

FLUJO DE CARBONO EN UN ÁREA DE ELEVADA PRODUCTIVIDAD: CUENCA OCCIDENTAL DEL ESTRECHO DE BRANSFIELD Y ESTRECHO DE GERLACHE, ANTÁRTICA*

Carbon flux in an high productivity area: western Bransfield Strait basin and Gerlache Strait, Antarctic.

Ricardo Anadón Alvarez

Abstract

The imminence of a global change induced by the atmospheric accumulation of greenhouse gases (i. e. carbon dioxide), has lead the scientific community to search for sinks and sources of these gases, with the ultimate goal of building accurate, balanced and predictive models of global warming. One of the most likely processes by which atmospheric CO₂ can be withdrawn from the atmosphere is the oceanic "biological pump". The biological pump is a 2-3-step process, consisting of CO₂ absorption by phytoplankton which grows and sinks to the bottom, or that is grazed by zooplankton whose feces also sink to the bottom, what would act as a long term carbon trap. Thus, spotting areas of high "biological pump" activity is a key target of biological oceanography. Because of its high nutrient concentrations, antarctic waters are serious candidates to maintain a high "biological pump" activity, although this is still a matter of debate.

Oceanographic expeditions FRUELA 95 and FRUELA 96, which lasted from 28 November 1995 to 10 February 1996, were launched to detect areas of high biological activity in the Bransfield Strait region, what would support our view of Antarctica as a major global trap of atmospheric carbon. Both surveys consisted of two exploratory macro (four transects, 20 nautical miles separated) and microscale (10x10 nautical miles) grids of stations, and several 24 hours intensive stations to obtain refined measurement of process rates.

FRUELA 95 was successful in detecting two areas of high phytoplankton productivity. One was located at the shelf-break off the Bransfield Strait, the other at the protected, coastal area of Gerlache Strait. At these areas, record observed figures of primary productivity (ca 5000 mgC m⁻²), and low nutrients concentrations suggested an active growth of phytoplankton fueled by dissolved nutrients. The "biological pump" seemed to play an active role in carbon sequestration, according to the low CO₂ partial pressures measured (down to 129 µatm). Most of the biological production at these areas could be attributed to large diatoms, while non productive areas were dominated by small (Cryptomonads). Downwards flux of carbon (ca. 500 mg C m⁻² day⁻¹, estimated from chlorophyll a data), as measured by Lagrangian sediment traps, suggested the planktonic ecosystem at these areas to be an effective mechanism of carbon sequestration and sedimentation.

The finding of high phytoplankton productivity at the shelf-break, probably at a circumpolar scale, stimulated scientists in cruise FRUELA 96 to repeat both macro and mesoscale grids in an attempt to corroborate the presence and persistence of this structure throughout the austral summer. However, antarctic waters seem highly variable in this regard, as our further attempts showed the presence of poor, blue waters with record minimum primary productivity (ca. 30 mgC m⁻² day⁻¹) at the same sites that where previously found to be highly productive.

Zooplankton communities were extremely scarce, or composed mainly of pteropods, whose role in carbon fluxes remains unclear. However, at the protected area of Gerlache Strait, biological productivity was still high (ca 3110 mgC m⁻² day⁻¹) as well as CO₂ partial pressures were amongst the lowest ever measured (ca. 120µatm). High phytoplankton production and sinking, and active grazing by euphausiids and copepods, seemed to play a significant role in transporting carbon to the sediments, according to results obtained by sediment traps.

* Proyecto: ANT94 - 1010 (Campaña FRUELA)

Dark sediments characterized areas with high rates of particle flux below the thermocline as well as a greenish stratum of labile organic matter will be observed on that stations.

In summary, our results suggest that there are open ocean in the Bellingshausen region near Bransfield Strait which may occasionally support high primary productivity, and that experience dramatic shifts in community structure through the productive season. Also, there are nearshore areas which support a persistent high primary productivity during the productive season, although their small size prevents any conclusion about their biogeochemical role at a planetary scale.

Key words: carbon flux, productivity, sedimentation, Antarctica.

INTRODUCCION

Los incrementos producidos en la concentración del CO₂ de la atmósfera en los últimos cien años de la Tierra, y de forma más acusada en las últimas décadas ha provocado el interés de los Estados y de los científicos debido a las repercusiones que tal incremento puede llevar aparejado. El cambio de la temperatura media en la Tierra o la elevación del nivel del mar serían algunos de ellos; es, además, el reflejo de cambios que se producen a escala planetaria: cambios de uso del territorio, incremento en el uso de energías no renovables p.e. Todos estos procesos, que reflejan un cambio a escala terrestre, se incluyen en el denominado *Cambio Global* (UNEP, 1992). El Cambio Global de producirse (y todo indica que así será) tendrá repercusiones políticas y económicas de largo alcance.

El interés científico se ha centrado en la generación de modelos que nos permitan obtener predicciones sobre los cambios que se producirán en el futuro, a través de la mejora de nuestras estimas de las transferencias de carbono y otros elementos entre los diferentes compartimentos en los que se puede descomponer la Tierra. Los modelos disponibles en la actualidad (Siegenthaler y Sarmiento, 1993) muestran un desajuste entre las emisiones de CO₂ a la atmósfera y las tasas de acumulación en la atmósfera y el océano. Se debe pensar por tanto en que existen imprecisiones en las medidas de los flujos entre los compartimentos, y muy notablemente entre la atmósfera y el océano.

Esta imprecisión en las estimas actuales respecto al papel de los océanos en el ciclo general del Carbono ha generado el interés científico internacional, interés que se ha traducido en la creación por parte del IGBP (International Geosphere-Biosphere Program) del programa JGOFS (Joint Global Oceanographic Flux Studies) que pretende conocer el papel de la bomba biológica en estos flujos, es decir los flujos mediados por organismos y, por tanto, en forma particulada.

El conocimiento de los mares antárticos es todavía deficiente en estos aspectos a pesar de aportaciones recientes (algunas de ellas en el área de estudio propuesta para la Campaña FRUELA, Campañas RACER-1991 y STERNA-1996), y, además, presentan algunas características de la campaña de la que ahora se informa. Serían estos:

1. Las elevadas concentraciones de nutrientes inorgánicos en las aguas antárticas que podrían sostener una producción sumamente elevada unido a la corta duración del periodo productivo, que impediría el agotamiento de los nutrientes.
2. La ausencia de una fuerte estratificación termohalina, excepto en las zonas marginales del hielo (a las que se ha venido prestando una especial atención), que favorece la renovación de los nutrientes en la capa fótica, pero perjudicaría a la producción.
3. La existencia de extensas áreas en las que se podría sostener una elevada producción, a pesar de haberse medido valores muy bajos, posiblemente por la baja concentración de algunos micronutrientes (hierro) o la elevada tasa de consumo por los herbívoros (Eufausiáceos - krill - o Salpas).

Las propias características hidrodinámicas en la zona de estudio, bien establecidas en la zona de los estrechos, pero cuyo conocimiento presenta lagunas en el borde de la plataforma antártica motivan que el estudio de los procesos relacionados con el flujo de carbono mediado por organismos (bomba biológica) sea de interés general, y pueda contribuir a disponer de una información más precisa del papel de una zona tan extensa del océano en los flujos globales de carbono.

