

## Meridional changes in water mass distributions off NW Africa during November 2007/2008

### Variación latitudinal en la distribución de masas de agua al NO de África durante noviembre de 2007/2008

MV Pastor<sup>1\*</sup>, J Peña-Izquierdo<sup>1</sup>, JL Pelegrí<sup>1</sup>, Á Marrero-Díaz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Institut de Ciències del Mar, CSIC, Passeig Marítim de la Barceloneta 37-49, 08003 Barcelona, Spain.

<sup>2</sup> Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, Campus Universitario de Tafira, 35017 Las Palmas de Gran Canaria, Canary Islands, Spain.

\* Corresponding author. Email: mpastor@icm.csic.es

**ABSTRACT.** An optimum multiparameter analysis was applied to a data set for the eastern boundary of the North Atlantic subtropical gyre, gathered during November of two consecutive years and spanning from 16 to 36° N. This data set covers over 20° of latitude with good meridional and zonal resolution over the whole coastal transition zone. The contribution from six water types in the depth range between 100 and 2000 m is solved. In the 100 to 700 m depth range the central waters of southern and northern origin meet abruptly at the Cape Verde Frontal Zone. This front traditionally has been reported to stretch from Cape Blanc, at about 21.5° N, to the Cape Verde Islands, but in our case it penetrates as far as 24° N over the continental slope. South of 21° N latitude we actually find a less saline and more oxygenated variety of South Atlantic Central Water, which we ascribe to less diluted equatorial waters. In the 700 to 1500 m depth range the dominant water type is a diluted form of Antarctic Intermediate Water (AAIW), whose influence smoothly disappears north of the Canary Islands as it is replaced by Mediterranean Water (MW); at latitudes where both water masses coexist, we observe MW offshore while AAIW is found near-shore. North Atlantic Deep Water is the dominating water type below about 1300/1700 m depth south/north of the Canary Islands; this abrupt change in depth suggests the existence of different paths for the deep waters reaching both sides of the archipelago.

*Key words:* optimum multiparameter analysis, eastern subtropical North Atlantic, central waters, intermediate waters, deep waters.

**RESUMEN.** Se aplicó un análisis multiparamétrico óptimo a un set de datos en el margen oriental del giro subtropical del Atlántico Norte, recogido en noviembre de dos años consecutivos y que se extiende entre las latitudes 16 y 36° N. El set de datos cubre unos 20° de latitud y tiene una buena resolución latitudinal y zonal en toda la región de transición costera. La contribución de seis tipos de agua es resuelta en el intervalo de densidad entre 100 y 2000 m. Entre los 100 y 700 m de profundidad, las aguas centrales del Atlántico Norte y Sur se encuentran abruptamente en el frente de Cabo Verde. Tradicionalmente se ha descrito que la posición de este frente se alarga desde Cabo Blanco, a unos 21.5° N, hasta las islas de Cabo Verde, pero nuestras observaciones muestran que penetra hasta 24° N cerca del talud continental. Al sur de 21° N se encuentra una variedad de Agua Central Sudatlántica menos salina y más oxigenada, que adscribimos a aguas ecuatoriales menos diluidas. Entre los 700 y los 1500 m de profundidad el tipo de agua dominante es un tipo diluido de Agua Antártica Intermedia (AAIW), cuya influencia desaparece suavemente al norte de las islas Canarias al ser reemplazada por Agua Mediterránea (MW); en las latitudes donde ambas masas de agua coexisten se aprecia que el MW se sitúa aguas afuera mientras que el AAIW se coloca cercana al talud. El Agua Profunda Noratlántica domina por debajo de los 1300/1700 m al sur/norte de las islas Canarias; este cambio abrupto en profundidad sugiere la existencia de caminos diferentes para las aguas profundas que llegan a cada lado del archipiélago.

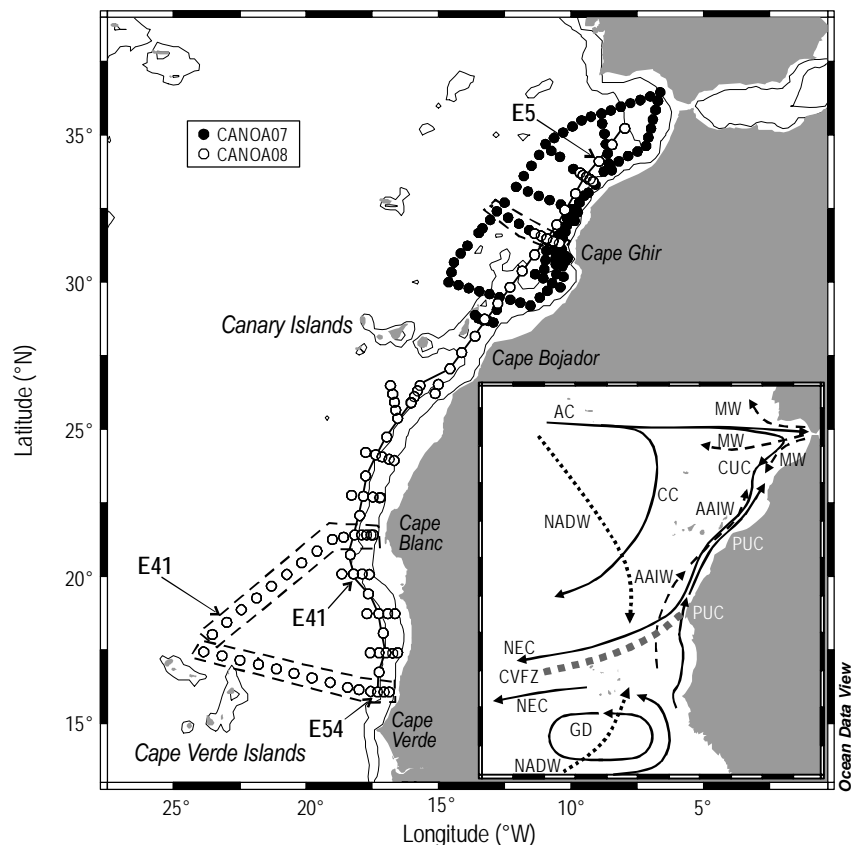
*Palabras clave:* análisis multiparamétrico óptimo, Atlántico Subtropical Noreste, aguas centrales, aguas intermedias, aguas profundas.

## INTRODUCTION

The water masses in the eastern North Atlantic have been studied for over 30 years, since the 1974 pioneering work by Fernando Fraga and collaborators (Fraga 1974, Manriquez and Fraga 1982, Fraga *et al.* 1985, Ríos *et al.* 1992), leading to a much improved description of their characteristics and distribution. The spatial distribution of the different water masses responds to the circulation patterns in the eastern North Atlantic Ocean (inset in fig. 1). The main distribution patterns change substantially from the upper-thermocline layers, commonly named central waters,

## INTRODUCCIÓN

Las masas de agua del Atlántico Norte oriental han sido estudiadas por más de 30 años, desde los trabajos pioneros de Fernando Fraga y colaboradores iniciados en 1974 (Fraga 1974, Manriquez y Fraga 1982, Fraga *et al.* 1985, Ríos *et al.* 1992), dando como resultado una gran mejora en la descripción de su distribución y características. La distribución espacial de las distintas masas de agua responde a los patrones de circulación del Atlántico Nororiental (recuadro interior en la fig. 1). Los principales patrones de distribución cambian sustancialmente desde las capas de la termoclina superior,



**Figure 1.** Map showing the stations occupied during the CANOA07 and CANOA08 cruises. Stations E5, E41, E54, and E70 are explicitly indicated. The meridional section is marked by a black line, and the north (32° N), south (16° N), and front (from Cape Blanc to Cape Verde Islands) sections are enclosed by dashed lines. The inset map shows a scheme with the main circulation features in central (continuous lines), intermediate (dashed lines), and deep (dotted lines) waters. AC: Azores Current; CUC: Canary Upwelling Current; CC: Canary Current; PUC: Poleward Undercurrent; NEC: North Equatorial Current; GD: Guinea Dome; MW: Mediterranean Water; AAIW: Antarctic Intermediate Water; NADW: North Atlantic Deep Water; CVFZ: Cape Verde Frontal Zone.

**Figura 1.** Mapa que muestra las estaciones ocupadas durante las campañas CANOA07 y CANOA08. Las estaciones E5, E41, E54 y E70 están explícitamente indicadas; la sección meridional viene indicada por una línea negra; las secciones norte (32° N), sur (16° N) y frente (desde cabo Blanco hasta las islas Cabo Verde) están encuadradas por una línea discontinua. El mapa del recuadro interior muestra un esquema con las características principales de la circulación en las aguas centrales (líneas continuas), intermedias (líneas discontinuas) y profundas (líneas punteadas). Por sus siglas en inglés, AC: corriente de Azores; CUC: corriente de Afloramiento de Canarias; CC: corriente de Canarias; PUC: corriente subsuperficial hacia el Polo; NEC: corriente Norecuatorial; GD: domo de Guinea; MW: Agua Mediterránea; AAIW: Agua Antártica Intermedia; NADW: Agua Noratlántica Profunda y CVFZ: Zona Frontal de Cabo Verde.

to the lower-thermocline or intermediate layers and to deep waters.

The northern and southern central waters are predominant in the upper-thermocline layers north and south of the Cape Verde Frontal Zone (CVFZ) (Tomczak 1981, Harvey 1982, Harvey and Arhan 1988, Zenk *et al.* 1991, Arhan *et al.* 1994, Castro *et al.* 1998, Poole and Tomczak 1999, Hernández-Guerra *et al.* 2001, Pérez *et al.* 2001, Machín *et al.* 2006, Pastor *et al.* 2008). The North Atlantic Central Water (NACW) domain is characterized by the presence of a southward eastern boundary current, the Canary Current. This southward current intensifies in the coastal upwelling region (Canary Upwelling Current), where it encounters an along-slope subsurface countercurrent (Poleward Undercurrent)

llamadas aguas centrales, hasta las capas intermedias o de la termoclina inferior y hasta las aguas profundas.

Las aguas centrales del norte y del sur predominan en las capas de la termoclina superior al norte y al sur de la Zona Frontal de Cabo Verde (CVFZ, por sus siglas en inglés) (Tomczak 1981, Harvey 1982, Harvey y Arhan 1988, Zenk *et al.* 1991, Arhan *et al.* 1994, Castro *et al.* 1998, Poole y Tomczak 1999, Hernández-Guerra *et al.* 2001, Pérez *et al.* 2001, Machín *et al.* 2006, Pastor *et al.* 2008). El dominio del Agua Central Noratlántica (NACW) está caracterizado por la presencia de una corriente de frontera este que fluye hacia el sur, la corriente de Canarias. Esta corriente se intensifica en la región costera de afloramiento (corriente Canaria de Afloramiento), donde fluye por encima de una contracorriente

(Barton and Hughes 1982, Pelegrí *et al.* 2005). When the boundary current system reaches Cape Blanc it diverts west as the North Equatorial Current (Mittelstaedt 1991). South of the CVFZ, the South Atlantic Central Water (SACW) becomes the dominant upper-thermocline water mass. This region is dominated by the Guinea Dome, with a predominant cyclonic circulation around a large-scale region of intensified Ekman pumping (Klein *et al.* 1995), where the eastward flowing North Equatorial Countercurrent reaches the coast and flows north until it merges west with the North Equatorial Current (Mittelstaedt 1991).

The intermediate layers are characterized by the large-scale encountering of Antarctic Intermediate Water (AAIW) and Mediterranean Water (MW), the former at a slightly higher level (cores at 800 and 1200 m north of the Canary Islands). This encountering displays seasonal periodicity, with AAIW finding its northernmost expansion in late fall and MW stretching to the south during winter (Arhan *et al.* 1994, Pérez *et al.* 2001, Machín and Pelegrí 2009, Machín *et al.* 2010). Further deep, we find waters of northern origin, here generically grouped under the North Atlantic Deep Water (NADW) denomination (Dickson and Brown 1994).

Typically, the data for the above studies have come from either regional or global cruises. The advantage of cruise data is that they can provide a description of water properties in a specific temporal and spatial domain; however, they usually have important limitations in terms of spatial coverage and resolution, with global cruises covering large areas but having low spatial resolution and regional cruises having good resolution but over relatively small ocean regions. In other cases the data have been extracted from climatological data sets, with rather gross spatial resolution (about  $1^\circ$  latitude  $\times$   $1^\circ$  longitude), which results from an optimal spatial interpolation of different cruise data. This procedure solves some of the coverage-versus-resolution limitations of the original data but inherits difficulties associated with the many different data sources. For example, climatological data may lead to undesired interpolation artifacts, either as a result of the lack of data in some particularly sensitive regions or after the combination of different years and seasons in regions that display substantial temporal variability. This may be the case for the Canary Basin and the CVFZ, with high seasonal variability at surface and intermediate levels (Pelegrí *et al.* 2005, Pastor *et al.* 2008, Machín and Pelegrí 2009, Machín *et al.* 2010).

In this work we have combined two single cruises that covered some 2000 km in latitude and 300 km in longitude, extending from the platform to the deep ocean near the eastern margin of the North Atlantic subtropical gyre. Both cruises were carried out during November of two consecutive years: 2007 and 2008. We will therefore be looking at fall conditions and may expect the seasonal and interannual variability to be minimized. Both cruises had medium resolution in the along-slope or meridional direction (some 50 km) and high resolution in the cross-slope or zonal direction

subsuperficial paralela al talud (corriente subsuperficial hacia el Polo) (Barton y Hughes 1982, Pelegrí *et al.* 2005). Cuando la corriente de frontera alcanza cabo Blanco, se desvía hacia el oeste como corriente Norecuatorial (Mittelstaedt 1991). El Agua Central Sudatlántica (SACW) predomina al sur de la CVFZ en la termoclina superior. En esta zona se encuentra el domo de Guinea, que presenta una circulación ciclónica a gran escala en una región con bombeo de Ekman intensificado (Klein *et al.* 1995), donde la contracorriente Norecuatorial fluye hacia el este hasta alcanzar la costa y se desvía hacia el norte para unirse con la corriente Norecuatorial en dirección oeste (Mittelstaedt 1991).

Las capas intermedias están caracterizadas por el encuentro a gran escala del Agua Antártica Intermedia (AAIW) y el Agua Mediterránea (MW), centradas a 800 y 1200 m al norte de las islas Canarias, respectivamente. Este encuentro presenta una periodicidad estacional; el AAIW alcanza la posición más al norte hacia finales de otoño y el MW se extiende hacia el sur durante el invierno (Arhan *et al.* 1994, Pérez *et al.* 2001, Machín y Pelegrí 2009, Machín *et al.* 2010). A profundidades mayores se encuentran aguas con origen en el Atlántico Norte, agrupadas bajo la denominación de Agua Noratlántica Profunda (NADW) (Dickson y Brown 1994).

Generalmente, los datos con los que se han llevado a cabo los estudios anteriores provienen de campañas regionales o globales. Los datos de campañas tienen la ventaja de proporcionar una descripción de las masas de agua en un dominio espacial o temporal específico; sin embargo, normalmente presentan limitaciones importantes en cuanto a cobertura y resolución espacial. Las campañas globales cubren grandes áreas, pero tienen una baja resolución espacial, y las campañas regionales presentan una buena resolución, pero sobre una región oceánica muy limitada. En otros casos, los datos analizados han sido extraídos de conjuntos climatológicos, con una resolución espacial generalmente baja ( $1^\circ$  de latitud  $\times$   $1^\circ$  de longitud), y que son resultado de una interpolación espacial óptima de datos pertenecientes a distintas campañas. Este procedimiento resuelve algunas limitaciones de resolución frente a la cobertura espacial, pero presenta dificultades asociadas a las fuentes de datos diversas. Por ejemplo, algunos datos climatológicos pueden mostrar artefactos causados por el método de interpolación, como resultado de falta de datos en alguna región determinada o tras combinar datos procedentes de distintos años o estaciones climatológicas en regiones que presentan una gran variabilidad temporal. Éste podría ser el caso de la cuenca Canaria y la CVFZ, con gran variabilidad estacional en superficie y a niveles intermedios (Pelegrí *et al.* 2005, Pastor *et al.* 2008, Machín y Pelegrí 2009, Machín *et al.* 2010).

