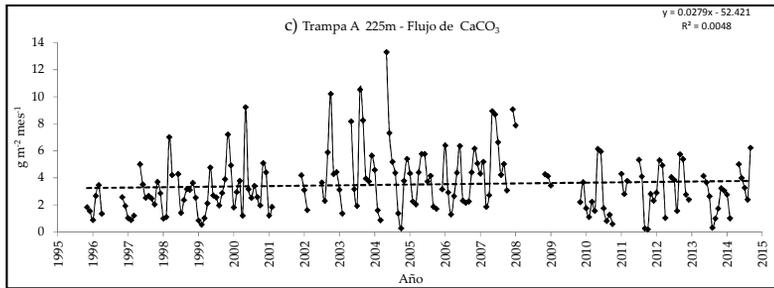
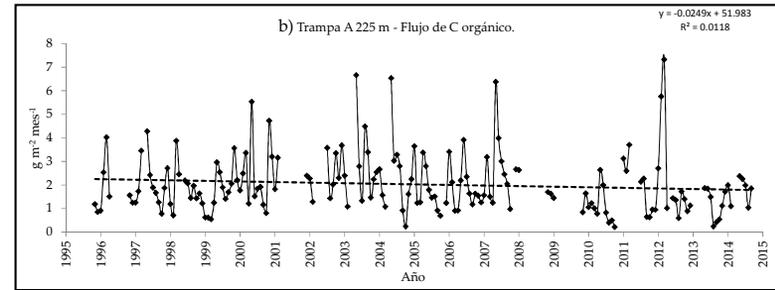
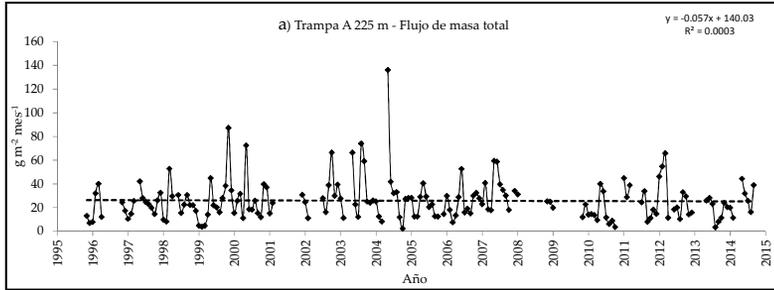
- MCCONNELL, M. C., R. C. THUNELL, L. LORENZONI, Y. ASTOR, J. D. WRIGHT. 2009. Seasonal variability in the salinity and oxygen isotopic composition of seawater from the Cariaco Basin, Venezuela: Implications for paleosalinity reconstructions. *G3*, Volume 10 (6), Q06019, doi:10.1029/2008GC002035
- MCPARLAND E., C. R. BENITEZ-NELSON, G. T. TAYLOR, A. ROLLINGS, L. LORENZONI. 2015. Cycling of suspended particulate phosphorus in the redoxcline of the Cariaco Basin. *Marine Chemistry*. 176: 64 –74.
- MONTES, E.; F.MULLER-KARGER, R.THUNELL, D.HOLLANDER, Y.ASTOR, R. VARELA, I. SOTO, L. LORENZONI, 2012. Vertical fluxes of particulate biogenic material through the euphotic and twilight zones in the Cariaco Basin, Venezuela. *Deep Sea Research I*. 67: 73-84.
- MONTES, E., R. THUNELL, F. E. MULLER-KARGER, E. TAPPA, L. LORENZONI, L. TROCCOLI, Y. ASTOR, R. VARELA. 2013. Sources of $\delta^{15}\text{N}$ variability in sinking particulate nitrogen in the Cariaco Basin, Venezuela. *Deep Sea Research II*. 93: 96 – 107.
- 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, J. R. DIAZ. 2000. Sediment record linked to surface processes in the Cariaco Basin. *EOS.AGU Transactions. American Geophysical Union*, 81 (45): 529, 534-535.
- MULLER-KARGER, F. E., R. VARELA, R. THUNELL, Y. ASTOR, H. ZHANG, C. HU. 2004. Processes of Coastal Upwelling and Carbon Flux in the Cariaco Basin. *Deep-Sea Research II. Special Issue: Views of Ocean Processes from the Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor (SeaWiFS) Mission* : Volume 2 - Edited by D. A. Siegel, A. C. Thomas and J. Marra. Vol 51/10-11 pp 927-943.
- MULLER-KARGER, F., L. LORENZONI, E. MONTES, G. TAYLOR, B. THUNELL, M. SCRANTON, C. BENITEZ-NELSON, Y. ASTOR, R. VARELA, L. TROCCOLI, K. FANNING. 2013. The CARIACO Ocean Time-Series: 18 years of international collaboration in ocean biogeochemistry and ecological research. *Ocean Carbon Biogeochemistry News. OCB News* Vol. 6 nº 3: 7-12. Fall 2013.
- MULLER-KARGER, F., Y. ASTOR, C. BENITEZ-NELSON, K. N. BUCK, K. A. FANNING, L. LORENZONI, E. MONTES, D. T. RUEDA-ROA, M. SCRANTON, E.TAPPA, G. TAYLOR, R. THUNELL, L. TROCCOLI, R. VARELA, 2019. The Scientific Legacy of the CARIACO Ocean Time-Series Program. *Annual Review of Marine Science*. 2019.11:413-437.
- MURRAY, J., J. DOWNS, S. STROM, C. WEI, H. JANNASCH. 1989. Nutrient assimilation, export and production and ^{234}Th scavenging in the eastern equatorial Pacific. *Deep-Sea Res.* 36: 1471-1489.
- MUTSHINDA, C. M.; L. TROCCOLI-GHINAGLIA, Z. V. FINKEL, F.E. MULLER-KARGER, A. J. IRWIN. 2013. Environmental control of the dominant phytoplankton in the Cariaco basin: a hierarchical Bayesian approach. *Marine Biology Research*, 2013; 9: 247-261.
- PACE, M., G. KNAUER, D. KARL, J. MARTIN. 1987. Primary production, new production and vertical flux in the eastern Pacific Ocean. *Nature* 325: 803-804.
- PETERSON, L. C. Y G. H. HAUG. 2006. Variability in the mean latitude of the Atlantic Intertropical Convergence Zone as recorded by riverine input of sediments to the Cariaco Basin (Venezuela). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 234 (2006) 97-113.
- PINCKNEY, J. L.; C. R. BENITEZ-NELSON, R. C. THUNELL, F. MULLER-KARGER, L. LORENZONI, L. TROCCOLI, R. VARELA. 2015. Phytoplankton community structure and depth distribution changes in the Cariaco Basin between 1996 and 2010. *Deep-Sea Research I* 101 (2015) 27-37.
- RAVEN M. R., A. L. SESSIONS, J. F. ADKINS, R. C. THUNELL, 2016. Rapid organic matter sulfurization in sinking particles from the Cariaco Basin water column, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 190: 175-190, <http://dx.doi.org/10.1016/j.gca.2016.06.030>.

