

## Meridional and zonal changes in water properties along the continental slope off central and northern Chile

### Cambios latitudinales y zonales en los parámetros oceanográficos a lo largo del talud continental en la zona centro y norte de Chile

PJ Llanillo<sup>1,2\*</sup>, JL Pelegrí<sup>1,2</sup>, CM Duarte<sup>2,3</sup>, M Emelianov<sup>1</sup>, M Gasser<sup>1</sup>, J Gourrion<sup>1</sup>, A Rodríguez-Santana<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup> Laboratorio Internacional de Cambio Global (LINCglobal), Consejo Superior de Investigaciones Científicas-Pontificia Universidad Católica (CSIC-PUC), Facultad de Ciencias Biológicas, Edificio N° 210, Of. 425, Pontificia Universidad Católica de Chile, Avenida Bernardo O'Higgins 340 ó Portugal 49, Santiago, Chile.

<sup>3</sup> Instituto Mediterráneo de Estudios Avanzados, CSIC, Carrer Miquel Marqués 21, 07190, Esporles (Illes Balears), Spain.

<sup>4</sup> Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, campus universitario de Tafira, 35017, Las Palmas de Gran Canaria, Spain.

\* Corresponding author. E-mail: llanillo@icm.csic.es

**ABSTRACT.** The Humboldt-09 cruise covered a narrow meridional band along the Chilean continental slope (44–23° S). Here we use physical and biochemical data from a long meridional section (4000 km) and three short zonal sections (100 km) to describe the distribution of the different water masses found in this region. Six water masses were identified: Subantarctic Water (SAAW), Summer Subantarctic Water (SSAW), Subtropical Water (STW), Equatorial Subsurface Water (ESSW), Antarctic Intermediate Water (AAIW), and Pacific Deep Water (PDW). For the first time, a novel set of source water mass properties (or water types) is introduced for SSAW, and nutrient and dissolved oxygen water types are proposed for all the water masses. Optimum multiparameter (OMP) analysis was used through an iterative process to obtain a sound definition of the water types that minimizes the residuals of the method. Both the classic OMP and the quasi-extended OMP models reproduced the data rather well. Finally, the spatial distribution of the different water masses was calculated with the quasi-extended OMP, which is not influenced by the respiration of organic matter. The distribution of the different water masses is presented over the meridional and zonal transects and in property-property diagrams. A smooth meridional transition from subantarctic to tropical and equatorial water masses is observed in this area. This transition takes place in surface, central, and intermediate waters over distances of the order of 1000 km. The meridional transition contrasts with the abrupt zonal changes found in the cross-slope direction, which are of comparable magnitude but over distances of the order of 100 km. Both AAIW and SAAW (fresh and well oxygenated) partially mix with the hypoxic ESSW and, therefore, play an important role in the ventilation of the southern part of the oxygen minimum zone.

**Key words:** quasi-extended optimum multiparameter analysis, water masses, oxygen minimum zone, Humboldt Current System.

**RESUMEN.** La campaña Humboldt-09 abarcó una estrecha franja latitudinal a lo largo del talud continental chileno, de 44 a 23°S. En este trabajo se utilizan los datos físicos y bioquímicos obtenidos a lo largo de una sección latitudinal (4000 km) y de tres secciones zonales cortas (100 km) para describir la distribución de las diferentes masas de agua presentes en la región. Se identificaron seis masas de agua: Agua Subantártica (SAAW, por sus siglas en inglés), Agua Subantártica de Verano (SSAW), Agua Subtropical (STW), Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW), Agua Antártica Intermedia (AAIW) y Agua Profunda del Pacífico (PDW). Se propone, por primera vez, un conjunto completo de propiedades de la masa de agua en origen (o valores tipo) para caracterizar SSAW, así como valores tipo de oxígeno disuelto y nutrientes para todas las masas de agua. Para su correcta definición se empleó el análisis óptimo multiparamétrico (OMP) de manera iterativa, seleccionando el conjunto de valores tipo que generó menores residuos. Tanto el modelo OMP clásico como el cuasi-extendido reproducen de manera fiel las observaciones. Finalmente, se determinó la distribución espacial de las diferentes masas de agua con el OMP cuasi-extendido, que no se encuentra influenciado por la respiración de la materia orgánica. La distribución de las distintas masas de agua se representa en las diferentes secciones y en los diagramas propiedad-propiedad. En esta región se aprecia una progresiva transición latitudinal de masas de agua de origen subantártico a masas de agua de origen tropical y ecuatorial. Esta transición tiene lugar en los 1000 m superiores, en distancias del orden de 1000 km. Esto contrasta con los rápidos cambios observados en las secciones zonales, de magnitud comparable pero en distancias del orden de 100 km. Tanto el AAIW como el SAAW (relativamente menos salinas y bien oxigenadas) se mezclan parcialmente con la hipóxica ESSW y, en consecuencia, juegan un papel importante en la ventilación de la parte austral de la zona de mínimo oxígeno.

**Palabras clave:** análisis óptimo multiparamétrico cuasi-extendido, zona de mínimo oxígeno, masas de agua, Sistema de la Corriente de Humboldt.

## INTRODUCTION

The current system off central and northern Chile is quite complex, with the alternation of equatorward and poleward currents that bring different water masses over a zonal band of a few hundred kilometers (fig. 1). These currents have high meridional coherence, of thousands of kilometers, but are separated in the cross-shore and vertical directions by only tens of kilometers and meters, respectively (Strub *et al.* 1998). In a sense we may talk of large horizontal cells that connect tropical with temperate regions, and the latter with subpolar regions.

In the offshore tropical and temperate regions we find a dominant equatorward current, the Humboldt Current (HC, also named Peru Current) (Silva *et al.* 2009). The HC feeds from the West Wind Drift (WWD), a wind-driven high-latitude broad eastward current (roughly between 40° and 50° S), and runs towards the equator, far from the continental slope, bringing relatively cold waters as far north as the Peru coast (Silva *et al.* 2009). The HC finally feeds into the South Equatorial Current (SEC) and its cold tongue can be appreciated as far as 4° S (Penven *et al.* 2005). In these tropical and temperate regions, near the slope, we also encounter a poleward current system. This poleward flow is commonly split into an undercurrent adjacent to the slope, the Poleward Undercurrent (PU), and a further offshore surface current, the Peru-Chile Counter Current (PCCC) (Strub *et al.* 1998), although it is likely that the latter is simply the surface and offshore manifestation of the former. Near the shelf we also find an equatorward Peru-Chile Coastal Current (PCC), which is wind-driven by the southerly winds and originates off northern and central Chile either from the WWD or from a reversal of the poleward currents (Halpin *et al.* 2004). The PCC waters are directly influenced by upwelling and remain separated from the HC by the poleward current system (PU and PCCC), except during summer at high latitudes (between 35° and 45° S), where the whole region flows equatorward. In the subpolar region the single dominant poleward current, the Cape Horn Current (CHC), experiences substantial buoyancy gain due to high precipitation while being driven by poleward downwelling winds (Halpin *et al.* 2004).

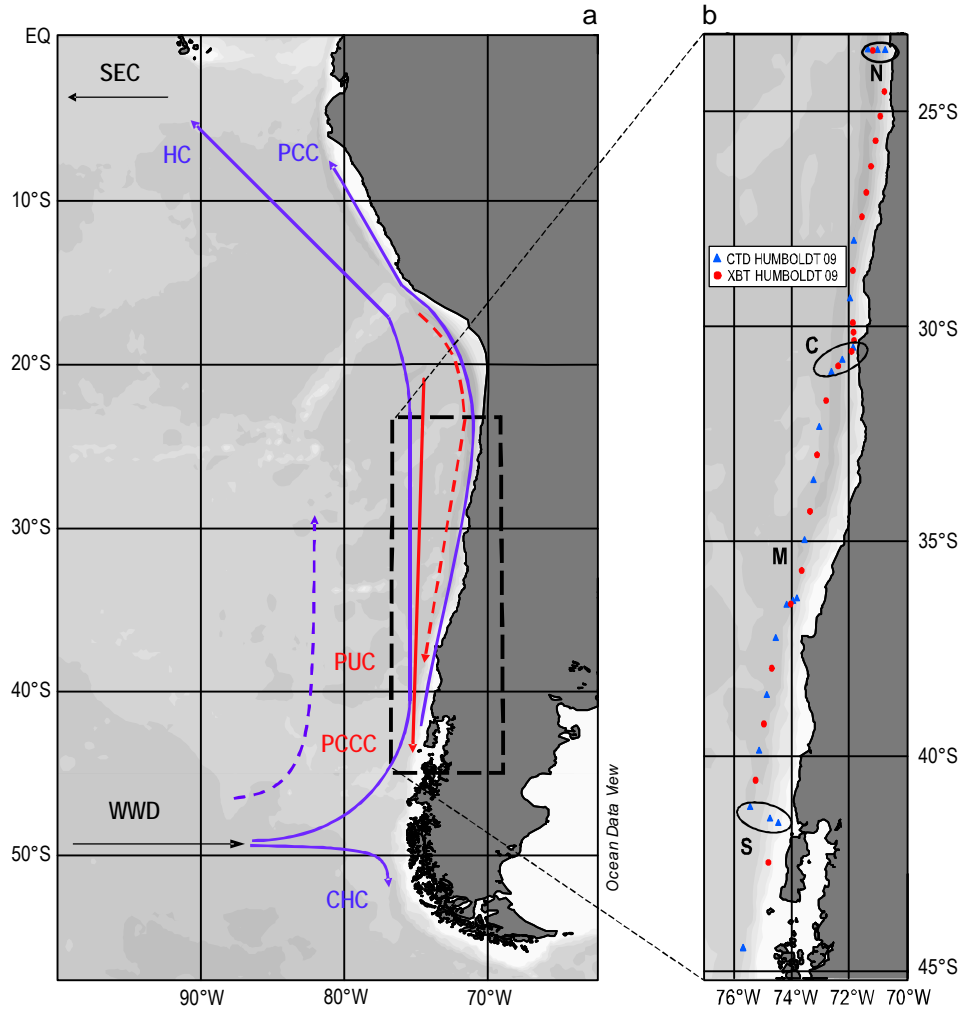
The meridional limits of these currents change seasonally according to the high atmospheric pressure in the southern Pacific. It is likely that some of these currents may locally converge, or even feed from each other, hence forming meridional cells. For example, the near-slope poleward current system (PU and PCCC) may feed the coastal PCC, so that the latter begins further south in summer than during winter (Strub *et al.* 1998). These meridional motions are accompanied by normal-to-shore vertical motions also induced by the southerly winds, in what constitutes an upwelling cell much smaller in size but running over nearly 4000 km (Strub *et al.* 1998). The vertical and horizontal cells are connected: as the wind intensifies the coastal jet gets stronger but upwelling also strengthens, with diapycnal

## INTRODUCCIÓN

El sistema de corrientes oceánicas en la zona centro y norte de Chile es complejo, presentando alternancia de corrientes hacia el ecuador con corrientes hacia los polos. Estas corrientes transportan y ponen en contacto diferentes masas de agua en una banda zonal de unos pocos cientos de kilómetros (fig. 1). Las corrientes presentes en esta zona destacan por su gran coherencia meridional, de miles de kilómetros; sin embargo, ocupan únicamente unas decenas de kilómetros en dirección perpendicular a la costa y unos pocos cientos de metros en profundidad (Strub *et al.* 1998). En cierto sentido, podemos hablar de grandes células horizontales que conectan las regiones tropicales con las regiones templadas y estas últimas con las regiones subpolares.

En las regiones oceánicas tropicales y templadas encontramos una corriente dominante que fluye hacia el ecuador, la Corriente de Humboldt (HC, por sus siglas en inglés, también llamada la Corriente del Perú) (Silva *et al.* 2009). La HC se alimenta de la Corriente de Deriva del Oeste (WWD), una amplia corriente impulsada por el viento hacia el este a altas latitudes (aproximadamente entre 40° y 50° S). La HC discurre hacia el ecuador, lejos de la plataforma continental, transportando aguas relativamente frías tan al norte como la costa de Perú (Silva *et al.* 2009). La HC finalmente desemboca en la corriente Surecuatorial (SEC), y se puede apreciar su lengua de agua fría hasta los 4° S (Penven *et al.* 2005). En estas regiones tropicales y templadas, cerca del talud continental, se encuentra también un sistema de corrientes que fluye hacia los polos. Este flujo hacia el polo se subdivide generalmente en una corriente subsuperficial adyacente al talud, la Corriente Subsuperficial hacia el Polo (PU) y, más mar adentro, la Contracorriente superficial de Perú-Chile (PCCC) (Strub *et al.* 1998). Sin embargo, es probable que esta última corriente no sea más que la manifestación más oceánica y superficial de la anterior. Cerca de la plataforma continental también se encuentra una corriente costera que fluye hacia el ecuador. Es la Corriente Costera de Perú-Chile (PCC), impulsada por los vientos del sur y con origen en la costa del norte y centro de Chile, ya sea proveniente de la WWD o producida por la retroflexión de las corrientes que fluyen hacia el polo (Halpin *et al.* 2004). Las aguas de la PCC están directamente influenciadas por el afloramiento y permanecen separadas de la HC por el sistema de corrientes hacia el polo (PU y PCCC), excepto durante el verano en latitudes altas (entre 35° y 45° S), donde toda la región fluye hacia el ecuador. En la región subpolar encontramos una corriente que fluye hacia el polo bajo los efectos de vientos favorables al hundimiento, se trata de la Corriente del Cabo de Hornos (CHC). Durante su viaje hacia el polo, las aguas transportadas por esta corriente experimentan un incremento sustancial en flotabilidad debido a la elevada precipitación que recibe esta zona (Halpin *et al.* 2004).