En este trabajo se han combinado dos campañas oceanográficas con unos 2000 km de cobertura latitudinal y 300 km de cobertura longitudinal, extendiéndose desde la plataforma hacia el océano profundo en el margen oriental del giro subtropical del Atlántico Norte. Ambas campañas se llevaron

(between 5 and 50 km), sufficient to detect the relatively smooth meridional changes and the much more abrupt zonal variations. The 2007 cruise (hereafter CANOA07) covered the region from about 27 to 37° N, while the 2008 cruise (hereafter CANOA08) sampled from about 16 to 35° N. Hence, the two cruises were nicely complementary but yet had sufficient spatial overlapping between 27 and 35° N to identify if there were significant interannual differences.

Our objective was to characterize the fall distribution of water masses in the eastern boundary of the North Atlantic subtropical gyre. There are two main reasons why the data from the CANOA07 and CANOA08 cruises are very appropriate for this characterization: they incorporate sufficient variables (temperature, salinity, phosphate, silicate, and dissolved oxygen) to use a multiparametric method, and they have an extensive and high-resolution spatial coverage in a constrained time interval. Specifically, the cruises had enhanced resolution in three key areas: near the continental slope, north of the Canary Islands, and in the CVFZ. First, the near-slope region was very well-resolved in order to detect both the Canary Upwelling Current and the Poleward Undercurrent, which respectively are potential paths for meridional transport of waters of northern and southern origin (Pelegrí *et al.* 2005, 2006). Second, the data set had excellent coverage north of the Canary Islands, where MW meets AAIW at intermediate levels with substantial latitudinal intrusions and preferential meridional propagation paths (Machín and Pelegrí 2009, Machín *et al.* 2010). Finally, it also had good scope of the near-slope region near the CVFZ, where NACW and SACW interleave with lateral and vertical intrusions (Zenk *et al.* 1991, Pérez-Rodríguez *et al.* 2001, Pastor *et al.* 2008).

The following section introduces the available data and sets the reference stations and meridional/zonal transects. In the subsequent sections we show the distribution of properties at these selected stations and transects, introduce the optimum multiparametric method and explain how we set reference values for the distinct water masses, and illustrate and discuss the spatial changes in water mass composition. The final section closes with a discussion of some relevant features and the conclusions.

## DATA SETS

The data used in this work were collected during two cruises carried out as part of the project entitled Upwelling Current off NW Africa (*Corriente de Afloramiento del Noroeste Africano*, CANOA). During both cruises, the conductivity-temperature-depth (CTD) stations were taken down to 2000 m or the bottom when shallower, with nearly continuous measurements of temperature, conductivity, pressure, and dissolved oxygen. The original data, typically several data values every meter, were eventually averaged to one data point per meter. The probe consisted of a Seabird 9Plus instrument, with a SBE 3Plus temperature sensor, a

acabo durante noviembre de dos años consecutivos: 2007 y 2008. Por lo tanto, se examinan las condiciones durante el otoño, y cabe esperar que las variaciones estacionales e interanuales sean mínimas. Ambas campañas se llevaron a cabo con una resolución media en la dirección latitudinal (a lo largo del talud) de unos 50 km, y una elevada resolución perpendicular a la costa (entre 5 y 50 km), suficiente para detectar los cambios latitudinales relativamente suaves y los cambios zonales mucho más abruptos. La campaña de 2007 (de ahora en adelante CANOA07) cubrió la región entre las latitudes 27 y 37° N, aproximadamente, mientras que durante la campaña de 2008 (de ahora en adelante CANOA08) se tomaron muestras entre los 16 y los 35° N. Así, las dos campañas son complementarias pero con suficiente coincidencia espacial entre los 27 y los 35° N como para identificar posibles diferencias interanuales significativas.

El objetivo de este trabajo fue caracterizar la distribución de las masas de agua en el margen oriental del giro subtropical del Atlántico Norte durante el otoño. Hay dos razones principales por las cuales los datos obtenidos en las campañas CANOA07 y CANOA08 son apropiados para esta caracterización: los datos incorporan un número de variables suficientes (temperatura, salinidad, fosfatos, silicatos y oxígeno disuelto) para aplicar un método multiparamétrico, y tienen una extensa cobertura espacial de alta resolución en un intervalo de tiempo limitado. Específicamente, las campañas tienen una mayor resolución en tres áreas clave: la zona próxima al talud continental, la zona al norte de las islas Canarias y la CVFZ. Primero, la región cercana al talud se muestreó con una alta resolución para detectar tanto la corriente de Afloramiento de Canarias como la corriente subsuperficial hacia el Polo, las cuales son caminos potenciales para el transporte latitudinal de aguas de origen norte y sur, respectivamente (Pelegrí *et al.* 2005, 2006). Segundo, el conjunto de datos tiene una cobertura excelente al norte de las islas Canarias, donde el MW se encuentra con el AAIW en niveles intermedios, con intrusiones latitudinales muy apreciables a lo largo de distintas rutas preferentes de propagación latitudinal (Machín y Pelegrí 2009, Machín *et al.* 2010). Finalmente, los datos también tienen un buen alcance en la región cercana al talud en la CVFZ, donde las NACW y las SACW entran en contacto, con intrusiones laterales (*interleaving*) y verticales (Zenk *et al.* 1991, Pérez-Rodríguez *et al.* 2001, Pastor *et al.* 2008).

La siguiente sección introduce los datos disponibles, las estaciones y transectos latitudinales y zonales de referencia. En las secciones subsiguientes se muestra la distribución de las propiedades en estas estaciones y estos transectos, se presenta el método multiparamétrico óptimo y se explica cómo se determinaron los valores de referencia para las distintas masas de agua, y se ilustran y discuten los cambios espaciales en la composición de las masas de agua. Finalmente, la última sección cierra con una discusión de las características más relevantes y las conclusiones.

SBE 4Plus conductivity sensor, and a SBE 43 dissolved oxygen sensor.

The CANOA07 cruise took place between 29 October and 20 November 2007 onboard R/V *García del Cid*. A total of 117 CTD stations were occupied between the Strait of Gibraltar and the Canary Islands (fig. 1). The CANOA08 cruise took place between 3 and 29 November 2008 onboard R/V *Sarmiento de Gamboa*. The cruise spanned from the Strait of Gibraltar to the Cape Verde archipelago (fig. 1), with a total of 94 CTD stations.

Water samples were collected at standard depths at 74 of the CANOA07 stations and at all CANOA08 stations. In both cruises the water samples were frozen at  $-20^{\circ}\text{C}$  and later analyzed using a Bran+Luebbe continuous-flow autoanalyzer, following a modification of the method described by Hansen and Koroleff (1999) in order to obtain the phosphate and silicate concentrations. Dissolved oxygen was determined with an automatic titrator, based on potentiometric endpoint detection (Outdot *et al.* 1988), and later used to calibrate the CTD oxygen values. The average difference between the titration and the CTD measurement was  $0.44\text{ mL L}^{-1}$  for CANOA07 and  $0.63\text{ mL L}^{-1}$  for CANOA08.

## SPATIAL DISTRIBUTION OF WATER PROPERTIES

In this section we present the spatial distribution of different properties using several selected stations and transects located as shown in figure 1. The selected transects are the north section from the CANOA07 cruise, and the front, south, and meridional sections from the CANOA08 cruise (figs. 2, 3). Additionally, we represent the depth distribution of several properties for stations E5, E41, E54, and E70, all from CANOA08 (fig. 4).

The top layer spans from the sea surface down to the potential density anomaly level (or isopycnal)  $\sigma_{\theta} = 26.46$ , approximately the upper 100 m of the water column; it displays highly variable temperature-salinity ( $\theta$ -S) characteristics as the result of coastal upwelling and also due to the presence of mesoscalar variability in the coastal transition zone. The mesoscale features are themselves the result of instabilities in the coastal upwelling jet (e.g., Pelegrí *et al.* 2005, Pastor *et al.* 2008), as well as the disturbance of the Canary Current flow by the Canary Islands (Sangrà *et al.* 2005, 2007, 2009; Machín and Pelegrí 2009). In general, this surface layer has relatively high salinity and dissolved oxygen values and is depleted in nutrients (figs. 2, 3). A particular feature of the eastern North Atlantic subtropical gyre is the subsurface salinity maximum between 50 and 100 m (fig. 4). This corresponds to waters formed at the sea surface, in areas where evaporation exceeds precipitation, that sink due to Ekman transport and winter vertical convection. Throughout spring and summer there is surface capping of this salinity anomaly, which then spreads horizontally over long distances (Bauer and Siedler 1988).

## CONJUNTO DE DATOS

El conjunto de datos utilizado en este trabajo fue recogido durante dos campañas que forman parte del proyecto Corriente de Afloramiento del Noroeste Africano (CANOA). En ambas campañas se tomaron datos de conductividad-temperatura-profundidad (CTD) desde la superficie hasta los 2000 m o hasta el fondo si éste era más somero, con medidas de temperatura, conductividad, presión y oxígeno disuelto casi continuas. Los datos originales, generalmente varios datos por cada metro, fueron promediados a un dato por cada metro. La sonda estaba compuesta por un instrumento Seabird 9Plus, con un sensor de temperatura SBE 3Plus, un sensor de conductividad SBE 4Plus y un sensor de oxígeno disuelto SBE 43.

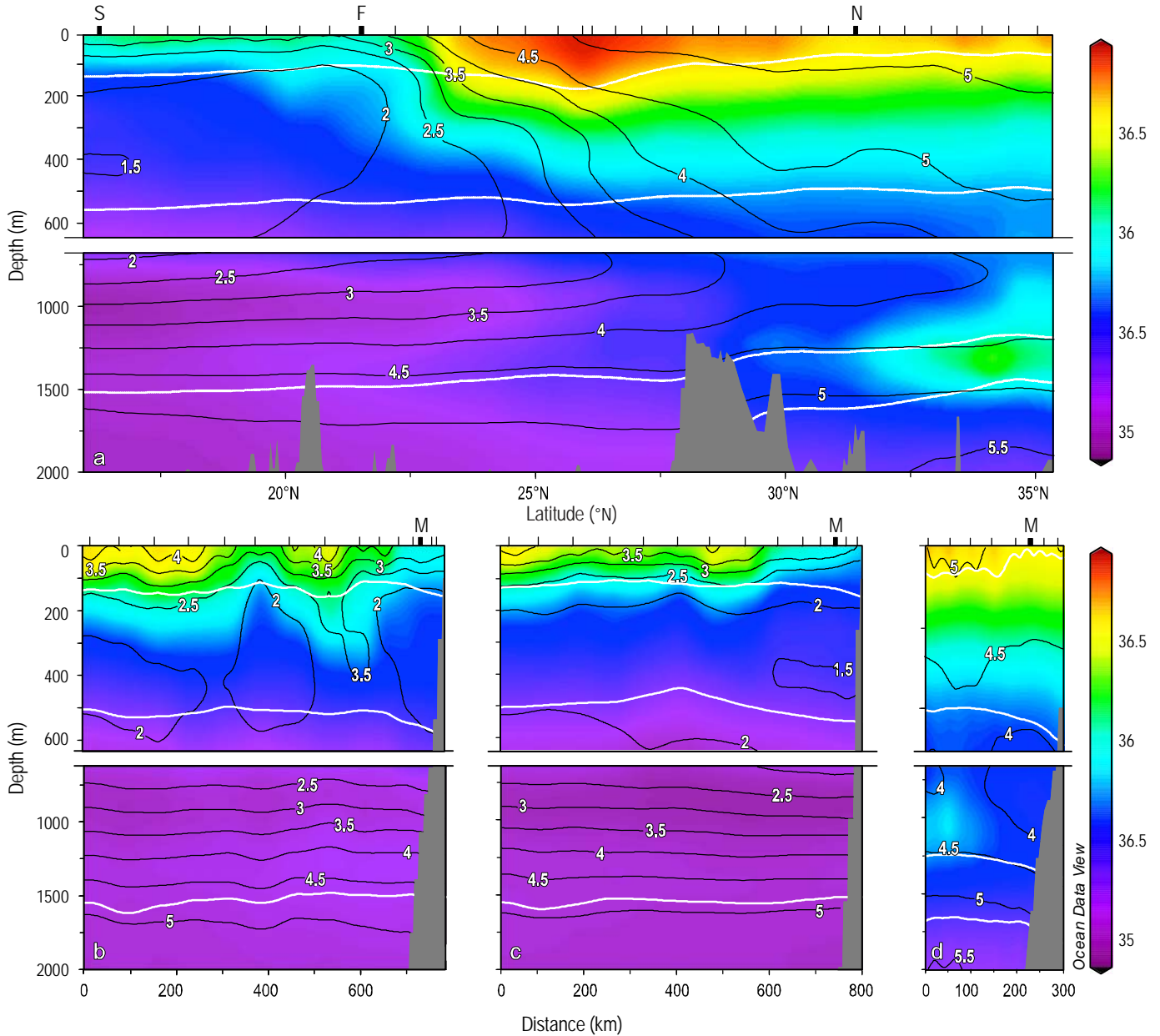
La campaña CANOA07 tuvo lugar entre el 29 de octubre y el 20 de noviembre de 2007 en el B/O *García del Cid*. Un total de 117 estaciones CTD fueron muestreadas entre el estrecho de Gibraltar y las islas Canarias (fig. 1). La campaña CANOA08 tuvo lugar entre el 3 y el 29 de noviembre de 2008 en el B/O *Sarmiento de Gamboa*. La campaña cubrió el área entre el estrecho de Gibraltar y las islas Cabo Verde (fig. 1), con un total de 94 estaciones CTD.

Se recogieron muestras de agua a profundidades estándar en 74 estaciones de CANOA07 y en todas las estaciones de CANOA08. En ambas campañas, las muestras se congelaron a  $-20^{\circ}\text{C}$  y fueron analizadas posteriormente con un autoanalyzer de flujo continuo Bran+Luebbe, siguiendo el método modificado y descrito por Hansen y Koroleff (1999), con el fin de obtener las concentraciones de fosfatos y silicatos. El oxígeno disuelto se determinó con un titulador automático, basado en la valoración potenciométrica de punto final (Outdot *et al.* 1988), y posteriormente se usó para calibrar los valores de oxígeno obtenidos con el sensor CTD. Las diferencias promedio entre la titulación y las medidas del CTD fueron  $0.44\text{ mL L}^{-1}$  para CANOA07 y  $0.63\text{ mL L}^{-1}$  para CANOA08.

## DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE PROPIEDADES

Se presentan las distribuciones espaciales de distintas propiedades a lo largo de los transectos y estaciones que se indican en la figura 1. Los transectos seleccionados fueron la sección norte, perteneciente a la campaña CANOA07, y las secciones frente, sur y latitudinal de la campaña CANOA08 (figs. 2, 3). Adicionalmente, se presenta la distribución vertical de varias propiedades en las estaciones E5, E41, E54 y E70, pertenecientes todas a CANOA08 (fig. 4).