OBJETIVO

El objetivo básico de la Campaña FRUELA era comprobar si las áreas de elevada productividad de los Estrechos de Bransfield, del Estrecho de Gerlache y la Plataforma continental externa a ambos (límite del Mar de Bellingshausen) generaba un flujo neto de CO_2 desde la atmósfera hacia el océano, y si este flujo se relacionaba con tasas de sedimentación de material particulado elevadas y con acumulación de carbono en los sedimentos. Tal como se expresaba en la solicitud del proyecto *cuantificar los flujos de carbono en un área de elevada productividad*,

La existencia de una elevada producción planctónica, es decir la transformación del CO_2 y del CO_3H^- en compuestos orgánicos reducidos y constituyentes de partículas, en un espacio de tiempo limitado podía ser responsable de una depleción en la concentración de dióxido de carbono en el agua superficial y por tanto de un flujo neto hacia el océano. Si además existe relación entre producción primaria y sedimentación, la retirada de carbono hacia los sedimentos sería perdurable y significaría un sumidero real de carbono.

Existía información comprensiva de la zona previa a la campaña FRUELA, proporcionada por las Campañas RACER de Estados Unidos (1986-87) (*Deep-Sea Res*, 38(8/9A), 1991) en el Estrecho de Bransfield y parte norte del Estrecho de Gerlache, y la Campaña STERNA del Reino Unido (1992) (Turner et al. 1995) en el área central del Mar de Bellingshausen, pero no se disponía de una información detallada de procesos importantes en los flujos de carbono, ni de las relaciones de estos con la circulación del agua. Tampoco se disponía de información sobre las tasas de sedimentación y acumulación y sus relaciones con la productividad superficial. Por último, no se disponía de información sobre la variación anual en la circulación ni en los flujos netos hacia los sedimentos.

La Campaña FRUELA pretendía subsanar algunas de estas carencias, obtener resultados comparables de diversos procesos biológicos, geológicos, químicos y físicos, y como valor añadido desarrollar una investigación multidisciplinar en un tema de interés científico y de actualidad evidente.

ORGANIZACION DE LAS CAMPAÑAS

Dada la diversidad de variables que se tomaron en consideración, así como las diferentes escalas a las que se desarrollan los procesos implicados, la Campaña FRUELA se llevó a cabo durante dos años. El primero se utilizó para colocar los instrumentos dedicados al registro continuo de variables físicas -temperatura y salinidad- y para obtención de material sedimentado durante el ciclo anual. Los trabajos se desarrollaron durante la Campaña Antártica 94-95 y no son objeto del presente informe.

El segundo año, durante la Campaña Antártica 95-96, se organizaron dos estrategias de muestreo diferentes debido tanto a las limitaciones del BIO Hespérides respecto al número de plazas disponibles como a las diferencias de escala temporal y espacial a la que los procesos implicados en la transferencia de carbono entre la atmósfera y el océano y de los procesos de sedimentación tienen lugar;. La campaña FRUELA se dividió, por tanto, en dos fases: la **primera** se dedicó de forma prioritaria al estudio de los procesos físicos, químicos y a la producción del fitoplancton, o lo que es lo mismo, la generación de las partículas orgánicas; la **segunda** se dedicó de forma prioritaria al estudio de los procesos de agregación, transformación y transporte de las partículas orgánicas mediados por el zooplancton, y al estudio de los materiales carbonatados acumulados en el sedimento. En una campaña posterior se recogieron los fondeos realizados durante la campaña Antártica 1994-95.

La primera fase de la Campaña se desarrolló desde el 28 de noviembre de 1995 al 10 de enero de 1996, y la segunda fase entre el 14 de enero y el 10 de febrero de 1996. La recogida de fondeos se realizó entre el 22 y el 26 de febrero.

En ambas fases se diseñó una estrategia de muestreo que implicaba:

- 1. Macroescala.** La descriptiva física, química y biológica del área de estudio se realizó muestreando en 34 estaciones (26 en la segunda fase, señaladas en la fig. 1) en cinco transectos perpendiculares a la costa (estaciones separadas 20 millas) en el Estrecho de Bransfield y el Mar de Bellinghausen, y 13 estaciones en el Estrecho de Gerlache (11 en la segunda fase).
- 2. Mesoescala.** En la primera fase se muestrearon 109 estaciones en la cuenca occidental del Estrecho de Bransfield (20 de ellas biológicas) con el fin de obtener la circulación en mesoescala y poder estudiar los efectos biológicos de la misma.

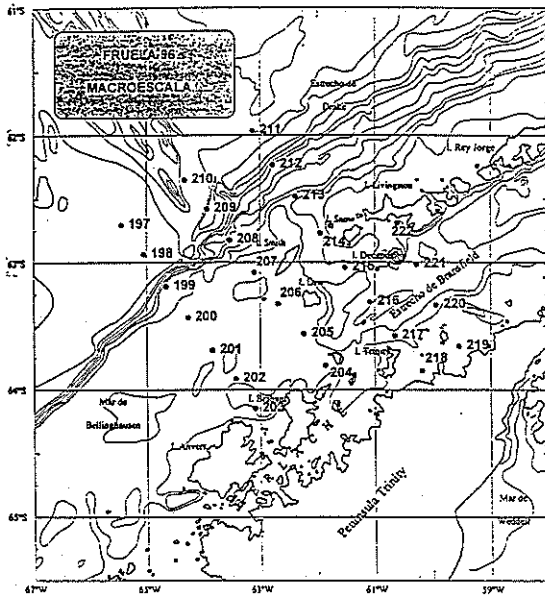


Figura 1. Mapa de la zona de estudio, en la que se reflejan las estaciones de macroescala durante la segunda fase. En la primera se muestreó una radial más hacia el oeste.

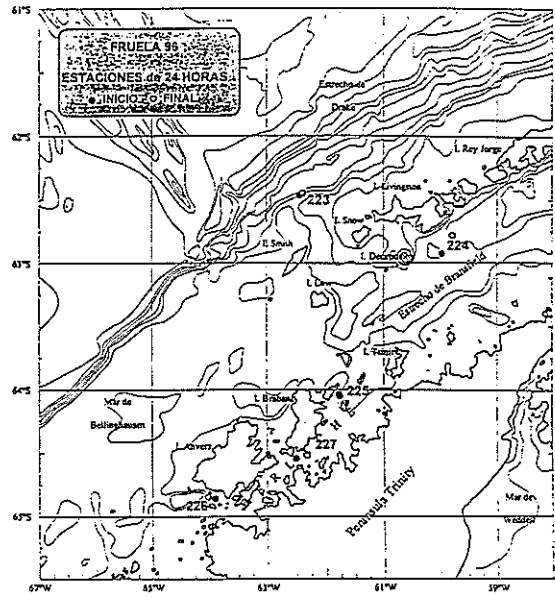


Figura 2. Mapa de la zona de estudio con la localización de las estaciones nictimerales de la segunda fase. Se indica la posición inicial y final de cada estación.

3. **Estaciones nictimerales.** La última tipo de muestreo realizado en cada fase fueron estaciones de 36 horas (fig 2), en las que se estudiaba la variación diaria de las actividad de los organismos y se obtenía la tasa de exportación de material particulado desde la capa fótica.
4. **Estaciones de sedimentos.** En la segunda campaña se realizaron muestreos dirigidos de sedimentos, además de los ya comentados; los lugares elegidos fueron aquellos en los que se habían colocado el año anterior trampas de sedimentación o en los que se encontraron altas tasas de exportación de material orgánico.