- ROMERO, O. E., R. C. THUNELL, Y. ASTOR, R. VARELA. 2009. Seasonal and interannual dynamics in diatom production in the Cariaco Basin, Venezuela. *Deep-Sea Research I*, 56:571-581.
- RUEDA-ROA, D., Y F. MULLER-KARGER, 2013. The Southern Caribbean Upwelling System: Sea surface temperature, wind forcing and chlorophyll concentration patterns, *Deep-Sea Research I*, 178:102-114. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr.2013.04.008>
- RYNEARSON, T. A., K. RICHARDSON, R. S. LAMPITT, M. E. SIERACKI, A. J. POULTON, M. M. LYNNGSGAARD, M. J. PERRY. 2013. Major contribution of diatom resting spores to vertical flux in the sub-polar North Atlantic. *Deep-Sea Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 82:60–71. doi:10.1016/j.dsr.2013.07.013
- SCHUBERT, C. 1982. Origin of Cariaco Basin, Southern Caribbean Sea. *Marine Geology*. 47: 345-360.
- SCRANTON, M. I., F. L. SAYLES, M. P. BACON, P. G. BREWER 1987. Temporal changes in the hydrography and chemistry of the Cariaco Trench. *Deep-Sea Research*, 34 (5/6): 945-963.
- SCRANTON, M. I., Y. ASTOR, R. BOHRER, T.-Y. HO, F. E. MULLER-KARGER. 2001. Controls on temporal variability of the geochemistry of the deep Cariaco Basin. *Deep-Sea Research I*, 48: 1605-1625.
- SCRANTON, M.I., M. MCINTYRE, G. T. TAYLOR, F. MULLER-KARGER, K. FANNING, Y. ASTOR. 2006. Temporal Variability in the Nutrient Chemistry of the Cariaco Basin. In: Neretin, L.N. (ed.), Past and Present Water Column Anoxia. NATO Science Series, Springer, Netherlands, p. 139-160
- SCRANTON, M., G. TAYLOR, R. THUNELL, C. BENITEZ-NELSON, F. MULLER-KARGER, K. FANNING, L. LORENZONI, E. MONTES, R. VARELA, Y. ASTOR. 2014. Interannual and Sub-decadal variability in the nutrient geochemistry of the Cariaco basin. *Oceanography* Vol. 27, n° 1 March 2014
- SILVERBERG, N., F. AGUIRRE BAHENA, M. Y. CORTÉS-MARTÍNEZ F. J. URCÁDIZ-CÁZARES. 2007. Flujos verticales de carbono orgánico e inorgánico particulado en Cuenca Alfonso, Bahía de La Paz, y comparación con otros ambientes en el norte de México. En: Carbono en ecosistemas acuáticos de Mexico. B. Hernández de la Torre y G. Gaxiola Castro (Ed). Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales. Instituto Nacional de Ecología Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada. Cap. 28: 411 - -425.
- SMOAK, J.M., C. BENITEZ-NELSON, W. S. MOORE, R.C. THUNELL, Y. ASTOR, F. MULLER-KARGER. 2004. Radionuclide fluxes and particle scavenging in Cariaco Basin. *Continental Shelf Research*. 24: 1451-1463, 2004
- SUTER E. A., M. G. PACHIADAKI, G. T. TAYLOR, Y. ASTOR, V. P. EDGCOMB. 2018. Free-living chemoautotrophic and particle-attached heterotrophic prokaryotes dominate microbial assemblages along a pelagic marine redox gradient. *Environment Microbiology*, 20(2): 693-712. doi:10.1111/1462-2920.13997.
- RUEDA-ROA D, J. MENDOZA , F. MULLER-KARGER, J. J. CARDENAS, A. ACHURY, Y. ASTOR (2017). Spatial variability of Spanish sardine (*Sardinella aurita*) abundance as related to the upwelling cycle off the southeastern Caribbean Sea. *PLoS ONE*. 12(6): 1-25.
- TAUCHER, J., P. STANGE, M. ALGUERÓ-MUÑIZ, L. T. BACHA, A. NAUENDORFA, R. KOLZENBURGA, J. BÜDENBENDERA, U. RIEBESELLA. 2018. In situ camera observations reveal major role of zooplankton in modulating marine snow formation during an upwelling-induced plankton bloom. *Progress in Oceanography* 164 (2018) 75–88.
- TAYLOR, G., M. SCRANTON, M. IABICHELLA, T. Y. HO, R. VARELA. 2001. Chemoautotrophy in the redox transition zone of the Cariaco Basin, a significant source of midwater organic carbon production. *Limnology & Oceanography*, 46:148-163.