La capa superficial comprende desde la superficie del mar hasta el nivel de anomalía de densidad potencial (isopicna)  $\sigma_{\theta} = 26.46$ , o aproximadamente los primeros 100 m de la columna de agua, y muestra características de temperatura y salinidad ( $\theta$ -S) muy variables como resultado del afloramiento costero y también por la presencia de variabilidad mesoscalar en la zona de transición costera. Las



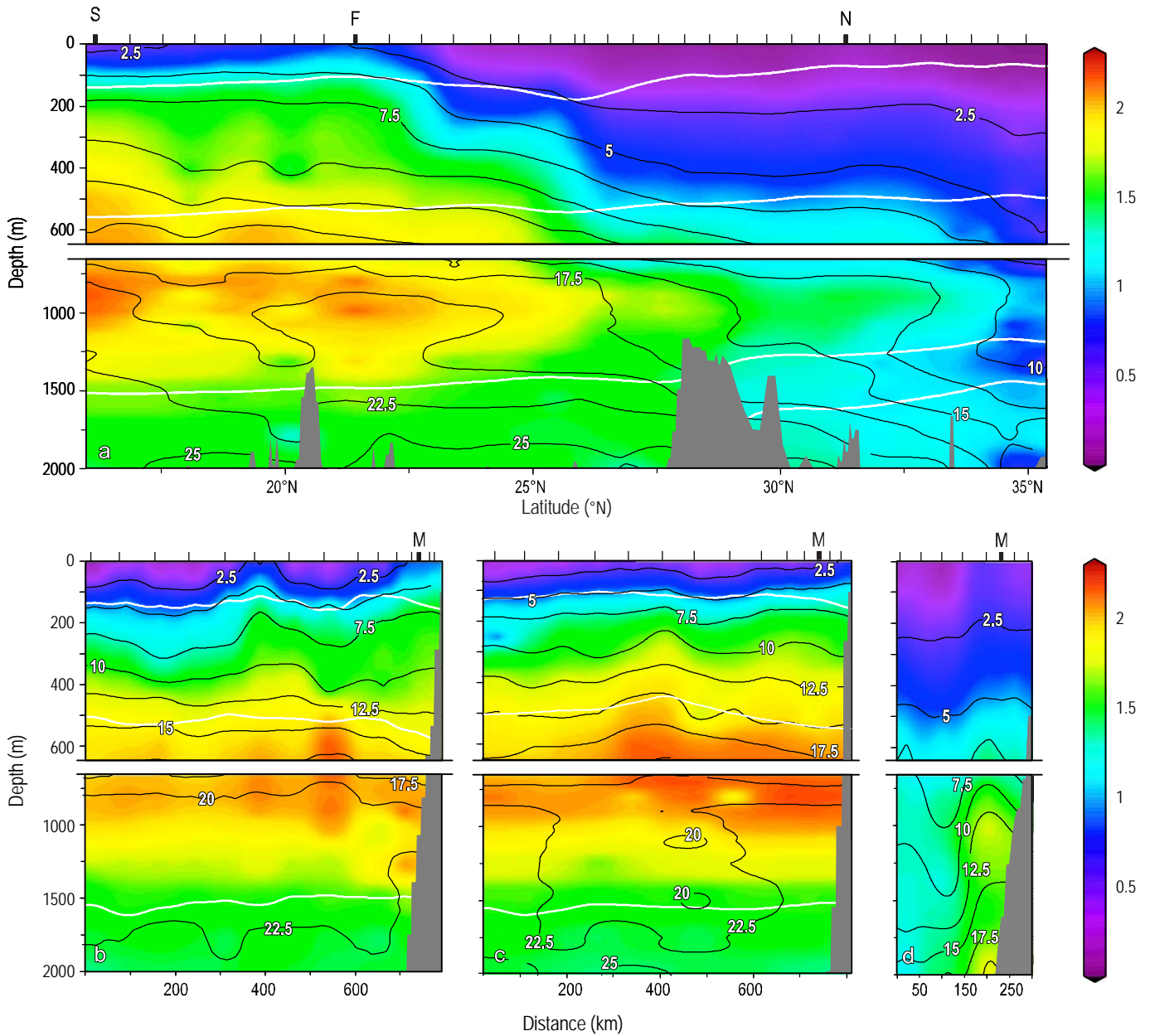
**Figure 2.** Distribution of salinity (color scale) and dissolved oxygen (black isolines) along the (a) meridional, (b) front, (c) south, and (d) north sections. White isolines represent isopycnals delimiting the base of the surface layer ( $\sigma_\theta = 26.46$ ), of the central water mass layer ( $\sigma_\theta = 27.14$ ), and of the intermediate layer ( $\sigma_\theta = 27.75$  for Antarctic Intermediate Water and  $\sigma_\theta = 27.85$  for Mediterranean Water). The location at which the meridional section intersects each cross-shore section and vice versa is shown at the top of each panel (M: meridional; S: south; F: front; N: north).

**Figura 2.** Distribución de salinidad (escala de color) y de oxígeno disuelto (isolíneas negras) en las secciones (a) latitudinal, (b) frente, (c) sur, y (d) norte. Las isolíneas blancas representan las isopícnas que delimitan la base de la capa superficial ( $\sigma_\theta = 26.46$ ), la base de las aguas centrales ( $\sigma_\theta = 27.14$ ), y la base de las aguas intermedias ( $\sigma_\theta = 27.75$  para el Agua Antártica Intermedia y  $\sigma_\theta = 27.85$  para el Agua Mediterránea). El lugar donde la sección latitudinal intersecta cada sección perpendicular a costa está indicado en la parte superior de cada panel (M: latitudinal; S: sur; F: frente; N: norte).

Immediately below and down to some 600 m ( $26.46 < \sigma_\theta < 27.14$ , as given by Tomczak 1981) there are two dominant central waters of our domain, NACW and SACW. Their confluence occurs at the CVFZ, which is located in the North Atlantic because of the year-long northern position of the

características mesoscales son resultado de las inestabilidades de la corriente en chorro asociada al afloramiento (e.g., Pelegrí *et al.* 2005, Pastor *et al.* 2008) así como también de la interacción de la corriente de Canarias con las islas del archipiélago canario (Sangrà *et al.* 2005, 2007, 2009, Machín y



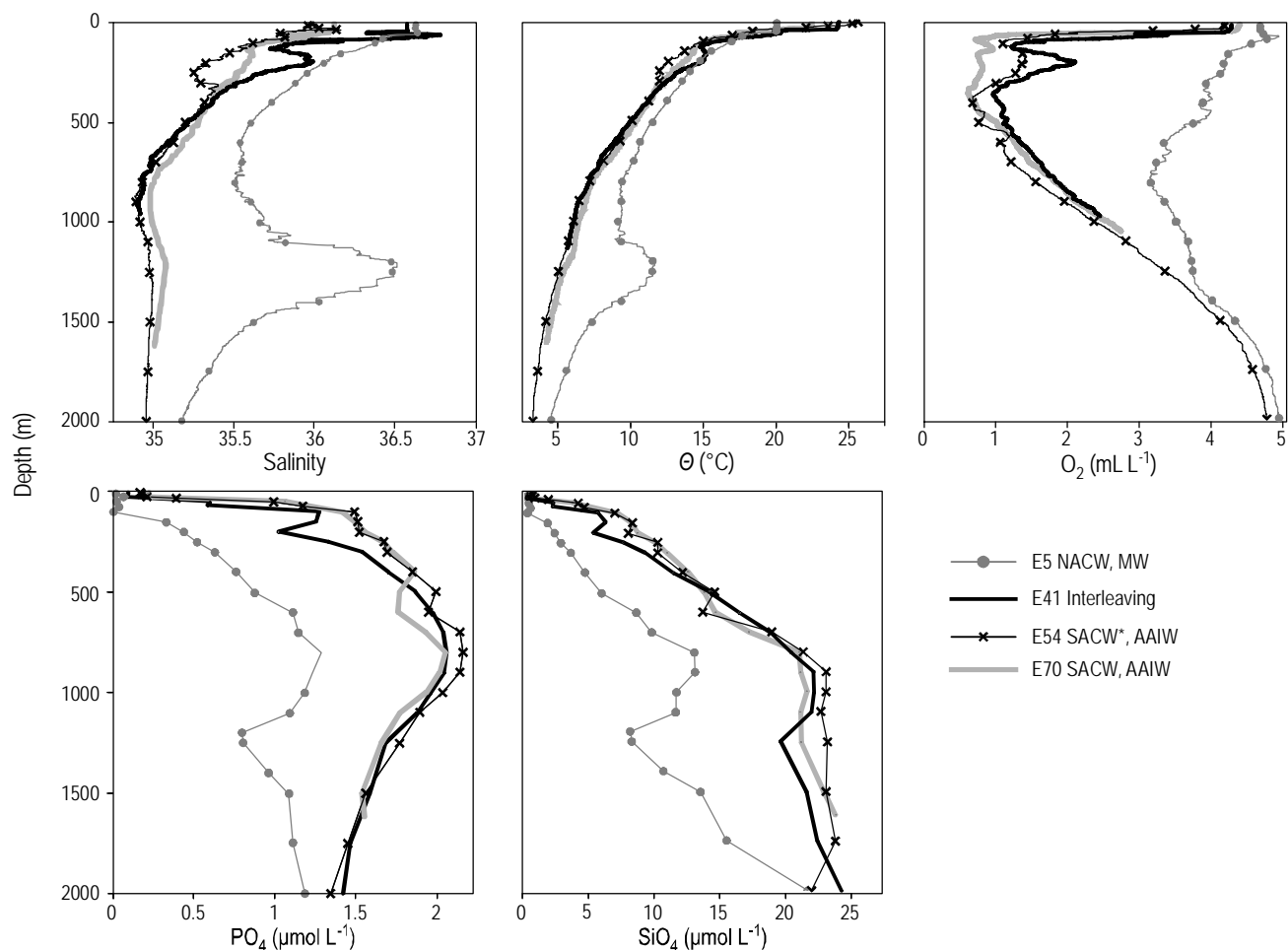


**Figure 3.** Distribution of phosphates (color scale) and silicates (black isolines) along the (a) meridional, (b) front, (c) south, and (d) north sections. White isolines represent isopycnals delimiting the base of the surface layer ( $\sigma_\theta = 26.46$ ), of the central water mass layer ( $\sigma_\theta = 27.14$ ), and of the intermediate layer ( $\sigma_\theta = 27.75$  for Antarctic Intermediate Water and  $\sigma_\theta = 27.85$  for Mediterranean Water). The location at which the meridional section intersects each cross-shore section is shown at the top of each panel (M: meridional; S: south; F: front; N: north).

**Figura 3.** Distribución de fosfatos (escala de color) y de silicatos (isolíneas negras) en las secciones (a) meridional, (b) frente, (c) sur, y (d) norte. Las isolíneas blancas representan las isopícnas que delimitan la base de la capa superficial ( $\sigma_\theta = 26.46$ ), la base de las aguas centrales ( $\sigma_\theta = 27.14$ ), y la base de las aguas intermedias ( $\sigma_\theta = 27.75$  para el Agua Antártica Intermedia y  $\sigma_\theta = 27.85$  para el Agua Mediterránea). El lugar donde la sección latitudinal interseca cada sección perpendicular a costa está indicado en la parte superior de cada panel (M: latitudinal; S: sur; F: frente; N: norte).

Intertropical Convergence Zone (or the Earth's thermal equator). The Cape Verde frontal system is characterized by an abrupt transition in temperature, salinity, and dissolved inorganic nutrients and oxygen. The NACW and SACW characteristics are substantially different as a result of their

Pelegrí 2009). En general, la capa superficial presenta valores altos de salinidad y de oxígeno disuelto y bajo contenido en nutrientes (figs. 2, 3). Una característica particular del giro subtropical del Atlántico Norte es el máximo de salinidad subsuperficial entre los 50 y los 100 m (fig. 4). Este máximo



**Figure 4.** Vertical distribution of potential temperature ( $\theta$ ), salinity (S), phosphate ( $\text{PO}_4$ ), silicate ( $\text{SiO}_4$ ), and dissolved oxygen ( $\text{O}_2$ ) at selected stations displaying different water characteristics. The dots and crosses not only serve to identify the different stations, they also indicate the sampling depths for inorganic nutrients. NACW: North Atlantic Central Water; MW: Mediterranean Water; SACW\*: South Atlantic Central Water of tropical origin; AAIW: Antarctic Intermediate Water; SACW: South Atlantic Central Water. The location of stations E5, E41, E54, and E70 is shown in figure 1.

**Figura 4.** Distribución vertical de temperatura potencial ( $\theta$ ), salinidad (S), fosfatos ( $\text{PO}_4$ ), silicatos ( $\text{SiO}_4$ ) y oxígeno disuelto ( $\text{O}_2$ ) en estaciones seleccionadas. Los círculos y las cruces no sólo indican las diferentes estaciones, también indican las profundidades de muestreo para los nutrientes inorgánicos. NACW: Agua Central Noratlántica; MW: Agua Mediterránea; SACW\*: Agua Central Sudatlántica de origen tropical; AAIW: Agua Antártica Intermedia; SACW: Agua Central Sudatlántica. La localización de las estaciones E5, E41, E54 y E70 se muestra en la figura 1.

different origin. The former are relatively young waters (therefore well oxygenated and poor in nutrients) formed at the northern edge of the relatively saline and warm North Atlantic subtropical basin, including temperate waters east of the North Atlantic Current. The latter, SACW, are much older waters of a more remote origin (the subtropical convergence of the South Atlantic), which reach the eastern margin of the North Atlantic Ocean after a complex path through the Equatorial Current System (Stramma and Schott 1999).

The CVFZ has been said to stretch southwest from near Cape Blanc towards the Cape Verde Islands (see inset in fig. 1; Zenk *et al.* 1991, Pastor *et al.* 2008). In our observations, however, the front appears to begin significantly north of Cape Blanc, at about  $24^\circ\text{N}$  (figs. 2a, 3a).

corresponde a aguas formadas en la superficie, en áreas donde la evaporación excede a la precipitación, que se hunden debido al transporte de Ekman y a la convección invernal. Durante la primavera y el verano esta anomalía de salinidad deja de estar en contacto con la superficie y se extiende horizontalmente sobre grandes distancias (Bauer y Siedler 1988).

Por debajo de esta capa y hasta unos 600 m de profundidad ( $26.46 < \sigma_\theta < 27.14$ , según Tomczak 1981) se encuentran las dos masas de agua centrales, NACW y SACW. El encuentro entre aguas del norte y del sur ocurre en la CVFZ, situada en el Atlántico Norte debido a que la Zona de Convergencia Intertropical (o el ecuador térmico de la Tierra) está localizada en el hemisferio norte durante todo el año. El sistema



Along the CVFZ there is interleaving of NACW and SACW at different longitudes and depths (Zenk *et al.* 1991), favored by the density-compensating character of the temperature and salinity fields. This interleaving is clearly observed in figures 2b and 3b, where high salinity/oxygen and low nutrient concentrations, characteristic of NACW, alternate with low salinity/oxygen and high nutrient SACW concentrations. In our observations, however, we find more instances of clear interleaving with SACW above NACW (station E41 in fig. 4), likely due to the fact that the opposite condition favors double-diffusive vertical processes.

A remarkable local feature of SACW is the relatively low dissolved oxygen values, which respond to the high primary production in the surface layers (after upwelling in coastal waters and within the Guinea Dome) combined with enhanced remineralization during the long recirculation times in this eastern basin, precisely around the Guinea Dome. This is clear in the vertical profiles of those stations within (E41) and south (E54 and E70) of the CVFZ, where we find that SACW is characterized by a minimum in oxygen between 100 and 500 m. At these depths nutrients are high, although their maximum is found in the underlying intermediate waters. An interesting feature is apparent at station E54, located over the slope along the south transect. Down to about 400 m this station shows relatively high dissolved oxygen concentrations and it is substantially less saline than the surrounding SACW, suggesting a less diluted southern variety. We will return to this issue in the following sections.