Los límites de estas corrientes cambian de latitud según la estación del año y en relación a la posición del anticiclón del



**Figure 1.** (a) Map of the eastern South Pacific with schematic arrows indicative of the patterns of motion of the dominant water masses. The lines sketch the dominant currents (HC: Humboldt Current, PCCC: Peru-Chile Counter Current, PUC: Poleward Undercurrent, PCC: Peru-Chile Coastal Current, CHC: Cape Horn Current, SEC: South Equatorial Current, and WWD: West Wind Drift), the red/purple lines indicating waters of tropical/subpolar origin. The dashed lines correspond to intermediate waters. The solid and dashed lines are suggestive of the main direction of propagation of the upper and intermediate waters. (b) Study area with the hydrographic (blue triangles) and XBT (red circles) stations. The meridional (M) and three zonal sections (northern, N; central, C; and southern, S) are shown.

**Figura 1.** (a) Mapa del Pacífico suroriental con flechas esquemáticas que indican los patrones de circulación de las masas de agua dominantes. Las líneas representan las corrientes dominantes (HC: Corriente de Humboldt, PCCC: Contra-corriente de Perú-Chile, PUC: Corriente subsuperficial hacia el polo, PCC: Corriente costera Perú-Chile, CHC: Corriente del Cabo de Hornos, SEC: Corriente surecuatorial y WWD: Corriente de Deriva del Oeste) con líneas rojas/moradas indicativas de aguas de origen tropical/subpolar. Las líneas discontinuas representan aguas intermedias. Las líneas sólidas y discontinuas son representativas de la dirección principal de propagación de las aguas superficiales, centrales e intermedias. (b) Zona de estudio con las estaciones hidrográficas (triángulos azules) y de XBT (puntos rojos) representadas. Se muestran los transectos zonales (norte N, central C y sur S) y el transecto latitudinal (M).

transfer and offshore transport (from wind-driven Ekman transport and along-shore divergence) likely bypassing the meridional connections. The interplay of these different processes actually controls the meridional and zonal extension of the main water masses in the region. The relevant issue for our study is that we expect to find substantial changes in water masses as we move over short cross-slope distances, as compared with the long along-slope distances necessary to change from subpolar to temperate and tropical waters.

Pacífico sur. Es probable que algunas de estas corrientes puedan llegar a converger localmente, o incluso a alimentarse una a otra, formando en consecuencia células de transporte meridional. Por ejemplo, el sistema de corrientes hacia el polo cercano al talud continental (PU y PCCC) podría alimentar la corriente costera PCC, de tal modo que ésta se inicie más al sur en verano que en invierno (Strub *et al.* 1998). Estos movimientos latitudinales se complementan con un movimiento ascendente y el posterior desplazamiento de

Traditionally, five different water masses have been identified in our study area (Silva *et al.* 2009). Three of these are found down to some 500 m: Subtropical Water (STW), Subantarctic Water (SAAW), and Equatorial Subsurface Water (ESSW). Between 500 and 1000 m we find Antarctic Intermediate Water (AAIW) and, further deep, Pacific Deep Water (PDW). In this study, for the first time we describe an additional water mass off central and southern Chile that results from SAAW modified by relatively fresh water coming from intensified spring runoff and summer melting from the fjord region between 40° and 45° S, here named Summer Subantarctic Water (SSAW).

High-quality hydrographic data of this region are sparse, taken over a few transects. To our knowledge, the major previous cruises in this area are the 1967 Scorpio cruise (Scripps Institution of Oceanography 1969, Stommel *et al.* 1973), the 1969 Piquero cruise (Scripps Institution of Oceanography 1974), the 1974 Krill Leg 4 cruise (Silva and Konow 1975), the 1995 Sonne 102 cruise (Leth *et al.* 2004), and the 2000 Cimar 6 and Cook-2 cruises (Schneider *et al.* 2007). Under the framework of the recently created International Laboratory on Global Change (LINC-Global), the Humboldt-09 cruise was conducted in March 2009 along the eastern South Pacific. One of the targets of this cruise was to contribute to the physical and chemical longitudinal and latitudinal characterization of seawater properties in a 100-km nearshore band between 23° and 44° S (fig. 1). These included not only salinity and potential temperature, whose water type values are reasonably well known for the area, but also inorganic nutrients and dissolved oxygen.

In the following section we introduce the data set obtained along the meridional and zonal transects and carefully revise the classical and quasi-extended optimum multiparameter (OMP) techniques used to determine the contributions of the distinct water masses. In the third section we show the distribution of the physical and biochemical water properties along these transects and present the data points in several property-property diagrams. In the fourth section the relative contributions of the different water masses are calculated using OMP analysis and plotted on the vertical transects and the property-property diagrams. In the final section we sum up the major conclusions on the zonal and meridional interleaving of the different water masses.

## MATERIAL AND METHODS

### Data set

The data set was obtained during the Humboldt-09 cruise on board the Spanish R/V *Hespérides*. The cruise spanned more than 20° of latitude along the continental slope off Chile, from 44° to 23° S (fig. 1). The hydrographic measurements consisted of an along-slope meridional transect (M transect), with conductivity-temperature-depth (CTD) stations spaced about 100 nautical miles (nm) and

agua perpendicularmente a la costa inducido por los vientos del sur, en lo que constituye una célula de afloramiento a una escala mucho más reducida en tamaño pero presente a lo largo de casi 4000 km (Strub *et al.* 1998). Las células horizontales y verticales también pueden conectarse: cuando el viento del sur se intensifica la corriente costera se hace más fuerte; esta intensificación a su vez fortalece el afloramiento, la transferencia diapirica y el transporte de agua hacia altamar (transporte de Ekman y divergencia a lo largo de la costa), probablemente sin que el agua realice todo el recorrido meridional. La interacción de los diferentes procesos descritos controla la extensión latitudinal y zonal real de las masas de agua principales en esta región. La cuestión más relevante en este estudio es la presencia de cambios sustanciales en las masas de agua a medida que se avanza una corta distancia en la dirección perpendicular al talud continental, en contraste con la larga distancia que ha de recorrerse en paralelo a la costa para encontrar un cambio de aguas de origen subpolar a aguas templadas y tropicales.

Tradicionalmente se han identificado cinco tipos diferentes de masas de agua en nuestra zona de estudio (Silva *et al.* 2009), tres de ellas situadas en los primeros 500 m de profundidad. Son el Agua Subtropical (STW, por sus siglas en inglés), el Agua Subantártica (SAAW) y el Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW). Entre 500 y 1000 m encontramos el Agua Intermedia Antártica (AAIW) y, debajo de esta última, se encuentra el Agua Profunda del Pacífico (PDW). En este trabajo se caracterizó una masa de agua nunca antes descrita. Se trata de una masa de agua superficial que se forma en verano en la zona centro y sur de Chile por la mezcla de SAAW con aguas dulces procedentes de la escorrentía intensificada con la fusión estival de los glaciares y neveros en la zona de los fiordos entre 40° y 45° S. La masa de agua resultante se denomina Agua Subantártica de Verano (SSAW).

Existen pocos datos hidrográficos de alta calidad en esta región, y éstos corresponden a unos pocos transectos. Las campañas oceanográficas más importantes realizadas previamente en la zona han sido: la campaña Scorpio en 1967 (Scripps Institution of Oceanography 1969, Stommel *et al.* 1973), la campaña Piquero en 1969 (Scripps Institution of Oceanography 1974), la campaña Krill Leg 4 en 1974 (Silva y Konow 1975), la campaña Sonne 102 en 1995 (Leth *et al.* 2004) y las campañas Cimar 6 y Cook-2 en 2000 (Schneider *et al.* 2007). En el marco del recientemente creado Laboratorio Internacional de Cambio Global (LINC-Global) se llevó a cabo la campaña oceanográfica Humboldt-09 a lo largo del Pacífico suroccidental en marzo de 2009. Uno de los principales objetivos de esta campaña fue la caracterización de las propiedades oceanográficas en una franja costera de unos 100 km de anchura entre los 23° y 44° S. Esta caracterización no sólo incluyó la temperatura potencial y la salinidad, cuyos valores son razonablemente conocidos para la zona, sino también nutrientes inorgánicos y oxígeno disuelto.

En la siguiente sección se presenta el conjunto de datos obtenidos a lo largo de los transectos (zonales y

expendable bathythermographs (XBTs) deployed at intermediate positions in between the CTD stations. Additionally, the survey comprised three short zonal transects with a length of some 50 nm, extending from the continental platform to the deep ocean, and labelled North (N, at 23° S), Central (C, at 31° S), and South (S, at 42° S). Each of these cross-slope transects had three CTD casts.

A total of 22 CTD stations were taken down to 1500 m. At these stations, 12-L water samples from a 24-bottle rosette were analyzed for salinity, dissolved oxygen, and inorganic nutrients. Dissolved oxygen concentrations were calibrated by high-precision Winkler titration using a potentiometric electrode and automated endpoint detection (Mettler Toledo, DL28 titrator). Water samples were frozen at 20 °C below zero and later analyzed with a AA3 Bran-Luebbe Autoanalyzer in order to obtain nutrient concentrations of phosphate, nitrate, nitrite, and silicate. In addition, a total of 23 XBTs were deployed along the cruise track. Throughout the cruise, velocity data in the upper few hundred meters of the water column were collected by the vessel's Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) mounted on the hull. The thermosalinograph and fluorometer continually collected data from the ship's underway system. Meteorological variables were monitored using the on board meteorological sampling system.

In this paper we use the XBT data only to get a high resolution view of the temperature fields and then use the potential temperature, salinity, dissolved oxygen, and inorganic nutrient data from the CTD stations to characterize the meridional and zonal distributions of the water masses present in the region.

### Optimum multiparameter analysis

The OMP method was originally developed by Tomczak (1981) and subsequently improved by Mackas *et al.* (1987). It is an inverse modelling technique widely used to study the distribution of water masses at scales where the properties are approximately conservative (classic approach) (e.g., Tomczak and Large 1989, Pérez *et al.* 2001, Tomczak and Liefink 2006, Silva *et al.* 2009, Pastor *et al.* 2012). In this subsection we briefly revise the basics of the OMP technique, while in the following two subsections we give a more detailed discussion of its implementation for our study area.

The OMP method relies heavily on the definition of the water types or source water mass properties (also named water properties). The water types are determined by the environmental conditions of the region where the water mass was formed, although this region may actually lie quite far away from the study area. Hence, the water types used by the OMP method have to compromise between maintaining the most distinctive characteristics of the original source water mass and still being indicative of this water mass after the transformations that it has suffered while reaching the study area. Two different strategies may be used: the first is to set

latitudinal) y se analiza minuciosamente el método óptimo multiparamétrico (OMP), en sus versiones clásica y cuasi-extendida, utilizado para determinar las contribuciones de las diferentes masas de agua. En la tercera sección se muestra la distribución de las propiedades físicas y biogeoquímicas a lo largo de los transectos y en distintos diagramas propiedad-propiedad. En la cuarta sección se calculan las contribuciones relativas de los diferentes tipos de masas de agua mediante el OMP. Las contribuciones relativas de las distintas masas de agua se representan en transectos verticales y en los diagramas propiedad-propiedad. Finalmente se enumeran las conclusiones finales que versan sobre la distribución e intercalado de las diferentes masas de agua.

## MATERIALES Y MÉTODOS

### Datos

El conjunto de datos utilizado fue obtenido durante la campaña Humboldt-09 a bordo del B/O *Hespérides*. La campaña abarcó más de 20° de latitud a lo largo del talud continental chileno, desde 44° S a 23° S (fig. 1). Las mediciones hidrográficas se realizaron en un transecto latitudinal a lo largo del talud continental (transecto M), con estaciones de medición de conductividad, temperatura y profundidad (CTD) espaciadas unas 100 millas náuticas (nm) y sondas batitermográficas desechables (XBT) lanzadas en la posición intermedia entre cada dos estaciones de CTD. Además, la campaña comprendía tres transectos zonales con una longitud de unas 50 nm cada uno, desde la plataforma continental hasta el océano profundo, que fueron etiquetados como norte (N, a 23° S), central (C, a 31° S) y sur (S, a 42° S). Se realizaron tres CTDs en cada uno de los transectos zonales.

En total se muestrearon 22 estaciones CTD hasta los 1500 m. En cada una de estas estaciones se recogieron muestras de agua en botellas de 12 L, montadas en una roseta de 24 botellas, para su posterior análisis de salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes inorgánicos. Las concentraciones de oxígeno disuelto fueron calibradas con el método Winkler de alta precisión utilizando un electrodo potenciométrico y un detector automatizado (Mettler Toledo, DL28 titrator). Las muestras de agua se congelaron a 20 °C bajo cero para ser posteriormente analizadas con el autoanalizador AA3 Bran-Luebbe a fin de obtener las concentraciones de fosfato, nitrato, nitrito y silicato. Por otro lado, se lanzaron un total de 23 XBTs. A lo largo del trayecto, se recolectaron datos de velocidad de la corriente en los primeros cientos de metros de profundidad por medio de un medidor acústico Doppler de corrientes (ADCP) montado en el casco del barco. El termosalinógrafo y fluorímetro recogieron datos de manera continua desde el sistema colocado en el casco del barco. Además, se monitorearon las variables meteorológicas mediante la estación meteorológica instalada a bordo.

En este trabajo se utilizaron los datos de XBT solamente para obtener una mayor resolución de los campos de

local water types for the subset of variables with the least conservative behavior and the second is to use non-local water types for all variables. The local approach is the basis of the classic OMP method and assumes that all variables behave conservatively in a small enough region. The second approach, with water types defined in the formation region, takes into account the biogeochemical transformations within the water masses as they travel from their source regions.