METODOLOGIA EMPLEADA

En cada una de las fases iniciales se realizaron dos tipos de estaciones básicas, mientras que las de 36 horas fueron todas estaciones biológicas largas. Las actividades en cada tipo de estación fueron:

Estaciones hidrográficas. Perfil de CTD hasta las proximidades del fondo. Durante la macroescala, toma de agua con la Rosette y obtención de muestras para el citómetro de flujo. En horas adecuadas se tomaron perfiles de radiación PAR (radiación fotosintéticamente activa) y UV con un radiómetro de Biospherical Instruments.

Estaciones biológicas rápidas. Igual que la anterior, más muestreo de agua para analizar variables químicas y biológicas a profundidades seleccionadas y muestreo del mesozooplankton en la columna de agua con una red triple WP2.

Estaciones biológicas largas. Perfil CTD cada 3 ó 6 horas con toma de agua con la Rosette a profundidades seleccionadas. Perfiles PAR y UV a lo largo del ciclo diario, a las que se añadieron medidas espectrales de la irradiancia (espectroradiómetro LICOR) una vez al día. Muestreo del mesozooplankton con una red WP2 cuatro veces al día, pescas con red Longhurst-Hardy (LHPR) dos veces al día hasta 400 m. de profundidad. Se realizaron además, pescas con la red Bioness. Colocación de una boya con muestras de fitoplancton a 5 profundidades para obtener la producción primaria y la producción neta y la respiración del microplancton, y una trampa de sedimentos para obtener el material exportable desde la capa fótica.

Se tomaron testigos de sedimentos en estaciones seleccionadas mediante sacatestigos Maxicorer y de gravedad. De los primeros se obtuvieron submuestras cada 0,5 cm los primeros 10 cm, y cada centímetro entre 10 y 30 cm de profundidad. Durante la segunda fase se realizaron medidas de abundancia del zooplankton en continuo mediante ecosondas Simrad EK500, y durante toda la campaña se realizaron medidas en continuo de temperatura, salinidad, fluorescencia y datos meteorológicos.

El total de estaciones muestreadas fue de 227, de las que 10 fueron de 36 horas.

Los tipos de medidas realizados incluyeron perfiles continuos de variables físicas y biológicas (CTD): temperatura, salinidad, transmitancia, fluorescencia; perfiles continuos de radiación PAR y UV (BI) y discretas del espectro de irradiancia (LICOR); perfiles discretos de variables químicas y biológicas: nutrientes (nitrato, nitrito, amonio, fosfato y silicato), alcalinidad, pH (cálculo del CIT y el CO_2), carbono y nitrógeno particulado y disuelto, clorofila, número de bacterias, composición y abundancia del fitoplancton. Con la red LHPR se obtuvo la distribución vertical de la composición y abundancia del mesozooplankton. Con la ecosonda se obtuvieron abundancia de ecos para diferentes TS (Target Strength; tamaños acústicos) en varias profundidades.

En profundidades seleccionadas se realizaron experimentos para medir la actividad de diferentes componentes de la comunidad pelágica: producción del fitoplancton (fraccionada por tamaños), excreción de DOC por el fitoplancton, producción bacteriana, consumo de bacterias por flagelados, producción neta de la comunidad y su respiración (fraccionadas por tamaños). La actividad del mesozooplankton: contenido digestivo y tasas de evacuación (fraccionadas por tamaños), respiración (mediante oximetrías o actividad ETS), producción de huevos (especies seleccionadas), selección de alimentos por tamaño, producción de paquetes fecales y su velocidad de sedimentación fue medida integrada en la columna de agua.

Las muestras de sedimento se pretenden datar y conocer la concentración de carbono orgánico e inorgánico, para establecer las tasas de acumulación de carbono en épocas pasadas.

RESULTADOS

Durante el muestreo de macroescala (primera fase) en todo el área de estudio se encontraron dos áreas con una elevada concentración de clorofila **a** (mayor de $2 \mu\text{g l}^{-1}$, con valores máximos de $12 \mu\text{g l}^{-1}$) y abundancia de fitoplancton de tamaño grande, una situada sobre el borde de la plataforma (fig. 3) y otra en el interior del Estrecho de Gerlache (fig. 4), no apareciendo una clara relación entre ambas. En el interior del Estrecho de Bransfield se detectó una concentración de clorofila menor (menor de $1 \mu\text{g l}^{-1}$), y semejante a los valores encontrados sobre la plataforma y el océano. Esta primera visión debió ser modificada durante el muestreo de mesoescala porque en estaciones determinadas del Estrecho de Bransfield se encontraron valores superiores a $2 \mu\text{g l}^{-1}$. Durante la segunda fase las concentraciones de clorofila **a** en el Mar de Bellinghausen fueron inferiores a $0,5 \mu\text{g l}^{-1}$ y de $0,5$ a $1 \mu\text{g l}^{-1}$ en el Estrecho de Bransfield. En el interior del Estrecho de Gerlache los valores fueron siempre superiores a 3 , alcanzando incluso valores de $19 \mu\text{g l}^{-1}$.

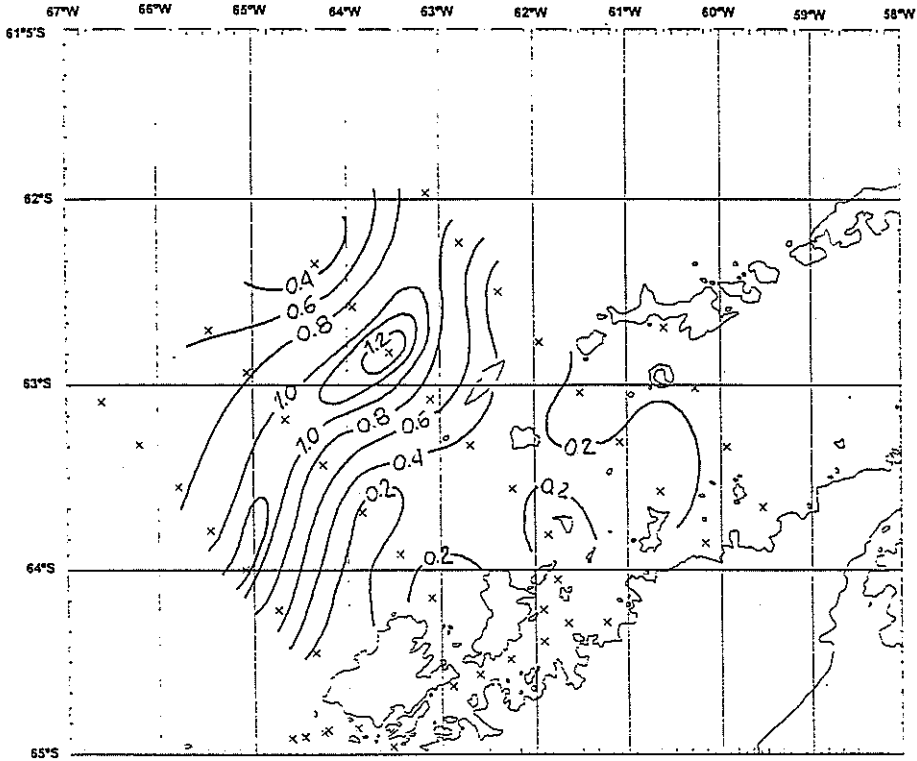


Figura 3. Abundancia ($\times 1000 \text{ ml}^{-1}$) a 5 m. del fitoplancton entre 12 y $30 \mu\text{m}$ durante la macroescala de la primera fase. Se puede apreciar la localización de los valores máximos a la altura del talud.

