

# Paleoceanografía del Océano del Sur: nuevas aportaciones en el contexto del Ocean Drilling Program

José-Abel Flores

*Entonces, pequeñas aves volaron gritando sobre el abismo aún entreabierto; una tétrica rompiente blanca chocó contra sus bordes abruptos; después, todo se desplomó, y el gran sudario del mar siguió meciéndose como se mecía hace cinco mil años.*

Moby Dick  
Herman Melville

Desde que en documentos de en torno 450 AC Herodoto se refiere a un océano, el *Mar Australis*, o siglos después, Ptolomeo (ca. 150 DC) incluye en su atlas una región en los confines del Sur, la *Terra Australis Incognita*, exploradores, navegantes, geógrafos y otros científicos, se vieron atraídos por un continente, un océano, supuestamente poblado de seres extraordinarios, en los que el hielo y un ambiente hostil eran los elementos característicos. Las primeras expediciones de que se tiene constancia de su aproximación al continente, y consecuentemente navegasen las aguas del Océano del Sur son la de Cook (segundo viaje, entre 1772-1775), en la que, aún prevaleciendo criterios comerciales, coincidió con el planteamiento de una incipiente investigación oceanográfica, sobre todo, de técnicas de navegación y cartográficas. Pero no es hasta bien comenzado el siglo XIX y principios del XX, alentados por los excelentes resultados obtenidos en algunas de las expediciones que se habían desarrollado en las latitudes bajas y medias, como las del *Beagle* (1831-36) o el *Challenger* (1872-76), o las primeras llevadas a cabo en el Ártico, como la del *Fram* (1893-96), cuando navegantes y exploradores se deciden adentrarse en la Antártida. Sir James Clark Ross (1800-62) es el primer científico que muestreó las aguas antárticas, mostrando su similitud con las del Ártico; y en 1911, en la carrera por conquistar territorios inexplorados, Roald Amundsen alcanza el Polo Sur. Transcurrido ese periodo en el que la aventura se constituía como el elemento fundamental, en el primer cuar-

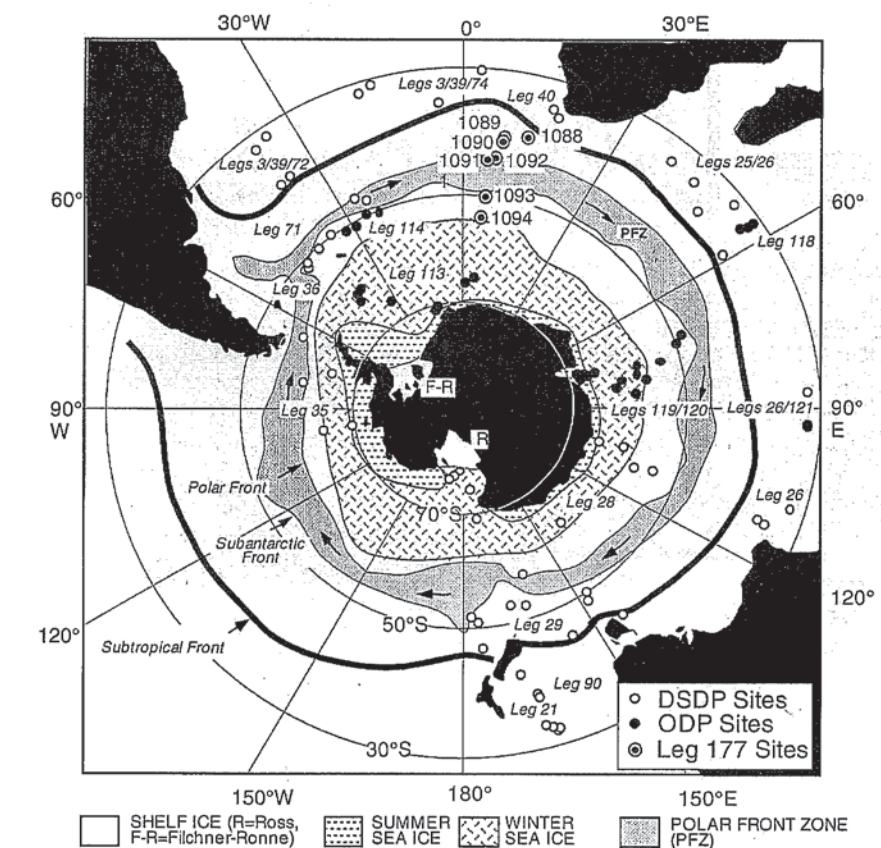


Figura 1: Oceanografía y principales campañas DSDP y ODP centradas en el Océano del Sur y distribución de los sistemas frontales y banquisa (Shipboard Scientific Party ODP leg 177, 1999)

to del Siglo XX, se inician las primeras campañas científicas para estudiar el entorno Antártico, al tiempo que se establecen las primeras bases habitadas. Entre las diversas campañas desarrolladas por entonces, caben destacarse las desarrolla-

das por el buque alemán *Meteor*, que desarrolla los primeros perfiles oceánicos, caracterizando las masa de agua que definen al Océano del Sur. Al tiempo, otros países, como Gran Bretaña, Estados Unidos, Australia, así como las naciones