There are two techniques to consider the biogeochemical changes of the non-conservative properties. The first adds a new unknown to the equations for the non-conservative variables. This unknown accounts for the biogeochemical changes of all non-conservative variables, under the assumption that they change jointly in accordance with the Redfield ratios of degradation of organic matter. This technique is known as the extended OMP analysis (Karstensen and Tomczak 1998, Poole and Tomczak 1999). Its main advantage is that it allows quantifying biogeochemical changes and the estimation of water-mass pseudo-ages, if the oxygen utilization rate (OUR) is well known. The difficulty lies in the fact that OUR is not constant throughout the ocean, changing with time and location; therefore, OUR estimates are subject to substantial errors unless other data, such as chlorofluorocarbon data, are available (Karstensen and Tomczak 1998). The second technique is a refinement of the classic OMP method where the non-conservative variables are converted into conservative variables (Broecker 1974, Anderson 1995, Fraga *et al.* 1998, Pérez *et al.* 2001). Because of the lack of accurate OUR values for our study area, we will use this second technique and leave the use of the extended OMP analysis to future works. Hereafter we will refer to this technique as the quasi-extended OMP analysis, and its implementation is discussed later on.

The OMP method assumes that each parameter sampled at each data point may be expressed as a linear combination of original water masses that are still present in the area (Tomczak and Large 1989). An underlying assumption is that mixing operates equally for all parameters and has no preferential direction; i.e., isotropic turbulent mixing is assumed (Karstensen and Tomczak 1999). Consequently, a linear system of mixing equations with the contributions of the different water masses, or mixing coefficients, can be set up for each single data point. In this system the water mass contributions constitute a set of non-negative mixing coefficients that represent the best linear mixing combination to reproduce the measured value.

The best solution is found using a non-negative least squares method to solve the system of equations (Mackas *et al.* 1987). To solve each system of mixing equations in a physically sensible way there are two principal conditions: (1) the number of source water masses ( $n$ ) should not exceed by more than one the number of variables sampled at every single point ( $n-1$ ), and (2) any data point should be within a region (in any property-property space) encompassed by the water types, i.e., all points are within the spreading path of

temperatura y se utilizó la temperatura potencial, la salinidad, el oxígeno disuelto y los nutrientes inorgánicos obtenidos en las estaciones para caracterizar la distribución latitudinal y longitudinal de las diferentes masas de agua presentes en la zona.

### Análisis óptimo multiparamétrico

El método óptimo multiparamétrico (OMP) fue originalmente desarrollado por Tomczak (1981) y posteriormente mejorado por Mackas *et al.* (1987). Es una técnica de modelado inversa, ampliamente utilizada en el estudio de la distribución de masas de agua a escalas espaciales en las que las propiedades oceánicas pueden considerarse aproximadamente conservativas (enfoque clásico) (Tomczak y Large 1989, Pérez *et al.* 2001, Tomczak y Lieftrink 2006, Silva *et al.* 2009). En este subapartado se revisan los conceptos básicos del método OMP y en los siguientes dos subapartados se realizará una discusión más detallada de la implementación de dicho método en el área de estudio.

El método OMP depende considerablemente de la correcta definición de las propiedades características de las masas de agua de origen (también denominadas valores tipo, del inglés *water types*). Dichas características son adquiridas en la región donde se forma cada masa de agua, la cual puede encontrarse muy lejos del área de estudio. En consecuencia, los valores tipo utilizados por el OMP deben por una parte ser representativos de la masa de agua cuando se formó y, a su vez, permitir identificar dicha masa de agua después de las transformaciones que pueda haber sufrido en su desplazamiento hacia el área de estudio. Se pueden utilizar dos estrategias diferentes: identificar valores tipo locales para el subconjunto de variables no conservativas o definir los valores tipo según las propiedades oceanográficas en la zona de formación de una determinada masa de agua. El método OMP clásico utiliza los valores tipo locales suponiendo que todas las variables se comportarán de una manera conservativa o definir los valores tipo según las propiedades oceanográficas en la zona de formación de una determinada masa de agua a la escala del área de estudio. El segundo enfoque utiliza valores tipo definidos según las propiedades reinantes en la región de formación de la masa de agua, y tiene además en cuenta las transformaciones biogeoquímicas acaecidas en la masa de agua a lo largo de su recorrido desde la zona donde se formó.

Existen dos modalidades que tienen en cuenta los cambios biogeoquímicos en las propiedades no conservativas. En la primera modalidad se añade una nueva incógnita a las ecuaciones de las variables no conservativas. Esta incógnita representa y cuantifica los cambios biogeoquímicos de todas las variables no conservativas, suponiendo que varían de acuerdo a la estequiometría de Redfield para la degradación de la materia orgánica. A esta modalidad se la denomina análisis OMP extendido (Karstensen y Tomczak 1998, Poole y Tomczak 1999). Su ventaja principal es que permite

the source water masses. The mass conservation equation is added to each of these systems, which may sometimes be over-determined.

The first step is to normalize and weight the data and the water types. Each variable is weighted according to the accuracy of its measure (table 1). The normalization process is accomplished by subtracting the mean to the original (measured) value and dividing by its standard deviation. In this manner all variables have maximum variations of the same order so changes of the different variables are directly comparable (Tomczak and Large 1989). The largest weight is placed on the mass conservation equation, because this condition must be met, followed by the potential temperature and salinity equations as these variables are not affected by biogeochemical processes. Once the data are normalized and weighted, an equation is defined for each variable  $C$ :

$$\sum_{i=1}^n C_i X_i = C + R_c \quad (1)$$

where  $X_i$  is the relative contribution (mixing coefficient) of the  $i^{\text{th}}$  water mass (subindex  $i$ ) with water type  $C_i$ , so that the combination of all  $n$  water masses leads to the observed  $C$  value. The combination has a residual,  $R$  (the subindices identify the variable corresponding to each residual), which has to be minimized.

A system of mixing equations is constructed and solved by using the non-negative least squares method for each data point. The number of equations ( $n$ ) is equal to the number of variables plus one, the last necessary equation being mass conservation (i.e., the sum of all mixing coefficients adds up to one). The system of equations may be written in matrix form as:

$$\vec{A} \cdot \vec{x} = \vec{C} + \vec{R} \quad (2)$$

where  $\vec{A}$  is a  $n \times n$  matrix containing the water types corresponding to the  $n-1$  variables plus mass conservation (which takes a value of one) for all  $n$  water masses,  $\vec{x} = (X_1, \dots, X_n)$  is the vector containing the mixing coefficients for all  $n$  water masses,  $\vec{C} = (C_1, \dots, C_{n-1}, C_n = 1)$  is the vector containing the observations and  $\vec{R} = (R_1, \dots, R_{n-1}, R_n = R_{\text{mass}})$  is the vector of the residuals for each variable (including mass).

Finally, an iterative process is employed to minimize the residuals and, consequently, to improve the final solutions. The method is used to recalculate the water types for all variables except potential temperature and salinity, so that we get values that are slightly different from the original ones. With this new set of water types the system of equations is solved once again for each data point and a new set of mixing coefficients and associated residuals is obtained. This iterative process is executed until the associated residuals are minimized or, in other words, when no noticeable

quantificar los cambios biogeoquímicos y el cálculo de las pseudo-edades de las masas de agua si se conoce bien la tasa de utilización de oxígeno (OUR, por sus siglas en inglés). Sin embargo, la dificultad radica en que la OUR no es constante en el océano, variando en el espacio y en el tiempo; en consecuencia, las estimaciones de la OUR están sujetas a errores sustanciales si no existen datos de clorofluorocarbonos para esa zona (Karstensen y Tomczak 1998). La segunda modalidad consiste en un refinamiento del método clásico, por el cual las variables no conservativas son sustituidas por variables conservativas (Broecker 1974, Anderson 1995, Fraga *et al.* 1998, Pérez *et al.* 2001). Debido al desconocimiento de un valor preciso para la OUR en nuestra zona estudio, en este trabajo se utilizó la segunda modalidad, dejando el análisis OMP extendido para trabajos futuros. De aquí en adelante esta técnica será referida como análisis OMP cuasi-extendido y su implementación será discutida con mayor profundidad más adelante.

El método OMP supone que cada parámetro medido en un punto determinado puede expresarse como la combinación lineal de los tipos de agua originales presentes en ese punto (Tomczak y Large 1989). Supone también que la mezcla es igual de eficiente para todos los parámetros y sin una dirección preferencial; es decir, supone una mezcla isotrópica turbulenta (Karstensen y Tomczak 1999). En consecuencia, se puede establecer un sistema de ecuaciones lineales de mezcla con las contribuciones de los diferentes tipos de agua, o coeficientes de mezcla, para cada punto. En este sistema, las contribuciones de las masas de agua típicas constituyen un conjunto de coeficientes de mezcla no negativos que representa la mejor combinación de mezcla lineal de los tipos de agua para reproducir el valor medido.

La mejor solución se obtiene resolviendo el sistema de ecuaciones mediante el método de mínimos cuadrados (Mackas *et al.* 1987). Para resolver cada sistema de ecuaciones de manera que se respete la física en juego se imponen dos condiciones principales: (1) el número de masas de agua ( $n$ ) no debe sobrepasar en más de uno el número de variables medidas ( $n-1$ ) en un determinado punto, y (2) cualquier punto medido debe estar englobado (en cualquier espacio propiedad-propiedad) dentro de los límites marcados por las distintas masas de agua en dicho espacio. Es decir, todos los puntos deben estar dentro de los posibles puntos de trayectoria de las masas de agua de origen. La ecuación de conservación de masas se añade a cada uno de estos sistemas de ecuaciones, de tal modo que a veces pueden estar sobredeterminados.

El primer paso consiste en normalizar y ponderar los datos y los valores tipo. Cada variable se pondera de acuerdo a la exactitud con que puede ser medida (tabla 1). El proceso de normalización se lleva a cabo restando la media al valor original (medido) y dividiendo entre su desviación estándar. De esta manera, todas las variables fluctúan dentro del mismo orden de magnitud, por lo que pueden ser comparadas directamente (Tomczak y Large 1989). Al ponderar las

**Table 1.** Water masses and their characteristic water types ( $\theta$  = potential temperature): Summer Subantarctic Water (SSAW), Subtropical Water (STW), Subantarctic Water (SAAW), Equatorial Subsurface Water (ESSW), Antarctic Intermediate Water (AAIW), and Pacific Deep Water (PDW).**Tabla 1.** Masas de agua y sus valores tipo característicos ( $\theta$  = temperatura potencial).

Water mass	$\theta$ (°C)	Salinity	Oxygen (mL L <sup>-1</sup> ) <sup>a</sup>	Phosphate ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) <sup>a</sup>	Silicate ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) <sup>a</sup>	Nitrate ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) <sup>a</sup>	NO ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) <sup>b</sup>	PO ( $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) <sup>b</sup>	Mass conservation
SSAW	15.0	33.0	5.7	0.66	0.0	2.20	272.63	350.94	–
STW	20.0	35.2	4.88	0.28	0.0	0.07	190.62	270.98	–
SAAW	11.5	33.8	5.83	0.84	0.0	14.88	358.40	417.59	–
ESSW	12.5	34.9	0.1	3.02	24.39	17.12	245.98	452.87	–
AAIW	3.0	34.0	4.7	1.95	9.76	36.70	501.54	507.66	–
PDW	1.75	34.68	1.7	2.92	108.21	39.15	517.42	574.90	–
Weights	24	12	2	2	12	2	6	6	100

<sup>a</sup> These water types are obtained from local values as explained in the text.

<sup>b</sup> From these preformed values of NO and PO it is possible to estimate preformed values of nitrate and phosphate assuming saturated values of oxygen in the formation region as explained in Pérez *et al.* (1993).

improvement is obtained in the next run of the loop. Once this stage is reached we may still further adjust the water types of some variables so that, when viewed in the property-property domains, all data points are approximately encompassed by the water type definitions (condition 2 of the OMP method).

### Implementation of the classic OMP analysis

The classic approach assumes that the biogeochemical changes of oxygen and nutrients within a single water-mass are negligible at a regional scale; i.e., all variables used in the analysis are considered to be conservative (Tomczak 1981). Therefore, a key aspect is to properly identify the thermohaline and biochemical characteristics of the water masses that may be present in the study area.

Two different water type definitions were investigated (table 1). For each of these we carried out two different runs, without and with nitrate, as described further below. The first definition used the values obtained from the Gouretski and Koltermann (2004) climatology; however, this option was found to poorly explain the variance of the data set, particularly salinity and the biochemical (oxygen, phosphate, and nitrate) variables (table 2). This was true regardless of whether nitrate was included or not as an additional variable. Therefore, this first option was rejected. The second option sets local water types through the analysis of our own data set, as described next, and was found to better explain the variance of the data (table 2).

The characteristic values of the variables (potential temperature  $\theta$ , salinity  $S$ , dissolved oxygen  $O$ , phosphate  $P$ , nitrate  $N$ , and silicate  $Si$ ) for each of the six different water masses (STW, SAAW, ESSW, AAIW, PDW, and SSAW) were estimated as follows. The potential temperature and salinity water types were taken from Silva *et al.* (2009). We

variables se asigna el mayor peso (máxima influencia) a la ecuación de conservación de masa, ya que es una condición que ha de cumplirse forzosamente. El segundo mayor peso se asigna a las ecuaciones correspondientes a la temperatura potencial y a la salinidad, ya que estas variables no se ven afectadas por los cambios biogeoquímicos. Una vez normalizados y ponderados los datos, se define un sistema de ecuaciones con una ecuación para cada variable  $C$ :

$$\sum_{i=1}^n C_i X_i = C + R_c \quad (1)$$

donde  $X_i$  representa la contribución relativa (coeficiente de mezcla) de la  $i$ -ésima masa de agua (subíndice  $i$ ) con valor tipo  $C_i$ , de manera que la combinación de las  $n$  distintas masas de agua da como resultado el valor observado  $C$ . Esta estimación tiene un residuo,  $R$ , que ha de ser minimizado (los subíndices identifican a qué variable corresponde cada residuo).