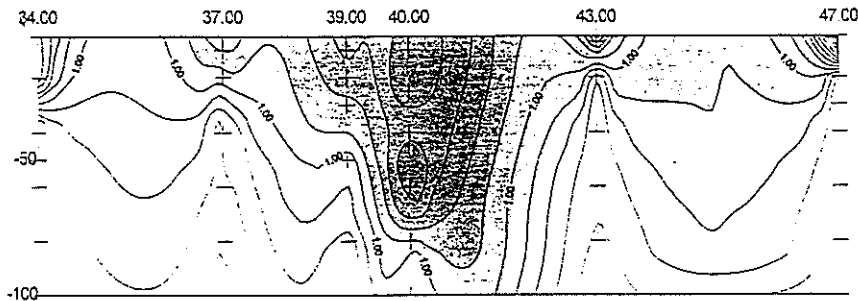


Figura 4. Distribución vertical de la clorofila **a** ($\mu\text{g l}^{-1}$) en el Estrecho de Gerlache

Las estructuras hidrográficas que soportaban estas zonas de alta producción eran diferentes. En la zona del talud se correspondía con una corriente meandrificante de sentido oeste-este (fig.5), corriente que en profundidad coincide con la posición del Límite de Aguas Continentales (CWB) y del Frente Polar (SPF) (fig. 6). No está claro cual es el mecanismo de estabilización de la columna de agua que permite el crecimiento del fitoplancton, hipótesis más probable para explicar este desarrollo. Conviene indicar que aunque durante la segunda fase se encontró una circulación similar, la concentración de clorofila a y la producción primaria fueron indetectables.

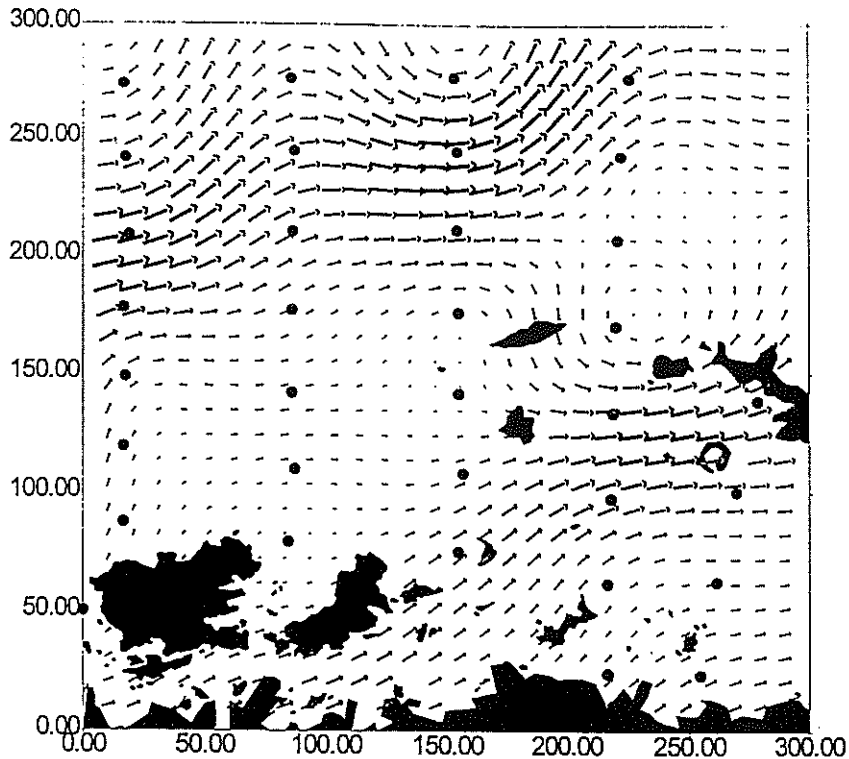


Figura 5. Velocidad geostrofica a 10 m. durante la macroescala de la primera fase (se indica la posición de las estaciones). Se aprecia la corriente del del oeste presente a la altura del talud, que se corresponde con el máximo de número de células.

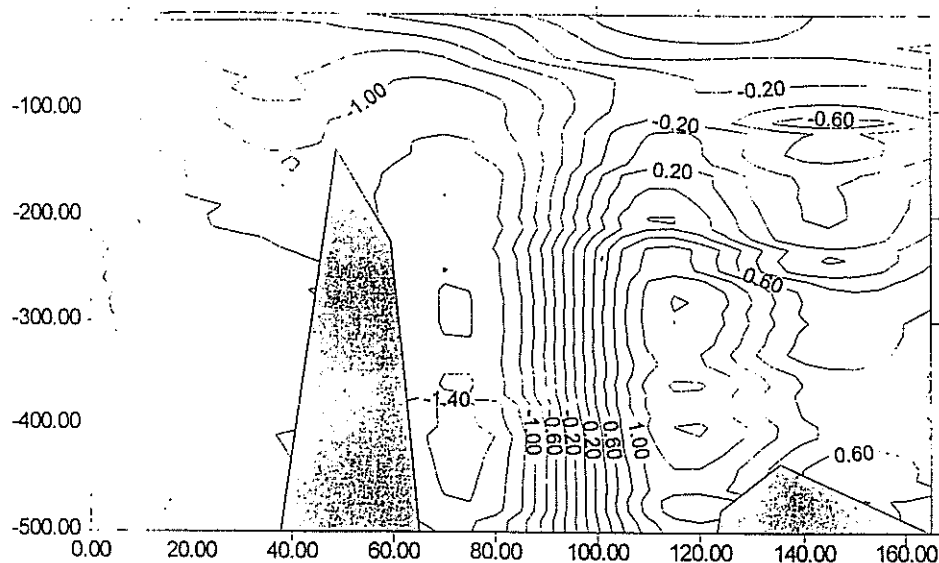


Figura 6. Distribución de la temperatura en un transecto que desde el interior del Estrecho de Bransfield por el estrecho de Boyd llega al talud continental. Se aprecia el Frente Polar por la distribución vertical de las temperaturas.

En el Estrecho de Gerlache, que constituye un canal estrecho y relativamente poco profundo, la circulación era de oeste a este, encontrándose una relajación de la altura dinámica en la confluencia con las aguas del Canal del Schollaert, en la boca sudoeste y en la boca noroeste. Es en estas zonas donde se encontraron de forma reiterada los valores más elevados de clorofila a. La ralentización del flujo en estas zonas, y el gradiente vertical de densidad en la zona de confluencia de las aguas del Estrecho de Gerlache y el Canal de Schollaert parecen justificar la elevada actividad biológica encontrada.

En el Estrecho de Bransfield la circulación de mesoescala mostraba una corriente principal de sentido oeste-este (fig. 7), en parte derivada de la corriente del talud del Mar de Bellingshausen, y en parte derivada de la corriente del Estrecho de Gerlache. Además, se aprecian varios giros en las proximidades del talud continental que debe corresponder al contacto entre las aguas superficiales de Weddell y de Bellingshausen.