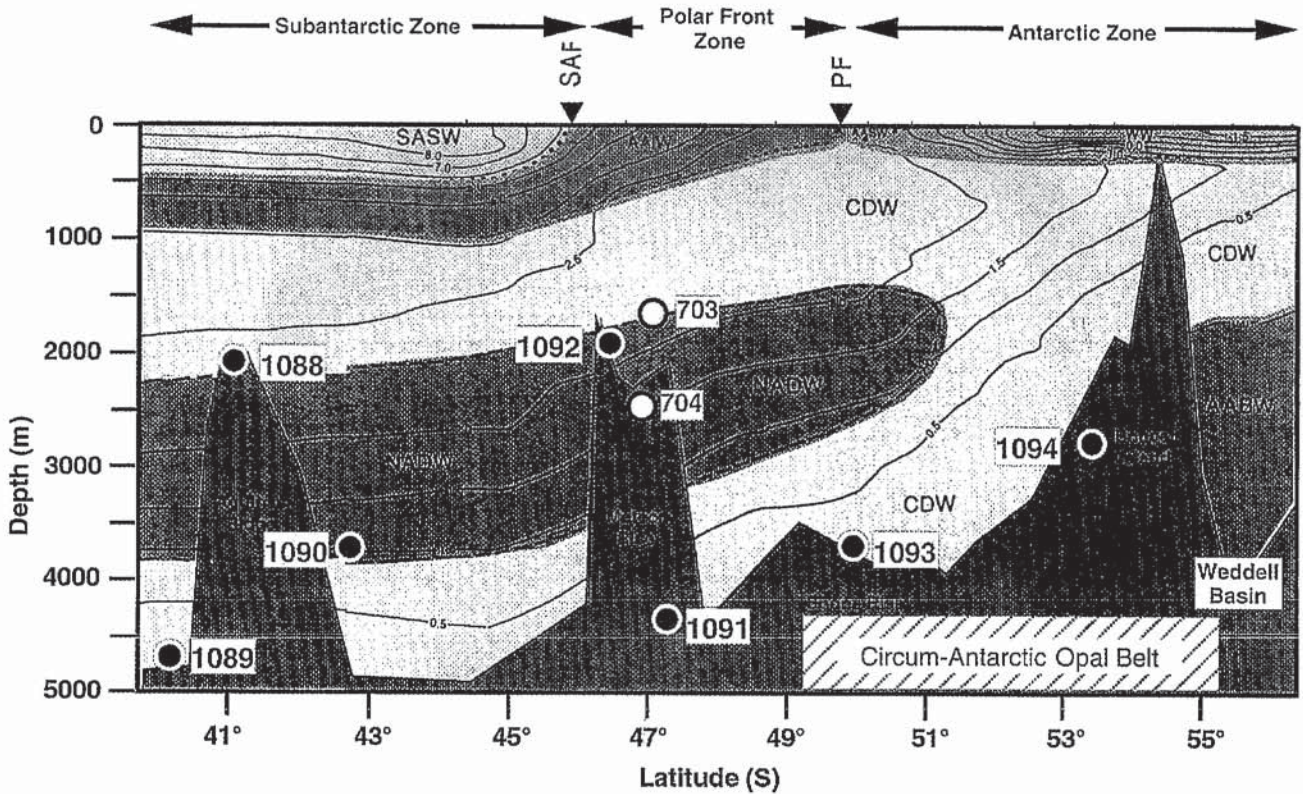


Figura 2. Sección transversal de las principales masas de agua en el sector Atlántico del Océano del Sur y situación de las estaciones de sondeo de la campaña ODP 177. NADW = North Atlantic Deep Water; CDW = Circumpolar Deep Water; AABW = Antarctic Bottom Water; AAIW = Antarctic Intermediate Water; SASW = Subantarctic Surface Water; SAF = Subantarctic Front; y PF = Polar Front. (Shipboard Scientific Party ODP leg 177, 1999)

suramericanas más australes, inician igualmente diversas campañas, que poco a poco proporcionan información suficiente para reproducir las características oceánicas de las masas de aguas que rodean el continente Antártico.

No obstante, y en lo concerniente a aspectos relativos a la Geología, la exploración del Océano del Sur, y la evolución de su entorno, no se destacaría hasta finales de los años 60, una vez que se inician las primeras campañas oceanográficas del *Glomar Challenger* en latitudes por debajo de los 50° S. Este buque oceanográfico, perteneciente al entonces denominado *Deep Sea Drilling Program* (DSDP), fue la herramienta de uno de los proyectos más ambiciosos que se han desarrollado en el ámbito de las Ciencias de la Tierra. El DSDP, y su continuador (en un marco administrativo distinto, pero con iguales objetivos) el *Ocean Drilling Program* (ODP), empleando el hasta hoy operativo *Joides Resolution*, desarrollan campañas de perforación del fondo oceánico de forma ininterrumpida desde 1968. Entre las regiones estudiadas, tal como puede verse en la figura 1, se cuenta con los sectores Atlántico, Pacífico e Índico del Océano del Sur.

Pero antes de adentrarnos en la problemática propia de la investigación paleoceanográfica, es conveniente mencionar alguna de las características fisiográficas, oceanológicas de las masas de agua que se definen en torno a la Antártida. Aunque para muchos oceanógrafos el Océano del Sur no tiene entidad de «provincia» oceánica, presenta un volumen de agua y una serie de características singulares que lo diferencian de otras regiones. Por una parte, posee una superficie helada, la banquisa, que fluctúa anualmente. Estas variaciones determinan que a su vez se desplacen otros frentes que se describirán a continuación. Pero además de la banquisa, el Océano del Sur se caracteriza por constituirse como un entorno aislado: o más concretamente, térmicamente aislado. Este hecho, que directa y conjuntamente con la restricción y estacionalidad en el total de radiación solar recibida anualmente es el causante de la aparición de la banquisa, se produce por la definición de una célula que gira en sentido opuesto a las agujas del reloj, limitada hacia el Norte en torno a los 50-55° que recibe el nombre de Corriente Circumpolar Antártica. Sin embargo, el límite que define el Océano del Sur puede considerar-

se la Convergencia Subtropical, ya que hacia latitudes superiores de este frente oceánico se observan los cambios más drásticos en las características termodinámicas de las masas de agua y posibilitan una clara diferenciación. Asimismo, en esa gran masa de agua que gira en torno al continente Antártico, se observan otros dos rasgos importantes: los frentes Subantártico y Polar. Todos estos frentes se desplazan en uno y otro sentido a lo largo del año en consonancia con los cambios que se producen en la banquisa. Estas características que se dan en el entorno Antártico, y de modo especial la Corriente Circumpolar, son a su vez las encargadas de distribuir las aguas que se incorporan procedentes de los tres océanos. Lo expuesto hasta aquí hace referencia exclusivamente a las aguas superficiales; sin embargo el volumen de éstas y la energía absorbida y transferible que acumulan, no representa más que una mínima parte. Un análisis de las características de las masas de agua intermedias y profundas en un perfil N-S, pone de manifiesto la integración y/o definición de un complejo en el que se ven involucrados grandes volúmenes de agua, con características de temperatura y salinidad muy variable y pro-

cedentes de regiones diversas (Figura 2).