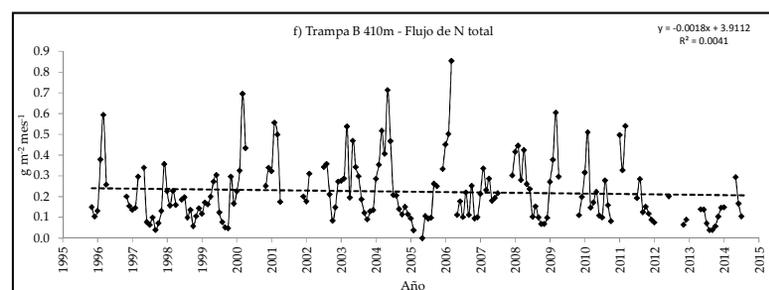
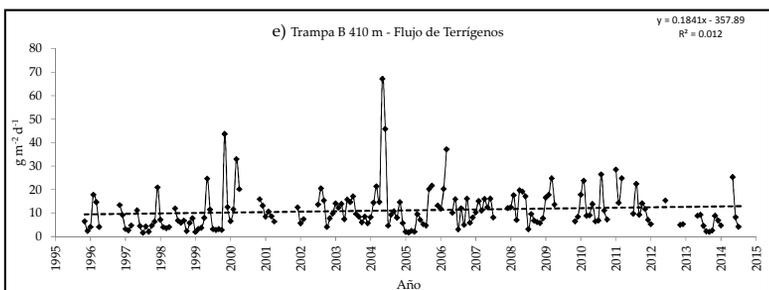
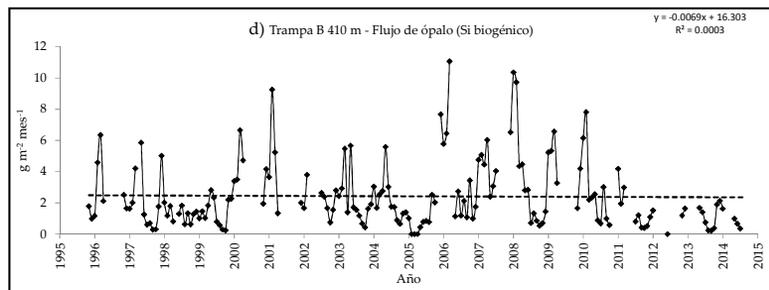
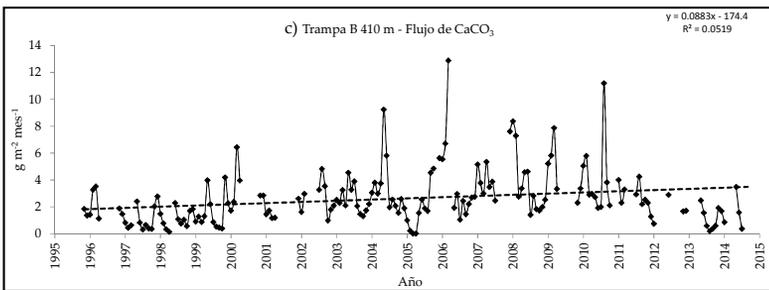
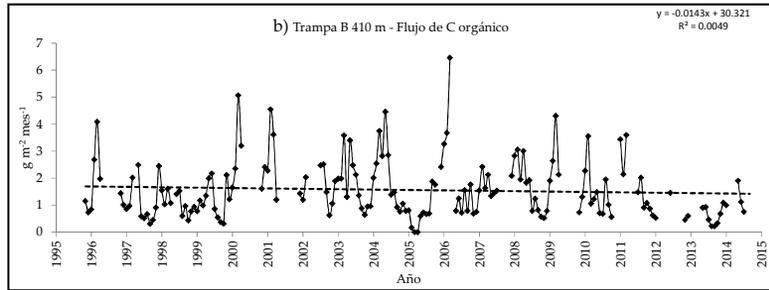
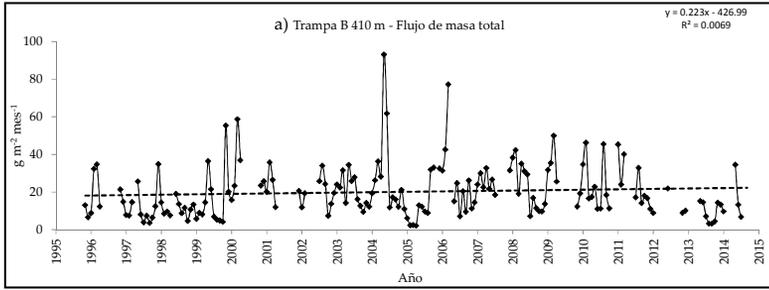
- TAYLOR, G.T. , M. IABICHELLA-ARMAS, R. VARELA, F. MULLER-KARGER, X. LIN, M. I. SCRANTON. 2006. Microbial Ecology of the Cariaco Basin's oxic-anoxic interface: the U.S.-Venezuela CARIACO Times Series Program. In: Neretin, L.N. (ed.) Past and Present Water Column Anoxia. NATO Science Series, Springer, Netherlands, p. 473-499.
- TAYLOR, G., F. MULLER-KARGER, R. THUNELL, M. SCRANTON, M., Y. ASTOR, R. VARELA, L. TROCCOLI, L. LORENZONI, K. FANNING, S. HANED, O. DOHERTY, 2012. Ecosystem responses in the southern Caribbean Sea to global climate change. *PNAS*. November 20, 2012. Vol. 109 n° 47: 19315-19320.
- TAYLOR, G. T., R. THUNELL, R. VARELA, C. BENITEZ-NELSON, M. I. SCRANTON. 2009. Hydrolytic ectoenzyme activity associated with suspended and sinking organic particles within the anoxic Cariaco Basin. *Deep-Sea Res. I*, 56: 1266-1283. doi:10.1016/j.dsr.2009.02.006.
- TAYLOR, G. T., E. A. SUTER, M. G. PACHIADAKI, Y. ASTOR, V. P. EDGCOMB, M. I. SCRANTON. 2018. Temporal Shifts in dominant sulfur-oxidizing chemoautotrophic populations across the Cariaco Basin's redoxcline. *Deep-Sea Res*, FALTA <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2017.11.016>
- TEDESCO, K.; R. THUNELL, Y. ASTOR, F.MULLER-KARGER, 2007. The oxygen isotope composition of planktonic foraminifera from the Cariaco Basin, Venezuela: seasonal and interannual variations. *Marine Micropaleontology*. 62: 180-193.
- 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.
- THUNELL, R., R. VARELA, M. LLANO, J. COLISTER, F. MULLER-KARGER, R. BOHRER. 2000. Organic carbon fluxes, degradation, and accumulation in an anoxic basin: sediment trap results from the Cariaco Basin. *Limnology & Oceanography*. 45 (2), 300-308.
- THUNELL, R., D. M. SIGMAN, F. MULLER-KARGER, Y. ASTOR, R. VARELA. 2004. Nitrogen isotope dynamics of the Cariaco Basin, Venezuela. *Global Biochemical Cycles*, 18 (GB3001), 13 pp
- THUNELL, R., C. BENITEZ-NELSON, R.VARELA, Y. ASTOR, F. MULLER-KARGER. 2007. Particulate organic carbon fluxes along upwelling dominated continental margins: Rates and mechanisms. *Global Biochemical Cycles*, 21 (GB3001),13 pp. doi:10.1029/2006GB002793
- THUNELL, R., C. BENITEZ-NELSON, F. MULLER-KARGER, L. LORENZONI, K. FANNING, M. SCRANTON, R. VARELA, Y. ASTOR. 2008. Si cycle in the Cariaco Basin, Venezuela: Seasonal variability in silicate availability and the Si:C:N composition particles. *Global Biochemical Cycles*, 22, GB4001, 14 pp, doi:10.1029/2007GB003096,
- TURICH, C., S. SCHOUTEN, R.THUNELL, R.VARELA, Y. ASTOR, S. WAKEHAM, 2013. Comparison of TEX86 and UK' 37 temperature proxies in sinking particles in the Cariaco Basin. *Deep-Sea Research I* 78: 115-133
- VARELA, R. Y F. VELÁSQUEZ, 2017. El Clima en Punta de Piedras, Isla de Margarita. Fundación La Salle de Ciencias Naturales. Colección Cuadernos Flasa, serie Ciencia y Tecnología. N° 14, 172p.
- VIRMANI, J., R. H. WEISBERG. 2009. Fish effects on ocean current observations in the Cariaco basin. *Journal of Geophysical Research - Oceans*. Vol 114, C03028C03028, doi:10.1029/2008JC004889.
- WAKEHAM, S. G., C. TURICH, G. T. TAYLOR, A. PODLASKA, M. I. SCRANTON, X.N. LI, R. VARELA, Y. ASTOR. 2010. Mid-chain A mid-chain methoxylated fatty acids in the water column of the Cariaco Basin: a chemoautotrophic source?. *Organic Geochemistry*, 41 (2010), 498-512.

- WAKEHAM, S. G., C. TURICH, F. SCHUBOTZ, A. PODLASKA, X. N. LI, R. VARELA, Y. ASTOR, J. SAENZ; D. RUSH, J. SINNINGHE DAMSTÉ, R. E. SUMMONS, M. I. SCRANTON, G. T. TAYLOR, Y KAI-UWE HINRICHS. 2012. Biomarkers, Chemistry and Microbiology show Chemoautotrophy in a Multilayer Chemocline in the Cariaco Basin. *Deep Sea Research I* 63 (2012): 163-156.
- WEJNERT, K. E., R. C. THUNELL, Y. ASTOR. 2013. Comparison of species-specific oxygen isotope paleotemperature equations: Sensitivity analysis using planktonic foraminifera from the Cariaco Basin, Venezuela. *Marine Micropaleontology* 101: 76-88.
- WISHNER, K. F., C. GELFMAN, M. M. GOWING, D. M. OUTRAM, M. RAPIEN, R. L. WILLIAMS, 2008. Vertical zonation and distributions of calanoid copepods through the lower oxycline of the Arabian Sea oxygen minimum zone. *Progress Oceanography*. 78,163-191
- WOODWORTH, M. P., M. A. GOÑI, K. TEDESCO, R. THUNNELL, Y. ASTOR, R. VARELA, R. MURRAY, F. MULLER-KARGER. 2004. Oceanographic controls on carbon isotopic compositions of sinking particles from the Cariaco Basin. *Deep-Sea Research I*. 51 (12): 1955-1974. <https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.08.003>
- WURTZEL, J., D. BLACK, R. C. THUNELL, L. C. PETERSON, E. J. TAPPA, S. RAHMAN. 2013. Mechanisms of southern Caribbean SST variability over the last two millennia. *Geophysical Research Letters*, Vol. 40, 1-5, doi:10.1002/2013GL058458, 2013
- ZONNEVELD, K., A. F. SUSEK, E. FISCHER, G. 2010. Seasonal variability of the organic-walled dinoflagellate cyst production in the coastal upwelling region off Cape Blanc (Mauritania): a five-year survey. *Journal of Phycology*. 46, 202-215.