El sistema de ecuaciones de mezcla se resuelve utilizando el método de mínimos cuadrados no negativos para cada punto. El número de ecuaciones ( $n$ ) es igual al número de variables más uno, siendo la última ecuación necesaria, la de la conservación de masa (la suma de todos los coeficientes de mezcla debe ser igual a 1). El sistema de ecuaciones puede escribirse en forma matricial de la siguiente manera:

$$\vec{A} \cdot \vec{x} = \vec{C} + \vec{R} \quad (2)$$

donde  $\vec{A}$  es una matriz  $n \times n$  que contiene los valores tipo de las  $n-1$  variables más un elemento que representa la conservación de masa (que toma el valor de 1) para todas las  $n$  masas de agua,  $\vec{x} = (X_1, \dots, X_n)$  es el vector que contiene los coeficientes de mezcla para todos las  $n$  masas de agua,



further defined the SSAW thermohaline values, as a high-latitude surface water mass, based on the surface data values south of 40° S found in the Humboldt-09 cruise (table 1). After defining the potential temperature and salinity water types, the water masses of the remaining variables ( $O$ ,  $P$ ,  $N$ , and  $S$ ; not available in the literature) are obtained from all data points located close enough to these potential temperature and salinity values; specifically for this calculation we defined windows of  $\pm 0.2$  °C and  $\pm 0.05$ , respectively, around the potential temperature and salinity water types. For each parameter, the mean value of the points within each window is calculated and used as the initial water types for oxygen, phosphate, nitrate, and silicate. The iterative procedure is then carried out, as described in the last section. Finally, the phosphate, silicate, and oxygen water types for AAIW and ESSW were reassessed by plotting the data points in the phosphate-oxygen and silicate-oxygen spaces and determining which slight changes in the water types may ensure that all data points are embraced by these water types (condition 2 of the OMP method) while the residuals remain equally small or even decrease. The final values are given in table 1.

Once the water types are properly characterized, the system of equations (2) may be solved using either five ( $\theta$ ,  $S$ ,  $O$ ,  $P$ , and  $Si$ ) or six variables (now including  $N$ ), thereby setting an overdetermined system of equations for each point. For those runs without nitrate, for example, we have five variables so we may determine the contributions from up to six water masses; i.e., in the system of equations (2),  $\vec{A}$  is a  $6 \times 6$  matrix,  $\vec{X} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6)$  is the vector containing the mixing coefficients for all six water masses,  $\vec{C} = (\theta, S, O, P, Si, 1)$  is the vector containing the observations, and  $\vec{R} = (R_\theta, R_S, R_O, R_P, R_{Si}, R_{mass})$  is the vector of the residuals for each variable (including mass). The water masses to be considered are those discussed in the introduction: SSAW, STW, SAAW, ESSW, AAIW, and PDW (table 1).

The inclusion of nitrate did not serve to improve the results. With this additional variable the variance explained by the model ( $R^2$ ) decreased, and the model reproduced the variance of the nitrate data very poorly (table 2). This is probably due to the non-conservative behavior of this variable and the importance of the denitrification process that takes place at several depths with hypoxic conditions within our study area (Silva *et al.* 2009). Therefore, we discarded the use of nitrate in order to optimize the classic OMP analysis.

After this process we finally managed to minimize the residuals markedly, with minimum residuals corresponding to mass conservation (less than  $10^{-3}$ ) and maximum residuals to oxygen ( $\sim 0.3$  mL L $^{-1}$ ) and phosphate ( $\sim 0.2$   $\mu$ mol kg $^{-1}$ ). This fact indicates that these variables do not actually behave conservatively at the scale of our study area as we had assumed. Their concentrations must therefore be conditioned by the remineralization of organic matter. However, the use of local values for the water types (under the assumption that

$\vec{C} = (C_1, \dots, C_{n-1}, C_n = 1)$  es el vector que contiene las observaciones y  $\vec{R} = (R_1, \dots, R_{n-1}, R_n = R_{mass})$  es el vector de los residuos de cada variable (incluyendo la masa).

Finalmente, se emplea un proceso iterativo con el fin de minimizar los residuos y, en consecuencia, mejorar las soluciones finales. El método se utiliza para recalcular los valores tipo para todas las variables excepto el de la temperatura potencial y la salinidad, de tal modo que a cada aplicación del OMP se obtienen unos valores tipo ligeramente diferentes a los originales. Con este nuevo conjunto de valores tipo se resuelve de nuevo el sistema de ecuaciones lineales para cada punto y se obtiene un nuevo conjunto de coeficientes de mezcla y unos nuevos residuos asociados. Este proceso iterativo se ejecuta hasta que los residuos se han minimizados o, en otras palabras, hasta que no se aprecia mejora alguna al aplicar de nuevo el OMP en un siguiente ciclo. Todavía podría ajustarse ligeramente el valor tipo de alguna variable con el objetivo de que, visto en cada espacio propiedad-propiedad, todos los puntos medidos se encuentren englobados por los valores tipo característicos de las distintas masas de agua (segunda condición).

### Implementación del análisis OMP clásico

El enfoque clásico supone que los cambios biogeoquímicos del oxígeno y los nutrientes, dentro de una determinada masa de agua, son despreciables a escala regional; es decir, todas las variables usadas en el análisis son consideradas conservativas (Tomczak 1981). En consecuencia, un aspecto clave es la correcta identificación de las características termohalinas y biogeoquímicas (o valores tipo) de las distintas masas de agua que pudieran estar presentes en el área de estudio.

Se investigaron dos conjuntos de valores tipo diferentes (tabla 1). Para cada conjunto se ejecutó el modelo en dos modalidades distintas, con y sin nitrato, como se describe más abajo. El primer conjunto de valores tipo se definió a partir de la climatología de Gouretski y Koltermann (2004). Esta opción explica pobremente la varianza de los datos, particularmente para la salinidad y las variables biogeoquímicas (oxígeno, fosfato y nitrato) (tabla 2). Este pobre ajuste del modelo resultó ser independiente de la inclusión o no del nitrato en el análisis por lo que esta primera opción fue desechada. La segunda opción consiste en utilizar valores tipo locales definidos a partir del conjunto de datos medidos en el área de estudio. Esta segunda opción explica mejor la varianza de los datos (tabla 2).

Los valores característicos de las variables (temperatura potencial  $\theta$ , salinidad  $S$ , oxígeno disuelto  $O$ , fosfato  $P$ , nitrato  $N$  y silicato  $Si$ ) para cada una de los seis masas de agua (STW, SAAW, ESSW, AAIW, PDW y SSAW) son estimados de la siguiente manera: los valores tipo de temperatura potencial y salinidad se toman de Silva *et al.* (2009), excepto para el SSAW, cuyos valores termohalinos se definen por primera

**Table 2.** Comparison of the performance of the different optimum multiparameter (OMP) models evaluated. For all models, the explained variance ( $R^2$ ) and the standard deviation of the residuals ( $\sigma$ ) are shown for each variable ( $\theta$  = potential temperature). The explained variance and the standard deviation are related as  $R^2 = \sigma_m^2 / \sigma^2$  where  $\sigma_m^2 = \sum_{j \text{ data}} (\hat{C}_j - \bar{C})^2$  and  $\sigma^2 = \sum_{j \text{ data}} (C_j - \bar{C})^2$ . The summation is over all data points  $C_j$ , the hat denotes the values predicted by the model, and the bar denotes the mean value as calculated with the data.

**Tabla 2.** Comparación de la capacidad predictiva de los diferentes modelos OMP evaluados. Se muestra, para cada variable, la varianza de los datos explicada por cada modelo ( $R^2$ ) y la desviación estándar ( $\sigma$ ) de los residuos ( $\theta$  = temperatura potencial). La varianza explicada se define como  $R^2 = \sigma_m^2 / \sigma^2$  donde  $\sigma_m^2 = \sum_{j \text{ data}} (\hat{C}_j - \bar{C})^2$  y  $\sigma^2 = \sum_{j \text{ data}} (C_j - \bar{C})^2$ . La sumatoria es de los datos  $C_j$ , el tilde representa los valores predichos por el modelo, y la barra representa el promedio calculado a partir de los datos.

Model		$\theta$	Salinity	Oxygen	Silicate	Phosphate	PO	Nitrate	NO
<b>OMP classic</b>	$R^2$	0.9944	0.7225	0.8287	0.9949	0.7800	–	0.1681	–
Water types from climatology	$\sigma$	0.3257	0.1445	24.2613	0.9549	0.2359	–	8.3754	–
<b>OMP classic</b>	$R^2$	0.9943	0.7280	0.8108	0.9968	0.9182	–	0.5839	–
Water types from local values (with nitrate)	$\sigma$	0.3274	0.1451	21.8543	0.8116	0.1943	–	7.7867	–
<b>OMP classic</b>	$R^2$	0.9944	0.7282	0.8119	0.9975	0.9166	–	–	–
Water types from local values (no nitrate)	$\sigma$	0.3279	0.1452	21.8144	0.8070	0.1945	–	–	–
<b>OMP quasi-extended</b>	$R^2$	0.9910	0.7283	–	0.9974	–	0.7941	–	0.7465
Water types from local values (with NO + PO)	$\sigma$	0.4133	0.1450	–	0.8846	–	32.8008	–	50.0614

all variables will behave conservatively at a regional scale), the low weight assigned to the non-conservative parameters, and the minimization of the residuals by means of an iterative process, allow us to obtain an optimized set of mixing coefficients. The final model explained most of the variance of our data set (99.4% of potential temperature data, 72.8% of salinity data, 81.2% of oxygen data, 99.8% of silicate data, and 91.7% of phosphate data) (table 2). This is quite a remarkable performance, simply based on the assumption that our study area is local enough to lessen the importance of biogeochemical cycles.

### Implementation of the quasi-extended OMP analysis

For the quasi-extended approach we define conservative preformed parameters for nitrogen and phosphorous as  $NO = 9.33 \text{ NO}_3 + \text{O}_2$  (Anderson 1995, Fraga *et al.* 1998, Pérez *et al.* 2001) and  $PO = 135 \text{ PO}_4 + \text{O}_2$  (Broecker 1974). The formulation is as in the system of equations (2), but now with the two previously defined additional variables. The procedure includes calculating the  $NO$  and  $PO$  values for each data point with the help of the two above equations. The water types for these two near-conservative variables may be determined using a procedure equivalent to that used for the biochemical variables (i.e., calculating the mean of all available data points within a window around the  $\theta$  and  $S$  water-type values). This is equivalent to using the calculated mixing coefficients ( $X_i$ ) in order to solve the equations

vez en este estudio en base a los datos superficiales registrados durante la campaña Humboldt-09 al sur de los 40° S (tabla 1). Los valores tipo del resto de las variables (oxígeno, fosfato, nitrato y silicato) no están disponibles en la literatura científica por lo que se definen unas “ventanas” de temperatura potencial ( $\pm 0.2^\circ\text{C}$ ) y de salinidad ( $\pm 0.05$ ) alrededor de los valores termohalinos tipo de cada masa de agua. A continuación se calcula el valor tipo para cada variable como el promedio de los valores medidos en todos los puntos localizados dentro de estas “ventanas” definidas para cada masa de agua. Una vez definidos los valores tipo se aplica el mismo procedimiento iterativo explicado en la sección anterior. Como última mejora, los valores tipo de fosfato, silicato y oxígeno para el AAIW y ESSW son refinados de modo que todos los datos medidos estén situados dentro del espacio delimitado por los valores tipo de cada masa de agua (segunda condición del método OMP), siempre y cuando, los residuos no aumenten. Los valores tipo resultantes aparecen en la tabla 1.

Una vez definidos correctamente los valores tipo, el sistema de ecuaciones (2) puede resolverse, bien usando cinco variables ( $\theta$ ,  $S$ ,  $O$ ,  $P$ , y  $Si$ ) o seis (incluyendo el  $N$ ), con lo que se obtiene un sistema de ecuaciones sobredeterminado para cada punto muestreado. Para las simulaciones sin nitrato, por ejemplo, tenemos cinco incógnitas; por lo tanto podemos determinar las contribuciones de hasta seis masas de agua. En el sistema de ecuaciones (2),  $\bar{A}^*$  es una matriz  $6 \times 6$ ,  $\bar{x} = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6)$  es el vector que contiene los

$NO = \sum_{i=1}^6 X_i NO_i$  and  $PO = \sum_{i=1}^6 X_i PO_i$  for the  $(NO_i, PO_i)$  values corresponding to each water type.

Once the water types have been obtained we can recalculate the mixing coefficients of each data point through solving the system of equations set for each data point with the following approximately conservative variables:  $\theta$ ,  $S$ ,  $NO$ ,  $PO$ , and  $Si$  (table 1). We have assumed  $Si$  behaves conservatively in our study area because the classic OMP model explained 99.8% of the  $Si$  variance. From this point on the methodology is the same as in the case of the classic OMP but with the preformed variables replacing nitrate, phosphate, and oxygen. Therefore, both the data and the water types are normalized and weighted (table 1) and the system of equations is solved for each data point by the non-negative least squares method.