Si, a modo de ejemplo, nos centramos en el sector Atlántico, entre las características hidrodinámicas de las masas de aguas que se han identificado en el entorno del Océano de Sur, llama especialmente la atención dos aspectos: el afloramiento en torno a los 60°S de la conocida por sus siglas como NADW (*North Atlantic Deep Water*), generada en el Atlántico Norte tras su hundimiento por inestabilidad térmica, y que al aflorar produce enriquecimiento en sales nutrientes, incorporadas a ella en su lento y largo recorrido, y la consiguiente eclosión de productores primarios. Por el contrario, en las inmediaciones del continente Antártico, coincidiendo con la divergencia Antártica, la baja temperatura determina un hundimiento de aguas superficiales que alimentan a la denominada AABW (*Antarctic Bottom Water*), que se deslizará por el fondo hasta alcanzar latitudes ecuatoriales antes de mezclarse. De igual modo, pero ocupando profundidades intermedias, sobre los 50°S, flanqueando el área de surgencia, se produce otro hundimiento que produce la AAIW (*Antarctic Intermediate Water*). La confluencia de las masas de agua, y la gran energía puesta en juego, así como los diferentes gradientes que se generan en ese entorno, determinan que el Océano del Sur juegue un papel preponderante en la distribución de calor en la totalidad del Planeta. Remitiéndonos a los modelos vigentes de circulación oceánica general, en concreto el denominado como Cinta Transportadora Termohalina Global (Figura 3), muestra que la distribución de volúmenes de agua fría esta controlada por la dinámica que se ejerce en el Océano del Sur; en otras palabras, en este sector se produce la redistribución de las masas de agua profundas. Cualquier variación en la posición o características de masas de agua adyacentes (variaciones del gradiente térmico o salino, frentes...), puede alterar el patrón de distribución de energía entre los océanos, y consecuentemente entre hemisferios y continentes y su climatología.

El estudio de las características del océano en el pasado, su evolución, le corresponde a la Paleooceanografía, materia interdisciplinar en la que se combinan técnicas sedimentológicas, geofísicas, micropaleontológicas y geoquímicas extraídas a partir del análisis de sedimentos u otros registros históricos (testigos de hielo...). Una de las principales preocupaciones desde el punto de vista técnico, es localizar y recuperar secuencias complejas y continuas que permitan estudiar intervalos de tiempo cortos, para lo cual,

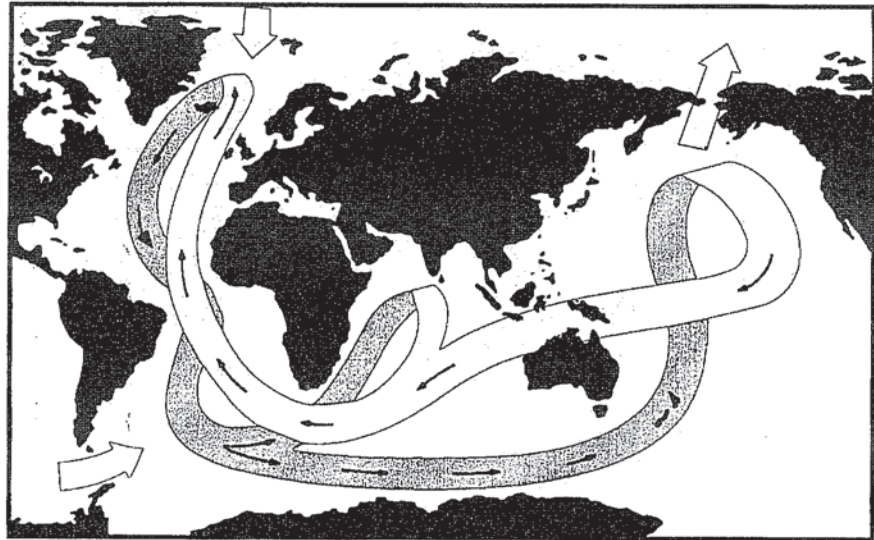


Figura 3. Cinta transportadora termohalina global. (Broecker y Denton, 1989).

en términos sedimentológicos, se requieren secciones con elevada tasa de sedimentación. En la actualidad, varios programas internacionales, integrados en buen número de casos en otros generales, como es PAGES o *Global Change*, se ocupan de la obtención y estudio de estas secciones, destacando el ya aludido ODP o el conocido como IMAGES (*International Marine Global Change Study*). En la mayoría de casos la información disponible, o generada dentro de campañas preliminares o de entidad menor, se emplea para llevar a cabo con garantías de éxito otras con mayores pretensiones, como las que se desarrollan en el marco de ODP.

Dentro de los programas DSDP y ODP han sido varias las campañas que han tenido lugar en el océano del Sur, con objetivos diversos (Figura 1). Con el objeto de ir centrando la discusión en la región Atlántica, y más en concreto aquellas con un componente paleoceanográfico importante, mencionar las campañas 71, 113 y 114. Más recientemente, en 1998-99, bajo el epígrafe «*Southern Ocean Paleooceanography*» se desarrolló la campaña ODP 177, que de alguna manera, aprovechando la información existente propia del DSDP y ODP, así como la obtenida mediante otros buques e instituciones, trató de abordar de manera exhaustiva la problemática paleoceanográfica del Océano del Sur.

Durante la campaña ODP 177, celebrada entre el 10 de diciembre de 1997 al 6 de febrero de 1998, se recuperaron sedimentos del sector Atlántico en el Océano del Sur (Figura 4), con el objetivo fundamental de estudiar la historia paleoceanográfica de la regiones Antártica y Subantártica, desde periodos de tiempo

recientes (milenios) hasta el Cenozoico. Asimismo, la localización de secciones con alta tasa de sedimentación se dirigió a obtener secuencias que permitiesen un estudio de alta resolución. Se realizaron un total de 7 estaciones (Sites) a lo largo de un transecto latitudinal a través de la Corriente Circumpolar Antártica desde 41° a 53°S. Tres estaciones a ~41°S próxima al surco de *Agulhas* (estaciones 1088, 1090, y 1091), dos a ~47°S cercana al alto *Meteor* (estaciones 1091 y 1092), y dos a 50 y 53°S en el denominado *Circum Antarctic Siliceous Belt* (estaciones 1093 y 1094). Las estaciones descritas se establecieron en rangos batimétricos entre 1093 a 4620 m de columna de agua, intersectando la totalidad de las más importantes masas de agua profundas y de fondo del Océano del Sur.

