

**Alberto R Piola**Investigador del Conicet en el  
Servicio de Hidrografía Naval**Osmar O Möller Jr.**Fundação Universidade  
Federal do Rio Grande**Elbio D Palma**Investigador del Conicet en la  
Universidad Nacional del Sur

# El impacto del Plata sobre el océano Atlántico

## ¿Qué ocurre con el agua de río cuando llega al océano?

Los ríos impactan en el océano de múltiples formas, e influyen sobre sus características físicas, químicas y biológicas. El alcance del agua de mezcla entre el río y el océano determina las condiciones ambientales de la zona costera y de los seres vivos que la habitan. Las características del estuario, donde las aguas de origen continental encuentran a las vastas aguas oceánicas, son descriptas en

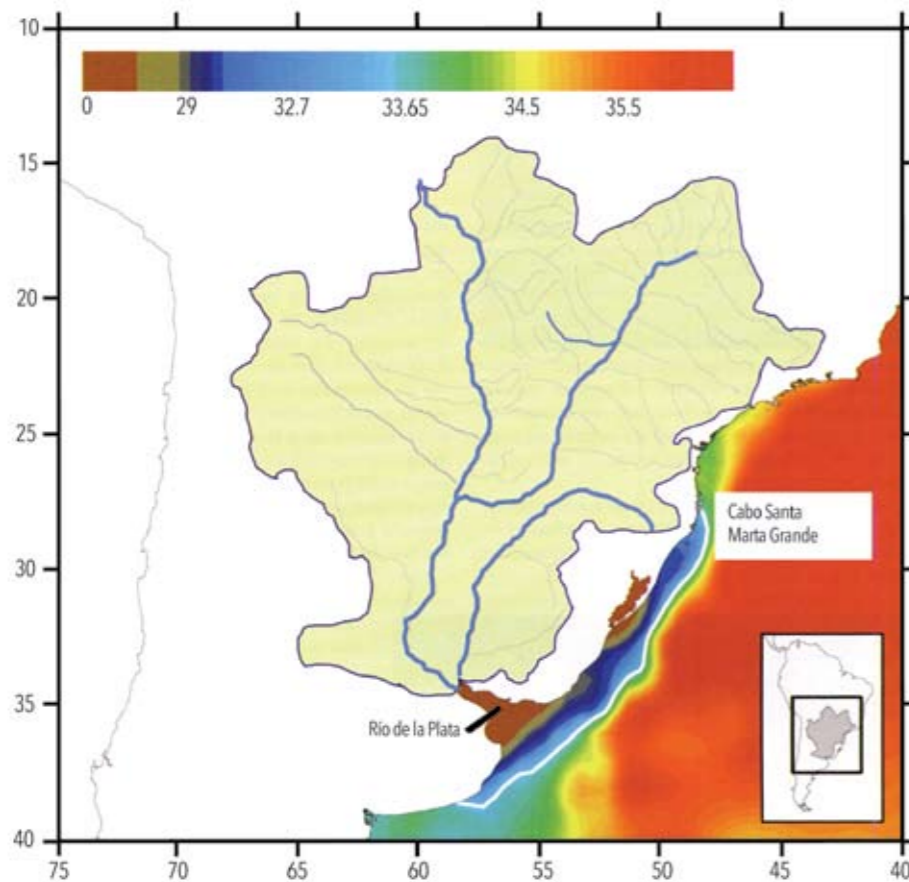
otro artículo publicado en este volumen ('El estuario del Plata: donde el río se encuentra con el mar'). La influencia del Plata se manifiesta también a grandes distancias del estuario y este es el objeto del presente artículo. Por ejemplo, la observación esporádica de especies subantárticas y pingüinos en las playas del Brasil sugieren la influencia de una corriente fría desde el sur. ¿Podrían estas corrientes tener alguna relación con el Plata?

Los ríos descargan en el mar agua 'dulce' y gran cantidad de elementos de origen continental, por ello producen un fuerte impacto en la zona costera. El agua de

### ¿DE QUÉ SE TRATA?

Los habitantes de la región costera desde la provincia de Buenos Aires en la Argentina hasta Río Grande, en el sur del Brasil, saben que en enero el agua de mar es casi 10°C más cálida que en julio. Lo que llama la atención es que en esta región se presentan las mayores variaciones estacionales de temperatura de todo el Atlántico Sur. Un observador algo más perceptivo notaría también cambios de color en su superficie de acuerdo con la época del año. Para explicar estas observaciones se ha especulado acerca de la existencia de frecuentes incursiones de agua fría, originadas en la corriente de Malvinas. En este artículo se presentan evidencias que sugieren que las más importantes alteraciones ambientales a lo largo de una franja costera de más de 1000km se deben a la variable influencia de las aguas que el Río de la Plata derrama sobre el océano Atlántico.