The mixing model obtained explains 99.1% of the  $\theta$  variance, 72.8% for  $S$ , 99.7% for  $Si$ , 79.4% for  $PO$ , and 74.6% for  $NO$ . The standard deviation of the  $NO$  residuals ( $50.06 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) is half that expected from the combination of the standard deviations of the oxygen and nitrate residuals ( $9.33 \sigma_N + \sigma_O = 94.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ). In addition, the standard deviation of the  $PO$  residuals ( $32.8 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) is also smaller than the one expected from the combination of the standard deviations of the oxygen and phosphate residuals ( $135 \sigma_P + \sigma_O = 48.1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (table 2).

The quasi-extended OMP analysis allows us to indirectly overcome the problem due to the biogeochemical variability (by using preformed nutrients) and the difficulty of estimating an accurate value for OUR in the study area. In addition, it allows us to include nitrate in the analysis in the form of  $NO$ . Therefore, this method was selected for this work and the set of mixing coefficients obtained is used in the fourth section to depict the participation of the different water masses during the Humboldt-09 cruise, both along the transects and within the different property-property domains.

## RESULTS

### Vertical distribution of properties

In this section we first focus on the distribution of properties on the along-slope (M) and cross-slope (N, C, and S) transects. Figures 2–4 show potential temperature, salinity, phosphate, dissolved oxygen, nitrate, and silicate distributions along these sections. Let us first consider the surface and subsurface layers (top 150 m). In these layers both potential temperature and salinity progressively increase towards tropical latitudes, from 12.5 to 17.5 °C and from 33.5 to 35, respectively (fig. 2), reflecting the transition from subpolar to subtropical and equatorial waters. Subpolar surface waters flow equatorward and enter the southern part of our study area, carrying the influence of the subpolar low pressure systems. This water mass comes from a region where stormy conditions reduce the amount of solar radiation reaching the

coeficientes de mezcla para las seis masas de agua,  $\vec{C} = (\theta, S, O, P, Si, 1)$  es el vector de las observaciones y  $\vec{R} = (R_\theta, R_S, R_O, R_P, R_{Si}, R_{mass})$  es el vector de los residuos de cada variable (incluyendo masa). Las masas de agua que han sido consideradas son las que fueron discutidas en la introducción: SSAW, STW, SAAW, ESSW, AAIW y PDW (tabla 1).

La inclusión del nitrato en el análisis no ayuda a mejorar los resultados. De hecho, la varianza explicada por el modelo ( $R^2$ ) decrece, además de que el modelo reproduce muy pobremente la varianza de los datos de nitrato (tabla 2). Esto se debe probablemente al comportamiento no conservativo de esta variable y a la importancia de la desnitrificación presente a diferentes profundidades con condiciones hipóxicas en el área de estudio (Silva *et al.* 2009). En consecuencia, se decidió prescindir del nitrato con el fin de optimizar el análisis OMP clásico.

Después de este proceso los residuos son minimizados ostensiblemente, el mínimo residuo corresponde a la conservación de masa (menos de  $10^{-3}$ ) y los máximos al oxígeno ( $\sim 0.3 \text{ mL L}^{-1}$ ) y al fosfato ( $\sim 0.2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ). Esto implica que estas variables no se comportan realmente de manera conservativa a la escala del área de estudio; por lo tanto, sus concentraciones están condicionadas por la remineralización de la materia orgánica. Sin embargo, el uso de valores tipo locales para las masas de agua (asumiendo que todas las variables se comportaban de una manera conservativa a una escala regional), combinado con la poca influencia (bajo peso) asignada a las variables no conservativas y la minimización de los residuos por medio del proceso iterativo, permitió obtener un conjunto optimizado de coeficientes de mezcla con el método clásico. El modelo resultante explica la mayor parte de la varianza del conjunto de datos utilizado (99.4% de la temperatura potencial, 72.8% de la salinidad, 81.2% del oxígeno, 99.8% del silicato y 91.7% del fosfato) (tabla 2), lo que implica un buen ajuste del modelo, a pesar de que se omiten los ciclos biogeoquímicos.

### Implementación del análisis OMP cuasi-extendido

Para el enfoque cuasi-extendido se definieron parámetros preformados para el nitrógeno,  $NO = 9.33 \text{ NO}_3 + \text{O}_2$  (Anderson 1995, Fraga *et al.* 1998, Pérez *et al.* 2001), y para el fosfato,  $PO = 135 \text{ PO}_4 + \text{O}_2$  (Broecker 1974). En la nueva formulación del sistema de ecuaciones (2) se sustituyeron las variables no conservativas por estas dos variables preformadas. Al principio del procedimiento se calcularon las variables preformadas  $NO$  y  $PO$  para cada punto con la ayuda de las dos ecuaciones antes descritas. Los valores tipo para estas dos variables cuasi-conservativas pueden determinarse de la misma manera que para las variables biogeoquímicas (calculando la media de todos los puntos localizados dentro de una ventana alrededor de los valores tipo de  $\theta$  y  $S$ ). Esto es equivalente a utilizar de los coeficientes de

sea surface and high rates of precipitation drastically reduce the salinity of the surface layers (Silva *et al.* 2009). On the other hand, the Pacific Subtropical Anticyclone favors high rates of evaporation and solar radiation over the northern (tropical) part of our study area, thus increasing the salinity and potential temperature of the surface layers, giving birth to STW. The warm ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ) and salty ( $\sim 35.2$ ) subtropical waters contrast with the much fresher ( $\sim 33.8$ ) and cooler ( $\sim 11.5^\circ\text{C}$ ) subpolar waters (fig. 2).

The above description is consistent with the dominant advective patterns for the near-surface waters in the central region of Chile: SAAW is brought equatorward by the HC and encounters STW, which is advected poleward from tropical latitudes by the PCCC (Strub *et al.* 1998). SAAW is believed to subduct below STW near  $35^\circ\text{S}$ , originating a shallow salinity minimum (Leth *et al.* 2004). In the southern end of the study area we also find surface waters with remarkably low values of salinity ( $\sim 33$ ) and high oxygen content ( $\sim 5.7\text{ mL L}^{-1}$ ) (figs. 2, 3). This fresh water mass is SSAW, or subantarctic waters modified through high spring precipitation and high fresh water discharge from the fjords of southern Chile probably due to summer glacier melting.

In the potential temperature-salinity M section (fig. 2) we may also appreciate a subsurface high salinity core in the northern part of the section that appears to stretch southward with the PU and which is progressively eroded over distance. This high salinity core occupies the top 500 m of the water column along section N; however, this core appears constrained to the near-slope region of section C and is missing in section S (fig. 2). This high salinity core presents extremely low values of dissolved oxygen ( $< 0.5\text{ mL L}^{-1}$ ) and high concentrations of nutrients like phosphate ( $> 2.5\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) or nitrate ( $> 40\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (figs. 3, 4). It is remarkable how the oxygen minimum zone (OMZ) perfectly fits the core of high salinity. The high nutrient content is due to the remineralization of organic matter, which reduces the oxygen concentration in the water. The water mass characterized by these features is known as ESSW, centered at 200–250 m depth and flowing poleward along its density level while progressively mixing and losing its identity. ESSW is no longer recognizable in transect S at  $41.6^\circ\text{S}$  (figs. 2, 3, 4).

At intermediate depths (400–1200 m) and along the M transect we observe a tongue characterized by low salinity ( $\sim 34.25$ ) and potential temperature ( $\sim 3^\circ\text{C}$ ) values, that seems to spread northward from  $44^\circ\text{S}$ . This tongue advects AAIW, a quite homogeneous water mass formed by winter convection north of the Antarctic Polar Front (Hartin *et al.* 2011), which has been reported to fully cross the equator before completely losing its identity (Strub *et al.* 1998). AAIW has a relative maximum of dissolved oxygen ( $3\text{--}4.7\text{ mL L}^{-1}$ ) and a relative minimum of nutrients ( $P < 2\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ,  $N < 30\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ , and  $Si < 50\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (figs. 3, 4).

Below AAIW, at depths greater than 1200 m, we find a more homogeneous water mass: PDW. We sampled this water mass from 1200 to 1500 m depth, the maximum cruise

mezcla antes calculados ( $X_i$ ) y resolver las ecuaciones

$$NO = \sum_{i=1}^6 X_i NO_i \text{ y } PO = \sum_{i=1}^6 X_i PO_i \text{ para los valores tipo } (NO_i, PO_i) \text{ correspondientes a estos parámetros preformados.}$$

Una vez obtenidos los valores tipo, se pueden calcular de nuevo los coeficientes de mezcla resolviendo el sistema de ecuaciones para cada punto con el siguiente conjunto de variables aproximadamente conservativas:  $\theta$ ,  $S$ ,  $NO$ ,  $PO$  y  $Si$  (tabla 1). Suponemos que el  $Si$  se comporta de manera conservativa en nuestra zona de estudio ya que el OMP clásico explicó correctamente el 99.8% de su varianza. De aquí en adelante se sigue la misma metodología que para el análisis OMP clásico pero sustituyendo al nitrato, fosfato y oxígeno con las variables preformadas. En consecuencia, se normalizan y ponderan tanto los datos medidos como los valores tipo (tabla 1) y el sistema de ecuaciones fue resuelto para cada punto muestreado por el método de mínimos cuadrados no negativos.

El modelo de mezcla obtenido explica el 99.1% de la varianza de  $\theta$ , el 72.8% de  $S$ , el 99.7% de  $Si$ , el 79.4% de  $PO$  y el 74.6% de  $NO$ . La desviación estándar de los residuos de  $NO$  ( $50.06\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) es la mitad de la esperada si se combinan las desviaciones estándar de los residuos del oxígeno y del nitrato ( $9.33\text{ }\sigma_N + \sigma_O = 94.5\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ). Además, la desviación estándar de los residuos de  $PO$  ( $32.8\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) es también menor a la que cabría esperar de las desviaciones estándar de los residuos del oxígeno y del fosfato ( $135\text{ }\sigma_P + \sigma_O = 48.1\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (tabla 2).

El método OMP cuasi-extendido permite indirectamente (utilizando nutrientes preformados) superar el problema debido a la variabilidad biogeoquímica y la dificultad de estimar un valor apropiado para la OUR en la región de estudio. Además, permite incluir al nitrato en el análisis bajo la forma de  $NO$ ; en consecuencia, se decidió utilizar este método para el presente trabajo. El conjunto de coeficientes de mezcla obtenidos con este OMP cuasi-extendido se utiliza más adelante para caracterizar la contribución de las diferentes masas de agua en los datos de la campaña Humboldt-09, tanto a lo largo de los transectos como en los diferentes espacios propiedad-propiedad.

## RESULTADOS

### Distribución vertical de propiedades

Las figuras 2, 3 y 4 muestran la distribución de temperatura potencial, salinidad, oxígeno disuelto, fosfato, nitrato y silicato a lo largo de los transectos latitudinal (paralelo al talud, M) y zonales (perpendiculares al talud; N, C y S). En la superficie y en las capas subsuperficiales (primeros 150 m), tanto la temperatura potencial como la salinidad aumentan progresivamente hacia latitudes tropicales, de  $12.5$  a  $17.5^\circ\text{C}$  y de  $33.5$  a  $35$ , respectivamente (fig. 2), reflejando la transición de aguas subpolares a aguas subtropicales y ecuatoriales. Las aguas subpolares superficiales fluyen hacia el ecuador y entran en la parte sur del área de estudio,

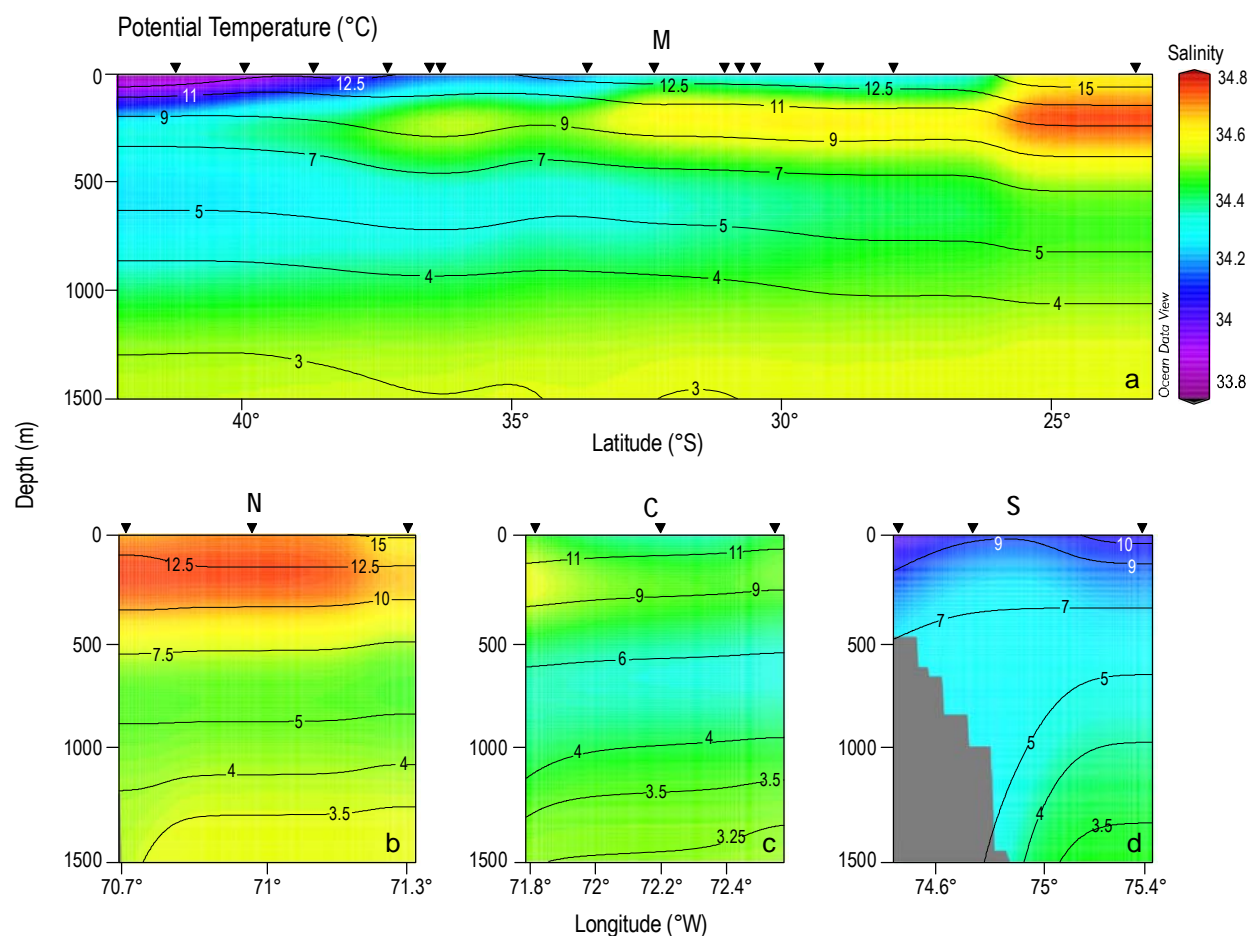
sampling depth. PDW is supposed to fill the remaining water column down to the sea bottom (Leth *et al.* 2004). This water mass is saltier ( $\sim 34.68$ ) and slightly colder ( $\sim 1.75\text{--}3^\circ\text{C}$ ) than the overlying intermediate waters. It is also characterized by low dissolved oxygen ( $\sim 1.7\text{ mL L}^{-1}$ ) and high nutrient concentration ( $P > 2.5\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ,  $N > 40\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ), being remarkably abundant in silicate ( $>80\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (figs. 2, 3, 4). In our region, PDW has been reported to move poleward (Shaffer *et al.* 2004) at velocities always less than  $0.5\text{ m s}^{-1}$  (Leth *et al.* 2004).