Los objetivos generales de la campaña ODP 177 se plantearon en dos sentidos: 1) implementar los esquemas biostratigráficos, paleogeográficos, y de la historia paleoceanográfica del Cenozoico inferior, un periodo marcado por el establecimiento de la Criosfera Antártica y de la Corriente Circumpolar Antártica; 2) obtener secciones del Neógeno superior, y de forma especial en el Pleistoceno reciente, que pudieran resolver los modelos de edad para el Hemisferio Sur empleando técnicas de calibrado astronómicas, así como realizar comparaciones con registros similares de otras cuencas oceánicas y con registros en testigos de hielo de Groenlandia y la Antártida.

Durante la campaña se recuperaron más de 4000 m de sedimentos, que registran edades desde el Eoceno al Holoceno. En cada estación se recuperaron un número variable de testigos que han posibi-

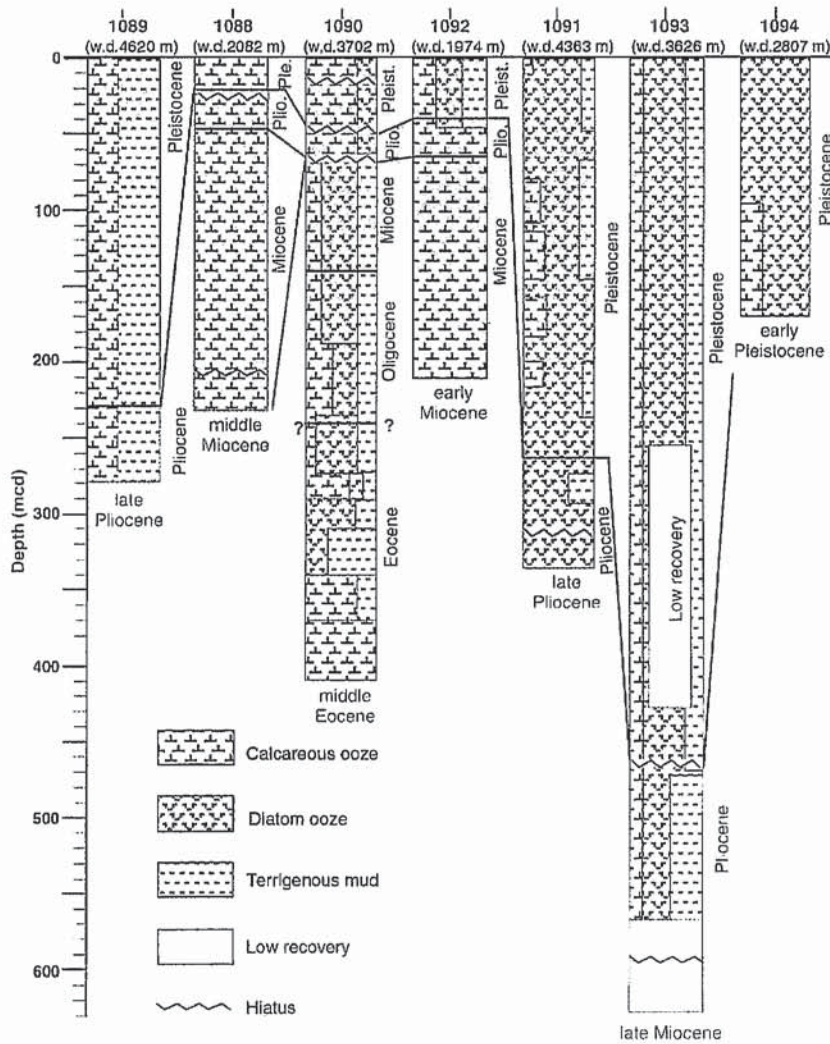


Figura 4. Litología y panel de correlación entre las secciones extraídas en las diferentes estaciones de muestreo durante la campaña ODP 177. Escala de Polaridad magnética de Cande y Kent (1992); w.d. = water depth; mcd = meters of composite depth.. (Shipboard Scientific Party ODP leg 177, 1999).

litado el establecimiento de “secuencias compuestas”, técnica que permite un registro continuo. El calibrado y la correlación para la obtención de las secuencias compuestas se ha llevado a cabo empleando análisis de alta resolución de la susceptibilidad magnética, atenuación de rayos gamma (GRA), reflectancia, así como con la definición de eventos biostratigráfico, desarrollados esencialmente con diatomeas, radiolarios y nanofósiles calcáreos. Como resultado de todo ello, las secciones recuperadas en la campaña ODP 177 representan la primera secuencia completa del rango señalado obtenida en el Océano del Sur.

En la estación 1090 se registró una secuencia continua de 330 m, con un rango Eoceno medio Mioceno Inferior, en la que se observa una variación cíclica en parámetros litológicos y micropaleontológicos, así como un excepcional registro

paleomagnético. Las condiciones de preservación de los foraminíferos, los cuales muestran un bajo grado de alteración de su calcita constituyente, posibilita la realización de análisis isotópicos ( $\delta^{18}O$ ) en el referido intervalo. La calidad de la señal biostratigráfica y paleomagnética de la estación ODP 1090, determinan que en un inmediato futuro en el mismo se establezca una sección tipo de referencia para el lapso Eoceno medio-Mioceno inferior para el Océano del Sur.

En lo que se refiere a la paleoceanografía del Plioceno-Pleistoceno, durante la campaña ODP 177 se registró una secuencia completa en una amplia región entre los 41° (estación 1089), 47° (estación 1091), 50° (estación 1093), y 53°S (estación 1094). En estas secuencias la tasa de sedimentación estimada varía entre 13 a 32 cm/ka. Ello posibilita la realización de estudios paleoceanográficos

con una resolución muy inferior a 1 ka. Este registro es equivalente al obtenido en las campañas ODP 162 y 172 del Atlántico Norte, y son excepcionales para la identificación de la respuesta a cambios orbitales en el Hemisferio Sur, así como el establecimiento de relaciones entre la evolución climática entre ambos hemisferio. La localización de los distintos testigos es óptima para observar el comportamiento de algunos aspectos clave del sistema climático, incluyendo el de la dinámica del casquete polar Antártico, dinámica de los diferentes frentes definidos en la Corriente Circumpolar Antártica y cambios en las características y distribución del Agua Profunda Noratlántica (NADW) en el Océano del Sur.