Below the central stratum we find the intermediate layers, here again formed by waters of southern (AAIW,  $27.14 < \sigma_\theta < 27.75$ ) and northern (MW,  $27.14 < \sigma_\theta < 27.85$ ) origin (Machín and Pelegrí 2009, Machín *et al.* 2010). In general, the stations near the Strait of Gibraltar show a pronounced salinity maximum between 1000 and 1500 m, associated with the presence of MW (fig. 2a, d). The high salinity, low nutrient values observed 200 km offshore in the north section (figs. 2d, 3d) are indicative of a preferential offshore path for MW, or an offshore displacement of this water mass by the northward flowing AAIW. The transition in this stratum appears to be more progressive than in the overlaying central waters, although there are instances of isolated, highly saline Mediterranean lenses in the northern end of the domain. Such an instance was found in one of the offshore stations during the CANOA07 cruise, just southwest of the north section (not shown). The 1200 m salinity maximum ( $S = 36.5$ ) at station E5 is the clear signature of MW at the northern stations (fig. 4), yet not approaching the Mediterranean outflow salinity values,  $S = 38.5$  (Ambar and Howe 1979).

As we move south, the intermediate salinity maximum gets eroded and instead the AAIW characteristics dominate. Intermediate waters of southern origin are relatively fresh and cool, like central waters, and nutrient rich and oxygen poor as compared with those of northern origin. This again reflects the relatively long residence time of the southern waters combined with the influence of the warm and salty

frontal de Cabo Verde está caracterizado por una transición abrupta en temperatura, salinidad, nutrientes y oxígeno disueltos. Las características del NACW y del SACW son considerablemente distintas debido a su diferente lugar de origen. Las primeras son aguas relativamente jóvenes (y por tanto bien oxigenadas y pobres en nutrientes) formadas en el límite norte de la cuenca noratlántica subtropical, con salinidad y temperatura relativamente elevadas, que incluyen las aguas templadas al este de la corriente del Atlántico Norte. Las SACW, por su parte, son mucho más antiguas: su lugar de formación es remoto (la convergencia subtropical del Atlántico Sur), y alcanzan el margen oriental del Atlántico Norte tras seguir un camino complejo a través del sistema de corrientes ecuatoriales (Stramma y Schott 1999).

Generalmente se considera que la CVFZ se extiende hacia el suroeste desde cabo Blanco hasta las islas de Cabo Verde (ver recuadro interior en la fig. 1; Zenk *et al.* 1991, Pastor *et al.* 2008). Sin embargo, en nuestras observaciones el frente aparece considerablemente al norte de cabo Blanco, a unos  $24^\circ$  N de latitud (figs. 2a, 3a). A lo largo de la CVFZ existen intrusiones laterales de NACW y SACW a distintas longitudes y profundidades (Zenk *et al.* 1991), favorecidas por el carácter compensatorio en densidad de los campos de temperatura y salinidad. Este entramado se observa claramente en las figuras 2b y 3b, donde los valores altos de salinidad y de oxígeno y las bajas concentraciones de nutrientes, característicos del NACW, se alternan con los valores bajos de salinidad y de oxígeno y las altas concentraciones de nutrientes, típicas del SACW. Con frecuencia el SACW se observa por encima del NACW (estación E41 en fig. 4), probablemente como consecuencia de que la situación inversa favorece los procesos de doble difusión.

Una característica local notable del SACW son los valores relativamente bajos de oxígeno disuelto, los cuales responden a la elevada producción primaria en la superficie (tras el afloramiento en la franja costera y en el domo de Guinea) combinada con los largos tiempos de recirculación alrededor del domo de Guinea que propicia una elevada remineralización. Esta característica se puede observar claramente en los perfiles verticales de las estaciones en la CVFZ (E41) y al sur de la misma (E54 y E70), donde se encuentra un mínimo de oxígeno entre los 100 y los 500 m de profundidad. A estas profundidades la concentración de nutrientes es elevada, aunque su máximo se encuentra en las aguas intermedias. Una característica interesante aparece en la estación E54, localizada sobre el talud en la sección sur. Esta estación muestra concentraciones relativamente altas de oxígeno disuelto hasta los 400 m, y es considerablemente menos salina que el SACW de alrededor, lo cual es indicativo de una variedad menos diluida procedente del sur. Se retomará esta cuestión en las secciones siguientes.

Por debajo del estrato central se encuentran las aguas intermedias, de nuevo con origen en el sur (AAIW,  $27.14 < \sigma_\theta < 27.75$ ) y en el norte (MW,  $27.14 < \sigma_\theta < 27.85$ ) (Machín y Pelegrí 2009, Machín *et al.* 2010). En general, las estaciones

Mediterranean outflow. On the other hand, AAIW appears to propagate north close to the slope, reaching at least the Canary Islands (Machín and Pelegrí 2009, Machín *et al.* 2010); in this study we actually found diluted AAIW characteristics as far north as 34° N. The low oxygen and high nutrient values at the southernmost stations are likely a result of the long path of these waters before reaching the eastern North Atlantic subtropical gyre. However, it is remarkable that the absolute oxygen minimum occurs within central waters (200–400 m), while the absolute nutrient maximum is found much deeper (800–1200 m). The anomalously high oxygen AAIW values, as compared with the extension of the high nutrient layers, is an imprint of the high oxygen concentration of these waters at origin; i.e., despite their long circulation time and intense remineralization they retain relatively high oxygen values.

Within the deeper layers we find NADW at all latitudes ( $\sigma_\theta < 27.75$ ), displaying meridional changes substantially smaller than those within the intermediate and upper layers. Nevertheless, figures 2a and 3a suggest that the Canary Islands may act as an obstacle to the propagation of these deep waters, since at this location there are significant changes in salinity, nutrients, and oxygen at depth.

#### WATER TYPES AND OPTIMUM MULTIPARAMETER ANALYSIS

The optimum multiparameter (OMP) analysis is a tool to analyze the water mass mixture in a water sample. The method calculates the contributions from the original water masses, called source water masses or water types, to the water sample. The water type contributions to each data point are obtained by finding the best linear mixing combination in a multi-parameter space (e.g., temperature, salinity, oxygen, and inorganic nutrients) that leads to the observed values. This is done by minimizing the residuals between predictions and observations, in a non-negative least squares sense (Mackas *et al.* 1987, Tomczak and Large 1989, Llanillo *et al.* 2012). The solution of the OMP analysis includes two physical constraints: the contributions from all sources add up to one (mass conservation) and all contributions must be non-negative.

In this work we use temperature ( $\theta$ ), salinity (S), phosphate ( $PO_4$ ), silicate ( $SiO_4$ ) and oxygen ( $O_2$ ) to resolve the following linear system of mixing equations:

$$\sum_i x_i \theta_i = \theta_{obs} + R_\theta \quad (1)$$

$$\sum_i x_i S_i = S_{obs} + R_S \quad (2)$$

$$\sum_i x_i (PO_4)_i = (PO_4)_{obs} + R_{PO_4} \quad (3)$$

$$\sum_i x_i (SiO_4)_i = (SiO_4)_{obs} + R_{SiO_4} \quad (4)$$

$$\sum_i x_i (O_2)_i = (O_2)_{obs} + R_{O_2} \quad (5)$$

cercanas al estrecho de Gibraltar muestran un pronunciado máximo de salinidad entre los 1000 y los 1500 m, asociado a la presencia de MW (fig. 2a, d). Los valores altos de salinidad y valores bajos de nutrientes observados en la sección norte, a unos 200 km de la costa (figs. 2d, 3d), indican un camino preferencial para el MW, o también que esta agua se ve desplazada costa afuera por el AAIW. La transición en este estrato parece ser más progresiva que en las aguas centrales, aunque en ocasiones en el extremo norte de la región de estudio se encuentran lentes aisladas de MW con elevada salinidad. Una de estas lentes fue encontrada en una estación situada al suroeste de la sección norte (no se muestra) durante la campaña CANOA07. El máximo de salinidad a 1200 m ( $S = 36.5$ ) en la estación E5 es una clara señal de MW en las estaciones del norte (fig. 4), aunque este valor queda lejos de los valores de salinidad del MW a su salida por el estrecho de Gibraltar,  $S = 38.5$  (Ambar y Howe 1979).

Hacia el sur, el máximo de salinidad en la capa intermedia se va erosionando y las características del AAIW pasan a ser dominantes. Éstas son relativamente frías y poco salinas, y son ricas en nutrientes y pobres en oxígeno comparadas con el MW. Estas características son de nuevo el reflejo de unos tiempos de residencia altos así como de la influencia del MW, cálida y salina. El AAIW parece fluir hacia el norte cerca del talud, alcanzando al menos las islas Canarias (Machín y Pelegrí 2009, Machín *et al.* 2010); en este estudio se encontraron de hecho características de AAIW diluidas hasta los 34° N. Las concentraciones bajas de oxígeno y altas en nutrientes en las estaciones más al sur son el resultado del largo camino que recorren estas aguas hasta alcanzar el margen oriental del giro subtropical del Atlántico Norte. Sin embargo, destaca que el mínimo en oxígeno se presentó en las aguas centrales (de 200 a 400 m), mientras que el máximo en nutrientes se encontró a mayor profundidad (entre los 800 y los 1200 m). Esto ocurre debido a la elevada concentración de oxígeno en la zona de formación del AAIW. Así, a pesar del largo recorrido y de la remineralización que en ellas tiene lugar, estas aguas retienen una concentración relativamente alta de oxígeno.

A mayor profundidad se encuentra el NADW en todas las latitudes de la región de estudio ( $\sigma_\theta < 27.75$ ), con cambios latitudinales mucho menores que en las capas intermedias y centrales. No obstante, las figuras 2a y 3a sugieren que las islas Canarias podrían actuar como barrera en la propagación de estas aguas, ya que se observan cambios considerables de salinidad, nutrientes y oxígeno a estas profundidades.

#### AGUAS TIPO Y ANÁLISIS MULTIPARAMÉTRICO ÓPTIMO

El análisis multiparamétrico óptimo (OMP) es una herramienta que permite analizar la mezcla de diversas masas de agua en una muestra. El método consiste en calcular la contribución de las masas de agua originales, llamadas masas de agua fuente o aguas tipo, en la muestra de agua. Las contribuciones de las aguas tipo en cada dato o muestra se obtienen

$$\sum_i x_i = 1 \quad (6)$$

where  $\theta_i$ ,  $S_i$ ,  $(PO_4)_i$ ,  $(SiO_4)_i$ , and  $(O_2)_i$  are the values for each source water mass and  $\theta_{obs}$ ,  $S_{obs}$ ,  $(PO_4)_{obs}$ ,  $(SiO_4)_{obs}$ , and  $(O_2)_{obs}$  are the observed values, the last equation being for mass conservation.

Before resolving the system, the water type matrix is normalized to commensurate the different variables, and different weights are applied to each variable. The weights ( $W_j$ ) are calculated following Tomczak and Large (1989):

$$W_j = \frac{\sigma_j^2}{\delta_{jmax}} \quad (7)$$

where  $\sigma_j$  is the standard deviation of the water type matrix for variable  $j$ , a measure for the ability of variable  $j$  to resolve differences in water mass content; and  $\delta_{jmax}$  is a measure of the environmental variability of the variable  $j$  that characterizes the water type, here estimated as the largest variance in variable  $j$  for the definition of any water type. Weights are then normalized to temperature, i.e., a weight of one is given to temperature and values less than one to the other variables, and a weight of 10 is assigned to equation 6 in order to emphasize mass conservation.

An essential component of OMP is the definition of the water type matrix. We follow the approach of defining values in the vicinity of the study region rather than in the remote areas of water mass formation. The values used are given in table 1. The OMP analysis is applied to data in the range  $26.46 < \sigma_\theta < 27.82$ . Data above the upper limit (typically

encontrando la mejor combinación de mezcla lineal en un espacio multiparamétrico (por ejemplo, temperatura, salinidad, oxígeno y nutrientes inorgánicos) que da como resultado los valores observados. El resultado se alcanza minimizando los residuos entre predicciones y observaciones, en un ajuste por mínimos cuadrados no negativo (Mackas *et al.* 1987, Tomczak y Large 1989, Llanillo *et al.* 2012). La solución incluye dos restricciones: la suma de todas las contribuciones debe ser igual a uno (conservación de masa) y todas las contribuciones deben ser positivas.

En este trabajo se utilizaron la temperatura ( $\theta$ ), la salinidad (S), los fosfatos ( $PO_4$ ), los silicatos ( $SiO_4$ ) y el oxígeno ( $O_2$ ) para resolver el siguiente sistema lineal de ecuaciones de mezcla:

$$\sum_i x_i \theta_i = \theta_{obs} + R_\theta \quad (1)$$

$$\sum_i x_i S_i = S_{obs} + R_S \quad (2)$$

$$\sum_i x_i (PO_4)_i = (PO_4)_{obs} + R_{PO_4} \quad (3)$$

$$\sum_i x_i (SiO_4)_i = (SiO_4)_{obs} + R_{SiO_4} \quad (4)$$

$$\sum_i x_i (O_2)_i = (O_2)_{obs} + R_{O_2} \quad (5)$$

$$\sum_i x_i = 1 \quad (6)$$

donde  $\theta_i$ ,  $S_i$ ,  $(PO_4)_i$ ,  $(SiO_4)_i$ ,  $(O_2)_i$  son los valores de cada masa de agua tipo y  $\theta_{obs}$ ,  $S_{obs}$ ,  $(PO_4)_{obs}$ ,  $(SiO_4)_{obs}$ ,  $(O_2)_{obs}$  son los observados. La última ecuación es la conservación de masa.

**Table 1.** Source water mass values used in the optimum multiparameter analysis for potential temperature ( $\theta$ ), salinity (S), phosphate ( $PO_4$ ), silicate ( $SiO_4$ ), and dissolved oxygen ( $O_2$ ). NACW: North Atlantic Coastal Water; SACW: South Atlantic Central Water; SACW\*: South Atlantic Central Water of tropical origin; AAIW: Antarctic Intermediate Water; MW: Mediterranean Water; NADW: North Atlantic Deep Water. The upper (U) and lower (L) end members are indicated.

**Tabla 1.** Valores de las masas de agua tipo utilizados en el análisis multiparamétrico óptimo para temperatura potencial ( $\theta$ ), salinidad (S), fosfatos ( $PO_4$ ), silicatos ( $SiO_4$ ) y oxígeno disuelto ( $O_2$ ). NACW: Agua Central Noratlántica; SACW: Agua Central Sudatlántica; SACW\*: Agua Central Sudatlántica de origen tropical; AAIW: Agua Antártica Intermedia; MW: Agua Mediterránea; NADW: Agua Noratlántica Profunda. Se indican el límite superior (U) y el inferior (L).

	$\theta$ (°C)	S	$PO_4$ ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	$SiO_4$ ( $\mu\text{mol L}^{-1}$ )	$O_2$ ( $\text{mL L}^{-1}$ )
NACW <sub>U</sub>	18.65	36.76	0.25	0.36	4.60
NACW <sub>L</sub>	11.00	35.47	1.05	5.65	3.66
SACW <sub>U</sub>	15.25	35.70	1.41	6.92	1.08
SACW <sub>L</sub>	9.70	35.18	1.94	14.08	1.20
SACW*	12.08	35.27	1.62	9.31	1.44
AAIW	6.50	34.90	2.02	22.55	2.21
MW	11.74	36.50	0.67	7.20	4.42
NADW	2.50	34.94	1.40	34.80	5.71
Weight	1.00	0.86	0.21	0.14	0.15

some 100 m and always less than 150 m) have been excluded as their physical and biochemical properties may be altered by atmospheric and biogeochemical processes. This guarantees that inorganic nutrients are not modified by primary production but gives no assurance that subsurface biochemical properties may be affected by the sinking and remineralization of organic matter (e.g. Llanillo *et al.* 2012); however, by using the local water types we expect to minimize these remineralization effects. We will nevertheless have to check *a posteriori* the implicit underlying assumption behind the OMP classic analysis; i.e., that phosphates, silicates, and oxygen are approximately independent and conservative.