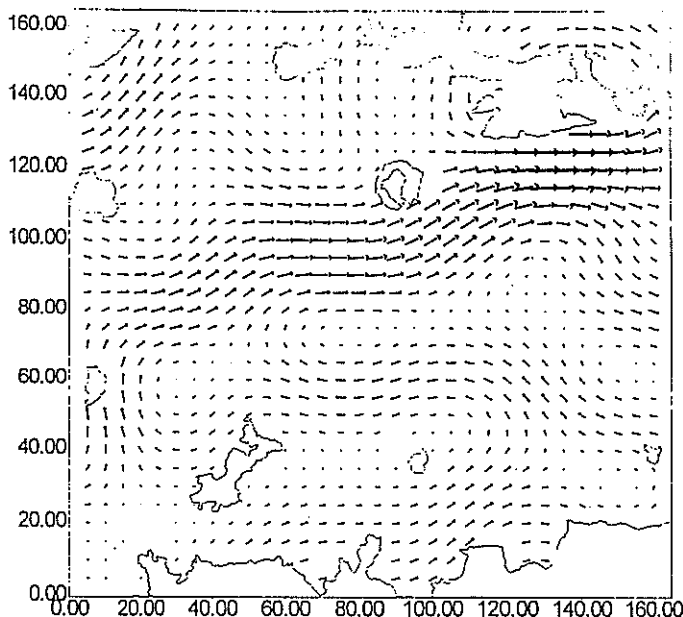


Figura 7. Velocidad geostrofica a 10 m. en el Estrecho de Bransfield. Se aprecia la corriente en el margen norte y la contribución del Estrecho de Gerlache y de la corriente del talud.

La composición del fitoplancton en las áreas de elevada actividad estaba dominada por diatomeas de tamaño grande, algunas de ellas formadoras de cadenas y mucilaginosas. Entre las especies que se encontraron destacan: *Thalassiosira* spp. (una de ellas de pequeño tamaño formaba masas mucilaginosas), *Eucampia antarctica*, *Odontella weisflogii*, *Fragilariopsis* spp., *Rhizosolenia antennata*, *R. inermis*, *R. truncata*, *Coscinodiscus* spp. *Thalassiothrix* cf. *antarctica*, *Phaeocystis* sp., *Protoperdinium* spp., *Distephanus speculum*, *Trichotoxon reinboldii*, *Odontella weissflogii*, *Dactyliosolen antarcticus*, *Dinophysis* sp., *Corethron criophilum* y *Hemiaulus* sp. En la unión del Estrecho de Gerlache con el Estrecho

de Bransfield se desarrollaban densas poblaciones de Cryptomonadales, extendiéndose estas por la parte norte de este último; lo que sugiere que esta población estaría ligada a la corriente detectada (fig. 8). La abundancia de este grupo fue testimonial en la segunda fase de la campaña.

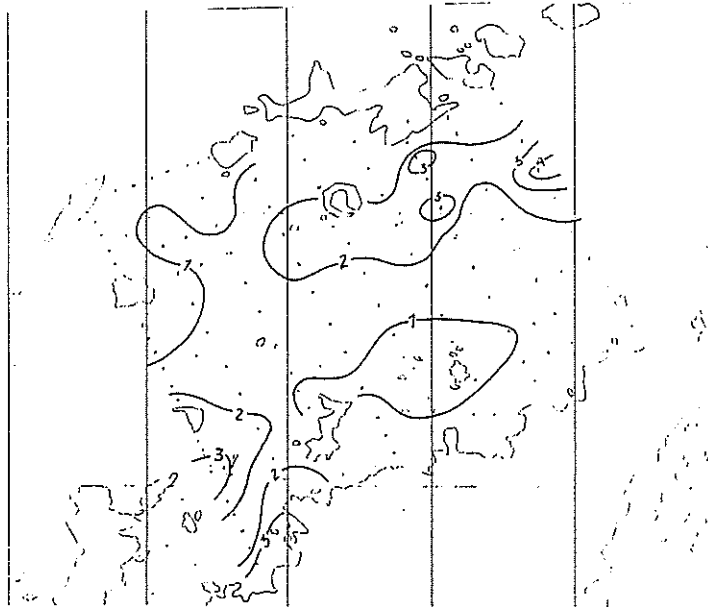


Figura 8. Abundancia de Criptomonadales ($\times 1000 \text{ ml}^{-1}$) a 5 m. durante el muestreo de mesoescala. Puede apreciarse el incremento de este grupo a la entrada del Estrecho de Gerlache, y en relación a la corriente norte del Estrecho de Bransfield.

Que la elevada concentración de fitoplancton encontrada presentaba una alta actividad fotosintética, se puede constatar en la importante reducción de la concentración de nutrientes (en la figura 9 se representa el nitrato, el pH y la fluorescencia) observada en dichas áreas, mientras se incrementa el pH y la fluorescencia. La persistencia de una elevada producción primaria se traduciría en la disminución significativa de los nutrientes, lo que reflejaría, además, la ausencia de procesos de mezcla que aportaran nutrientes a la capa superficial (otra visión complementaria de la estabilidad vertical de los cuerpos de agua en los que se desarrollan). En todo caso, como ya se señala en trabajos anteriores, la concentración de nutrientes era muy elevada, aunque existan diferencias entre las distintas masas de agua detectadas en la zona que habrá que estudiar.

La presión parcial de CO_2 calculada en la primera fase fue inferior a la atmosférica en todas las estaciones muestreadas, con valores especialmente bajos en las estaciones donde la actividad fotosintética era alta. Valores superficiales de $230 \mu\text{atm}$ de CO_2 no son raros para estas zonas. Durante la segunda fase los valores encontrados fueron bajos en el interior del Gerlache y superiores a $300 \mu\text{atm}$ en el resto de áreas. El valor más bajo detectado en superficie a lo largo de un ciclo diario fue de $125 \mu\text{atm}$ en el mediodía. La variación del CO_2 a lo largo del día parece oscilatorio, con valores mínimos al mediodía y una amplitud de variación de $70 \mu\text{atm}$.