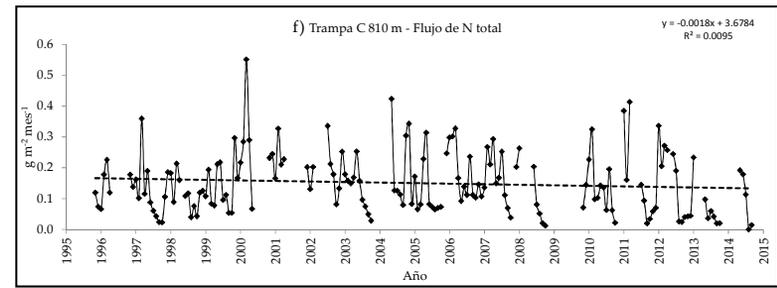
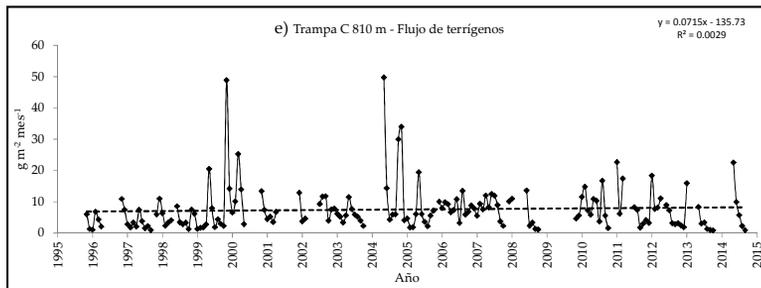
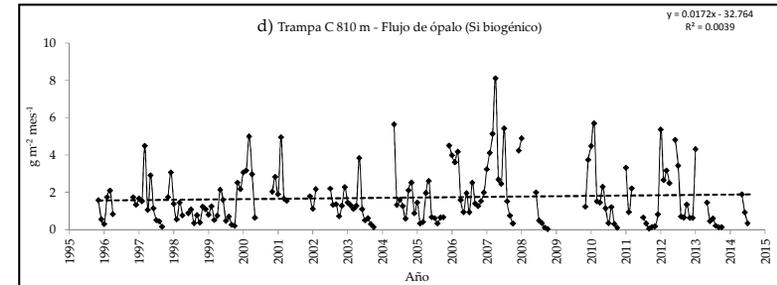
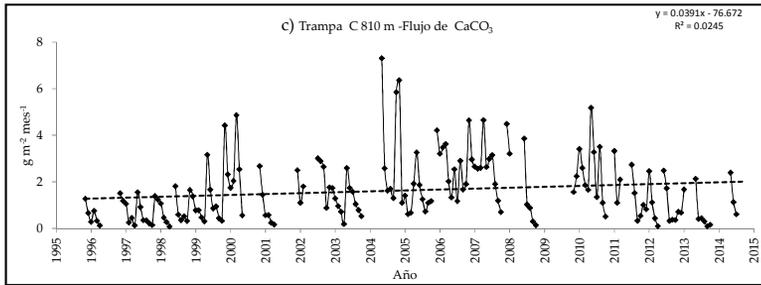
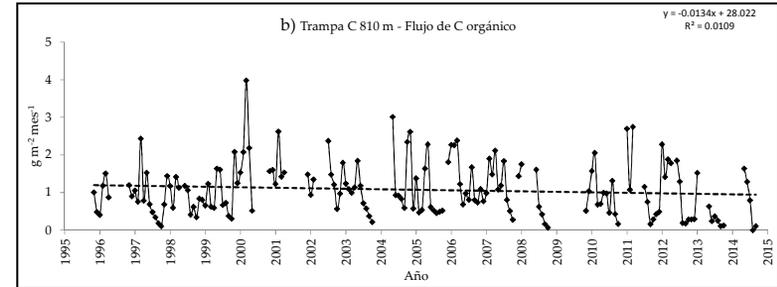
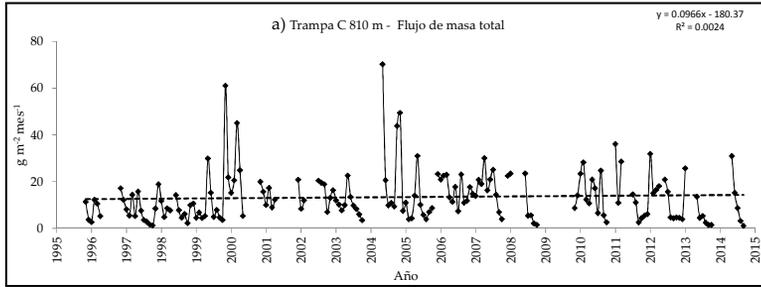
Anexo 1. Series de tiempo de la variación mensual del flujo de: (a) masa total de partículas, y separado por sus componentes; (b) C orgánico, (c) CaCO_3 , (d) ópalo, (e) terrígenos y (f) N total, en las muestras a 225 m de profundidad (trampa A) en CARIACO, datos de noviembre 1995 a octubre 2014. La línea a trazos indica la tendencia lineal de los valores en $\text{g m}^{-2} \text{mes}^{-1}$, ninguna de ellas significativas