**Figura 1.** Cuenca del Plata, incluyendo los principales tributarios, y distribución superficial de salinidad en invierno. La escala de colores indica los valores de salinidad en el océano. Nótese la lengua de baja salinidad (tonos azules) que se extiende desde el estuario del Plata a lo largo de las costas del Uruguay y el Brasil.

a las zonas costeras suele estimular el desarrollo de la vida marina.

Cada segundo, el Río de la Plata descarga en promedio unos 22.000 metros cúbicos de agua de origen continental en el Atlántico Sur. El agua proviene de las cuencas de los ríos Paraná/Paraguay y Uruguay (figura 1), la segunda en extensión en Sudamérica después de la del Amazonas, y la cuarta en el mundo. La cuenca del Plata abarca unos 3.100.000km<sup>2</sup>, que incluyen regiones remotas, como las nacientes del río Pilcomayo en el noroeste boliviano, en la cordillera central y las sierras al noreste de Brasilia, que se encuentran a más de 2500km de la desembocadura. La sierra do Mar, próxima a la costa del SE del Brasil, impide el flujo directo de

las aguas de lluvia hacia el océano y estas se derraman hacia la cuenca del Plata. Por ejemplo, las aguas de los ríos Tietê y Pinheiros, que atraviesan la ciudad de San Pablo, situada a menos de 50km del Atlántico, recorren más de 2800km para alcanzar el océano recién después de llegar al Río de la Plata.

Las aguas diluidas por la descarga del Río de la Plata sobre la plataforma continental producen un fuerte impacto en el ecosistema marino. Por ejemplo, la abundancia de ciertas especies del fitoplancton y de larvas de anchoa de banco (*Pomatomus saltatrix*), que es la especie de mayor importancia en términos de volúmenes de captura del sur del Brasil, está ligada a la presencia de aguas diluidas en el área costera, y presenta variaciones relacionadas con la distribución espacial de las mismas. Durante los años en que las aguas costeras de baja salinidad tienen mayor presencia, en la plataforma continental se observa un sensible aumento en la captura de la sardina (*Sardinella brasiliensis*) en el sur del Brasil. Si bien las aguas de origen continental modifican notablemente tanto la estratificación vertical como las corrientes y las características químicas y biológicas de la zona costera, los mecanismos involucrados no son bien conocidos.

Durante el otoño y el invierno, cuando predominan vientos del sudoeste, las aguas de baja salinidad influidas por la descarga continental del Plata se extienden sobre una banda angosta a lo largo de las costas del Uruguay y

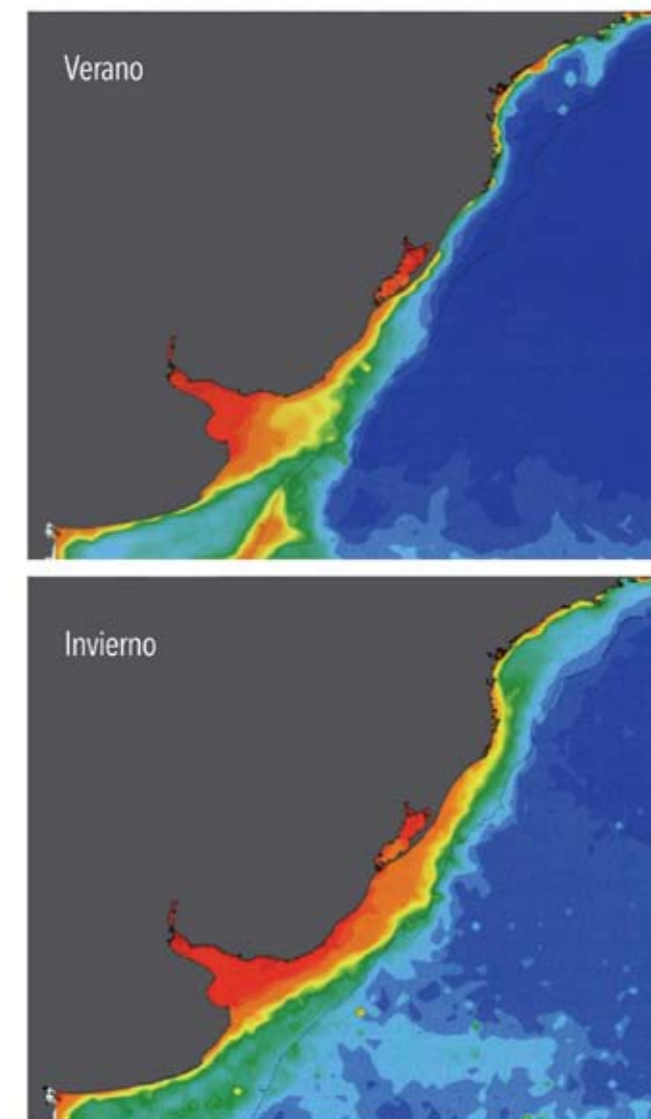
del sur del Brasil, hasta más al norte de la isla de Florianópolis, ubicada a más de 1200km del estuario (figura 1). En ocasiones extraordinarias, pueden llegar al litoral paulista. En cambio, en primavera y verano la rama costera se retrae hasta la latitud de Río Grande, en las proximidades de la boca de la laguna de los Patos. En esta época del año las aguas de baja salinidad se extienden hacia el este, más allá del talud continental sudamericano, donde se mezclan con aguas superficiales de las corrientes de Brasil y Malvinas. Algunos sensores satelitales capaces de cuantificar los sedimentos en suspensión arrastrados por los ríos y los florecimientos del fitoplancton asociados al aporte de nutrientes confirman estas marcadas oscilaciones estacionales de las aguas costeras. Entre 1998 y 2002, los promedios para los meses de julio muestran una importante penetración de aguas de origen continental sobre una angosta franja litoral a lo largo de la costa del Uruguay y sur del Brasil (figura 2). En cambio, en enero el área de influencia del río se ensancha cerca del estuario y la franja costera se retrae considerablemente. Estos cambios en la distribución de aguas diluidas alteran las condiciones ambientales costeras.