Como puede apreciarse, los datos de que se dispone en la actualidad son restringidos, encontrándose en la mayoría de los casos en elaboración. No obstante, sin otro objeto que el explicar en qué medida esta campaña puede aportar nuevos datos a la investigación paleoceanográfica, profundizaremos en el análisis de alguno de los objetivos planteados, una vez que los modelos estratigráficos se han validado..

La génesis de la criosfera, o cubierta de hielo que rodea el continente Antártico, tras la separación definitiva del Americano, puede ser considerado el primer evento trascendente en la historia del Océano del Sur, si no su generador. Con anterioridad a este evento, y pese a ocupar latitudes altas, no se llegó a generar una cubierta de hielo marina. Este hecho aconteció próximo al límite Eoceno-Oligoceno. En la figura 5 se muestran los valores de los registros isotópicos (relación entre los isótopos pesado  $-O^{18}$  - y ligero  $-O^{16}$  - del oxígeno) en foraminíferos bentónicos del Océano del Sur. La relación isotópica extraída de las conchas carbonatadas de foraminíferos se relaciona con la cantidad de hielo acumulado en los casquetes polares, y reflejan indirectamente, episodios de temperaturas relativamente bajas o altas (relación isotópica alta y baja, respectivamente) en el contexto climático global. Si analizáramos conjuntamente las curvas obtenidas entre los foraminíferos planctónicos y bentónicos, el trazado de las curvas del Océano del Sur con anterioridad al Eoceno superior-Oligoceno, mostrarían un trazado paralelo, pero claramente separados, indicando un cierto gradiente térmico entre los organismos que habitaban los fondos, y los que vivían en las masas de agua superficiales. En cambio, a partir del límite Eoceno-Oligoceno, aún manteniéndose el paralelismo en el trazado, se observaría un acusado descenso en las tem-

peraturas, tanto en las aguas superficiales como en las profundas. En el Hemisferio Norte, el registro paleotérmico, pese a mostrar fluctuaciones, mantendría sus valores, mientras que las aguas profundas, generadas fundamentalmente en el entorno Antártico, presentarían un claro y progresivo enfriamiento, incrementando el gradiente entre aguas profundas y superficiales. Otros eventos señalados en la figura 5, como es el desarrollo de la banquisa hasta alcanzar las que muestra en la actualidad, no ha sido bien documentada en la campaña que nos ocupa al carecer de registros de calidad. Coincidiendo con variaciones en la señal isotópica, otros indicadores nos suministran información respecto a la definición de una cubierta de hielo. Entre ellos los se destacan los IRD (Ice-rafted debris), material erosionado por los icebergs del continente, y depositado en las cuencas oceánicas, cuyo registro se reconoce de manera importante justamente a partir del límite Eoceno-Oligoceno. Como ya se comentara, durante la campaña ODP 177, este trascendental evento está perfectamente registrado en la estación 1090, en la que además se ha podido obtener un magnífico registro gemagnético, con la consiguiente mejora en el calibrado de otras señales como las micropaleontológicas.

Otro de los aspectos en los que la Paleocceanografía está centrando sus esfuerzos, es en la obtención de secuencias de alta resolución durante el Pleistoceno, y en concreto en episodios en los que se ha demostrado, tuvieron lugar cambios climáticos drásticos y muy rápidos. Los resultados preliminares obtenidos en la campaña ODP 177 muestran un claro control sedimentarios por parte de parámetros astronómicos correspondiente a las frecuencias de Milankovitch (variaciones en la excentricidad, oblicuidad y precesión de los equinoccios), y han sido empleados en correlación y calibrado de distintas señales (geofísicas, como son la reflectancia, emisión de partículas gamma, o micropaleontológicas, como son los cambios en los flujos de organismos silíceos o calcáreos). En este sentido, varios grupos de investigación centran sus esfuerzos en investigar los acontecimientos que tuvieron lugar en el Pleistoceno medio en la totalidad de océano, y que se tradujo en un cambio en la frecuencia dominante de los 41 años (ciclos de oblicuidad) a los de 100 (ciclos de excentricidad), y en qué medida se reflejan o se explican en el Océano del Sur.

Pero aparte de estos ciclos de ordenes en torno a la decenas y centenas de miles de años, durante esta campaña se persi-