### Property-property diagrams

It is useful to examine how all data points are distributed in several property-property diagrams (fig. 5). In the potential temperature-salinity diagram (fig. 5a), we can distinguish the presence of the six water masses at different density levels. Three surface water masses (STW, SSAW, and SAAW) appear within layers of potential density ( $\sigma_\theta$ ) less than  $26\text{ kg m}^{-3}$ . STW presents potential temperature and salinity values

transportando en sus propiedades oceánicas la influencia de los sistemas de baja presión subpolares. Estas aguas provienen de una región donde las abundantes tormentas reducen la radiación solar incidente en la superficie del mar y las altas tasas de precipitación reducen la salinidad de las capas superficiales (Silva *et al.* 2009). Por otro lado, el anticiclón del Pacífico subtropical favorece una elevada tasa de evaporación inducida por la intensa radiación solar recibida en la zona norte (tropical) de la región estudiada. Estas condiciones favorecen un incremento de la salinidad y la temperatura potencial de las capas superficiales, dando origen a la STW. Se aprecia un claro contraste entre las aguas cálidas ( $\sim 20^\circ\text{C}$ ) y saladas ( $\sim 35.2$ ) de origen tropical y las aguas subpolares, mucho menos saladas ( $\sim 33.8$ ) y más frías ( $\sim 11.5^\circ\text{C}$ ) (ver fig. 2).

La anterior descripción es consistente con los patrones de circulación dominantes en las aguas superficiales de la zona central de Chile: La HC transporta SAAW hacia el norte (ecuador) y se encuentra con STW que fluye hacia el sur con la PCCC (Strub *et al.* 1998). Se cree que el SAAW subduce



**Figure 2.** Distribution of potential temperature (contour lines) and salinity (coloured) along the (a) meridional (M), (b) northern (N,  $23.6^\circ\text{S}$ ), (c) central (C,  $30.8^\circ\text{S}$ ), and (d) southern (S,  $41.6^\circ\text{S}$ ) sections; in the zonal sections the longitude axis increases in the offshore direction.

**Figura 2.** Distribución de la temperatura potencial (líneas de contorno) y salinidad (en color) a lo largo de las secciones (a) latitudinal (M), (b) norte (N,  $23.6^\circ\text{S}$ ), (c) central (C,  $30.8^\circ\text{S}$ ) y (d) sur (S,  $41.6^\circ\text{S}$ ); en las secciones zonales el eje longitudinal incrementa mar adentro.



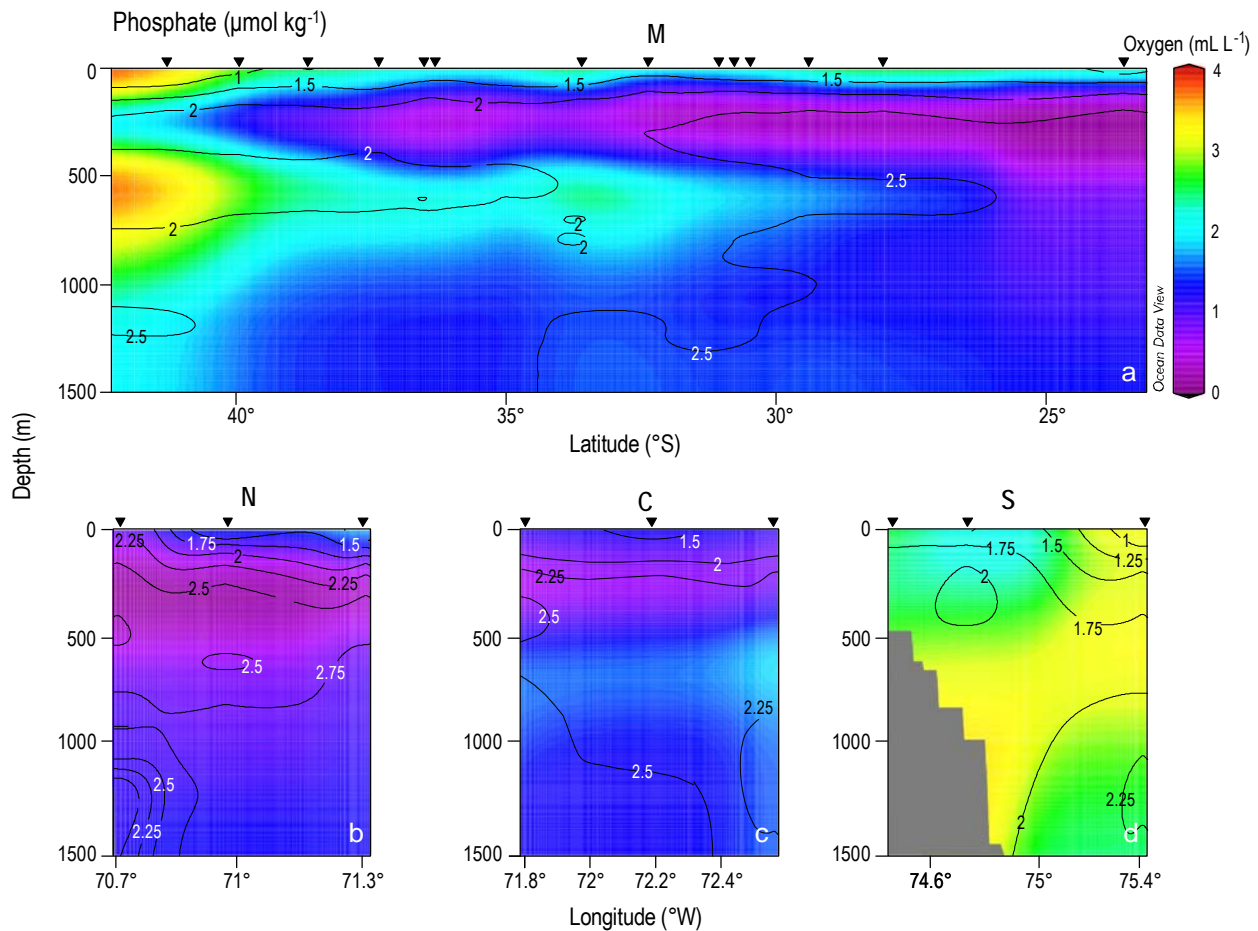
higher than SSAW and SAAW and is located in the northern part of our study area. In addition, SSAW is fresher and warmer than SAAW; both water masses are predominant in the southern part of the study area.

At around  $\sigma_\theta = 26.25 \text{ kg m}^{-3}$  we find ESSW, saltier and slightly colder than SSAW, mainly located in the northern part of the area analyzed. Further deep ( $\sigma_\theta = 27.2 \text{ kg m}^{-3}$ ) and in the southern part of this region we find AAIW, colder and fresher than ESSW. Finally, at greater depths ( $\sigma_\theta > 27.4 \text{ kg m}^{-3}$ ) we find PDW, characterized by the lowest potential temperatures found in our study area and salinity values above those of AAIW (fig. 5a, table 1).

In figure 5b we may distinguish some characteristic properties of the six water masses found in our study area. The two subantarctic surface water masses present relatively high values of dissolved oxygen, in contrast with the hypoxia found in ESSW. AAIW also has relatively high oxygen concentrations, indicative of the proximity of its formation region north of the Antarctic Polar Front (Hartin *et al.* 2011).

bajo STW aproximadamente a  $35^\circ \text{S}$ , originando un mínimo somero de salinidad (Leth *et al.* 2004). En la parte más austral de la región estudiada aparecen aguas con valores especialmente bajos de salinidad ( $\sim 3$ ) y alto contenido en oxígeno ( $\sim 5.7 \text{ mL L}^{-1}$ ) (figs. 2, 3). Se trata de aguas subantárticas modificadas por la gran precipitación de primavera y la descarga de abundante agua dulce durante la fusión estival de los fiordos del sur de Chile, dando origen a la SSAW.

En la sección M de temperatura potencial-salinidad (fig. 2) puede apreciarse un núcleo subsuperficial de alta salinidad en la parte norte de la sección que se extiende hacia el sur con la PU y que se va erosionando progresivamente con la distancia. Este núcleo de alta salinidad ocupa los primeros 500 m de la columna de agua a lo largo de la sección N. Sin embargo, aparece restringido a la zona próxima al talud continental en la sección C y desaparece completamente en la sección S (fig. 2). Este núcleo presenta a su vez valores extremadamente bajos de oxígeno disuelto ( $< 0.5 \text{ mL L}^{-1}$ ) y altas concentraciones de nutrientes (fosfato  $> 2.5 \mu\text{mol kg}^{-1}$ , nitrato  $> 40 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (figs. 3, 4). Es notable



**Figure 3.** Distribution of phosphate (contour lines) and oxygen (coloured) along the (a) meridional (M), (b) northern (N,  $23.6^\circ \text{S}$ ), (c) central (C,  $30.8^\circ \text{S}$ ), and (d) southern (S,  $41.6^\circ \text{S}$ ) sections; in the zonal sections the longitude axis increases in the offshore direction.

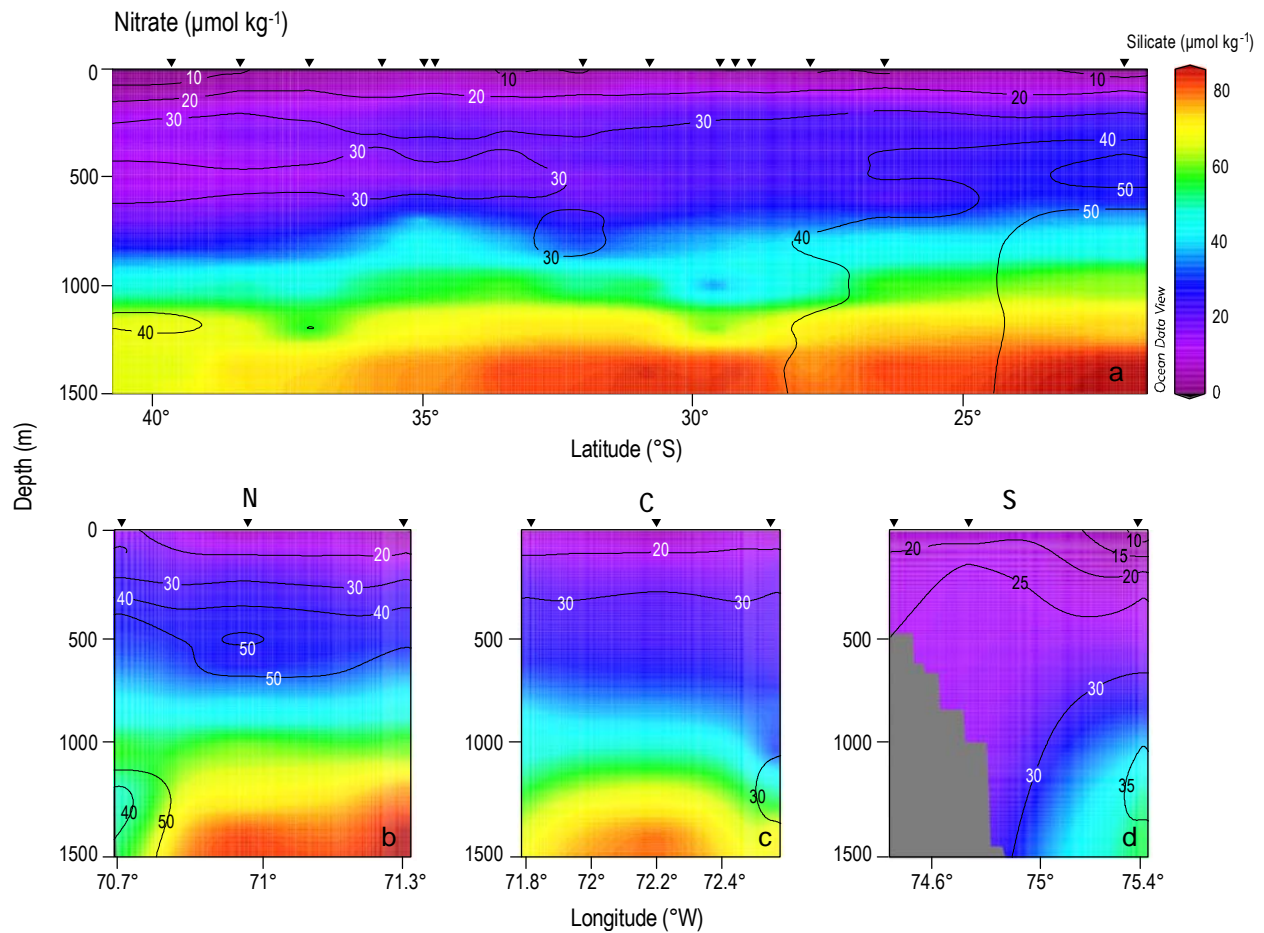
**Figura 3.** Distribución del fosfato (líneas de contorno) y del oxígeno (en color) a lo largo de las secciones (a) latitudinal (M), (b) norte (N,  $23.6^\circ \text{S}$ ), (c) central (C,  $30.8^\circ \text{S}$ ) y (d) sur (S,  $41.6^\circ \text{S}$ ); en las secciones zonales el eje longitudinal incrementa mar adentro.