## ¿Por qué varía la 'pluma' del Plata?

Existen tres factores principales que determinan la distribución de aguas diluidas por la desembocadura de un río en el océano: 1) la rotación de la tierra produce la fuerza denominada de Coriolis<sup>1</sup> que, en el hemisferio sur, desvía las aguas hacia la izquierda de la desembocadura; 2) el viento que actúa directamente sobre la capa superficial le transfiere parte de su energía, y 3) el caudal del río determina la cantidad de agua 'dulce' disponible para la mezcla con las aguas oceánicas. Por lo general los últimos dos factores presentan variaciones temporales que alteran la distribución de las aguas diluidas. En el área de influencia del Río de la Plata el viento predominante varía de acuerdo con la época del año, en verano sopla desde el NE y en invierno desde el SO. Estas variaciones del viento serían las principales responsables de los cambios estacionales observados en la distribución de las aguas diluidas antes descripta.

El caudal del Plata también presenta fluctuaciones significativas. Estas variaciones no tienen un carácter estacional bien definido. En los períodos de marzo a agosto de 1983 y de abril a mayo de 1998 se registraron los caudales más intensos del siglo XX. Durante estos períodos la descarga promedio superó los 60.000 metros cúbicos por segundo, casi tres veces el valor medio del caudal

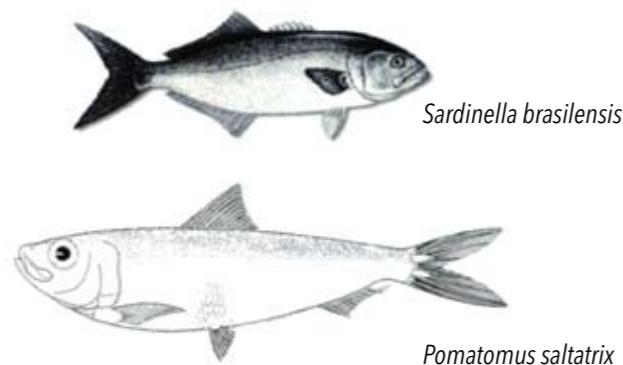
<sup>1</sup> En honor al ingeniero y matemático francés Gustave Gaspard Coriolis (1792-1843). La fuerza de Coriolis aparece cuando referimos los movimientos de un cuerpo a un sistema de rotación, como es el caso de la Tierra.



**Figura 2.** Imágenes satelitales de concentración de clorofila, promedios de enero (izquierda) y julio (derecha). Los colores rojos, amarillos y verdes indican valores decrecientes de clorofila satelital y el azul indica áreas de menor concentración. Esta variable refleja el efecto combinado de la concentración de clorofila y sedimentos en suspensión en la superficie, siendo máximos los valores asociados a la descarga del Río de la Plata. Nótese la marcada penetración de las altas concentraciones sobre una estrecha franja a lo largo de las costas del Uruguay y sur del Brasil durante el invierno. Compárese con la figura 1.

observado en los últimos cincuenta años. En contraste, en mayo de 1978 y entre diciembre de 1999 y enero de 2000, el caudal del Plata fue inferior a 12.000 metros cúbicos por segundo, es decir solo una quinta parte de los volúmenes más altos alcanzados. Varios estudios realizados durante la última década concluyen que el caudal del río Paraná, el principal tributario del Plata, presenta variaciones asociadas con El Niño. Así se denomina a un fenómeno climático que se origina en el Pacífico ecuatorial y que afecta gran parte del globo. Durante los años de El Niño se producen importantes alteraciones de los patrones climáticos 'normales', como sequías e inundaciones