Six source water masses may be discerned in the study area. The upper part of the water column, down to  $\sigma_\theta = 27.14$ , is dominated by the central water masses of northern (NACW) and southern origin (SACW). Here we have used the  $\theta$ -S characteristics that Tomczak (1981) defined using hydrographic data from the region 20 to 26° N. Due to their formation process, the  $\theta$ -S relationship for central waters is defined by a straight line (Mamayev 1975). Therefore, in order to characterize a central water mass in the  $\sigma_\theta$  range 26.46–27.14, we require two source water types; i.e., for each water mass we need upper (U) and lower (L) end members (NACW<sub>U</sub>, NACW<sub>L</sub>, SACW<sub>U</sub>, SACW<sub>L</sub>).

An additional water type of southern origin is detected in the southernmost part of the study region, at stations along the continental slope above 200 m depth, in waters having a relative salinity and temperature minimum and oxygen maximum. This variety, here named SACW\*, has been previously identified as a regional SACW variety from the tropical region (Fraga 1974, Voituriez and Chuchla 1978, Manríquez and Fraga 1982). The  $\theta$ -S characteristics for SACW\* have been defined using those southern stations that display a salinity minimum in the central water mass layer.

Two water masses are found at intermediate layers: MW and AAIW. The  $\theta$ -S values for MW have been derived from the World Ocean Circulation Experiment (WOCE) Hydrographic Climatology (Gouretski and Koltermann 2004), by searching the temperature and salinity values that correspond to the salinity maximum in an intermediate layer within a region bounded by latitudes 12 and 49° N and from the coast to 1500 km offshore. For the AAIW we used a modified type defined by Fraga *et al.* (1985) at about 20° N, a variety that was also employed by Pérez *et al.* (2001) to study the regional water masses. Finally, the deep levels of the water column are influenced by NADW. For this water mass, we have chosen the  $\theta$ -S point corresponding to the upper limit suggested by Castro *et al.* (1998), based on the deepest limit of MW influence (Harvey 1982).

Having assigned the  $\theta$ -S characteristics of the source water types, we determined their nutrient and dissolved oxygen characteristics using stations in our data set that closely match each source water type  $\theta$ -S definition. Two exceptions

Antes de resolver el sistema, la matriz de aguas tipo es normalizada para que las diferentes variables sean proporcionales, y se aplican distintos pesos a cada variable. Los pesos ( $W_j$ ) han sido calculados según Tomczak y Large (1989),

$$W_j = \frac{\sigma_j^2}{\delta_{j\max}} \quad (7)$$

donde  $\sigma_j$  es la desviación estándar de la matriz de aguas tipo para la variable  $j$ , una medida de la habilidad de la variable  $j$  para resolver el contenido en cada masa de agua; y  $\delta_{j\max}$  es una medida de la variabilidad medioambiental de la variable  $j$ , estimada como la varianza máxima entre todas las aguas tipo de la variable  $j$ . Los pesos son normalizados a la temperatura, que es el parámetro con mayor peso; es decir, a la temperatura se le asigna el peso de uno y valores menores que uno a las demás variables. A la ecuación 6 se le asigna un peso de 10 con el objetivo de enfatizar la conservación de masa.

Una parte esencial del OMP es la definición de la matriz de aguas tipo. Aquí se han definido las aguas tipo según las características que tienen cerca de la región de estudio, en lugar de usar los valores en la región de formación. Los valores utilizados se muestran en la tabla 1. Se han utilizado los límites de densidad  $26.46 < \sigma_\theta < 27.82$  para el análisis. Los datos por encima del límite superior (unos 100 m en promedio, y siempre menos de 150 m) han sido excluidos ya que sus propiedades físicas y bioquímicas podrían estar alteradas por procesos atmosféricos y biogeoquímicos. Se garantiza así que los nutrientes inorgánicos no son alterados debido a la producción primaria, aunque no podemos asegurar que las propiedades en la subsuperficie no estén afectadas por la remineralización de materia orgánica (e.g. Llanillo *et al.* 2012). Sin embargo, al usar aguas tipo definidas localmente, se espera que los efectos de remineralización sean mínimos. Tras realizar el análisis OMP, el supuesto del OMP clásico de que los fosfatos, los silicatos y el oxígeno son independientes y conservativos deberá ser comprobado.

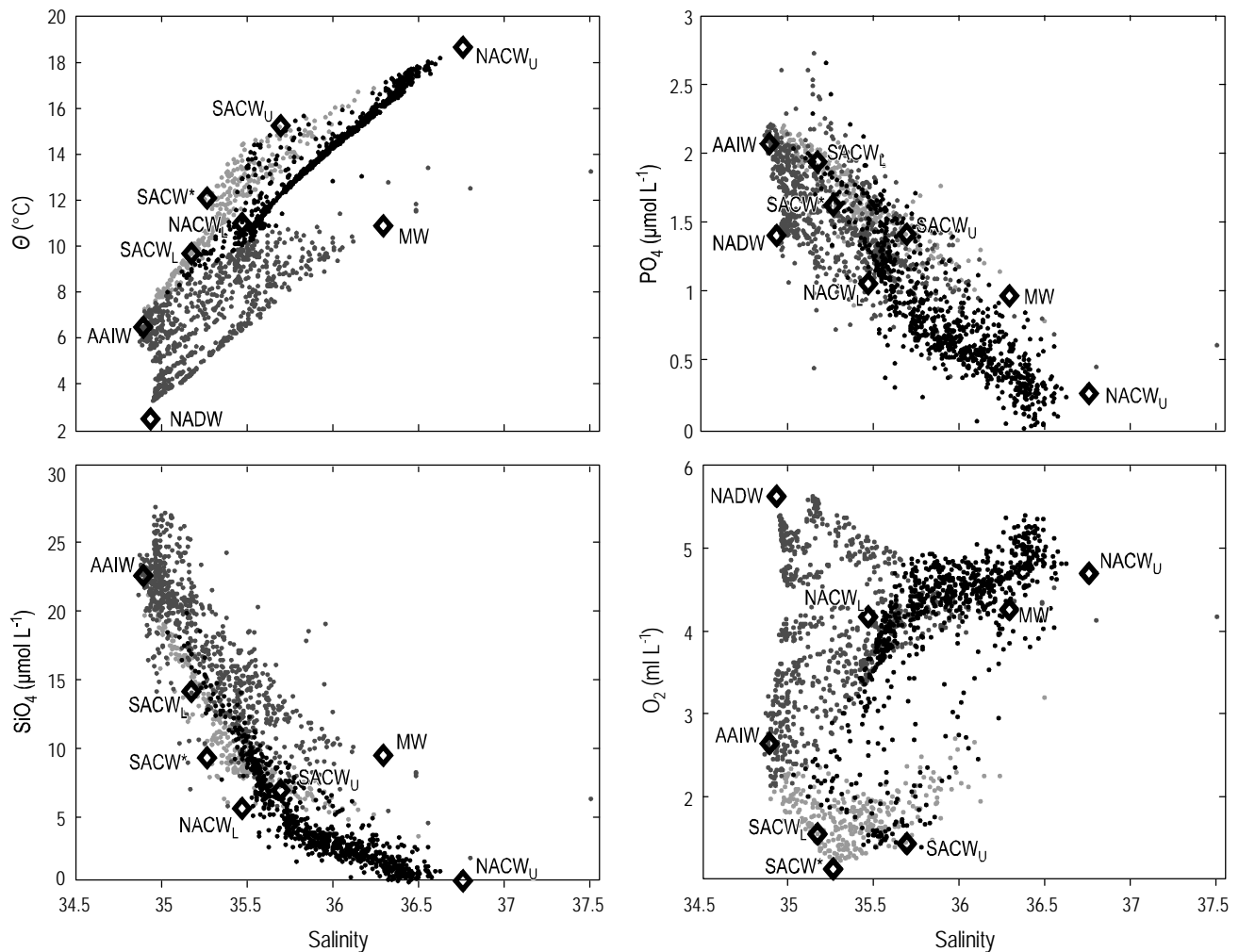
Seis masas de agua fuente se distinguen en el área de estudio. La parte superior de la columna de agua hasta  $\sigma_\theta = 27.14$  está dominada por aguas centrales de origen norte (NACW) y sur (SACW). Se han utilizado las características  $\theta$ -S que Tomczak (1981) definió con datos hidrográficos de la región entre 20 y 26° N. Debido a su proceso de formación, la relación  $\theta$ -S de las masas de agua centrales viene definida por un línea recta (Mamayev 1975). Por lo tanto, se requieren dos aguas tipo para caracterizar cada masa de agua central en el intervalo  $\sigma_\theta$  que va de 26.46 a 27.14, una para el límite superior (U) y otra para el inferior (L) (NACW<sub>U</sub>, NACW<sub>L</sub>, SACW<sub>U</sub>, SACW<sub>L</sub>).

Se ha detectado un agua tipo adicional de origen sur en las estaciones más sureñas de la región de estudio a lo largo del talud, por encima de los 200 m, con un mínimo relativo

**Table 2.** Bounding latitudes and densities, and water types used to group the data in three subsets for the optimum multiparameter analysis. NACW: North Atlantic Coastal Water; SACW: South Atlantic Central Water; AAIW: Antarctic Intermediate Water; MW: Mediterranean Water; NADW: North Atlantic Deep Water; SACW\*: South Atlantic Central Water of tropical origin; the upper (U) and lower (L) end members are indicated.

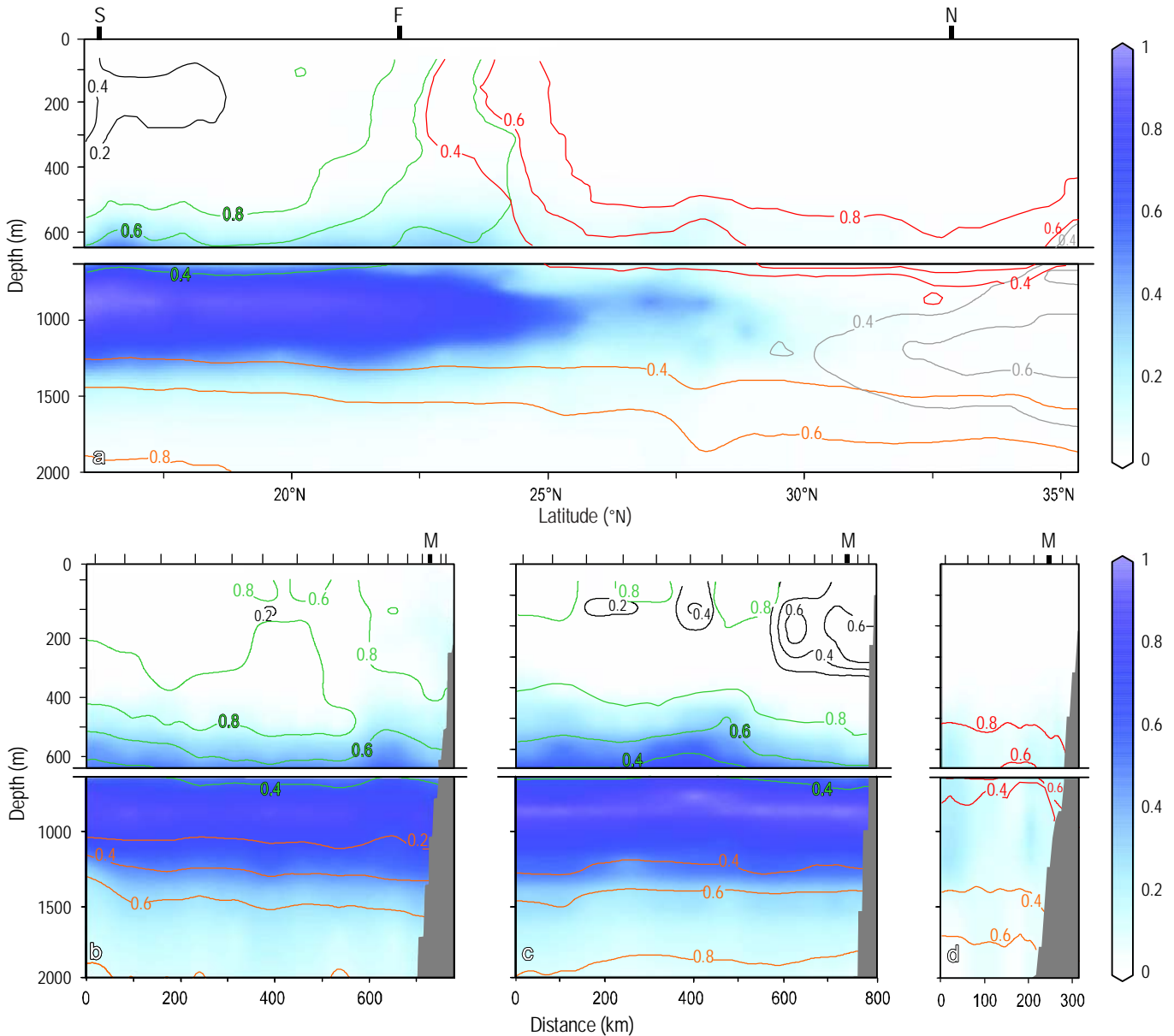
**Tabla 2.** Latitudes y densidades que delimitan cada uno de los tres grupos definidos en el análisis multiparamétrico óptimo, y aguas tipo utilizadas en cada grupo. NACW: Agua Central Noratlántica; SACW: Agua Central Sudatlántica; AAIW: Agua Antártica Intermedia; MW: Agua Mediterránea; NADW: Agua Noratlántica Profunda; SACW\*: Agua Central Sudatlántica de origen tropical. Se indican el límite superior (U) y el inferior (L).

	Group 1		Group 2		Group 3	
Latitudes	>21° N		<21° N		All latitudes	
$\sigma_\theta$	26.46–27.32		26.46–27.32		>27.32	
Water types	NACW <sub>U</sub>	NACW <sub>L</sub>	NACW <sub>U</sub>	NACW <sub>L</sub>	NACW <sub>L</sub>	SACW <sub>L</sub>
	SACW <sub>U</sub>	SACW <sub>L</sub>	SACW <sub>U</sub>	SACW <sub>L</sub>	AAIW	MW
	AAIW	MW	SACW*	AAIW	NADW	



**Figure 5.** Property-property diagrams showing the data used in each group of the optimum multiparameter analysis (black dots correspond to group 1, light grey dots to group 2, and dark grey dots to group 3; see table 2 for groups). Diamonds show the source water type values used in the analysis. See table 2 for water types.

**Figura 5.** Diagramas propiedad-propiedad con cada uno de los grupos utilizados en el análisis multiparamétrico óptimo (los puntos negros corresponden al grupo 1, los gris claro al grupo 2 y los gris oscuro al grupo 3; ver tabla 2 para los grupos). Los diamantes muestran los valores de las masas de agua tipo que se utilizaron en el análisis. Ver la tabla 2 para los tipos de agua.