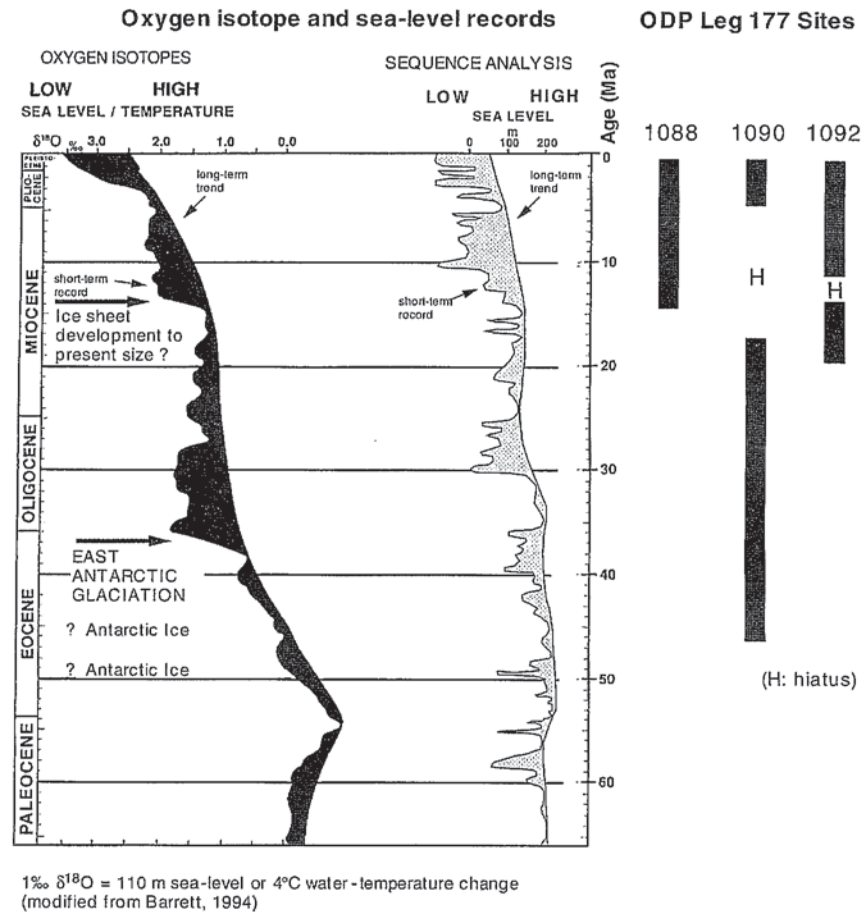


Figura 5. Principales eventos paleocceanográficos registrados en el Océano del Sur y su relación con las curvas isotópica del oxígeno (extraída en foraminíferos bentónicos) y eustática.

gula la identificación de otros de mayor frecuencia, y que no necesariamente respondan a variaciones de índole astronómica. Algunos de estos cambios se han puesto de manifiesto en el Hemisferio Norte, destacándose los denominados eventos Henrich y Dansgaard-Oeschger, en los que empleando biomarcadores y/u otras técnicas de cuantificación de paleotemperaturas que emplean como herramienta fundamental los microfósiles (funciones de transferencia, o de análogos) se detectan cambios en la temperatura de las masas de agua superficiales de varios grados (en torno a 10°C), en lapsos de decenas de años. Hasta el momento no se han puesto de manifiesto de forma clara en el Hemisferio Sur: Su identificación, o evidenciar su ausencia es fundamental para la explicación de los mismos. En un sentido similar, la disponibilidad y calibrado de eventos de menos entidad, bien de naturaleza climática y/o biológica a lo largo del Pleistoceno, permitirá en un futuro inmediato estimar y valorar la simetría y el grado de sincronismo que existe entre hemisferios en lo que respecta a la respuesta climática. La alta calidad del re-

gistro y el excelente control de edad que ha podido desarrollarse, ha posibilitado una correlación directa con la obtenida por técnicas similares en los testigos de hielo, tanto Antárticos como de Groenlandia, y establecer así las relaciones entre atmósfera (temperatura, CO<sub>2</sub>...) y océano (temperatura superficial, productividad, circulación profunda...) durante los últimos cuatro ciclos climáticos. Relacionado con esta variabilidad climática drástica y de ciclos cortos, otro aspecto fundamental en la investigación del Océano del Sur se centra en la respuesta ante esos cambios de los productores primarios y su efecto en la presión de CO<sub>2</sub> atmosférico.

La alta calidad de las secuencias sedimentarias recuperadas durante la campaña ODP 177 en el Océano del Sur llena un espacio hasta el momento inexistente, completando la secuencia de una serie de localidades que permitan una correlación global entre el sector Antártico y Subantártico y el resto del sistema climático del Planeta.

Como puede comprobarse de la exposición, la mayor parte del trabajo está por realizar, y es labor de años el completar el

análisis del material extraído. Asimismo, estas campañas sientan las bases de otras que se desarrollarán en un futuro más o menos próximo y dentro de lo que a partir del año 2003 será la continuación del proyecto ODP, que con nuevas plataformas y distinto sistema de organización se convertirá en el IODP (*Integrated Ocean Drilling Program*), que invita a la comunidad científica a mantener, cuando no a incrementar, el nivel creativo e investigador que han marcado las fases previas.

### Bibliografía

A continuación se enumeran algunos de los trabajos a partir de los cuales se elaboró la conferencia y el texto que la resume.