Sardinella brasiliensis

Pomatomus saltatrix



$$\text{Salinidad} = \frac{\text{masa de sal en gramos}}{\text{masa de agua en kilogramos}}$$

extraordinarias en diversos lugares del planeta. Durante esos períodos aumentan las precipitaciones en la cuenca del Plata y, en consecuencia, también el caudal del río. Los fenómenos de El Niño más intensos ocurrieron en 1982-1983 y 1997-1998, precisamente los años en los que el caudal del Plata fue máximo. Aún no conocemos con precisión de qué forma estos importantes aumentos del caudal del Plata afectan las condiciones ambientales de las aguas costeras. En teoría, durante los años de caudal alto, gracias a la mayor disponibilidad de agua dulce, se produciría un marcado aumento en la extensión de las aguas de baja salinidad. En consecuencia, durante épocas de grandes caudales, como los observados en años de El Niño, la salinidad superficial en el litoral del sur del Brasil debería disminuir. Sin embargo, los datos históricos disponibles indican que la extensión de aguas diluidas por la influencia del Plata no aumenta durante esos períodos sino que disminuye. Por ejemplo, la salinidad superficial del área próxima al cabo Santa Marta Grande, donde las

variaciones estacionales de salinidad son máximas, es mayor en los años de El Niño, asociados a caudal alto, que en los años de caudal bajo, correspondientes a la fase opuesta de El Niño, denominada La Niña.

Este comportamiento aparentemente contradictorio se debería a que en la cuenca del Plata, durante los períodos de grandes caudales, sobre la zona costera soplan con mayor frecuencia e intensidad vientos del nordeste. Debido al efecto producido por la rotación de la Tierra los vientos del nordeste actúan apartando las aguas de baja salinidad de la región costera hacia el océano abierto y reemplazándola por aguas más profundas y de mayor salinidad. Por lo tanto, independientemente de la época del año, la situación durante períodos de caudal alto es similar a la observada durante el verano. El aumento de las lluvias en la región subtropical de América del Sur, que incluye la cuenca del Plata, se debe, entre otros factores, a la mayor frecuencia de vientos del nordeste, que aportan mayor cantidad de humedad que en períodos de viento y caudal 'normales'. Los vientos predominantes del nordeste se extenderían también a la región costera, limitando así la extensión de las aguas de baja salinidad hacia el norte. Es decir que el mismo patrón de vientos que produce las lluvias intensas en la cuenca del Plata y el aumento del caudal del río limitaría la penetración de aguas de baja salinidad hacia el norte, a lo largo de la costa sudamericana.

Estudios recientes muestran que debajo de la capa superficial, ocupada por aguas de baja salinidad, se registra una abrupta transición entre aguas cálidas y de alta salinidad, de origen subtropical y aguas relativamente frías de origen subantártico. El frente se extiende hacia el sur, desde el área costera al norte de Río Grande, hasta el borde del talud continental.

Esta transición se denomina frente subtropical de plataforma. Las aguas frías ocupan casi la totalidad de la columna de agua en la plataforma continental patagónica y el litoral bonaerense, excepto el área de influencia del Río de la Plata. Es por ello que a profundidades de 100m, en los fondos marinos frente a la provincia de Buenos Aires viven moluscos, equinodermos y otros invertebrados, tí-

picos de ambientes litorales patagónicos. Por su parte, el agua subtropical de plataforma, diluida por la mezcla con aguas del Plata, ocupa la extensa plataforma brasileña al sur del cabo Frío. El frente podría ser también una barrera para la distribución de especies, limitando la extensión geográfica tanto de especies subantárticas como subtropicales, pero las observaciones biológicas en esta región todavía son escasas y no son concluyentes.

## La situación observada en invierno de 2003 y verano de 2004

La falta de observaciones en el área de transición se debe, parcialmente, a que esta está próxima a la frontera oceánica entre el Uruguay y el Brasil. Dado que históricamente la mayoría de los estudios realizados por estos países abarcaron solamente sus aguas territoriales, las observaciones no permiten describir adecuadamente la zona transición. Con el fin de determinar la variabilidad del impacto del Plata sobre el ecosistema de la plataforma continental, y evaluar los efectos de las variaciones del viento y la descarga continental, un equipo internacional de científicos de varias disciplinas diseñó un ambicioso proyecto de investigación que incluye la realización de campañas oceanográficas multidisciplinarias, relevamientos aéreos de salinidad, y un conjunto de modelos que simulan numéricamente las corrientes oceánicas de la región. El objetivo del proyecto es el estudio de las variaciones estacionales de la 'pluma' de agua de baja salinidad y del frente subtropical de plataforma, y sus impactos sobre la circulación, los procesos químicos y biológicos en la plataforma continental de Sudamérica.

En agosto de 2003 y febrero de 2004, se realizaron dos campañas oceanográficas a bordo de los buques oceanográficos Puerto Deseado y Antares respectivamente, y dos relevamientos aéreos de salinidad, que abarcaron más de 1500km a lo largo de la costa entre Mar del Plata (la Argentina) e Itajaí (Brasil). Durante estas campañas se cubrieron 174 estaciones oceanográficas sobre 11 secciones transversales a la costa (figura 3). En cada estación, donde el barco se detiene para hacer observaciones, se midió temperatura, salinidad, turbidez y concentración de oxígeno disuelto y nutrientes. También se realizaron observaciones de la radiación solar incidente y radiación emitida por la superficie del mar, y se tomaron 120 muestras de fondo para el análisis de organismos que viven en los sedimentos marinos y son sensibles a los cambios ambientales. En algunas estaciones seleccionadas se tomaron muestras de plancton mediante barridos verticales y horizontales empleando diversos tipos de redes.