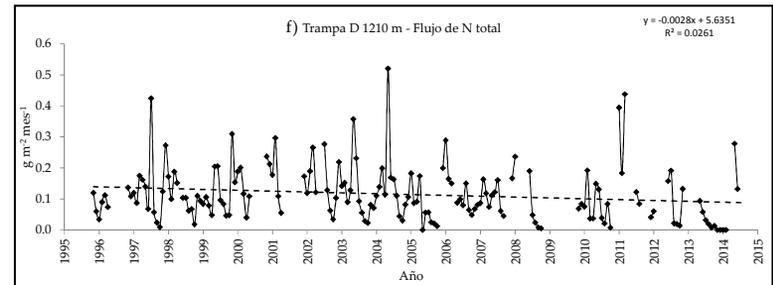
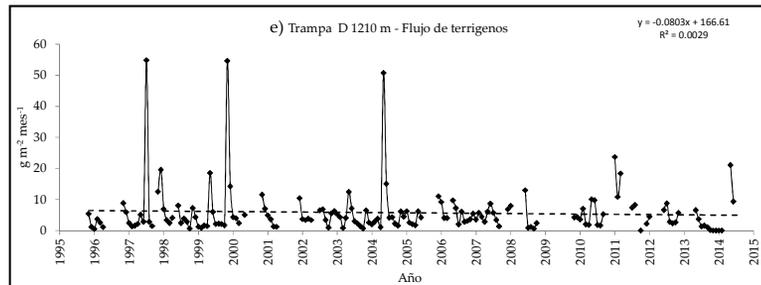
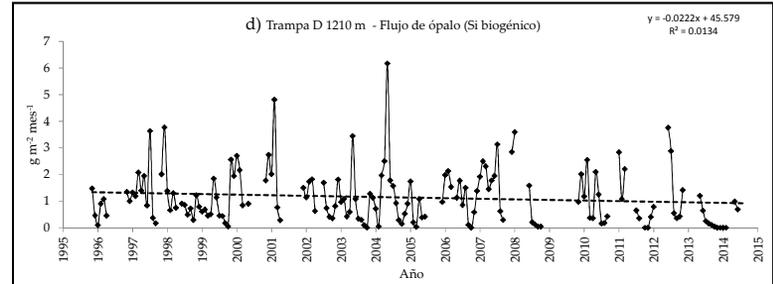
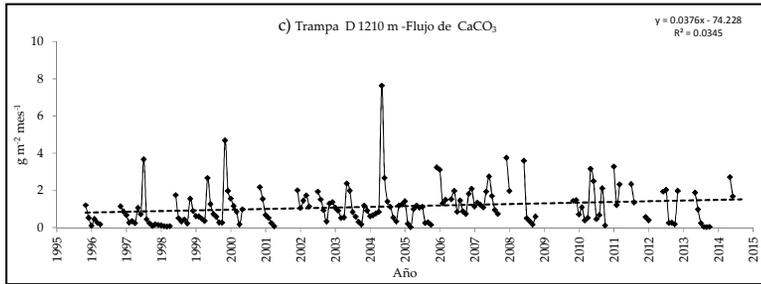
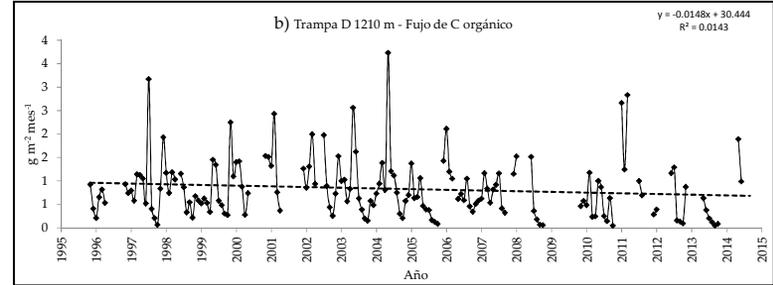
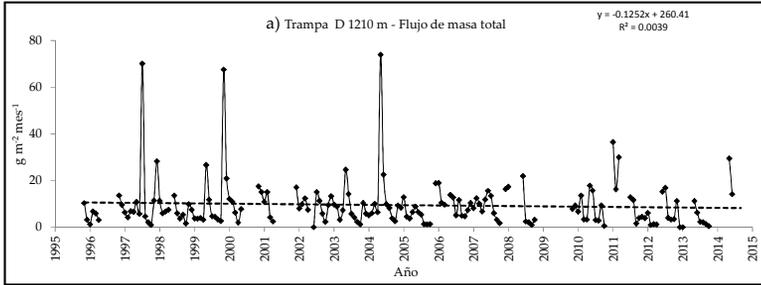
Anexo 2. Series de tiempo de la variación mensual del flujo de: (a) masa total de partículas, y separado por sus componentes; (b) C orgánico, (c) CaCO₃, (d) ópalo, (e) terrígenos y (f) N total, en las muestras a 410 m de profundidad (trampa B) en CARIACO, datos de noviembre 1995 a octubre 2014. La línea a trazos indica la tendencia lineal de los valores en g m⁻² mes⁻¹, solo significativa para el CaCO₃



Anexo 3. Series de tiempo de la variación mensual del flujo de: (a) masa total de partículas, y separado por sus componentes; (b) C orgánico, (c) CaCO₃, (d) ópalo, (e) terrígenos y (f) N total, en las muestras a 810 m de profundidad (trampa C) en CARIACO, datos de noviembre 1995 a octubre 2014. La línea a trazos indica la tendencia lineal de los valores en g m⁻² mes⁻¹, solo significativa para el CaCO₃

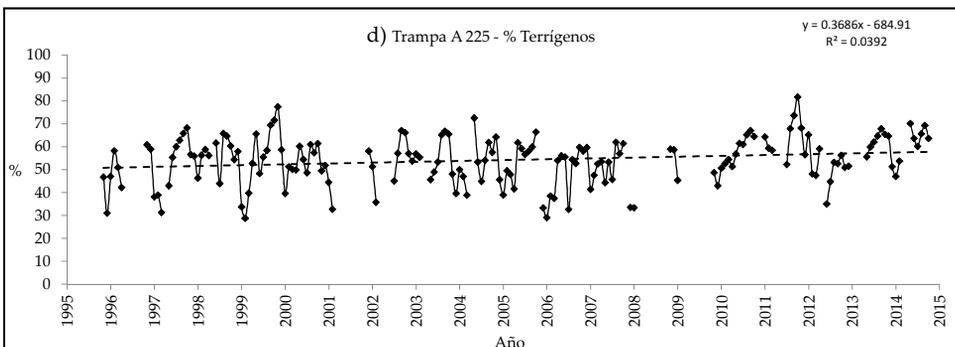
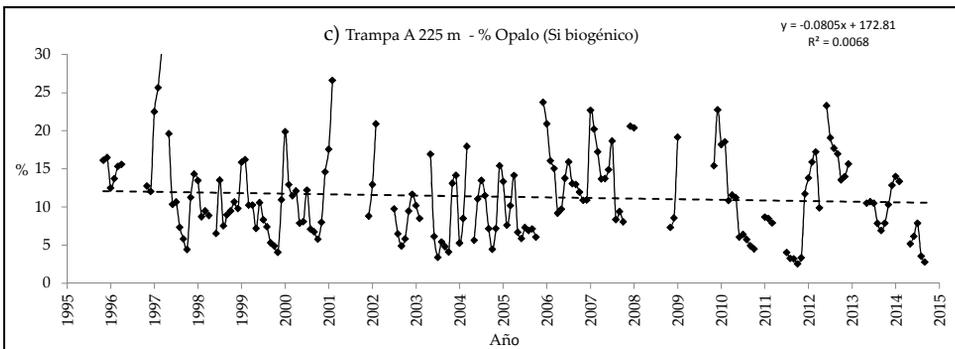
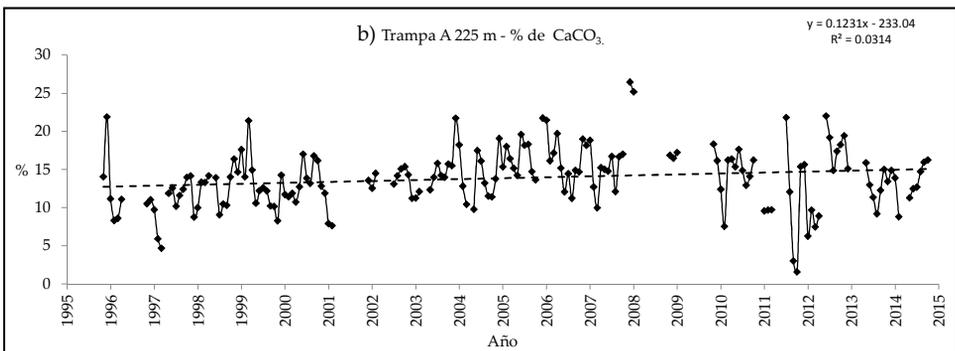
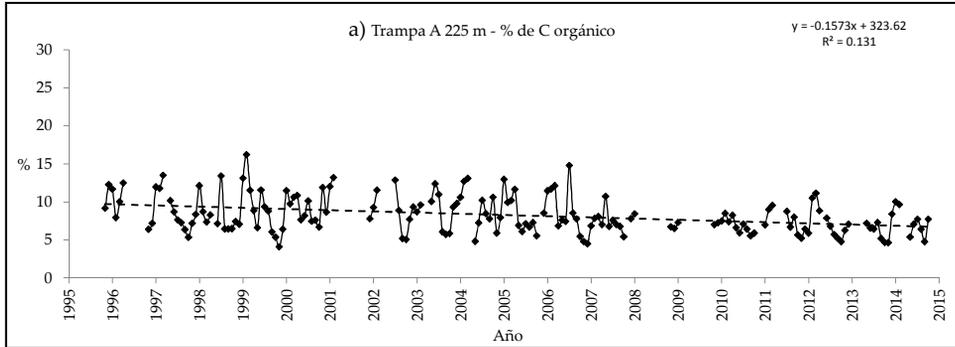