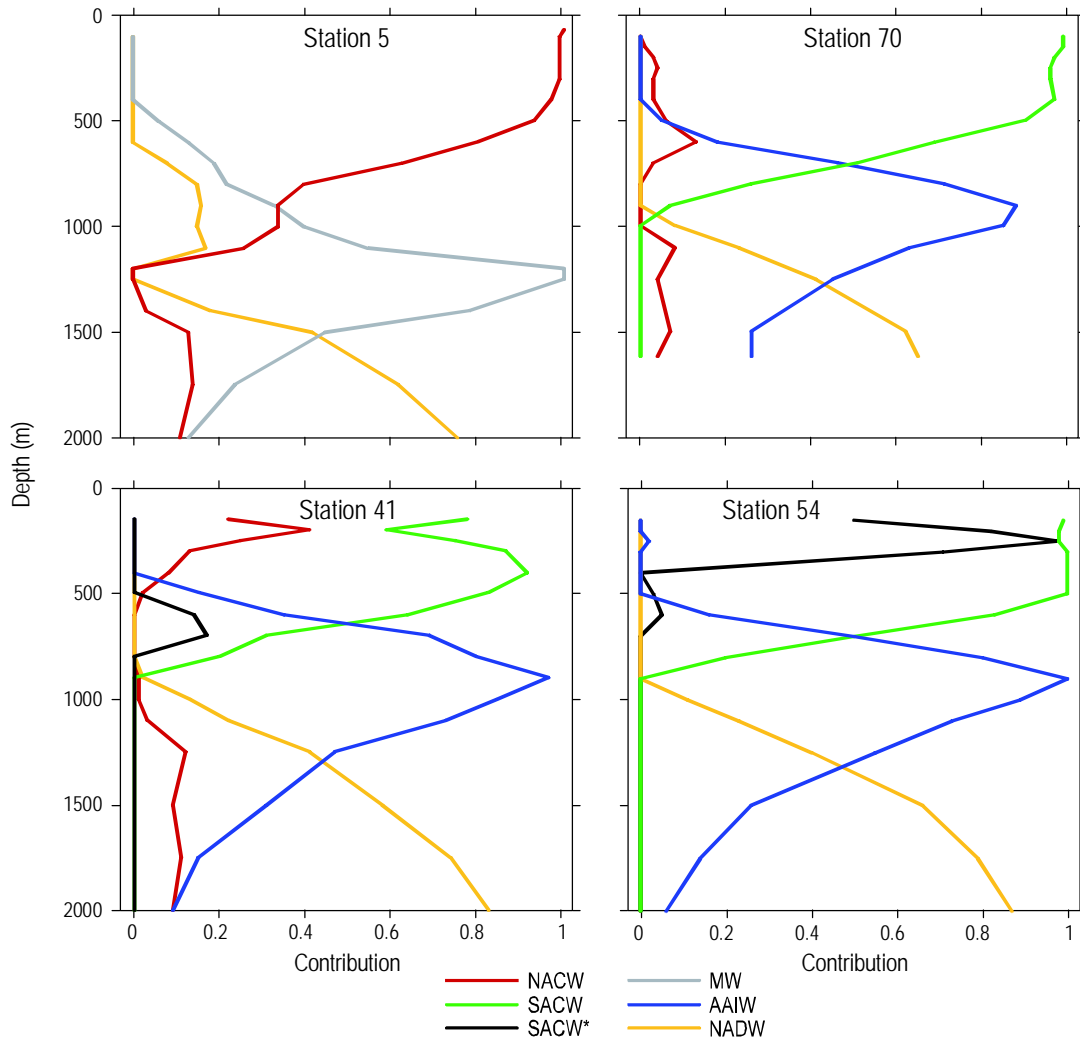
**Figure 6.** Water mass contributions obtained with the optimum multiparameter analysis (a) as a function of depth and latitude, and along the (b) front, (c) south, and (d) north sections. The contribution of North Atlantic Central Water is shown in red, South Atlantic Central Water in green, South Atlantic Central Water of tropical origin (SACW\*) in black, Antarctic Intermediate Water in blue color scale, Mediterranean Water in grey, and North Atlantic Deep Water in orange. Only isolines above 0.4 are shown, except for SACW\* where contributions above 0.2 are plotted; contour intervals are every 0.2 units. Approximate latitudes of the north (N), front (F), and south (S) sections are shown in panel a, and the intersection of the latitudinal (M) section is shown in the cross-shore sections.

**Figura 6.** Contribuciones de las distintas masas de agua obtenidas en el análisis multiparamétrico óptimo (a) en función de la latitud y profundidad, y a lo largo de las secciones (b) frente, (c) sur y (d) norte. La contribución del Agua Central Noratlántica se muestra en rojo; Agua Central Sudatlántica, en verde; Agua Central Sudatlántica de origen tropical (SACW\*), en negro; Agua Antártica Intermedia, en escala de color azul; Agua Mediterránea, en gris; y Agua Noratlántica profunda, en naranja. Sólo se muestran las isolíneas por encima de 0.4, excepto para el SACW\* donde además se muestra la contribución de 0.2; los contornos se han graficado a intervalos de 0.2 unidades. Las latitudes aproximadas de las secciones norte (N), frente (F) y sur (S) se muestran en el panel a, y la intersección con la sección latitudinal (M) se muestra en las secciones perpendiculares a la costa.

are MW, where the same data from the WOCE climatology has been used, and NADW, whose values were also taken from Castro *et al.* (1998).

de temperatura y salinidad, y un máximo de oxígeno. Esta variedad, que hemos denominado SACW\*, ha sido identificada previamente como una variedad regional de SACW de





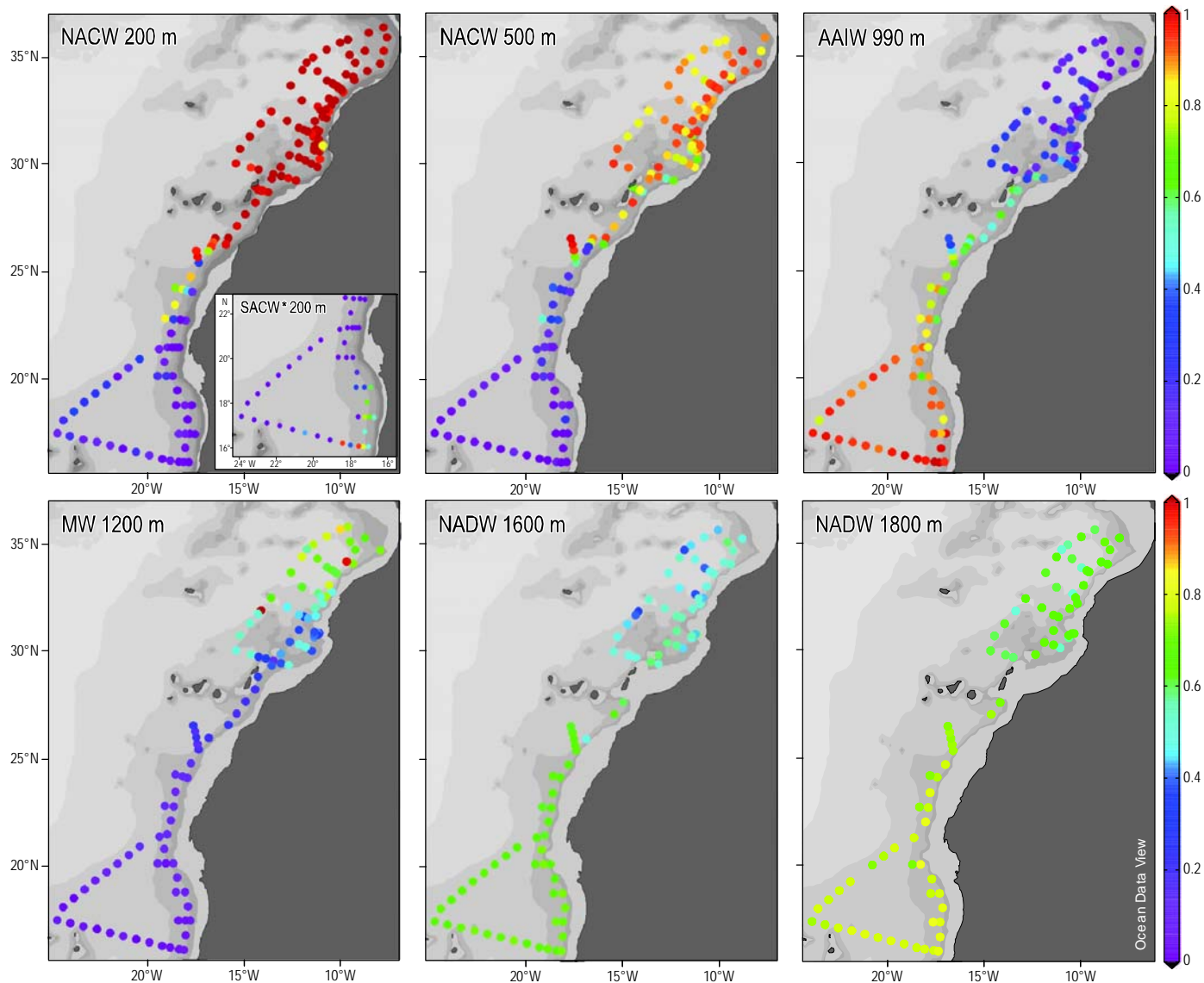
**Figure 7.** Water mass contributions at selected stations as obtained with the optimum multiparameter analysis (see fig. 1). North Atlantic Central Water (NACW), South Atlantic Central Water (SACW), South Atlantic Central Water of tropical origin (SACW\*), Mediterranean Water (MW), Antarctic Intermediate Water (AAIW), North Atlantic Deep Water (NADW).

**Figura 7.** Contribuciones de las distintas masas de agua en las estaciones seleccionadas obtenidas mediante el análisis multiparamétrico óptimo (ver fig. 1 para la localización de las estaciones). Agua Central Noratlántica (NACW), Agua Central Sudatlántica (SACW), Agua Central Sudatlántica de origen tropical (SACW\*), Agua Mediterránea (MW), Agua Antártica Intermedia (AAIW), Agua Noratlántica profunda (NADW).

Hence, eight source water types are identified in the study domain:  $NACW_U$ ,  $NACW_L$ ,  $SACW_U$ ,  $SACW_L$ ,  $SACW^*$ , MW, AAIW, and NADW. However, from the available variables a maximum of six source water types may be resolved as contributing to any observed water mixture. Therefore, we have followed a procedure where the data set has been divided into three groups, according to their density and latitude, so that at any location only six water types contribute to the water mixture (table 2). The first subset includes data above  $\sigma_\theta = 27.32$  and north of  $21^\circ N$ , the second subset groups data points above  $\sigma_\theta = 27.32$  and south of  $21^\circ N$ , and the third subset includes all data below  $\sigma_\theta = 27.32$ . Property-property diagrams in figure 5 show the three groups

origen tropical (Fraga 1974, Voituriez y Chuchla 1978, Manríquez y Fraga 1982). Las características  $\theta$ -S del SACW\* han sido definidas usando las estaciones que presentan el mínimo de salinidad en la capa de las aguas centrales.

A profundidades intermedias se encontraron dos masas de agua: MW y AAIW. Los valores  $\theta$ -S para el MW se calcularon a partir de la climatología WOCE (por sus siglas en inglés: *World Ocean Circulation Experiment*; Gouretski y Koltermann 2004), tomando los valores de temperatura y salinidad correspondientes al máximo de salinidad en la zona delimitada por las latitudes  $12$  y  $49^\circ N$  y desde la costa hasta  $1500$  km mar adentro. Para el AAIW, se utilizó un agua tipo modificada definida por Fraga *et al.* (1985) a unos  $20^\circ N$ , una



**Figure 8.** Water mass contributions at several depth levels as obtained with the optimum multiparameter analysis. North Atlantic Central Water (NACW), South Atlantic Central Water of tropical origin (SACW\*), Antarctic Intermediate Water (AAIW), Mediterranean Water (MW), North Atlantic Deep Water (NADW).

**Figura 8.** Contribuciones de las distintas masas de agua a varios niveles de profundidad obtenidas mediante el análisis multiparamétrico óptimo. Agua Central Noratlántica (NACW), Agua Central Sudatlántica de origen tropical (SACW\*), Agua Antártica Intermedia (AAIW), Agua Mediterránea (MW), Agua Noratlántica profunda (NADW).

into which the data set was divided, as well as the source water types used in the OMP analysis.

This grouping is not arbitrary. The  $\sigma_\theta = 27.32$  level has been taken as the upper limit of NADW influence. By using the lower central waters, the intermediate waters, and the deep water (NACW<sub>L</sub>, SACW<sub>L</sub>, SACW\*, MW, AAIW, and NADW) we find that only 16% of the data above  $\sigma_\theta = 27.32$  have a percentage of NADW higher than 10%, with an absolute maximum of 17%. On the other hand, the central and intermediate layers were analyzed considering only NACW<sub>U</sub>, NACW<sub>L</sub>, SACW<sub>U</sub>, SACW<sub>L</sub>, SACW\*, and MW, to conclude that the 21° N latitude sets a clear boundary

variedad que también fue utilizada por Pérez *et al.* (2001) para estudiar masas de agua en esta región. Finalmente, en las capas profundas de la columna de agua se encontró NADW. Para definir esta masa de agua, se eligió el punto  $\theta$ -S correspondiente al límite superior definido por Castro *et al.* (1998), basado en el límite inferior de influencia del MW (Harvey 1982).

Una vez asignadas las características  $\theta$ -S, hemos determinado los nutrientes y el oxígeno disuelto de las masas de agua tipo utilizando las estaciones de nuestro conjunto de datos que concuerdan con la definición  $\theta$ -S de cada masa de agua. Dos excepciones son el MW, para la cual se utilizó la misma

between SACW\* and MW in the upper part of the water column; i.e., neither MW is found south of this latitude nor SACW\* north of it.

**DISTRIBUTION OF WATER MASSES**

Figures 6, 7, and 8 show the result of the OMP analysis across four sections, four selected stations, and several horizontal levels, respectively. Total SACW is shown as the sum of three end members: SACW<sub>U</sub>, SACW<sub>L</sub>, and SACW\*. Similarly, NACW is shown as the sum of NACW<sub>U</sub> and NACW<sub>L</sub>. Panel 5a shows the contributions of the dominant water masses as a function of depth and latitude. To produce this figure we used all available data; hence, this is a zonally smoothed view of the meridional changes.

The central waters dominate throughout the top 650 m of the water column. The front between SACW and NACW, here defined as where each central water mass contributes about 50%, changes from near 24° N in the top 250 m to beyond 25° N in deeper central layers (figs. 6a, 8). Interleaving between the two central water masses can be observed along the front section (fig. 6b) and south section (fig. 6c), where the SACW contribution decreases below 0.8

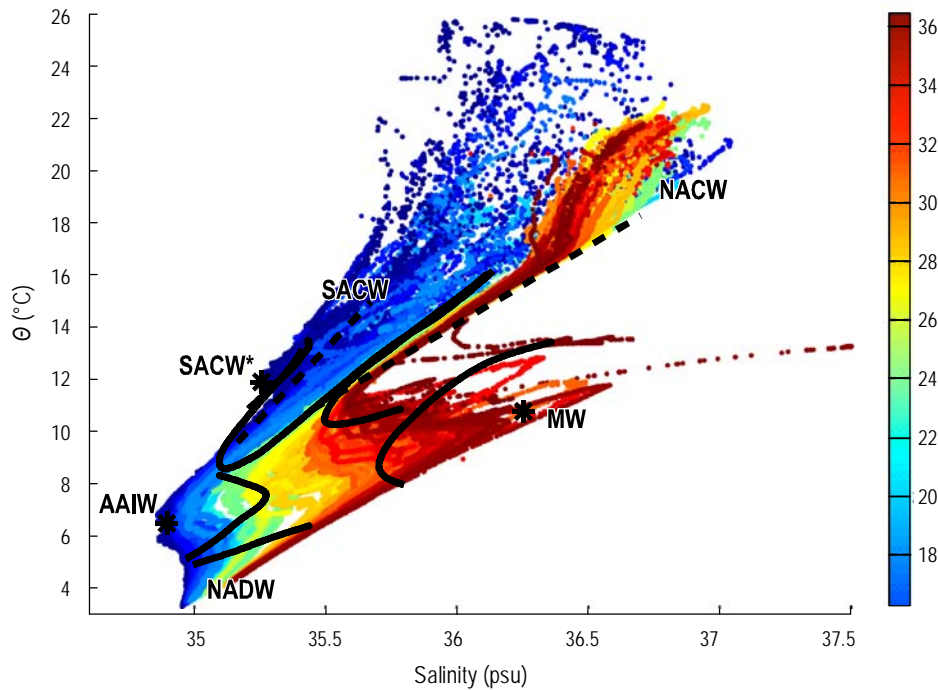
**Table 3.** Coefficients of determination ( $r^2$ ) and standard errors ( $\sigma$ ) of the linear relationship between observations and values recalculated using the set of equations of the optimum multiparameter analysis.