Estas nuevas observaciones multidisciplinarias ilustran elocuentemente las dramáticas variaciones estacionales de las aguas de baja salinidad en la zona costera (figura 4). Por

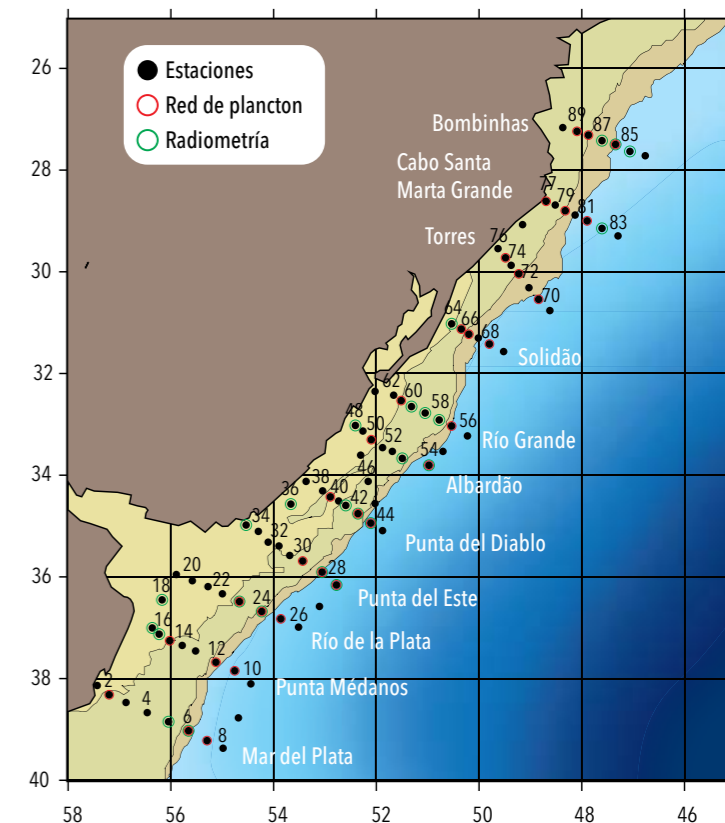


Figura 3. Actividades realizadas a bordo del buque oceanográfico Antares en febrero de 2004.



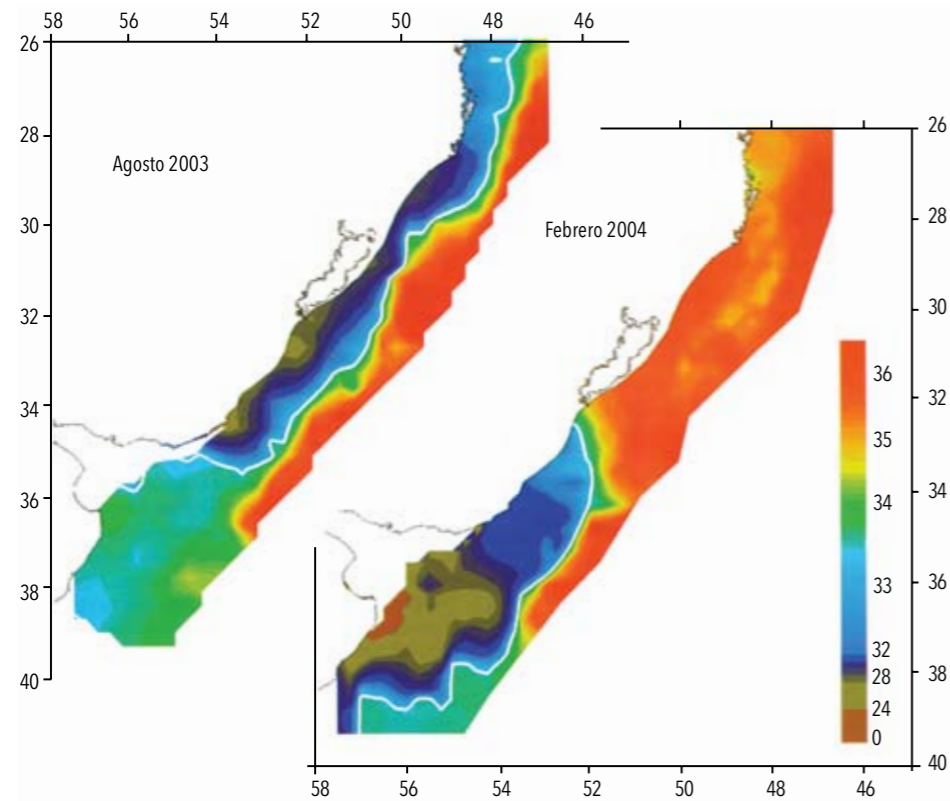
Maniobra con sonda CTD, utilizada para medir conductividad, temperatura y profundidad del agua.