With regards to the phosphate content, we find that deep waters have higher content than surface waters, with STW being less rich in phosphate than SSAW and SAAW. ESSW and PDW present the highest phosphate concentration among the six water masses found in the area (fig. 5b, c). Finally, PDW presents the largest silicate concentrations, with values at least five times greater than those found in other water masses (fig. 5d).

In figure 5c we can appreciate the nitrate to phosphate Redfield ratio (16:1), as shown by the straight line formed by the data points. The outliers are explained by the hypoxic conditions mainly found within the ESSW layers (located below and to the right of the straight line representing the Redfield ratio and with  $\sigma_\theta = 26.25 \text{ kg m}^{-3}$ ) and at some PDW points ( $\sigma_\theta > 27.4 \text{ kg m}^{-3}$ ). This is because the Redfield ratio (N:P) is defined for the degradation of organic matter in oxygenated waters and, consequently, it is not valid in hypoxic environments where denitrification occurs. In quasi-anoxic conditions there is not enough dissolved oxygen

cómo la zona de mínimo oxígeno (OMZ, por sus siglas en inglés) coincide perfectamente con este núcleo de elevada salinidad. El alto contenido de nutrientes se debe a la remineralización de la materia orgánica, proceso que a su vez reduce la concentración de oxígeno disuelto en el agua. La masa de agua que responde a estas características es el ESSW y su núcleo está localizado entre 200 y 250 m de profundidad. El ESSW fluye hacia el polo a lo largo de sus isopícnas características, mezclándose y perdiendo progresivamente su identidad. El ESSW desaparece completamente en el transecto S a  $41.6^\circ \text{ S}$  (figs. 2, 3, 4).

A profundidades intermedias (400–1200 m) y a lo largo del transecto M se observa una lengua caracterizada por bajos valores de salinidad ( $\sim 34.25$ ) y temperatura potencial ( $\sim 3^\circ \text{ C}$ ), que parece extenderse hacia el norte desde los  $44^\circ \text{ S}$ . Esta lengua transporta AAIW, una masa de agua bastante homogénea formada por convección invernal al norte del Frente Polar Antártico (Hartin *et al.* 2011). Se ha documentado que el AAIW cruza el ecuador antes de perder completamente sus propiedades (Strub *et al.* 1998); presenta un



**Figure 4.** Distribution of nitrate (contour lines) and silicate (coloured) along the (a) meridional (M), (b) northern (N,  $23.6^\circ \text{ S}$ ), (c) central (C,  $30.8^\circ \text{ S}$ ), and (d) southern (S,  $41.6^\circ \text{ S}$ ) sections; in the zonal sections the longitude axis increases in the offshore direction. **Figura 4.** Distribución del nitrato (líneas de contorno) y del silicato (en color) a lo largo de las secciones (a) latitudinal (M), (b) norte (N;  $23.6^\circ \text{ S}$ ), (c) central (C;  $30.8^\circ \text{ S}$ ) y (d) sur (S;  $41.6^\circ \text{ S}$ ); en las secciones zonales el eje longitudinal incrementa mar adentro.

in the water to maintain the oxidation of organic matter. In this situation the degradation of organic matter is maintained by nitrate, which plays the role of dissolved oxygen as electron acceptor and is finally reduced to elemental nitrogen in a few steps (Thomas 1966, Anderson *et al.* 1982, Codispoti and Christensen 1985). In the first of these steps nitrate is reduced to nitrite, a situation that generates local nitrate minimum and nitrite maximum values (Wooster *et al.* 1965, Zuta and Guillen 1970, Diaz 1984, Codispoti and Christensen 1985). This nitrate deficit disrupts the N:P molar ratio presenting a high deviation from the 16:1 ratio slope found when the organic matter is remineralized under aerobic conditions (Silva *et al.* 2009).

## DISCUSSION

### Property-property diagrams per water mass

Both the classic OMP method, with water types for oxygen and nutrients estimated using the cruise data (discarding nitrate from the analysis), and the quasi-extended OMP method, with the aid of preformed water types for the non-conservative variables determined from our own data set, performed equally well at explaining the data variance and presented similar standard deviations (table 2). It is fair to recognize that both methods showed less skill at reproducing the salinity data (73% in both cases). The quasi-extended version could only reproduce 75% and 70% of the *PO* and *NO* variables, respectively, apparently because of the denitrification process taking place in the study area. Nevertheless, the plots obtained with these methods were very similar. Therefore, and because the quasi-extended method has the advantage of avoiding the problem associated with the respiration of organic matter, we used it to calculate the contribution of the different water masses to each of the data points gathered during the Humboldt-09 cruise.

Through the OMP analysis we defined the water types of the six water masses that are present in the study area. Their characteristic water types can be appreciated in figures 6–8, where we plotted the data set in several property-property spaces. In the potential temperature *vs* salinity diagrams (fig. 6) we may appreciate the gradation of characteristics as a function of water depth, with STW, SAAW, and SSAW occupying the near surface layers, ESSW and AAIW the intermediate layers, and PDW the deep layers. However, there is also a remarkable gradation in latitude, with STW (ESSW) being very salty and warm as compared with SSAW/SAAW (AAIW). In the phosphate *vs* oxygen diagram (fig. 7), the most striking difference appears in the subsurface layers, with ESSW having much less oxygen and much more phosphate than AAIW. In the silicate *vs* oxygen diagram (fig. 8), all waters appear very poor in silicate except for PDW and, to a lesser degree, ESSW.

The results confirm that the points located near a red star (representing a water mass defined by its characteristic water

máximo relativo de oxígeno disuelto ( $3\text{--}4.7\text{ mL L}^{-1}$ ) y un mínimo relativo de nutrientes ( $P < 2\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ,  $N < 30\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$  y  $Si < 50\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (figs. 3, 4).

Por debajo del AAIW, a profundidades mayores de 1200 m, encontramos una masa de agua muy homogénea; se trata de PDW. En esta campaña la profundidad máxima de muestreo fue de 1500 m, por lo que esta masa de agua sólo pudo ser muestreada de 1200 a 1500 m de profundidad. Se cree que el PDW ocupa el resto de la columna de agua desde los 1200 m de profundidad hasta el fondo del océano (Leth *et al.* 2004). Esta masa de agua es más salada ( $\sim 34.68$ ) y ligeramente más fría ( $\sim 1.75$  a  $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) que las aguas intermedias suprayacentes; también se caracteriza por valores bajos de oxígeno disuelto ( $\sim 1.7\text{ mL L}^{-1}$ ) y alta concentración de nutrientes ( $P > 2.5\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ,  $N > 40\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ,  $Si > 80\text{ }\mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (figs. 2, 3, 4). A estas profundidades se ha documentado que el PDW fluye hacia el polo (Shaffer *et al.* 2004) a velocidades siempre inferiores a  $0.5\text{ m s}^{-1}$  (Leth *et al.* 2004).

### Diagramas propiedad-propiedad

Resulta de utilidad examinar como se distribuyen los puntos muestreados en varios diagramas propiedad-propiedad (fig. 5). En el diagrama temperatura potencial-salinidad se pueden apreciar seis masas de agua distintas, cada una situada a una densidad característica (fig. 5a). En las capas con densidad potencial menor a  $26\text{ kg m}^{-3}$  encontramos las tres masas de agua superficiales (STW, SSAW y SAAW); STW predomina en el norte del área estudiada, contrastando con SSAW y SAAW por sus altos valores de temperatura potencial y salinidad. Por otro lado, el SSAW resulta ser más cálida y dulce que el SAAW, siendo ambas masas de agua las predominantes en el sur de la región estudiada.

En densidades alrededor de  $\sigma_{\theta} = 26.25\text{ kg m}^{-3}$  encontramos ESSW, más salada y ligeramente más fría que el SSAW. El ESSW se encuentra localizada principalmente en el norte de la zona estudiada. A mayor profundidad ( $\sigma_{\theta} = 27.2\text{ kg m}^{-3}$ ) y en la parte más austral de la zona de estudio, encontramos AAIW, más fría y dulce que el ESSW. Finalmente, a mayores profundidades ( $\sigma_{\theta} > 27.4\text{ kg m}^{-3}$ ), la protagonista es el PDW, que se caracteriza por tener la temperatura potencial más baja registrada en el área de estudio y valores de salinidad por encima de los típicos del AAIW (fig. 5a, tabla 1).

En la figura 5b pueden distinguirse algunas de las propiedades características de las seis masas de agua presentes en la zona estudiada. Las dos masas de agua superficiales subantárticas presentan valores relativamente elevados de oxígeno disuelto, en claro contraste con la hipoxia característica del ESSW. El AAIW también presenta altos valores de oxígeno disuelto, lo que es indicativo de la proximidad del área de estudio a su zona de formación, al norte del Frente Polar Antártico (Hartin *et al.* 2011). En lo referente al contenido en fósforo, y como era de esperar, las aguas profundas



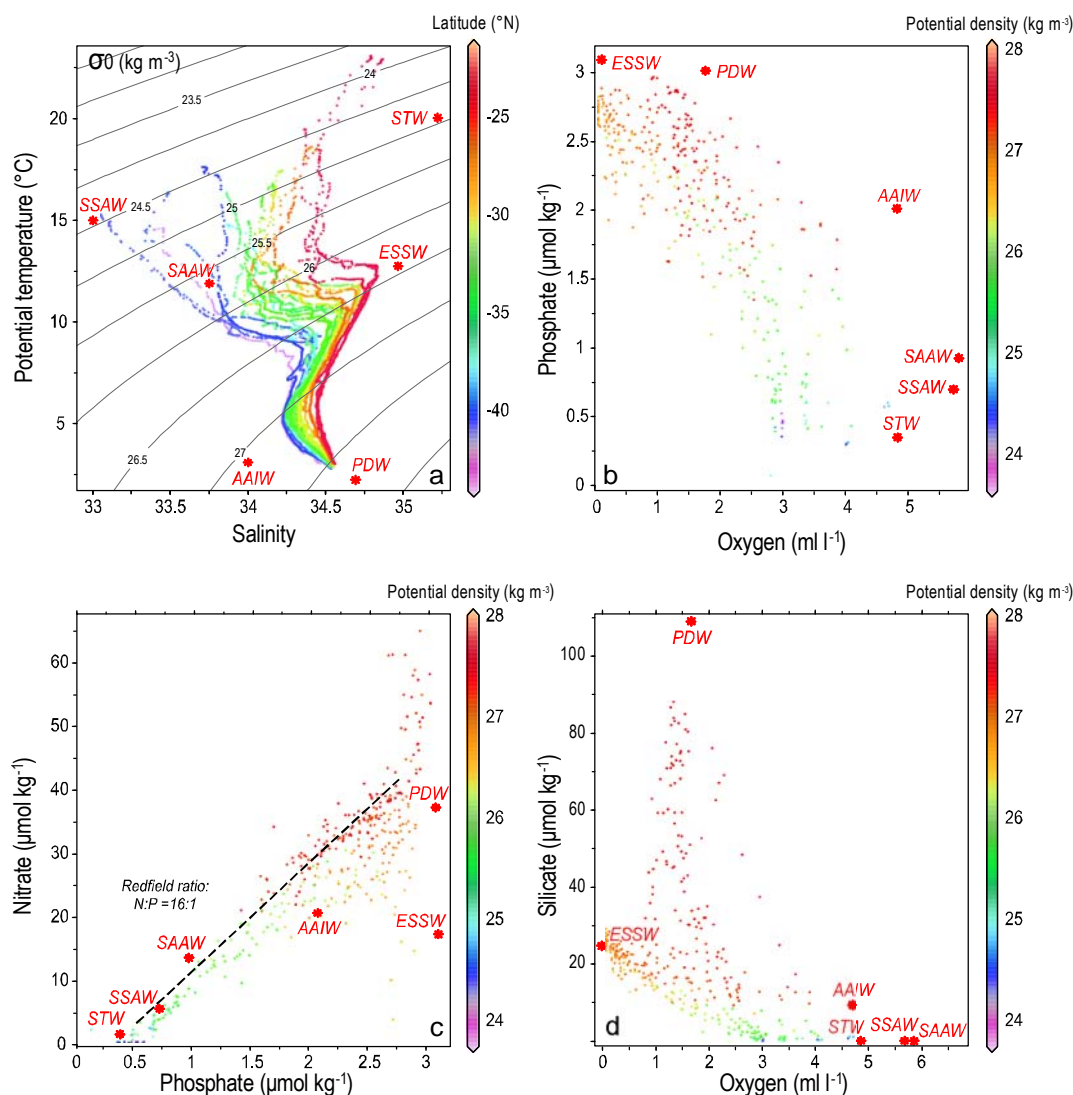
types) have a substantially high participation of the corresponding water mass. This gives confidence in the high skill of the OMP technique to properly identify the contributions of the different water masses to any data point.