**Tabla 3.** Coeficientes de determinación ( $r^2$ ) y errores estándar ( $\sigma$ ) de la relación lineal entre los parámetros observados y los valores recalculados usando las ecuaciones del análisis multiparamétrico óptimo.

	$r^2$	$\sigma$
$\theta$	0.9993	0.11
S	0.9985	0.02
PO <sub>4</sub>	0.9492	0.14
SiO <sub>4</sub>	0.9242	3.06
O <sub>2</sub>	0.9338	0.50

climatología WOCE, y el NADW, para la cual se utilizaron también los valores determinados por Castro *et al.* (1998).

Así, se identificaron ocho aguas tipo en la región de estudio: NACW<sub>U</sub>, NACW<sub>L</sub>, SACW<sub>U</sub>, SACW<sub>L</sub>, SACW\*, MW, AAIW, y NADW. Sin embargo, con las variables disponibles, el análisis OMP sólo puede resolver seis aguas



**Figure 9.** Temperature-salinity ( $\theta$ -S) diagram with all data points from both cruises. The latitude is color-coded and the 50% contour lines for the contribution of the different water masses are shown. The stars illustrate the Mediterranean Water (MW), Antarctic Intermediate Water (AAIW), and South Atlantic Central Water of tropical origin (SACW\*) water types; the North Atlantic Deep Water (NADW) is out of scale and the dashed lines correspond to the North Atlantic Central Water (NACW) and the South Atlantic Central Water (SACW).

**Figura 9.** Diagrama de temperatura y salinidad ( $\theta$ -S) con los datos de las dos campañas. La escala de color muestra la latitud y las isolíneas la contribución del 50% de cada masa de agua. Las estrellas indican las aguas tipo Agua Mediterránea (MW), Agua Antártica Intermedia (AAIW), y Agua Central Sudatlántica de origen tropical (SACW\*); el Agua Noratlántica profunda (NADW) está fuera de escala y las líneas discontinuas corresponden al Agua Central Noratlántica (NACW) y al Agua Central Sudatlántica (SACW).

in the top 250 m. Another evidence of interleaving can be found at station 41 (fig. 7), where a decrease in SACW contribution concurs with an increase in NACW at 200 m depth. The SACW\* contribution has also been plotted separately. This water mass is centered at 200 m depth and its zonally averaged influence (values as high as 20%) reaches as far north as 19° N (fig. 6a). The SACW\* contribution becomes highest at the southernmost stations over the continental slope (figs. 6c, 8).

From the Strait of Gibraltar to 32° N, in a layer centered at 1200 m depth, we find MW percentage contributions higher than 60%. At some individual stations, such as E5, temperature and salinity are substantially higher (fig. 4), and MW contribution reaches 1 at 1200 m depth (figs. 7, 8), indicating the presence of less diluted MW. AAIW approximately occupies the same depth range as MW, although in the encountering region it lies above MW (fig. 6a). The maximum AAIW percentages are found at 900 m at the southernmost stations (e.g., fig. 8 and stations 54 and 41 in fig. 7), indicative of its southern origin.

The contributions of NADW above 60% are found at depths greater than 1500 m for all stations located in the southern half of the study region. North of 28° N (the latitude of the Canary Islands), percentages above 60% are found only below 1750 m; above this level, MW contributes significantly to the water mixture. This latitudinal abrupt change suggests that NADW reaches the southern waters via the western basin while its path to the easternmost region is influenced by the presence of the Canary Islands and MW.

In addition, in figure 9 we present a  $\theta$ -S diagram obtained using all available data, with data points color-coded as a function of latitude and contour lines for the 50% contribution of the different regional water masses. The color-coded latitude clearly shows the abrupt transition at central layers as compared with the much more smooth changes in intermediate and deep waters. The contour lines also indicate which data points are dominated by one single water mass, turning out to be everywhere except the intermediate layers where the influence of both central and deep waters is appreciable. However, the presence of significant contributions of central and deep waters at intermediate layers possibly is an artifact of the OMP method, since this method does not take into account the anisotropic character of mixing. Instead, the OMP method simply looks at distances in a multi-property space, indistinctly of whether such a distance is along or across isopycnals. In reality, however, epipycnal diffusion greatly exceeds diapycnal diffusion so we may expect that the method may locally overestimate contributions from vertically adjacent water types.

To test the assumption that inorganic nutrients and dissolved oxygen are conservative, we recalculated the observed salinity, temperature, dissolved oxygen, and inorganic nutrient concentrations using the previously described mixing equations and compared them to the original observations.

tipo en la mezcla. Por este motivo, el conjunto de datos se dividió en tres grupos según la latitud y la densidad, de manera que en cada momento sólo seis aguas tipo contribuyen a la mezcla observada (tabla 2). El primer grupo incluye datos por encima de  $\sigma_\theta = 27.32$  y al norte de 21° N, el segundo grupo los datos por encima de  $\sigma_\theta = 27.32$  y al sur de 21° N, y el tercer grupo incluye todos los datos por debajo de  $\sigma_\theta = 27.32$ . Los diagramas propiedad-propiedad de la figura 5 muestran los tres grupos en los que han sido divididos los datos, así como las masas de agua tipo utilizadas en el análisis OMP.

Esta agrupación no es arbitraria. El nivel de densidad  $\sigma_\theta = 27.32$  se ha tomado como el límite superior de influencia del NADW. Al aplicar el análisis OMP a los datos y al usar las aguas tipo NACW<sub>L</sub>, SACW<sub>L</sub>, SACW\*, MW, AAIW, y NADW, se ha encontrado que sólo el 16% de los datos por encima de  $\sigma_\theta = 27.32$  tienen un porcentaje de NADW superior al 10%, con un máximo absoluto del 17%. Por otro lado, se analizaron las aguas centrales e intermedias, considerando NACW<sub>U</sub>, NACW<sub>L</sub>, SACW<sub>U</sub>, SACW<sub>L</sub>, SACW\* y MW, y se concluye que la latitud 21° N marca la separación entre SACW\* y MW en la parte superior de la columna de agua; es decir, el MW no se encuentra al sur de esta latitud ni tampoco lo hace el SACW\* al norte de la misma.

## DISTRIBUCIÓN DE LAS MASAS DE AGUA

Las figuras 6, 7 y 8 muestran el resultado del OMP a través de cuatro secciones, cuatro estaciones, y varios niveles horizontales. El SACW total es la suma de SACW<sub>U</sub>, SACW<sub>L</sub> y SACW\*. Del mismo modo, el NACW es la suma de NACW<sub>U</sub> y NACW<sub>L</sub>. El panel en la figura 5a muestra la contribución de las distintas masas de agua en función de la latitud y la profundidad. Se utilizaron todos los datos disponibles, con lo que esta figura representa un promedio zonal de los cambios latitudinales.

Las aguas centrales dominan en los primeros 650 m de la columna de agua. El frente entre el SACW y el NACW, definido donde cada masa de agua central contribuye aproximadamente al 50%, se desplaza desde los 24° N en los primeros 250 m hasta más allá de los 25° N en las capas centrales más profundas (figs. 6a, 8). Se pueden observar intrusiones laterales entre las dos masas de agua centrales en la sección Front fig. 6b) y South fig. 6c), donde la contribución del SACW desciende por debajo de 0.8 en los primeros 250 m de la columna de agua. Otra evidencia de intrusiones laterales se observa en la estación 41 (fig. 7), donde concurren una disminución en SACW con un aumento de NACW a unos 200 m de profundidad. La contribución del SACW\* también ha sido graficada por separado. Esta masa de agua está centrada a 200 m de profundidad y su influencia (valores de hasta 20%) alcanza los 19° N (fig. 6a). La contribución del SACW\* es máxima en las estaciones situadas más al sur sobre el talud continental.

The high coefficients of determination ( $r^2$ ) and small standard errors ( $\sigma$ ) of the linear relationships between the observations and the recalculated data (table 3) show that the parameters can be regarded as conservative.

Finally, let us briefly consider whether the combined (two-consecutive-year) data set may be affected by interannual variability. First, when plotted in different property-property diagrams, the data did not exhibit any significant differences in the data-overlapping region (north of the Canary Islands). Additionally, the residuals between the observations and the values modeled with the OMP did not change noticeably in the two different years. Furthermore, a close examination of the 31.5 and 32.5° N cross-slope sections, which were surveyed both years, revealed no significant changes except for a moderate increase in MW over the slope during 2007.

## DISCUSSION AND CONCLUSIONS

We used a combined data set from two November cruises, carried out during two consecutive years, to investigate the meridional and zonal changes in water mass characteristics off NW Africa. Our objectives were, first, to characterize the distinct water types present in this region and, second, to carry out an OMP analysis to determine the spatial distribution of the contributions of these different water types.

We found that the surface and central waters, down to about 650 m, are dominated by central waters of northern (NACW) and southern (SACW) origin. The transition between NACW and SACW occurs abruptly in the CVFZ; i.e., along the continental slope the water mass composition changes from about 80% of southern origin to the same proportion of northern origin in about three degrees of latitude. Despite the presence of substantial interleaving along the front, commonly with SACW on top of NACW, we see that the front tilts northwards with depth, indicating a predominant southward propagation of NACW in the top layers of the water column.

In this work we have identified and characterized two southern water varieties: SACW and SACW\*; SACW\* is less saline and more oxygenated than the classical SACW, which is suggestive of a more remote tropical origin with less diluted southern characteristics. Here we have used the more diluted regional variety (SACW) to define those waters south of the front (Tomczak 1981, Klein and Tomczak 1994). In this manner the front shows a sharp change in water mass composition, from northern to southern characteristics.

The SACW\* variety appears to be advected north by the eastern branch of the cyclonic circulation around the Guinea Dome, and is responsible for the scarce renovation of the southern waters in the dome's shadow zone, as suggested by Stramma *et al.* (2005, 2008). This poleward current is modulated by the position of the Intertropical Convergence Zone, intensifying and stretching as far north as 21° N in summer

Entre el estrecho de Gibraltar y los 32° N, se encontraron porcentajes de MW superiores al 60% en una capa centrada a 1200 m de profundidad. En algunas estaciones individuales, como E5 (fig. 4), la temperatura y salinidad fueron considerablemente mayores y la contribución de MW alcanzó valores de 1 (figs. 7, 8), lo que indica la presencia de MW menos diluida. El AAIW ocupó aproximadamente el mismo intervalo de profundidades que el MW; sin embargo, en la región de encuentro de ambas masas de agua, el AAIW se situó por encima del MW (fig. 6a). Los máximos porcentajes de AAIW se observaron a 900 m en las estaciones más al sur (e.g., fig. 8 y estaciones 54 y 41 en la fig. 7), lo cual es indicativo de su origen.

En cuanto al NADW, se encontraron contribuciones por encima del 60% a profundidades superiores a los 1500 m en las estaciones localizadas en la mitad sureña de la región de estudio. Al norte de 28° N, donde se sitúan las islas Canarias, este tipo de agua contribuye con porcentajes igual o por encima del 60% sólo por debajo de los 1750 m; por encima de este nivel, el MW contribuye significativamente a la mezcla. Estos cambios latitudinales sugieren que el NADW alcanza el sur vía la cuenca occidental, mientras que su camino hacia la región más oriental está influenciado por la presencia de las islas Canarias y el MW.

La figura 9 muestra un diagrama  $\theta$ -S con todos los datos disponibles. La escala de color es función de la latitud y las líneas de contorno marcan la contribución del 50% de las distintas masas de agua. La latitud muestra claramente la transición abrupta en las capas centrales en comparación con los cambios mucho más suaves en las capas intermedias. Las líneas de contorno también indican cuáles puntos están dominados por una única masa de agua, lo cual sucede en todas partes excepto en las capas intermedias, donde se aprecia la influencia tanto de aguas centrales como de profundas. Sin embargo, es posible que la presencia de contribuciones significativas de aguas centrales y profundas en estas capas intermedias sea un artefacto del método de análisis, ya que éste no toma en cuenta el carácter anisótropo de la mezcla. El análisis OMP sencillamente mide distancias en un espacio de múltiples propiedades, sin tener en cuenta si la distancia es a lo largo de o a través de superficies isopícnas. En realidad, la difusión epipícnica es muy superior a la difusión diapícnica, con lo que cabe esperar que el método pueda sobreestimar localmente contribuciones de tipos de agua verticalmente adyacentes.

Con el fin de determinar si los nutrientes inorgánicos y el oxígeno disuelto se comportan como conservativos, se recalcularon la salinidad, la temperatura, la concentración de oxígeno disuelto y los nutrientes inorgánicos observados con las ecuaciones de mezcla descritas anteriormente. Los resultados se compararon con las observaciones originales. Los altos coeficientes de determinación ( $r^2$ ) y pequeños errores estándar ( $\sigma$ ) de la relación lineal entre las observaciones y los datos recalculados (tabla 3) indican que los parámetros pueden ser considerados como conservativos.

and weakening and only reaching 17° N in winter (Peterson and Stramma 1991, Siedler *et al.* 1992, Lazaro *et al.* 2005). If we had chosen this second variety to define the dominant water masses in this region (e.g., Manríquez and Fraga 1982), then the front would have appeared as a less abrupt contrast between northern and southern water percentages.

Our work has also shown the complexity of the coastal transition zone, particularly over the continental slope. During our measurements there was significant coastal upwelling as far south as 16° N, but the water mass distribution did not show a southward penetration of NACW through a coastal upwelling jet. However, patches of NACW were found along the front and south sections, possibly resulting from the detachment of eddies or rings in the CVFZ (Pastor *et al.* 2008). The CVFZ was mainly located north of an imaginary line between Cape Blanc and the Cape Verde Islands, particularly along the continental slope where it stretched as far as 24° N. This is likely the result of the penetration of southern waters due to the Poleward Undercurrent, which appears to be an important phenomenon in the area. Actually, it is possible that the Poleward Undercurrent accommodates the SACW\* variety and transfers it along the slope beyond the CVFZ.

Below 600 m and as deep as 1500 m we found two intermediate water masses, again of northern (MW) and southern (AAIW) origin. The transition between MW and AAIW in the intermediate levels is much less abrupt than in the central water layer and occurs north of the Canary Islands. In our observations, MW is centered near 1200 m, slightly deeper than AAIW, centered at depths of about 900 m. The large meridional penetration of AAIW is a result of when the cruises were conducted: Machín and Pelegrí (2009) and Machín *et al.* (2010) reported a strong seasonal signal in the northward penetration of AAIW, which surpasses the Canary archipelago and finds its northernmost extension during late fall. Mediterranean eddies occur to the north of the Canary Islands (we actually found one during the CANOA07 cruise), which resemble the less diluted MW type.

Below 1300 m, at the southernmost stations, and 1800 m, at the northernmost stations, we found the 50% NADW contour, which defines the predominance of this deep water mass. This contour deepens smoothly with latitude except at the location of the Canary Islands where it suddenly plunges some 100 m, suggesting that the deep waters reaching both sides of the archipelago have followed significantly different paths.