ejemplo, en invierno de 2003 los rastros de las aguas del Plata, mezcladas con aguas de la plataforma continental, se extendieron más allá de los 26°S, sobrepasando el límite entre los estados de Santa Catalina y Paraná. En cambio, en febrero de 2004 no se halló rastro alguno de aguas del Plata más allá de Río Grande. La región donde se registran las mayores variaciones estacionales de salinidad superfi-

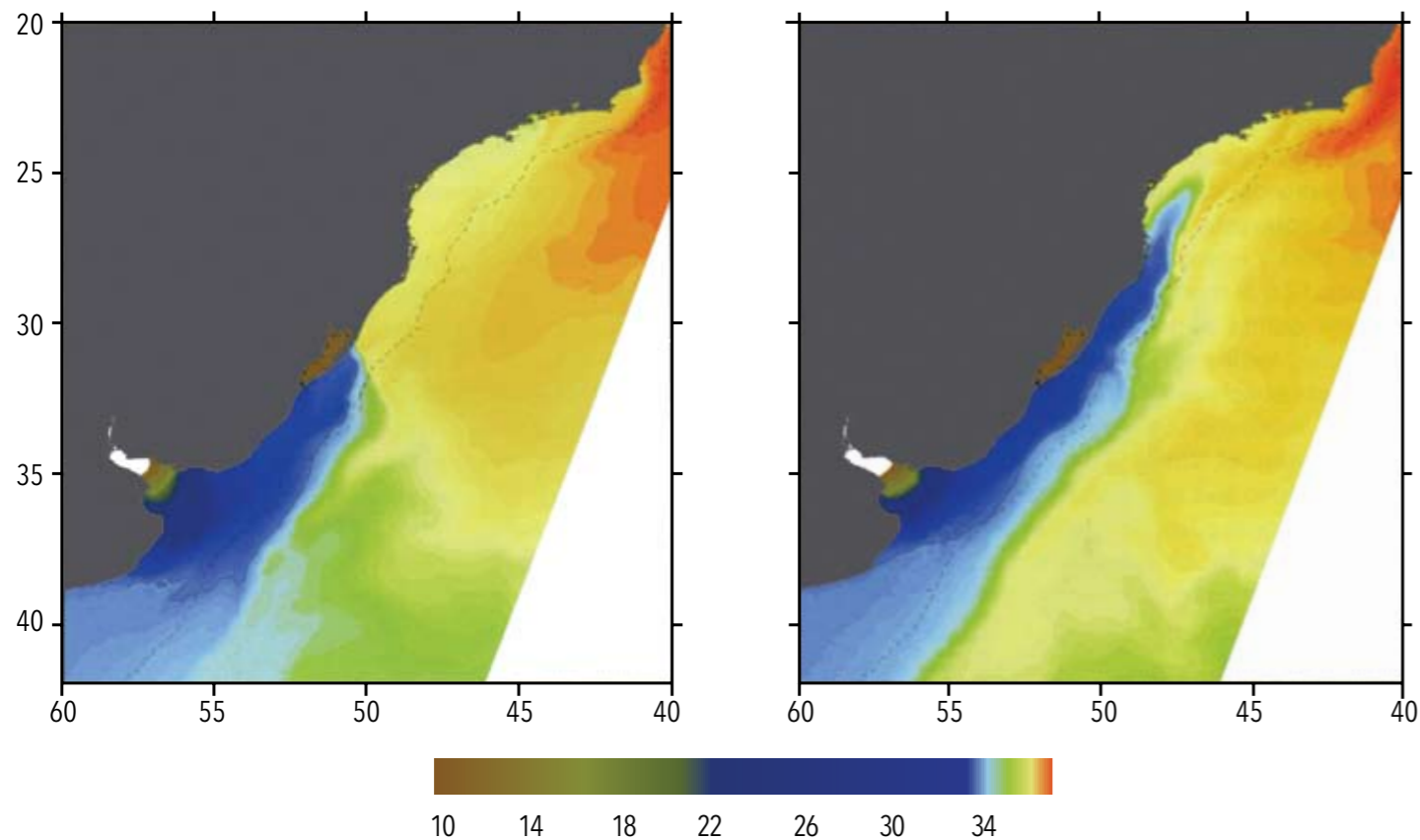


Draga para muestreos de sedimentos marinos.





**Figura 4.** La salinidad superficial en las áreas de influencia del Plata en agosto de 2003 (izquierda) y febrero de 2004 (derecha). Las aguas de menor salinidad se indican con los tonos marrón y azul (ver escala de colores a la derecha). Nótese, en invierno, la extensión de las aguas diluidas por el Plata, más allá de 26°S.