Anexo 4. Series de tiempo de la variación mensual del flujo de: (a) masa total de partículas, y separado por sus componentes; (b) C orgánico, (c) CaCO₃, (d) ópalo, (e) terrígenos y (f) N total, en las muestras a 1210 m de profundidad (trampa D) en CARIACO, datos de noviembre 1995 a octubre 2014. La línea a trazos indica la tendencia lineal de los valores en g m⁻² mes⁻¹, solo significativa para el CaCO₃



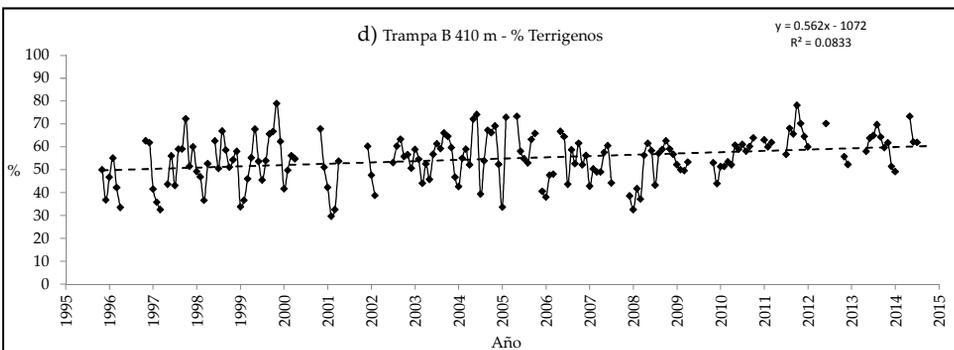
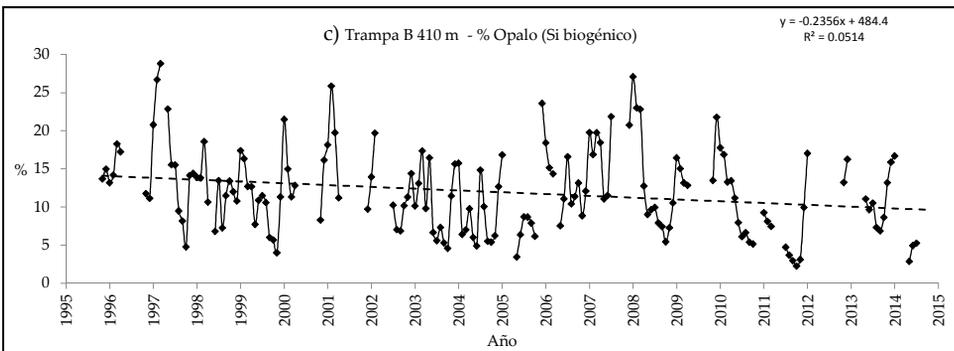
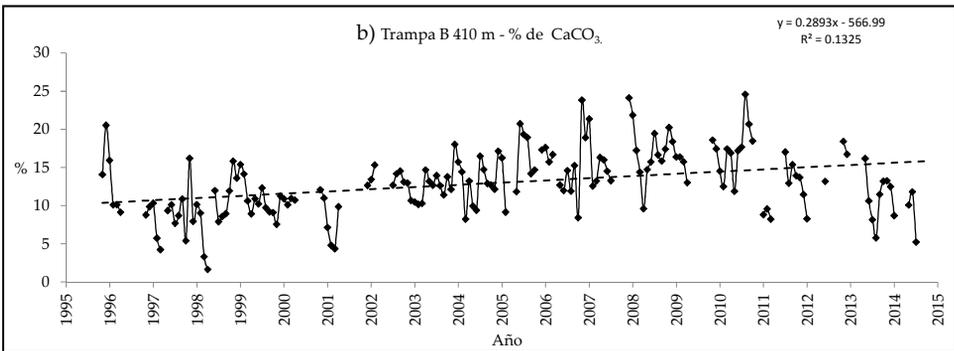
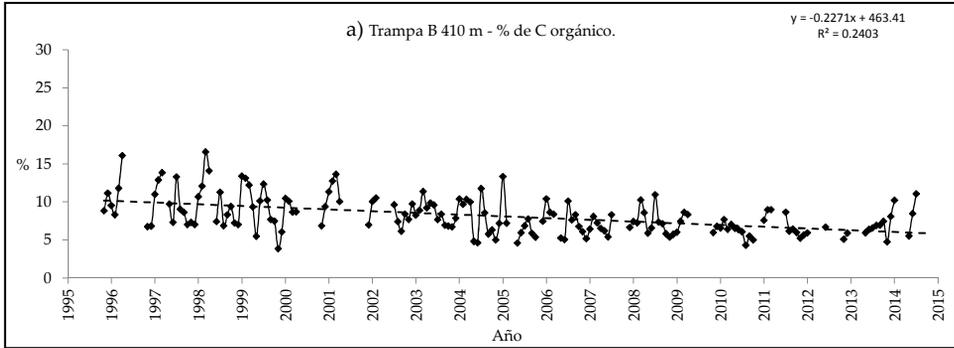
Anexos

Anexo 5. Series de tiempo de la variación del porcentaje de: a) C orgánico, b) CaCO_3 , c) Ópalo, d) terrígenos, en las muestras del flujo de partículas captadas por la trampa A a 225 m de profundidad en CARIACO de noviembre de 1995 a octubre 2014. La línea a trazos indica la tendencia lineal de los valores, significativa excepto para el ópalo.