## ACKNOWLEDGEMENTS

This research was supported by the Ministry of Science and Innovation (MSI, Spain) through projects CANOA (CTM2005-00444/MAR) and MOC<sup>2</sup> (CTM2008-06438-C02-01). MVP was supported by a JAE-Predoc Assistantship from the Council for Scientific Research (CSIC, Spain), and

Finalmente, es conveniente una breve consideración sobre si el conjunto de datos combinado (dos años consecutivos) puede estar afectado por la existencia de variabilidad interanual. Por una parte, los datos correspondientes a la región donde se realizó un muestreo en ambas campañas no mostraron diferencias significativas cuando se representaron en los diversos diagramas propiedad-propiedad. Además, los residuos entre las observaciones y los valores recalculados no cambiaron apreciablemente para los datos pertenecientes a distintos años. Finalmente, en las secciones perpendiculares a la costa en 31.5 y 32.5° N, que fueron muestreadas ambos años, la única diferencia significativa fue una mayor presencia de MW en el talud durante 2007.

## DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Se utilizó un conjunto con datos de dos campañas oceanográficas, llevadas a cabo en noviembre de dos años consecutivos, con el fin de investigar los cambios latitudinales y zonales de las masas de agua en la región costera del noroeste Africano. Los objetivos principales del estudio fueron, primero, caracterizar las distintas aguas tipo presentes en la región y, segundo, realizar un análisis OMP para determinar la distribución espacial de la contribución de cada masa de agua.

Se encontró que la capa de agua superficial hasta los 650 m está dominada por aguas centrales de origen norte (NACW) y sur (SACW). La transición entre ambas masas de agua ocurre, de forma abrupta, en la CVFZ. A lo largo del talud, la composición cambia de un 80% de SACW al 80% de NACW en tan sólo tres grados de latitud. A pesar de la presencia elevada de intrusiones en el frente, con SACW por encima de NACW, se observó que el frente se encuentra inclinado hacia el norte en profundidad, lo que indica una propagación hacia el sur del NACW en las capas superiores de la columna de agua.

Se identificaron y caracterizaron dos variedades de agua central del sur: SACW y SACW\*. La variedad SACW\* es menos salina y más oxigenada que la variedad clásica, SACW, lo que sugiere que el SACW\* está menos diluida. En el análisis se utilizó la variedad SACW para definir las aguas al sur del frente (Tomczak 1981, Klein y Tomczak 1994). De este modo, el frente muestra un cambio abrupto en la composición de masas de agua al pasar de aguas del norte a aguas del sur.

La variedad SACW\* parece ser advectada hacia el norte por la rama este de la circulación ciclónica alrededor del domo de Guinea, siendo responsable de la renovación de aguas en la zona de sombra del domo, tal como sugieren Stramma *et al.* (2005, 2008). Esta corriente hacia el Polo viene modulada por la posición de la Zona de Convergencia Intertropical: se intensifica y se extiende hasta 21° N durante el verano y se debilita y alcanza sólo hasta 17° N durante el invierno (Peterson y Stramma 1991, Siedler *et al.* 1992, Lazaro *et al.* 2005). Si esta variedad hubiera sido elegida para



JPI was supported by a FPI grant from MSI. We would like to acknowledge the support received from the crew of R/V *García del Cid* and R/V *Sarmiento de Gamboa*. We are deeply grateful to all of them, especially the captains E Otal and D Domínguez, and the technicians JA Pozo, J Salvador, and M Lloret. We would also like to thank FF Pérez for providing useful comments during the OMP analysis and E Vázquez for the dissolved oxygen measurements. We are thankful to the two anonymous reviewers for many useful suggestions and the handling editor, MG Coto, for carefully revising the manuscript.

## REFERENCES

- Ambar I, Howe MR. 1979. Observations of the Mediterranean outflow. I. Mixing in the Mediterranean outflow. *Deep-Sea Res.* 26A: 535–554.
- Arhan M, Colin de Verdière A, Mémary L. 1994. The eastern boundary of the subtropical North Atlantic. *J. Phys. Oceanogr.* 24: 1295–1316.
- Barton E, Hughes P. 1982. Variability of water mass interleaving off NW Africa. *J. Mar. Res.* 40: 963–984.
- Bauer E, Siedler G. 1988. The relative contributions of advection and diapycnal mixing below the sub-tropical salinity maximum. *Deep-Sea Res.* 35A: 811–837.
- Castro CG, Pérez FF, Holley S, Ríos AF. 1998. Chemical characterisation and modelling of water masses in the Northeast Atlantic. *Prog. Oceanogr.* 41: 249–279.
- Dickson R, Brown J. 1994. The production of North Atlantic Deep Water: Sources, rates, and pathways. *J. Geophys. Res.* 99: 12319–12341.
- Fraga F. 1974. Distribution des masses d'eau dans l'upwelling de Mauritanie. *Thetys* 6: 5–10.
- Fraga F, Barton ED, Llinás O. 1985. The concentration of nutrient salts in "pure" North and South Atlantic Central Waters. *International Symposium on the Most Important Upwelling Areas of Western Africa*, Inst. Inv. Pesq., Barcelona, 1: 25–36.
- Gouretski VV, Koltermann KP. 2004. WOCE Global Hydrographic Climatology. *Berichte des Bundesamtes für Seeschifffahrt und Hydrographie Nr. 35/2004*, 50 pp.
- Hansen HP, Koroleff F. 1999. Determination of nutrients. In: Grasshoff K, Kremling K, Ehrhardt M (eds.), *Methods of Seawater Analysis*. Wiley-VCH, 600 pp.
- Harvey J. 1982.  $\theta$ -S relationships and water masses in the eastern North Atlantic. *Deep-Sea Res.* 29: 1021–1033.
- Harvey J, Arhan M. 1988. The water masses of the Central North Atlantic in 1983–1984. *J. Phys. Oceanogr.* 12: 1856–1875.
- Hernández-Guerra A, López-Laatzén F, Machín F, de Armas D, Pelegrí JL. 2001. Water masses, circulation and transport in the Eastern Boundary Current of the North Atlantic Subtropical Gyre. *Sci. Mar.* 65: 177–186.
- Klein B, Tomczak M. 1994. Identification of diapycnal mixing through optimum multiparameter analysis. 2. Evidence for unidirectional diapycnal mixing in the front between North and South Atlantic Central Water. *J. Geophys. Res.* 99: 25275–25280.
- Klein B, Molinari RL, Müller TJ, Siedler G. 1995. A transatlantic section at 14.5N: Meridional volume and heat fluxes. *J. Mar. Res.* 53: 929–957.
- Lazaro C, Fernandes MJ, Santos AMP, Oliverira P. 2005. Seasonal and interannual variability of surface circulation in the Cape definir el agua central del sur en la zona (e.g., Manríquez y Fraga 1982), el frente hubiera mostrado una transición menos abrupta entre aguas del norte y del sur.
- Este trabajo ha mostrado también la complejidad de la zona de transición costera, particularmente sobre el talud. El afloramiento costero ocupaba una banda desde el norte hasta los 16° N, pero la distribución de masas de agua no mostró una penetración hacia el sur de NACW asociada a la corriente en chorro del afloramiento. No obstante, se apreciaron evidencias aisladas de NACW a lo largo de las secciones frente y sur posiblemente como resultado de la separación de anillos o remolinos en la CVFZ (Pastor *et al.* 2008). La CVFZ fue localizada a lo largo de una línea imaginaria entre cabo Blanco y las islas Cabo Verde, alargándose hasta 24° N a lo largo del talud continental. Esta extensión latitudinal es seguramente el resultado de la penetración de aguas del sur con la corriente subsuperficial hacia el Polo; es incluso posible que esta corriente subsuperficial acomode la transferencia de SACW\* más allá de la CVFZ.
- Entre los 600 m y los 1500 m se encontraron de nuevo aguas de origen norte (MW) y sur (AAIW). La transición entre MW y AAIW es mucho menos abrupta que en las capas centrales, y ocurre al norte de las islas Canarias. El MW está centrada en los 1200 m, ligeramente más profunda que el AAIW, centrada sobre los 900 m. La penetración latitudinal hacia el norte del AAIW se debe al momento en que se realizaron las campañas: Machín y Pelegrí (2009) y Machín *et al.* (2010) indicaron una señal fuertemente estacional en el flujo hacia el norte del AAIW, la cual sobrepasa el archipiélago canario y tiene una extensión máxima hacia el norte durante el otoño. Al norte de las islas Canarias se observó un remolino de MW (durante la campaña CANOA07), que presenta características de MW poco diluida.
- Por debajo de los 1300 m en las estaciones más al sur, y por debajo de los 1800 m en las estaciones más al norte, se encontró el contorno de contribución del 50% de NADW. Poco a poco, este contorno se hace más profundo a medida que nos movemos hacia el norte, excepto a la latitud de las islas Canarias, donde se hunde repentinamente unos 100 m. Esto sugiere que el NADW que alcanza cada lado del archipiélago ha recorrido un camino distinto.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido apoyado por el Ministerio de Ciencia e Innovación de España, a través de los proyectos CANOA (CTM2005-00444/MAR) y MOC<sup>2</sup> (CTM2008-06438-C02-01). MVP fue financiada con una beca JAE-Predoc del Consejo Superior de Investigaciones Científicas y JPI con una beca FPI del Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Nos gustaría agradecer el apoyo de los miembros de la tripulación y los técnicos del B/O *García del Cid* y B/O *Sarmiento de Gamboa*, especialmente a los Capitanes E Otal y D Domínguez, y los técnicos JA Pozo, J Salvador y M Lloret. También se agradece a FF Pérez los comentarios

- Verde region from 8 years of merged T/P and ERS-2 altimeter data. *Remote Sens. Environ.* 98: 45–62.
- Llanillo PJ, Pelegrí JL, Duarte CM, Emelianov M, Gasser M, Gourrion J, Rodríguez-Santana A. 2012. Meridional and zonal changes in water properties along the continental slope off central and northern Chile. *Cienc. Mar.* 38: 307–332.
- Machín FJ, Pelegrí JL. 2009. Northward penetration of Antarctic Intermediate Water off northwest Africa. *J. Phys. Oceanogr.* 39: 512–535.
- Machín FJ, Hernández-Guerra A, Pelegrí JL. 2006. Mass fluxes in the Canary Basin. *Prog. Oceanogr.* 70: 416–447.
- Machín FJ, Pelegrí JL, Fraile-Nuez E, Vélez-Belchi P, López-Laatzén F, Hernández-Guerra A. 2010. Seasonal flow reversals of Intermediate Waters in the Canary Current System east of the Canary Islands. *J. Phys. Oceanogr.*, <http://journals.ametsoc.org/doi/pdf/10.1175/2010JPO4320.1>.
- Mackas DL, Denman KL, Bennett AF. 1987. Least-square multiple tracer analysis of water mass composition. *J. Geophys. Res.* 92: 2907–2918.
- Mamayev OI. 1975. *Temperature-Salinity Analysis of World Ocean Waters*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, 374 pp.
- Manriquez M, Fraga F. 1982. The distribution of water masses in the upwelling region off northwest Africa in November. *Rapp. P.V. Reun. Cons. Int. Explor. Mer* 180: 39–47.
- Mittelstaedt M. 1991. The ocean boundary along the northwest african coast: Circulation and oceanographic properties at the sea surface. *Prog. Oceanogr.* 26: 307–355.
- Outdot C, Gerard R, Morin P, Gningue I. 1988. Precise shipboard determination of dissolved oxygen (Winkler procedure) for productivity studies with a commercial system. *Limnol. Oceanogr.* 33: 146–150.
- Pastor MV, Pelegrí JL, Hernández-Guerra A, Font J, Salat J, Emelianov M. 2008. Water and nutrient fluxes off Northwest Africa. *Cont. Shelf Res.* 7: 915–936.
- Pelegrí JL, Aristegui J, Cana L, González-Dávila M, Hernández-Guerra A, Hernández-León S, Marrero-Díaz A, Montero MF, Sangrà P, Santana-Casiano M. 2005. Coupling between the open ocean and the coastal upwelling region off northwest Africa: Water recirculation and offshore pumping of organic matter. *J. Mar. Syst.* 54: 3–37.
- Pelegrí J, Marrero-Díaz A, Ratsimandresy A. 2006. Nutrient irrigation of the North Atlantic. *Prog. Oceanogr.* 70: 366–406.
- Pérez FF, Mintrop L, Llinás O, González-Dávila M, Castro CG, Álvarez M, Körtzinger A, Santana-Casiano M, Rueda M, Ríos A. 2001. Mixing analysis of nutrients, oxygen and inorganic carbon in the Canary Islands region. *J. Mar. Syst.* 28: 183–201.
- Pérez-Rodríguez P, Pelegrí JL, Marrero-Díaz A. 2001. Dynamical characteristics of the Cape Verde frontal zone. *Sci. Mar.* 65(S1): 241–250.
- Peterson RG, Stramma L. 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Prog. Oceanogr.* 26: 1–73.
- tan útiles sobre el análisis OMP, y a E Vázquez por los análisis de oxígeno disuelto. Agradecemos las sugerencias de los dos revisores anónimos, así como al editor invitado, MG Coto, por su revisión cuidadosa del manuscrito.
- 
- Poole R, Tomczak M. 1999. Optimum multiparameter analysis of the water mass structure in the Atlantic Ocean thermocline. *Deep-Sea Res.* I 46: 1895–1921.
- Ríos AF, Pérez FF, Fraga F. 1992. Water masses in the upper and middle North Atlantic Ocean east of the Azores. *Deep-Sea Res.* I 39: 645–658.
- Sangrà P, Pelegrí JL, Hernández-Guerra A, Arregui I, Martín J, Marrero-Díaz A, Martínez A, Ratsimandresy A, Rodríguez-Santana A. 2005. Life history of an anticyclonic eddy. *J. Geophys. Res.* 110(C3), C03021, doi:10.1029/2004JC002526.
- Sangrà P, Auladell M, Marrero-Díaz A, Pelegrí JL, Fraile-Nuez E, Rodríguez-Santana A, Martín JM, Mason E, Hernández-Guerra A. 2007. On the nature of oceanic eddies shed by the Island of Gran Canaria. *Deep-Sea Res.* 54: 687–709.
- Sangrà P, Pascual A, Rodríguez-Santana A, Machín F, Mason E, McWilliams JC, Pelegrí JL, Dong C, Rubio A, Aristegui J, Marrero-Díaz A, Hernández-Guerra A, Martínez-Marrero A, Auladell M. 2009. The Canary Eddy Corridor: A major pathway for long-lived eddies in the subtropical North Atlantic. *Deep-Sea Res.* 56(12): 2100–2114.
- Siedler G, Zangenberg N, Onken R., Morlière A. 1992. Seasonal changes in the tropical Atlantic circulation: Observation and simulation of the Guinea Dome. *J. Geophys. Res.* 97: 703–715.
- Stramma L, Schott F. 1999. The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.* 46: 279–303.
- Stramma L, Huttel S, Schafstall J. 2005. Water masses and currents in the upper tropical northeast Atlantic off northwest Africa. *J. Geophys. Res.* 110(C12), C12006, doi:10.1029/2005JC002939.
- Stramma L, Brandt P, Schafstall J, Schott F, Fischer J, Koertzing A. 2008. Oxygen minimum zone in the North Atlantic south and east of the Cape Verde Islands. *J. Geophys. Res.* 113(C4), C04014, doi:10.1029/2007JC004369.
- Tomczak M. 1981. An analysis of mixing in the frontal zone of South and North Atlantic Central Water off Northwest Africa. *Prog. Oceanogr.* 10: 173–192.
- Tomczak M, Large DGB. 1989. Optimum multiparameter analysis of mixing in the thermocline of the eastern Indian Ocean. *J. Geophys. Res.* 94: 16141–16149.
- Voituriez B, Chuchla R. 1978. Influence of southern Atlantic central water on distribution of salinity and oxygen in northeast tropical Atlantic Ocean. *Deep-Sea Res.* 25: 107–117.
- Zenk W, Klein B, Schröder M. 1991. Cape Verde frontal zone. *Deep-Sea Res.* 38: S505–S530.

*Received July 2010,  
received in revised form July 2011,  
accepted July 2011.*