**Figura 5.** Salinidad de superficie simulada con el Princeton Ocean Model, para un caudal del Río de la Plata igual a 20.000m<sup>3</sup>/s y vientos típicos de enero (izquierda) y julio (derecha).

cial abarca una franja costera de más de 800km de largo y tiene un ancho promedio de más de 100km. La figura 4 muestra que en invierno las aguas menos salinas (salinidad < 28) se extienden más de 500km a lo largo de la costa del Uruguay y sur del Brasil, desde la boca del Río de la Plata hasta más allá de Río Grande. En cambio, en verano estas se localizan frente a la boca del río, se extienden hacia el sudeste hasta unos 250km de Mar del Plata y alcanzan más de 160km al este del cabo Polonio. En invierno en cambio no hay rastros del Plata frente a Mar del Plata y la 'pluma' de agua diluida alcanza apenas unos 50km de ancho frente a las costas del Uruguay.

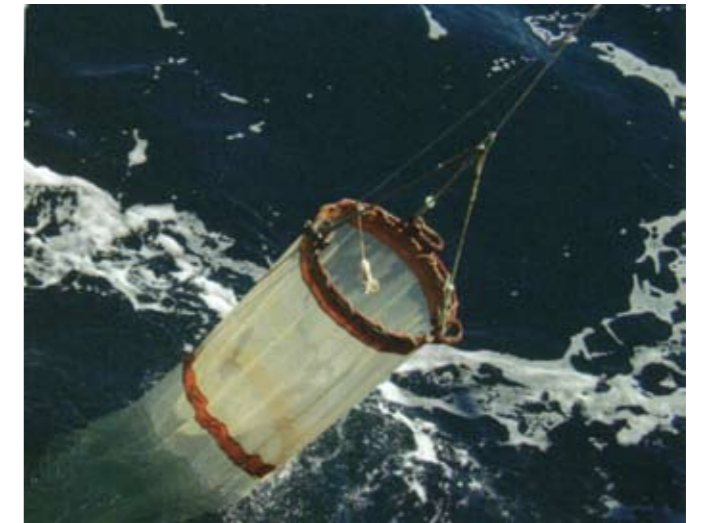
En el otoño e invierno de 2003 el caudal del Plata osciló entre 13.200 y 16.100 metros cúbicos por segundo, muy por debajo de los valores típicos, y en verano de 2004 osciló entre 16.200 y 25.400 metros cúbicos por segundo. Es decir que los cambios de caudal no parecen poder justificar las

grandes variaciones en la distribución de las aguas del Plata. Durante agosto de 2003 los vientos predominantes fueron intensos del sudoeste y contribuyeron a la propagación de agua diluida hacia el nordeste. En cambio en febrero de 2004 los vientos soplaron desde el nordeste y empujaron a las aguas del Plata hacia el sudoeste. Las nuevas observaciones confirman la hipótesis de que el viento ejerce una influencia dominante sobre las marcadas variaciones estacionales de la 'pluma' del Plata.

## Simulaciones numéricas

Con el fin de comprender más completamente las complejas interacciones entre las variaciones del viento y el caudal, y evaluar el efecto de otros factores como la topografía del fondo marino, las mareas, y los procesos de mezcla entre aguas del río y aguas oceánicas, también se están realizando simulaciones de las corrientes de la región. Estas se basan en modelos matemáticos que permiten determinar la velocidad y las propiedades del agua en función de leyes físicas, como la segunda ley de Newton, la conservación de la masa, el calor y la salinidad. Los modelos también requieren la especificación de los valores de las variables en los bordes del dominio y de las condiciones iniciales. Dado que no es posible hallar una solución analítica a las ecuaciones que describen la evolución temporal de los campos de velocidad, temperatura y salinidad, para su resolución se emplean métodos numéricos. La misma estrategia se emplea, por ejemplo, para estimar el estado de la atmósfera y producir pronósticos meteorológicos. En nuestras aplicaciones recurrimos a un modelo desarrollado en la Universidad de Princeton (Estados Unidos) a finales de la década de los 80 y que ha sido adaptado a la región costera del este de Sudamérica.

En la figura 5 se presenta la distribución superficial de salinidad media de invierno, producida a partir de una de estas simulaciones. En este caso aplicamos los caudales promedio del Río de la Plata y de la laguna de los Patos, y vientos medios de invierno determinados por el Centro Europeo de Pronóstico a Mediano Plazo. La distribución de la salinidad sugerida por el modelo presenta rasgos muy cercanos a la realidad. Las áreas de mayor salinidad corresponden a la corriente de Brasil (salinidad > 36), que fluye hacia el sur desde regiones de alta tasa de evaporación ubicadas en el Atlántico subtropical, más allá del límite norte de nuestro modelo. La corriente de Malvinas fluye hacia el norte con valores intermedios de salinidad (~34). En la plataforma continental el rasgo más sobresaliente es la descarga del Río de la Plata que forma la franja costera de baja salinidad que se extiende más allá del cabo Santa Marta Grande (salinidad < 33,5). La simulación de verano (figura 5), en cambio, presenta las aguas del Plata extendidas hacia el sur, apenas sobrepasando la desembocadura de la laguna de los Patos, en el sur del