- Barron, J., Larsen, B., and Baldauf, J.G., 1991a. Evidence for late Eocene to early Oligocene Antarctic glaciation and observations on late Neogene glacial history of Antarctica: results from Leg 119. In Barron, J., Larsen, B., et al., Proc. ODP, Sci. Results, 119: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 869–891.
- Barron, J.A., Baldauf, J.G., Barrera, E., Caulet, J.-P., Huber, B.T., Keating, B.H., Lazarus, D., Sakai, H., Thierstein, H.R., and Wei, W., 1991b. Biochronologic and magneto-chronologic synthesis of Leg 119 sediments from the Kerguelen Plateau and Prydz Bay, Antarctica. In Barron, J., Larsen, B., et al., Proc. ODP, Sci. Results, 119: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 813–847.
- Bender, M., Sowers, T., Dickson, M., Orchard, J., Grootes, P., Mayewski, P., and Messer, D., 1994. Climate teleconnections between Greenland and Antarctica throughout the last 100,000 years. *Nature*, 372:663–666.
- Berger, W.H., 1989. Global maps of ocean productivity. In Berger, W.H., Smetacek, V.S., and Wefer, G. (Eds.), *Productivity of the Oceans: Present and Past*: New York (Wiley), 429–455.
- Berger, W.H., and Jansen, E., 1994. Mid-Pleistocene climate shift: the Nansen connection. In Johannessen, O.M., Muensch, R.D., and Overland, J.E. (Eds.), *The Role of the Polar Oceans in Shaping the Global Environment*. Geophys. Monogr., Am. Geophys. Union, 85:295–311.
- Bohrmann, G., Kuhn, G., Abelmann, A., Gersonde, R., and Fütterer, D., 1990. A young porcellanite occurrence from the Southwest Indian Ridge. *Mar. Geol.*, 92:155–163.
- Bond, G., Broecker, W., Johnsen, S., McManus, J., Labeyrie, L., Jouzel, J., and Bonani, G., 1993. Correlations between climate records from the North Atlantic sediments and Greenland ice. *Nature*, 365:143–147.
- Bond, G.C., and Lotti, R., 1995. Iceberg discharges into the North Atlantic on millennial time scales during the last glaciation. *Science*, 276:1005–1010.
- Broecker, W.S., 1997. Will our ride into the Greenhouse future be a smooth one? *GSA Today*, 7:1–6.
- Broecker, W.S., and Denton, G. H., 1989. The role of ocean-atmosphere reorganizations in glacial cycles. *Geoch. Cosmoch. A.*, 53: 2465–2501.
- Broecker, W.S., and Peng, T.-H., 1989. The cause of the glacial to interglacial atmospheric CO<sub>2</sub> change: a polar alkalinity hypothesis. *Global Biogeochem. Cycles*, 3:215–239.
- Cande, S.C., and Kent, D.V., 1992. A new geomagnetic polarity time scale for the Late Cretaceous and Cenozoic. *J. Geophys. Res.*, 97:13917–13951.
- Cande, S.C., LaBrecque, J.L., and Haxby, W.F., 1988. Plate kinematics of the South Atlantic: Chron C34 to present. *J. Geophys. Res.*, 93:13479–13492.
- Charles, C.D., and Fairbanks, R.G., 1992. Evidence from Southern Ocean sediments for the effect of North Atlantic deep-water flux on climate. *Nature*, 355:416–419.
- Charles, C.D., Lynch-Stieglitz, J., Ninne-mann, U.S., and Fairbanks, R.G., 1996. Climate connections between the hemispheres revealed by deep sea sediment core/ice core correlations. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 142:19–27.
- Ciesielski, P.F., Kristoffersen, Y., et al., 1988. Proc. ODP, Init. Repts., 114: College Station, TX (Ocean Drilling Program).
- Clapperton, C.M., and Sugden, D.E., 1990. Late Cenozoic glacial history of the Ross Embayment, Antarctica. *Quat. Sci. Rev.*, 9:253–272.
- Dansgaard, W., Johnsen, S.J., Clausen, H.B., Dahl-Jensen, D., Gundestrup, N.S., Hammer, C.U., Hvidberg, C.S., Steffensen, J.P., Sveinbjörnsdóttir, A.E.,
- Jouzel, J., and Bond, G., 1993. Evidence for general instability of past climate from a 250-kyr ice-core record. *Nature*, 364:218–220.
- DeMaster, D.J., 1981. The supply and accumulation of silica in the marine environment. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 45:1715–1732.
- Dowsett, H., Barron, J., and Poore, R., 1996. Middle Pliocene sea surface temperatures: a global reconstruction. *Mar. Micropaleontol.*, 27:13–25.
- duPlessis, A., 1977. Seafloor spreading south of the Agulhas Fracture Zone. *Nature*, 270:719–721.
- Francois, R., Altabet, M.A., Ein-Fen, Y., Sigman, D.M., Bacon, M.P., Frank, M., Bohrmann, G., Bareille, G., and Labeyrie, L.D., 1997. Contribution of Southern Ocean surface-water stratification to low atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations during the last glacial period. *Nature*, 389:929–935.
- Froelich, P.N., Malone, P.N., Hodell, D.A., Ciesielski, P.F., Warnke, D.A., Westall, F., Hailwood, E.A., Nobes, D.C., Fenner, J., Mienert, J., Mwenifumbo, C.J., and Müller, D.W., 1991a. Biogenic opal and carbonate accumulation rates in the subantarctic South Atlantic: the late Neogene of Meteor Rise Site 704. In Ciesielski, P.F., Kristoffersen, Y., et al., Proc. ODP, Sci. Results, 114: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 515–550.
- Gersonde, R., Kyte, F.T., Bleil, U., Diekmann, B., Flores, J.A., Gohl, K., Grahl, G., Hagen, R., Kuhn, G., Sierro, F.J., Voelker, D., Abelmann, A., and Bostwick, J. A., 1997. Geological record and reconstruction of the late Pliocene impact of the Eltánin asteroid in the Southern Ocean. *Nature*, 390:357–363.
- GRIP (Greenland Ice-core Project) Members, 1993. Climate instability during the last interglacial period recorded in the GRIP ice core. *Nature*, 364:203–207.
- Hambrey, M.J., and Barrett, P.J., 1993. Cenozoic sedimentary and climatic record, Ross Sea Region, Antarctica. In Kennett, J.P., and Warnke, D.A., (Eds.), *The Antarctic Paleoenvironment: A Perspective on Global Change*, 2. *Antarct. Res. Ser.*, 60:91–124.
- Hodell, D.A., and Venz, K., 1992. Toward a high-resolution stable isotopic record of the Southern Ocean during the Pliocene-Pleistocene (4.8 to 0.8 Ma). In Kennett, J.P., Warnke, D.A. (Eds.), *The Antarctic Paleoenvironment: A Perspective on Global Change* (Pt. 1). *Am. Geophys. Union, Antarct. Res. Ser.*, 56:265–310.
- Howard W., 1997. A warm future in the past. *Nature*, 388:418–419.
- Howard, W.R., and Prell, W.L., 1992. Late Quaternary surface circulation of the southern Indian Ocean and its relationship to orbital variations. *Paleoceanography*, 7:79–117.
- Imbrie, J., Berger, A., Boyle, E., Clemens, S., Duffy, A., Howard, W.,