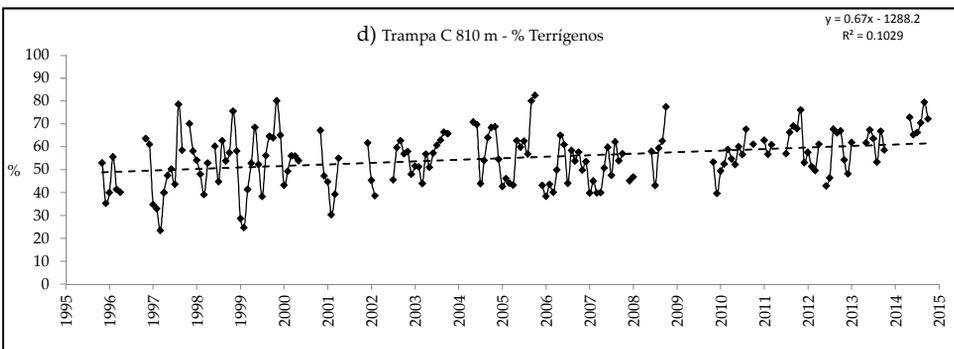
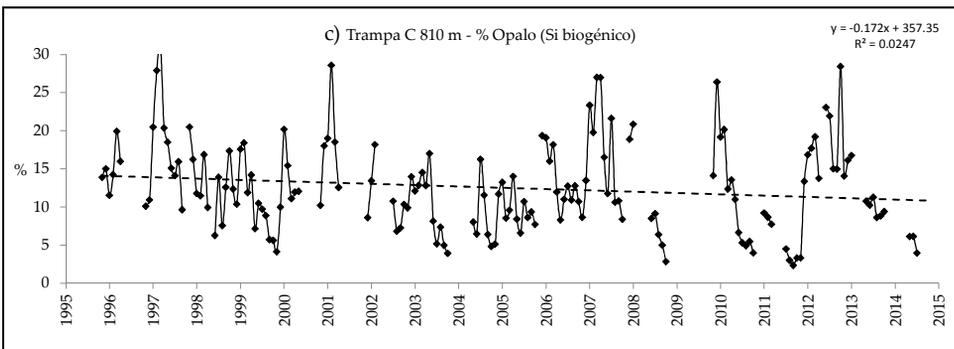
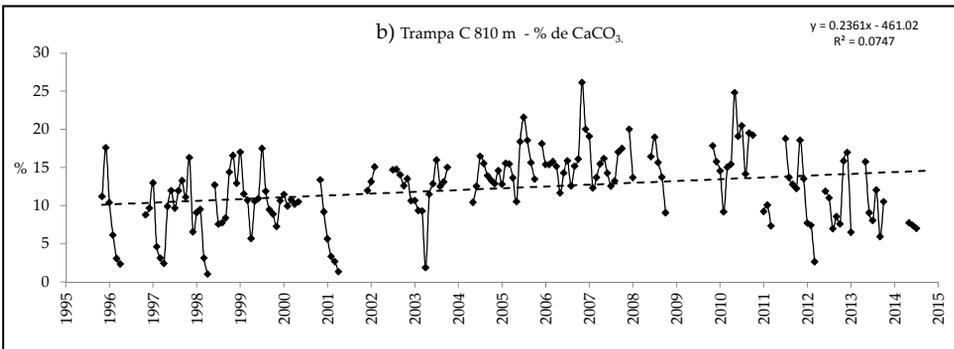
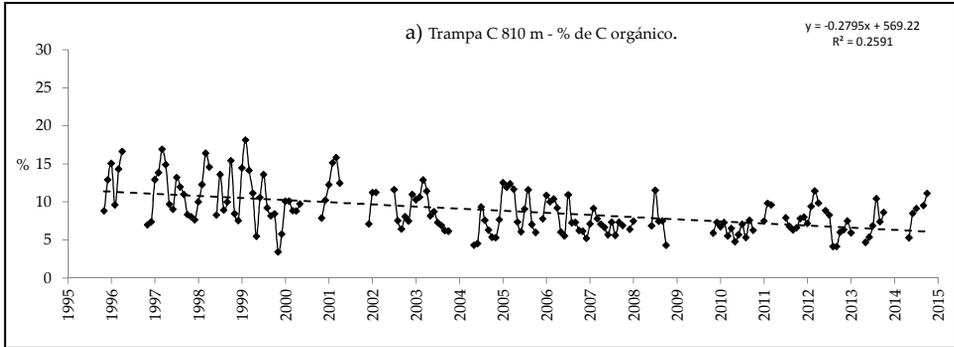
Anexos

Anexo 6. Series de tiempo de la variación del porcentaje. a) C orgánico, b) CaCO₃, c) Ópalo, d) terrígenos, en las muestras del flujo de partículas captadas por la trampa B a 410 m de profundidad en CARIACO de noviembre de 1995 a octubre 2014. La línea a trazos indica la tendencia lineal de los valores, significativa para todos los componentes.



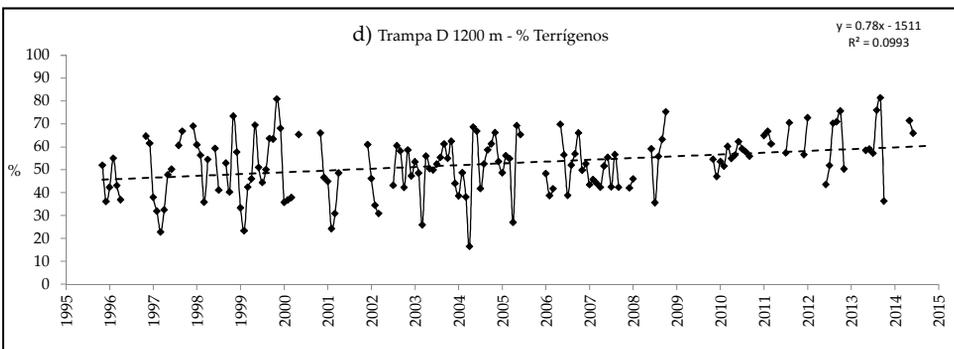
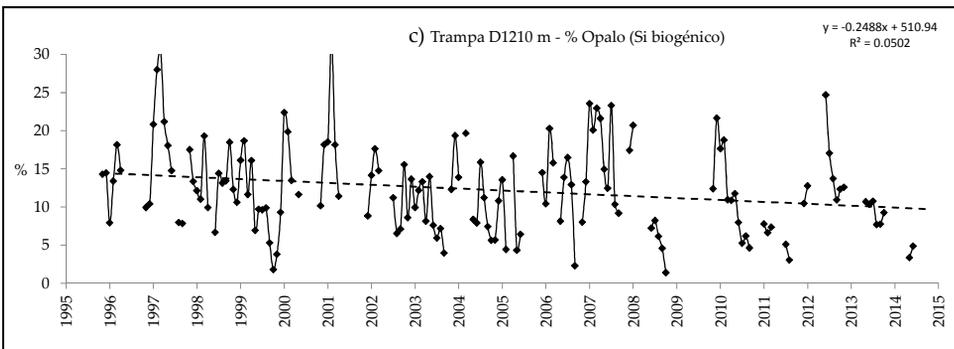
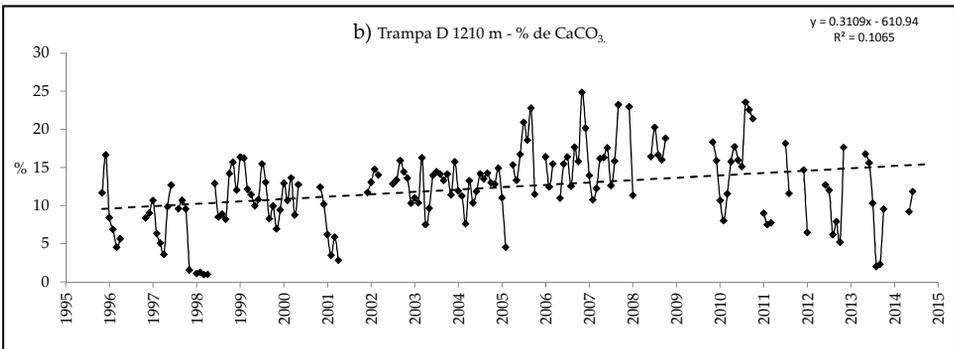
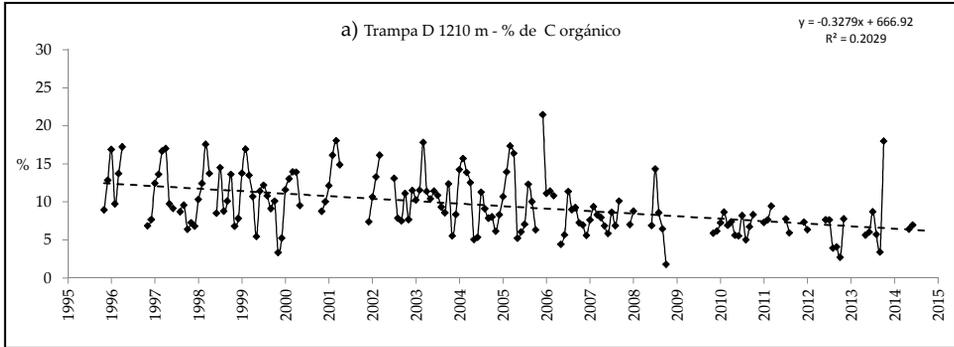
Anexos