Red de plancton de arrastre horizontal.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS DEL PROYECTO LAPLATA

- Determinar la importancia relativa del viento y la descarga de agua de baja salinidad por las descargas del Río de la Plata y las lagunas de los Patos/Mirim a lo largo de la plataforma continental.
- Establecer las condiciones en las cuales la temperatura y el color de la superficie del mar pueden utilizarse como indicadores de la distribución de aguas de baja salinidad.
- Investigar la influencia del frente subtropical de plataforma y la capa de baja salinidad sobre el componente planctónico del ecosistema pelágico.
- Investigar las conexiones dinámicas de la localización del frente subtropical de plataforma con la variabilidad de la descarga continental y las corrientes de Brasil y Malvinas.
- Identificar las posibles correlaciones entre las variaciones estacionales en el espesor y la extensión de la capa de agua de baja salinidad y el frente subtropical de plataforma con los procesos químicos y biológicos de la región. Ver <http://glaucus.fcien.edu.uy/pctmya/sacc/>

Brasil, también en concordancia con las observaciones de salinidad típicas de esta época del año. Si bien estas simulaciones numéricas reproducen los rasgos más notables del campo de salinidad sobre la plataforma continental, los modelos no están todavía correctamente calibrados como para producir pronósticos del estado del ambiente oceánico costero a partir de los datos de viento y caudal.



Preparación de una red de plancton.

## Los próximos pasos

Los modelos numéricos y las nuevas observaciones confirman algunas hipótesis acerca del papel que desempeñan las fluctuaciones en la intensidad y dirección del viento y el caudal de agua dulce sobre la distribución de aguas de baja salinidad en la plataforma continental, tan-

to a escala estacional como interanual. Pero las corrientes oceánicas responden a variaciones del viento en lapsos muy cortos, de apenas unos días, y dado que el viento también varía típicamente en pocos días, es probable que existan variaciones significativas de las corrientes superficiales en esa escala temporal. Nuestros estudios se han dirigido a comprender las variaciones de las corrientes y la distribución de aguas de origen continental en la escala estacional, ahora debemos abocarnos al estudio de las escalas temporales más cortas. ¿Cómo se altera la distribución de salinidad y nutrientes cuando pasa una tormenta sobre la región? ¿Puede un evento de este tipo alterar significativamente los patrones medios estacionales?

Hay múltiples evidencias de que la distribución del fitoplancton, la base fundamental de la cadena alimentaria marina, fluctúa de acuerdo con las condiciones de estratificación del agua y con la disponibilidad de nutrientes, indispensables para su desarrollo, y directamente ligados a la presencia de aguas diluidas. Sin embargo, la relación entre las condiciones ambientales y los niveles más altos de la cadena alimentaria, que ocupan generalmente las especies de mayor interés comercial, es considerablemente más compleja y aún no bien comprendida. También es importante investigar cómo las modificaciones en el ambiente costero afectan a los organismos vivos. **CH**

Las fotografías fueron tomadas por C Balestrini, C Martínez, J Muelbert y O Möller. Las imágenes satelitales provienen del Proyecto SeaWiFS del Goddard Space Flight Center (NASA, Estados Unidos) y fueron procesadas por S Romero. Estos estudios son financiados por el Instituto Inter-Americano para el Estudio del Cambio Global, la Oficina de Investigaciones Navales (Estados Unidos), la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica (PICT99 07-06420), la Universidad de Buenos Aires (X084) y Universidad Nacional del Sur (F025).

### LECTURAS SUGERIDAS

**FRAMIÑAN MB, ETALA MP, ACHA EM, GUERRERO RA, LASTA CA & BROWN OB**, 1999, 'Physical characteristics and processes of the Río de la Plata Estuary', en Perillo GM, Piccolo MC & Pino-Quivira M (eds.), *Estuaries of South America. Their Geomorphology and Dynamics*, Chapter 8, edited by, Springer-Verlag, Berlín, pp. 161-194.

**GUERRERO RA, LASTA CA, ACHA EM, MIANZAN HW y FRAMIÑAN MB**, 1997, *Atlas hidrográfico del Río de la Plata*, Comisión Administradora del Río de la Plata, Instituto Nacional de Investigación

y Desarrollo Pesquero, Buenos Aires-Montevideo.

**PALMA ED, MATANO RP & PIOLA AR**, 'Three dimensional barotropic response of the southwestern Atlantic shelf circulation to tidal and wind forcing', *Journal of Geophysical Research* (en prensa).

**PIOLA AR, CAMPOS EJD, MÖLLER OO JR, CHARO M & MARTÍNEZ C**, 2000, 'Subtropical shelf front off eastern South America', *Journal of Geophysical Research*, 105: 6566-6578.