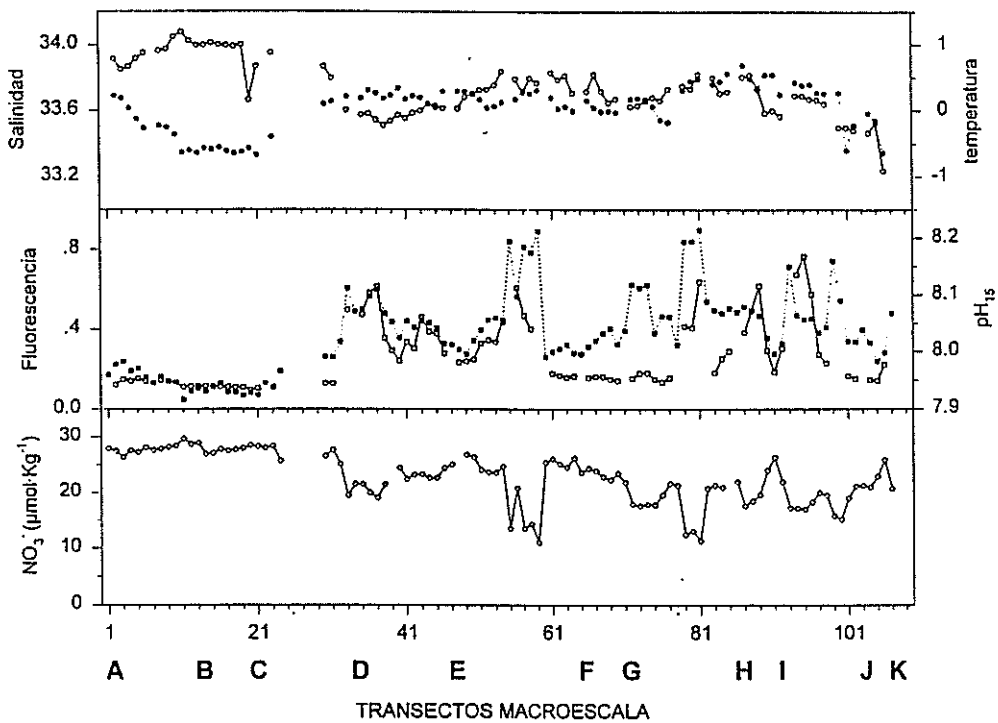


Figura 9. Distribución en superficie de la salinidad, temperatura, fluorescencia, pH_{15} y nitrato durante el muestreo de macroescala. Se puede apreciar un descenso acusado del nitrato, que se corresponde con aumentos de la fluorescencia y el pH. Se corresponde con estaciones situadas sobre el talud continental

El coeficiente de extinción del PAR (fig. 10) también es máxima en las estaciones con elevada concentración de clorofila **a** en superficie, pero, a pesar de ello las concentraciones de clorofila encontradas en profundidad eran elevadas (p.e. en la estación 29 se encontraron $1.7 \mu\text{g l}^{-1}$ a 60 m). Ello sugiere que en estas zonas se estaba produciendo una exportación significativa hacia capas inferiores de la columna de agua. La extinción de diferentes bandas espectrales era dependiente del tipo de fitoplancton dominante en cada estación (diatomeas grandes, Cryptomonadales, etc).

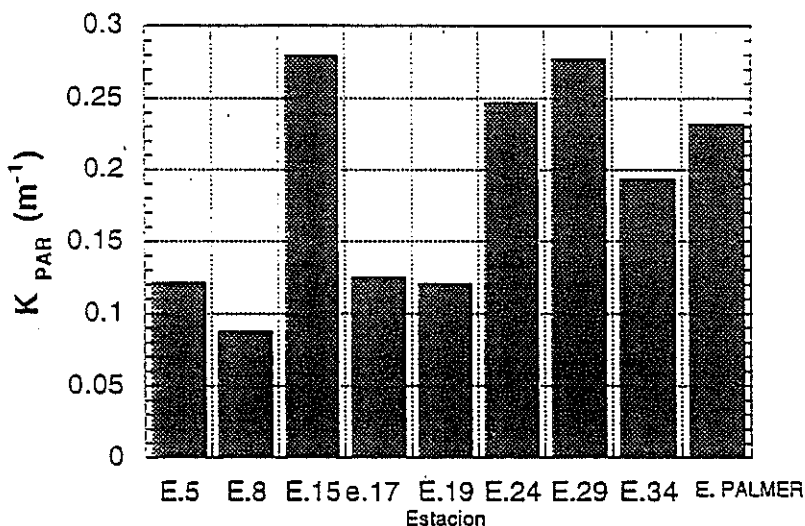


Figura 10. Valores del coeficiente de atenuación vertical (K) del PAR durante la macroescala. Los valores elevados de K se corresponden a estaciones del talud en las que se apreció una concentración menor de nitratos

Los valores de producción primaria encontrados en el conjunto de las dos fases fueron muy elevados en comparación con los obtenidos en trabajos precedentes, tanto si se estima como asimilación de carbono (tabla I), como si se estudia la producción neta y la respiración de la comunidad por el método de oxígeno.

Referencia	Zona	Producción Primaria gC m ⁻² día ⁻¹
El Sayed et al., 1983	Mar de Ross	0.1-0.3
Von Bogunden et al., 1986	Bransfield	0.88
Holm-Hansen y Mitchell, 1991	Bransfield	0.07-3.4
Holm-Hansen y Mitchell, 1991	Gerlache	0.18-1.95
Gleitz et al., 1994	Mar de Weddell	0.1-1.0
Helbling et al., 1995	Elephant Island	0.2-0.75
Boyd et al., 1995	Bellinghausen	0.09-0.76
Arístegui et al., (remitido)	Bransfield	0.3-1.5
FRUELA 1ª Fase	Bransfield	0.87-1.58
FRUELA 1ª Fase	Gerlache	0.36-3.05
FRUELA 2ª Fase	Bellinghausen	0.03-0.35
FRUELA 2ª Fase	Bransfield	0.49-0.79
FRUELA 2ª Fase	Gerlache	0.67-3.11

Tabla I. Valores de producción primaria obtenidos durante la Campaña FRUELA comparados con datos recogidos de la bibliografía referentes a la misma o áreas próximas a la estudiada.

Al igual que la asimilación de carbono, los valores obtenidos de producción neta son elevados, y en muchos casos superiores a los pocos datos previos existentes. Esta metodología permitió confirmar que la respiración es superior en la capa productiva en aquellas estaciones dominadas por fitoplancton de pequeño tamaño, mientras los valores máximos de actividad respiratoria están segregados en la columna de agua respecto a los máximos de producción si el fitoplancton productivo es de mayor tamaño. Este hecho sugiere que en áreas dominadas por fitoplancton de tamaño grande existe un transporte vertical del material sintetizado, hecho que puede confirmarse si se analiza la distribución vertical de la biomasa fitoplanctónica (estimada como clorofila *a*) (fig. 11). Se puede apreciar en esta figura que las células de diferentes tamaños contribuyen de forma significativamente diferente a la biomasa del fitoplancton, al igual que ocurre con la producción.

Las concentraciones de materiales orgánicos disueltos exudados por el fitoplancton, medidas en incubaciones de fitoplancton con ¹⁴C, se incrementaba linealmente en el tiempo, al igual que el carbono asimilado. El porcentaje del fotosintetato liberado al medio que representaría entre el 16 y el 32 % del carbono incorporado.