Anexo 7. Series de tiempo de la variación del porcentaje. a) C orgánico, b) CaCO₃, c) Ópalo, d) terrígenos, en las muestras del flujo de partículas captadas por la trampa C a 810 m de profundidad en CARIACO de noviembre de 1995 a octubre 2014. La línea a trazos indica la tendencia lineal de los valores, significativa excepto para el ópalo



Anexos

Anexo 8. Series de tiempo de la variación del porcentaje. a) C orgánico, b) CaCO₃, c) Ópalo, d) terrígenos, en las muestras del flujo de partículas captadas por la trampa D a 1210 m de profundidad en CARIACO de noviembre de 1995 a octubre 2014. La línea a trazos indica la tendencia lineal de los valores, significativa para todos los componentes.



Anexos

Anexo 9. Coeficientes de correlación de Pearson (r) entre la clorofila, producción primaria y el C orgánico en partículas en suspensión en el agua, con los componentes del flujo de partículas relacionados con las variables biológicas, C_{org} , Opalo y $CaCO_3$. Medidos en la estación CARIACO según la época del año surgencia / estabilidad, y en los periodos de tiempo de 1995 a 2004 y de 2005 a 2016, y para la serie completa 1995 -2016.

Flujos	Clorofila	Producción	POC	n
225 m	<i>Correlaciones durante la surgencia</i>			67
A-Corg	0,134	0,152	0,368	
A-Opalo	0,155	0,183	0,325	
A-CaCO ₃	-0,211	-0,185	-0,134	
225 m	<i>Correlaciones durante la estabilidad</i>			76
A-Corg	0,250	0,318	0,158	
A-Opalo	0,157	0,318	0,129	
A-CaCO ₃	0,147	0,108	-0,008	
225 m	<i>Correlaciones periodo 1995-2004</i>			79
A-Corg	-0,034	-0,013	0,264	
A-Opalo	0,080	0,185	0,362	
A-CaCO ₃	-0,251	-0,283	-0,051	
225 m	<i>Correlaciones periodo 2005-2016</i>			64
A-Corg	0,355	0,383	0,212	
A-Opalo	0,384	0,426	0,208	
A-CaCO ₃	0,053	0,053	-0,207	
225 m	<i>Correlaciones periodo 1995-2016</i>			155
A-Corg	0,145	0,188	0,245	
A-Opalo	0,186	0,263	0,271	
A-CaCO ₃	-0,141	-0,160	-0,133	

Flujos	Clorofila	Producción	POC	n
410 m	<i>Correlaciones durante la surgencia</i>			76
B-Corg	0,205	0,106	0,213	
B-Opalo	0,097	0,074	0,010	
B-CaCO ₃	-0,182	-0,189	-0,215	
410 m	<i>Correlaciones durante la estabilidad</i>			75
B-Corg	0,352	0,417	0,318	
B-Opalo	0,182	0,405	0,162	
B-CaCO ₃	0,091	0,095	-0,055	
410 m	<i>Correlaciones periodo 1995-2004</i>			79
B-Corg	0,389	0,325	0,515	
B-Opalo	0,401	0,429	0,481	
B-CaCO ₃	-0,064	-0,055	0,159	
410 m	<i>Correlaciones periodo 2005-2016</i>			73
B-Corg	0,300	0,381	0,067	
B-Opalo	0,243	0,373	-0,036	
B-CaCO ₃	0,132	0,178	-0,216	
410 m	<i>Correlaciones periodo 1995-2016</i>			153
B-Corg	0,356	0,324	0,335	
B-Opalo	0,279	0,340	0,191	
B-CaCO ₃	-0,028	-0,007	-0,096	

Flujos	Clorofila	Producción	POC	n
810 m	<i>Correlaciones durante la surgencia</i>			65
C-Corg	0,109	0,101	0,171	
C-Opalo	0,021	0,039	0,042	
C-CaCO ₃	-0,280	-0,179	-0,345	
810 m	<i>Correlaciones durante la estabilidad</i>			70
C-Corg	0,298	0,424	0,084	
C-Opalo	0,201	0,362	0,107	
C-CaCO ₃	0,083	0,111	-0,109	
810 m	<i>Correlaciones periodo 1995-2004</i>			75
C-Corg	0,151	0,234	0,246	
C-Opalo	0,189	0,311	0,340	
C-CaCO ₃	-0,257	-0,182	-0,165	
810 m	<i>Correlaciones periodo 2005-2016</i>			60
C-Corg	0,486	0,556	0,180	
C-Opalo	0,380	0,494	0,135	
C-CaCO ₃	0,133	0,214	-0,246	
810 m	<i>Correlaciones periodo 1995-2016</i>			146
C-Corg	0,281	0,377	0,238	
C-Opalo	0,217	0,316	0,174	
C-CaCO ₃	-0,141	-0,062	-0,232	

Flujos	Clorofila	Producción	POC	n
1210 m	<i>Correlaciones durante la surgencia</i>			65
D-Corg	0,131	0,204	0,135	
D-Opalo	0,079	0,115	0,085	
D-CaCO ₃	-0,220	-0,070	-0,226	
1210 m	<i>Correlaciones durante la estabilidad</i>			66
D-Corg	0,474	0,423	0,341	
D-Opalo	0,178	0,212	0,175	
D-CaCO ₃	0,261	0,191	0,065	
1210 m	<i>Correlaciones periodo 1995-2004</i>			81
D-Corg	0,229	0,310	0,337	
D-Opalo	0,207	0,299	0,263	
D-CaCO ₃	-0,162	-0,068	-0,004	
1210 m	<i>Correlaciones periodo 2005-2016</i>			50
D-Corg	0,374	0,381	0,083	
D-Opalo	0,199	0,207	0,040	
D-CaCO ₃	0,136	0,106	-0,171	
1210 m	<i>Correlaciones periodo 1995-2016</i>			146
D-Corg	0,282	0,370	0,284	
D-Opalo	0,195	0,271	0,189	
D-CaCO ₃	-0,103	-0,034	-0,121	

Recibido: 7 septiembre 2019

Aceptado: 28 julio 2020

Publicado en línea: 30 diciembre 2020

Patricia Ojeda¹, Ramón Varela¹, Robert Thunell², Frank Muller-Karger³, Eric Tappa²

1 Estación de Investigaciones Marinas de Margarita. EDIMAR. Fundación La Salle de Ciencias Naturales, Punta de Piedras, Isla de Margarita. Venezuela.

Email: patikaya15@yahoo.com ramon.varela@fundacionlasalle.org.ve

2 Department of Geological Sciences and Marine Science Program, University of South Carolina, Columbia, South Carolina, USA. Email: tappa@geol.sc.edu

3 College of Marine Science, IMARS. University of South Florida, St. Petersburg, Florida 33701, USA. Email: carib@usf.edu