- Kukla, G., Kutzbach, J., Martinson, D., McIntyre, A., Mix, A., Molino, B., Morley, J., Peterson, L., Pisias, N., Prell, W., Raymo, M., Shackleton, N., and Toggweiler, J., 1993. On the structure and origin of major glaciation cycles, 2. The 100,000-year cycle. *Paleoceanography*, 8:699-735.
- Imbrie, J., Boyle, E.A., Clemens, S.C., Duffy, A., Howard, W.R., Kukla, G., Kutzbach, J., Martinson, D.G., McIntyre, A., Mix, A.C., Molino, B., Morley, J.J., Peterson, L.C., Pisias, N.G., Prell, W.L., Raymo, M.E., Shackleton, N.J., and Toggweiler, J.R., 1992. On the structure and origin of major glaciation cycles, 1. Linear responses to Milankovitch forcing. *Paleoceanography*, 7:701-738.
- Imbrie, J., McIntyre, A., and Mix, A., 1989. Oceanic response to orbital forcing in the late Quaternary: observational and experimental strategies. In Berger, A., Schneider, S., and Duplessy, J.C. (Eds.), *Climate and Geo-Sciences: Dordrecht* (Kluwer Academic), 121-164.
- Keir, R.S., 1988. On the late Pleistocene ocean geochemistry and circulation. *Paleoceanography*, 3:413-445.
- Kemp, A.E.S., and Baldauf, J.G., 1993. Vast Neogene laminated diatom mat deposits from the eastern equatorial Pacific Ocean. *Nature*, 362:141-144.
- Kemp, A.E.S., Baldauf, J.G., and Pearce, R.B., 1995. Origins and paleoceanographic significance of laminated diatom ooze from the eastern equatorial Pacific Ocean. In Pisias, N.G., Mayer, L.A., Janecek, T.R., Palmer-Julson, A., and van Andel, T.H. (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Results*, 138: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 641-645.
- Kennett, J.P., 1977. Cenozoic evolution of Antarctic glaciation, the circum-Antarctic Ocean, and their impact on global paleoceanography. *J. Geophys. Res.*, 82:3843-3860.
- Kennett, J.P., and Barker, P.F., 1990. Latest Cretaceous to Cenozoic climate and oceanographic developments in the Weddell Sea, Antarctica: an ocean-drilling perspective. In Barker, P.F., Kennett, J.P., et al., *Proc. ODP, Sci. Results*, 113: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 937-960.
- Kennett, J.P., and Barron, J.A., 1992. Introduction. In Kennett, J.P., and Warnke, D.A. (Eds.), *The Antarctic Paleoenvironment: A Perspective on Global Change*. *Am. Geophys. Union*, 56:1-6.
- Knox, F.E., and McElroy, M.B., 1984. Changes in atmospheric CO<sub>2</sub>: influence of the marine biota at high latitudes. *J. Geophys. Res.*, 89:4629-4637.
- Kumar, K., Anderson, R.F., Mortlock, R.A., Froelich, P.N., Kubik, P., Ditttrich-Hannen, B., and Suter, M., 1995. Increased biological productivity and export production in the glacial Southern Ocean. *Nature*, 378:675-680.
- Labeyrie, L., Labracherie, M., Gorfti, N., Pichon, J.J., Vautravers, M., Arnold, M., Duplessy, J.-C., Paterne, M., Michel, E., Duprat, J., Caralp, M., and Turon, J.L., 1996. Hydrographic changes of the Southern Ocean (southeast Indian sector) over the last 230 kyr. *Paleoceanography*, 11:57-76.
- Labeyrie, L., Pichon, J.-J., Labracherie, M., Ippolito, P., Duprat, J., and Duplessy, J.-C., 1986. Melting history of Antarctica during the past 60,000 years. *Nature*, 322:701-706.
- Lawver, L.A., Gahagan, L.M., and Coffin, M.F., 1992. The development of paleosea-ways around Antarctica. In Kennett, J.P., and Warnke, D.A. (Eds.), *The Antarctic Paleoenvironment: a Perspective on Global Change*. *Am. Geophys. Union, Antarct. Res. Ser.*, 56:7-30.
- Lisitzin, A.P., 1985. The silica cycle during the last ice age. *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 50:241-270.
- Lutjeharms, J.R.E., 1985. Location of frontal systems between Africa and Antarctica: some preliminary results. *Deep-Sea Res. Part A*, 32:1499-1509.
- Morley, J.J., 1989. Variations in high-latitude oceanographic fronts in the southern Indian Ocean: an estimation based on faunal changes. *Paleoceanography*, 4:547-554.
- Oppo, D.W., and Fairbanks, R.G., 1987. Variability in the deep and intermediate water circulation of the Atlantic Ocean during the past 25,000 years: Northern Hemisphere modulation of the Southern Ocean. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 86:1-15.
- Peterson, R.G., and Stramma, L., 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Prog. Oceanogr.*, 26:1-73.
- Petit, J.R., Basile, I., Leruyet, A., Raynaud, D., Lorius, C., Jouzel, J., Stievenard, M., Lipenkov, V.Y., Barkov, N.I., Kudryashov, B.-B., Davis, M., Saltzman, E., and Kotlyakov, V., 1997. Four climatic cycles in Vostok ice core. *Nature*, 387:121-164.
- Prell, W.L., Huston, W.H., and Williams, D.F., 1979. The Subtropical Convergence and late Quaternary circulation in the southern Indian Ocean. *Mar. Micropaleontol.*, 4:225-234.
- Ruddiman, W.F., Raymo, M.E., Martinson, D.G., Clement, B.M., and Backman, J., 1986. Pleistocene evolution of Northern Hemisphere climate. *Paleoceanography*, 4:353-412.
- Sarmiento, J.L., and Toggweiler, J.R., 1984. A new model for the role of the oceans in determining atmospheric carbon dioxide pCO<sub>2</sub> levels. *Nature*, 308:621-624.
- Shackleton, N.J., and Crowhurst, S., 1997. Sediment fluxes based on an orbitally tuned time scale 5 Ma to 14 Ma, Site 926. In Shackleton, N.J., Curry, W.B., Richter, C., and Bralower, T.J. (Eds.), *Proc. ODP, Sci. Results*, 154: College Station, TX (Ocean Drilling Program), 69-82.
- Shipboard Scientific party, 1999. Leg 177 summary: Southern Ocean paleoceanography. *Proc. ODP, Init. Repts.*, 177. College Station, TX (Ocean Drilling Program), 1-67.
- Siegenthaler, U., and Wenk, T.H., 1984. Rapid atmospheric CO<sub>2</sub> variations and ocean circulation. *Nature*, 308:624-626.
- Sowers, T., and Bender, M., 1995. Climate records covering the last deglaciation. *Sci-ence*, 269:210-214.
- Webb, P.-N., and Harwood, D.M., 1991. Late Cenozoic glacial history of the Ross Embayment, Antarctica. In Cronin, T.M., and Dowsett, H.J. (Eds.), *Pliocene Climates*. *Quat. Sci. Rev.*, 10:215-223.
- Zachos, J.C., Rea, D.K., Seto, K., Nomura, R., and Niitsuma, N., 1992. Paleogene and early Neogene deep water history of the Indian Ocean: inferences from stable isotope records. In Duncan, R.A., Rea, D.K., Kidd, R.B., von Rad, U., and Weissel, J.K. (Eds.), *The Indian Ocean: A Synthesis of Results from the Ocean Drilling Program*. *Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr.*, 70:351-386.