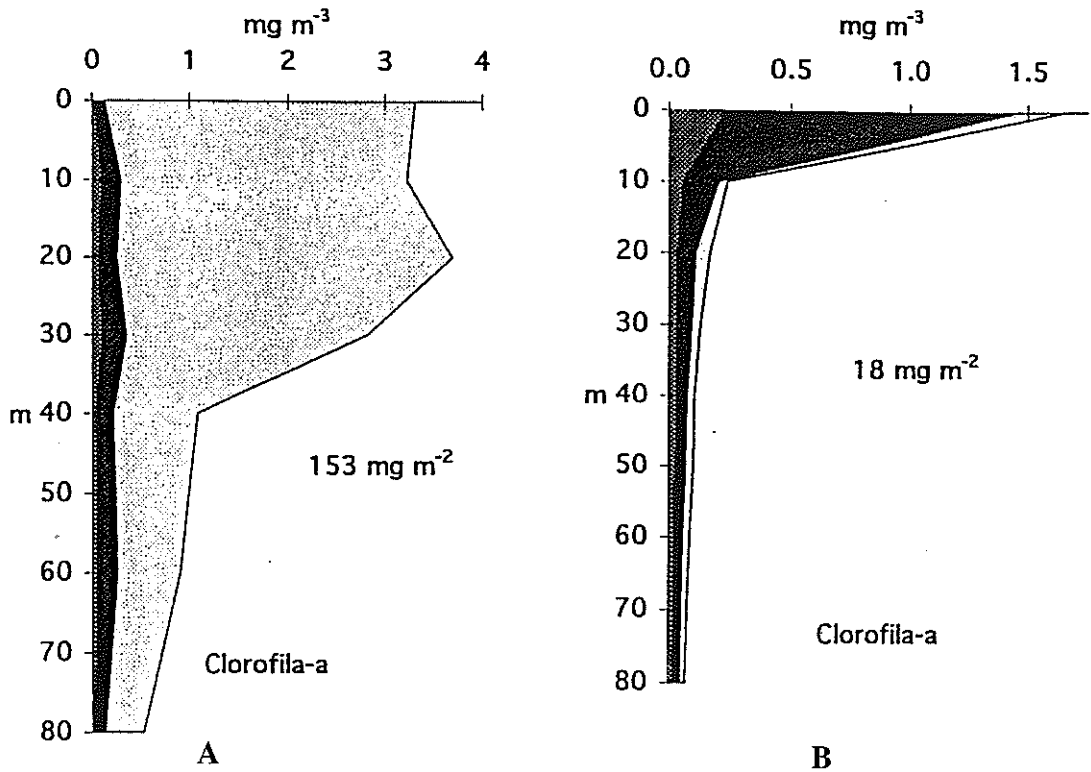


Figura 11. Distribución vertical de clorofila a fraccionada en tres tamaños (0,2-2, 2-10; >10 μm) en dos estaciones del Estrecho de Gerlache, una dominada por diatomeas de tamaño grande (A) y otra por Cryptomonadales (B)

La actividad bacteriana, que utilizan los materiales orgánicos previamente sintetizados, se relaciona con la producción primaria. Sin embargo, los valores de producción secundaria encontrados en las dos fases, 0.01-8.0 en la primera y 0.001-7.71 μgC l⁻¹ día⁻¹, son reflejo de la reducida actividad bacteriana en relación a la producción primaria. En estaciones nictimerales se apreció un ciclo diario de actividad bacteriana, evidente en toda la columna de agua, pero importante en la capa superficial. Los valores integrados en la columna de agua reflejan una relación inversa entre producción primaria neta y producción bacteriana (fig. 12).

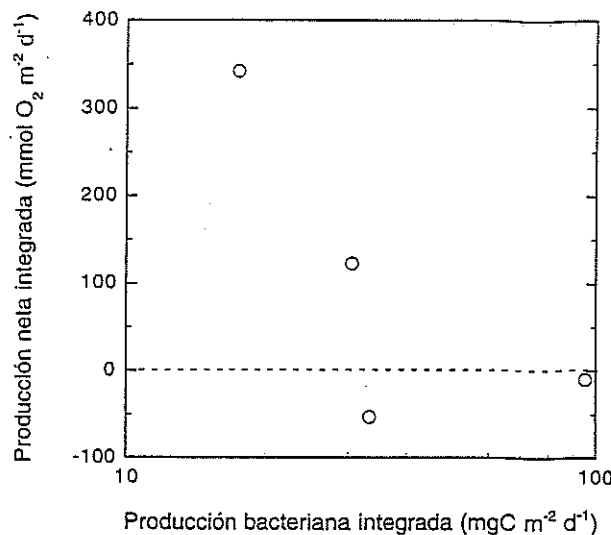


Figura 12. Relación observada entre la producción primaria neta integrada en algunas estaciones durante la segunda fase y la actividad bacteriana integrada en las mismas estaciones

La composición y abundancia del zooplancton difería entre ambas fases. Durante la primera fase se encontraron un elevado número de especies de copépodos, y localmente abundancia de otros grupos como Apendiculariáceos, Salpas y Quetognatos; eran abundantes las fases juveniles y los huevos de algunos grupos (copépodos p.e.), reflejo de una elevada actividad del mesozooplancton en el frente de talud y en el Estrecho de Gerlache. Abundaba, también, microplancton heterótrofo omnívoro (detritívoros y herbívoros): Acantharios y Foraminíferos. Durante esta primera fase también se encontraron poblaciones importantes de *Euphausia superba* en el Estrecho de Gerlache.

Durante la segunda fase en la zona de talud prácticamente habían desaparecido los Copépodos y los Apendiculariáceos (la concentración de clorofila era inferior a $0.30 \mu\text{g a l}^{-1}$ sólo se encontraron poblaciones de Pterópodos, alguna Salpa y pocos Eufausiáceos. En el Estrecho de Gerlache seguían siendo abundantes *Euphausia superba* y *Metridia gerlachei* (copépodo), y en el Estrecho de Bransfield se encontraron poblaciones de esta última especie y algunos juveniles de Eufausiáceos.

Existe relación entre el contenido digestivo de los copépodos herbívoros y la concentración de clorofila, lo que sugiere una tasa de consumo alta, según indican los experimentos realizados para obtener la tasa de evacuación del digestivo con *Metridia gerlachei*; los valores de tasa de evacuación encontrados fueron altos, similares a los de la literatura. La producción secundaria sostenida por los Copépodos (durante la segunda fase) no debe ser muy elevada, dado que los valores de producción de huevos por hembras de *Metridia gerlachei* no era muy elevado, pero se relacionaba claramente con la biomasa del fitoplancton, entre 0 en el talud y 7.1 en el Estrecho de Gerlache.

Sí era perceptible la producción de paquetes fecales por *Metridia gerlachei*, entre 2.1 y 28.4 (valores medios en diferentes estaciones) durante la segunda fase. La producción de paquetes fecales en esta especie es mayor si se alimenta con la fracción menor de $10 \mu\text{m}$ que si se alimenta con las fracciones de 10-200 y mayor de $200 \mu\text{m}$. También la producción de heces por *Euphausia superba* era importante cuando la concentración de clorofila era elevada, aunque en este caso el tamaño de las mismas no era homogéneo.

Las velocidades verticales de los paquetes fecales en función de su volumen se pueden ajustar a una regresión lineal, y van de 100 a 900 m día^{-1} para las de *Euphausia superba* y de 22 a 50 m día^{-1} para *Metridia gerlachei*. La elevada velocidad de las heces de *Euphausia superba* pueden permitir un paso rápido del material particulado hasta el sedimento. Queda por estimar la eficiencia de asimilación de las especies más abundantes del zooplancton, pero en aguas ricas en fitoplancton, en las heces de estas especies se puede encontrar una producción primaria significativa, lo que puede ser reflejo de un tránsito rápido por el digestivo. Sería una indicación de un papel muy activo del zooplancton en la compactación y exportación de material particulado de la capa superficial.

Falta realizar los cálculos pertinentes a partir de los tamaños acústicos detectados con la ecosonda, pero "a priori" parecen existir acúmulos de organismos de tamaño mediano grande, que posiblemente se puedan atribuir a Eufausiáceos, en los bordes de los taludes y en áreas específicas en el interior del Estrecho de Gerlache. Estos acúmulos se sitúan por encima de los 200 m de profundidad, observándose un segundo máximo por debajo de esta profundidad (en la parte externa de las radiales no aparece este segundo máximo) de ecos provenientes de organismos de tamaño menor.

Los valores obtenidos de flujo vertical de material particulado debajo de la capa fótica muestra grandes diferencias entre estaciones. Por término general las estaciones con elevada producción primaria y tamaño del fitoplancton grande este flujo es elevado; los valores máximos obtenidos son de 23, 15 y 13 mg clorofila total $\text{m}^{-2} \text{día}^{-1}$. Estos valores representarían un flujo de carbono desde la capa fótica (considerando como valor medio de la relación carbono/clorofila total de 40) de 928, 627 y 508 $\text{mgC m}^{-2} \text{día}^{-1}$, valor que puede representar hasta un tercio de la asimilación de carbono por el fitoplancton en la zona fótica. Estos valores fueron obtenidos en el Estrecho de Gerlache y , a pesar de no disponer de valores para la acumulación de fitoplancton en el frente de talud, estos podrían ser similares.

Por contra, en áreas con productividad significativa pero sostenida por fitoplancton de pequeño tamaño (p.e. Cryptomonadales) o en áreas poco productivas (un ejemplo significativo sería el frente de talud durante la segunda fase de la campaña) la exportación de materiales particulados sería pequeña. El valor más bajo registrado fue de 0.35 mg Clor total $\text{m}^{-2} \text{día}^{-1}$ (representaría 5 $\text{mgC m}^{-2} \text{día}^{-1}$) en el frente de talud durante la segunda fase.

Aunque no se dispone de información sobre la concentración de carbono en el sedimento, ni su variación temporal en los últimos 100 años (está pendiente la realización de los análisis) la observación visual permite avanzar que las áreas de alta exportación de material sedimentado se corresponden con sedimentos con mayor contenido orgánico, en algún caso asociado a la presencia de una capa significativa de materiales orgánicos de reciente sedimentación (se apreciaba coloración verde).

CONCLUSIONES

- En el área de estudio se encontraron áreas de elevada productividad del fitoplancton. Estas áreas se encontraron ligadas a estructuras hidrográficas concretas: frente de talud y frente Polar, Estrecho de Gerlache en su confluencia con el Canal de Schollaert con una velocidad horizontal reducida respecto a otras áreas. La producción puede estar sostenida por fitoplancton dominado por diatomeas de gran tamaño o por Cryptomonadales, lo que afecta a la estructura de tamaños del material particulado sintetizado.
- La concentración de nutrientes en el agua de las zonas productivas se reducía significativamente en relación a las aguas circundantes, y estos descensos se relacionan con una baja presión parcial de CO_2 (hasta 129 μatm). Se pudo poner de manifiesto un ciclo diario en la concentración de nutrientes y pCO_2 , lo que sería reflejo del elevado dinamismo de la comunidad pelágica en estas zonas.
- Se encontraron valores elevados de radiación UV, aunque la atenuación de esta y de la radiación PAR era muy rápida en zonas productivas. Esto sería reflejo de la elevada captación de PAR por el material particulado, que en algún caso podría provocar el incremento de la temperatura del agua. En experimentos de producción primaria con radiación UV se encontraron reducciones significativas de la tasa de fotosíntesis.

- La actividad heterótrofa asociada a estas zonas de elevada productividad era importante, encontrándose una mayor abundancia de zooplancton y de actividad bacteriana. La actividad del zooplancton también se incrementaba, tal como se pone de manifiesto con el contenido digestivo y las tasas de producción de huevos (copépodos) y de paquetes fecales. La velocidad vertical de estos últimos podía alcanzar los 900 m día⁻¹ en Eufausiáceos y de 50 m día⁻¹ en Copépodos.
- Las tasas de exportación de material particulado desde la zona fótica eran elevadas en zonas productivas, si el tamaño de los productores era grande, entre 1000 y 500 mgC m⁻² día⁻¹, y representa una exportación que puede ser un tercio de la asimilación de carbono por el fitoplancton en la zona fótica. Estos elevados valores se relacionan con sedimentos con contenido orgánico alto.
- Algunos de los procesos observados, p.e. la acumulación de fitoplancton y zooplancton en el frente de talud no se detectaron al final del verano antártico, sin que haya sido posible determinar las causas (durante la segunda fase la concentración de fitoplancton presenta valores mínimos), pero señala la necesidad de conocer en detalle su duración para poder realizar estimas realistas del significado biogeoquímico del área estudiada. Por la misma razón sería deseable establecer la validez espacial de los resultados obtenidos. Todo ello dada la importancia global que pueden tener los procesos y flujos medidos u observados.
- El presente informe se basa en datos e interpretaciones preliminares, en su mayor parte obtenidos durante el transcurso de la Campaña FRUELA, y están, por lo tanto, sujetos a la posibilidad de posteriores correcciones. Este informe o los resultados en el expuestos no deben ser citados sin la previa autorización de los autores.

Participantes

1ª FASE

Marta Estrada, Nuria Guixa y Dolors Vaqué¹

Florentina Alvarez, Ricardo Anadón y Pablo Serret²

Emilio Manuel Fernández y Gabriel Rosón³

Antonio Bode⁴

Carmen González, M^a Dolores Doval, Enrique Nogueira, M^a Victoria González y Ramón Penín⁵

Jaime Rodríguez, Félix López, José M^a Blanco y Francisco Jiménez⁶

Damiá Gomis⁷

Oswaldo López, Manuel González, Julia Figa y Joan Puigdefàbregas⁸

Pedro Jornet, M^a Isabel Lloret, Fernando Uceta y Zacarías García⁹

¹ ICM

² Universidad de Oviedo

³ Universidad de Vigo

⁴ C. Oceanográfico de La Coruña - IEO

⁵ Inst. Investigaciones Marinas - IIM

⁶ Universidad de Málaga

⁷ Universidad de Baleares

⁸ Univ. Politécnica de Cataluña - UPC

⁹ BIO Hespérides

¹⁰ Universidad Autónoma de Barcelona

¹¹ Universidad de Las Palmas

2ª FASE

Carles Pedrós, Josep. M^a Gasol, Xavier Irigoien, Albert Calvet, Francesc Pagés, Arturo Castellón, Jorge Guillén, Marcelli Farran¹

Ricardo Anadón, José Luis Acuña, Jesús Alberto Cabal, Emilio Marañón, Rafael Gonzalez-Quirós, Mario Quevedo, Natalia Gonzalez, Jorge Alvarez²

Manuel Varela⁴

Aida Fernández, M^a Luisa Villarino, M^a Trinidad Rellán, M^a José Pazó⁵

Marc Antonbi García, Pilar Rojas⁸

Mario Manriquez, Pedro Jornet, Miguel Pancorbo⁹

Pera Masqué¹⁰

Santiago Hernández, Irene Lidia Montero¹¹

Referencias

Huntley, M.; Karl, D.M.; Niiler, P. y Holm-Hansen, O. (Eds.). (1991): Research on Antarctic Coastal Ecosystem Rates "RACER". *Deep-Sea Res.*, 38, 911-1260.

Turner, D.R.; Owens, N. J. P. y Priddle, J. (Eds.). (1995): Southern Ocean JGOFS: The U.K. "STERNA" study in the Bellingshausen Sea. *Deep-Sea Res.*, 42, 905-1334.