### Vertical distributions per water mass

The quasi-extended OMP analysis gives the contributions of the different water masses to each data point. Given this information we may plot the contributions of each water mass along the meridional and zonal Humboldt-09 transects.

presentan una mayor abundancia que las aguas superficiales, siendo entre estas últimas el STW la menos rica en fosfato. El ESSW y el PDW presentan el mayor contenido en fosfato de todas las masas de agua presentes en la zona (fig. 5b, c). Por último, cabe destacar que los mayores valores de silicato se encuentran en el PDW, llegando a quintuplicar los valores encontrados en las otras masas de agua (fig. 5d).

En la figura 5c se puede apreciar la relación de Redfield entre nitrato y fosfato (16:1), representada por la recta a lo largo de la cual se alinean la mayoría de los puntos. Los valores atípicos (puntos muy alejados de dicha recta) se explican



**Figure 5.** Water types (red stars), from table 1, represented in different property-property diagrams: (a) potential temperature-salinity diagram, with contours of potential density ( $\sigma_\theta$ ) shown as grey contour lines and latitude color-coded; (b) phosphate-oxygen diagram; (c) nitrate-phosphate diagram, with the Redfield ratio shown by a dashed line; and (d) silicate-oxygen diagram. Potential density is color coded in (b), (c) and (d).

**Figura 5.** Valores tipo (asteriscos rojos) detallados en la tabla 1, representados en los diferentes diagramas propiedad-propiedad: (a) temperatura potencial-salinidad con contornos de densidad potencial (líneas en gris) y la latitud en código de colores; (b) fosfato-oxígeno; (c) nitrato-fosfato (la recta punteada representa la estequiometría de Redfield); y (d) silicato-oxígeno. Densidad potencial representada en código de colores en (b), (c) y (d).

Figures 9 and 10 provide useful information regarding the spreading path of the water masses and how much mixing they undergo during their propagation.

In figure 9 we show the distribution of the contributions of all water masses for transect M. The upper plot zooms on the surface layers, from the sea surface down to 180 m, and the lower one covers from 180 to 1400 m depth. In the surface layers we find SSAW, its core located between 43° and 36° S and stretching throughout section S (fig. 10), which is eroded during its equatorward path as it mixes with SAAW and STW. We identify SAAW below SSAW, at depths between 40 and 120 m in the nearshore region of section S and reaching even deeper (180 m) further offshore in that section (fig. 10). This water mass is advected northward by the HC (Strub *et al.* 1998), mixing along its path with SSAW and STW, and subducting under STW at the Subtropical Convergence, beyond 35° S (Silva *et al.* 2009). On its way it rises over ESSW, occupying a thinner layer, from 20 m down to 70 m in section C and thinning to a width of about 20 m in section N. SAAW shoals in the nearshore region, displacing STW to the west in sections C and N (fig. 10).

At the surface STW is found spanning a layer up to 45 m thick between 23° and 26° S (fig. 9). STW is advected poleward from tropical latitudes by the PCCC (Silva *et al.* 2009). During its path it encounters a wedge of mixed SSAW and SAAW that separates STW from the Chilean coast, diverting STW further west (fig. 10). Remnants of STW are still found at 75.3° W in zonal transect C but it completely disappears in transect S. Below STW we find ESSW, at 23° S (fig. 9); this water mass occupies about 500 m of the water column, with a relatively shallow core at 140 m depth. ESSW moves south as a wedge advected by the PU (Leth *et al.* 2004). On its poleward path, its upper part sinks under SAAW from 70 m in section C to 140 m nearshore in section S (fig. 10). ESSW progressively loses its identity by mixing with SAAW on its upper side and with AAIW on its bottom side (figs. 9, 10).

At intermediate depths (from 400 to 1000 m) we identify AAIW (figs. 9, 10), originated north of the Antarctic Polar Front (Hartin *et al.* 2011). AAIW is advected equatorward and is progressively eroded as it mixes with quite salty ESSW on its upper side and with PDW on its bottom side. AAIW is found along the whole meridional transect and in the three zonal transects, although its participation in the water column at tropical latitudes is relatively small. Its core is located at 600 m depth and spreads northward like a tongue of relatively fresh water with salinity values between 34.1 and 34.3. In addition, AAIW presents a local maximum of dissolved oxygen (3–4.7 mL L<sup>-1</sup>) and a relative minimum of nutrients ( $P < 2 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ,  $N < 30 \mu\text{mol kg}^{-1}$ ) (figs. 3, 4).

Under AAIW, at depths greater than 1200 m, we find PDW. Here we may only appreciate the upper tip of this water mass as it extends down to about 3000 m (Silva *et al.* 2009). This water mass slowly flows south while it mixes with AAIW on its upper side (figs. 9, 10). PDW presents values of nutrients/oxygen higher/lower than AAIW (table 1).

por las condiciones hipóxicas presentes en las capas con ESSW ( $\sigma_\theta = 26.25 \text{ kg m}^{-3}$ ) y en algunos puntos muestreados pertenecientes al PDW ( $\sigma_\theta > 27.4 \text{ kg m}^{-3}$ ). La desviación se debe a que la estequiometría de Redfield (N:P) fue definida para la degradación de la materia orgánica en aguas bien oxigenadas y, en consecuencia, no es válida en ambientes hipóxicos donde la desnitrificación tiene lugar. En condiciones cuasi-anóxicas no hay suficiente oxígeno disuelto en el agua para mantener la oxidación de la materia orgánica, entonces el nitrato juega el papel del oxígeno disuelto, convirtiéndose en receptor de electrones y reduciéndose en una serie de pasos hasta llegar a nitrógeno elemental (Thomas 1966, Anderson *et al.* 1982, Codispoti y Christensen 1985). Primero el nitrato es reducido a nitrito, generando un mínimo local de nitrato y un máximo local de nitrito (Wooster *et al.* 1965, Zuta y Guillen 1970, Diaz 1984, Codispoti y Christensen 1985). Este déficit de nitrato altera la proporción molar N:P, generando una clara desviación de la pendiente de la proporción 16:1 característica de la remineralización de la materia orgánica en condiciones aeróbicas (Silva *et al.* 2009).

## DISCUSIÓN

### Diagramas propiedad-propiedad para cada masa de agua

Tanto el método OMP clásico, que utiliza los valores tipo locales para oxígeno y nutrientes (descartando el nitrato para el análisis), como el método OMP cuasi-extendido basado en el uso de variables preformadas, funcionaron bien a la hora de explicar la varianza de los datos, presentando desviaciones estándares similares (tabla 2). Sin embargo, ambos métodos reprodujeron de una manera menos precisa la variabilidad de los datos de salinidad (73% en ambos casos). La versión cuasi-extendida sólo puede reproducir el 75% de *PO* y el 70% de *NO*, aparentemente a causa del proceso de desnitrificación presente en el área de estudio. Sin embargo, las distribuciones obtenidas con ambos métodos son muy similares. En consecuencia, y dado que el método cuasi-extendido tiene la ventaja de evitar el problema generado por la oxidación de la materia orgánica, se utilizó dicho método para el cálculo de las contribuciones de las distintas masas de agua en cada uno de los puntos muestreados durante la campaña Humboldt-09.

Mediante el análisis OMP se definieron los valores tipo característicos de las seis masas de agua presentes en el área de estudio. Dichos valores pueden ser apreciados en las figuras 6, 7 y 8, en las cuales se ha representado el conjunto de datos en los distintos espacios propiedad-propiedad. En los diagramas de temperatura potencial vs salinidad (fig. 6) puede apreciarse el cambio progresivo de las características en función de la profundidad, donde el STW, SAAW y SSAW ocupan las capas superficiales, el ESSW y el AAIW los niveles intermedios, y el PDW en las capas profundas. También se aprecia un cambio progresivo en las propiedades a lo largo de la latitud, con STW (ESSW) comparativamente

## CONCLUSIONS

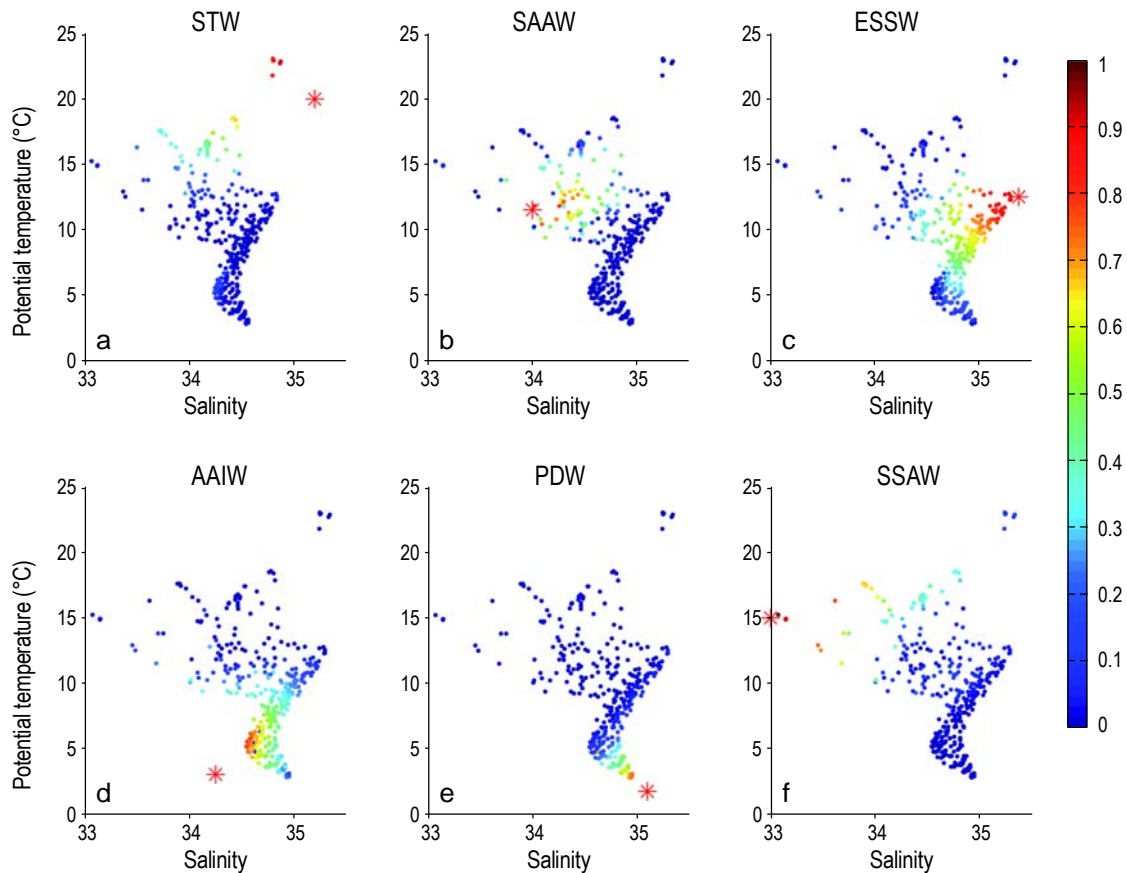
The analysis of potential temperature, salinity, inorganic nutrients, and dissolved oxygen data from the Humboldt-09 cruise indicates the presence of different surface, intermediate, and deep water masses that progressively mix and erode along their particular spreading paths. The distribution of the physico-chemical properties along the meridional and zonal transects clearly shows quite stratified water masses that are approximately distributed in four different water strata: near surface (down to ~60 m), central (60 m to about 200–400 m), intermediate (200–400 m to about 1200 m), and deep waters (below 1200 m). One main feature is that surface and central waters, formed within the very large South Pacific subtropical gyre, occupy a relatively thin water stratum as compared with intermediate and deep waters of extratropical origin. This contrasts with other east boundary systems, such as the Canary, Oregon, and Benguela current systems, where central waters reach greater depths (Tomczak and Godfrey 2003).

muy saladas y cálidas frente al SSAW/SAAW (AAIW). En el diagrama de fósforo vs oxígeno (fig. 7) la diferencia más notable aparece en las capas subsuperficiales, con ESSW que presenta mucho menos oxígeno y mucho más fósforo que el AAIW. En el diagrama silicato vs oxígeno (fig. 8) todas las masas de agua presentan valores muy bajos de silicato excepto el PDW y, en menor medida, el ESSW.

Los resultados confirman el correcto funcionamiento del análisis OMP ya que los puntos localizados cerca de los valores tipo de una determinada masa de agua, presentan altas contribuciones de dicha masa de agua. Este hecho da confianza respecto a la capacidad del método OMP para determinar las contribuciones de las distintas masas de agua en cada punto muestreado.

### Distribuciones verticales para cada masa de agua

El análisis OMP cuasi-extendido proporciona las contribuciones de las diferentes masas de agua en cada punto

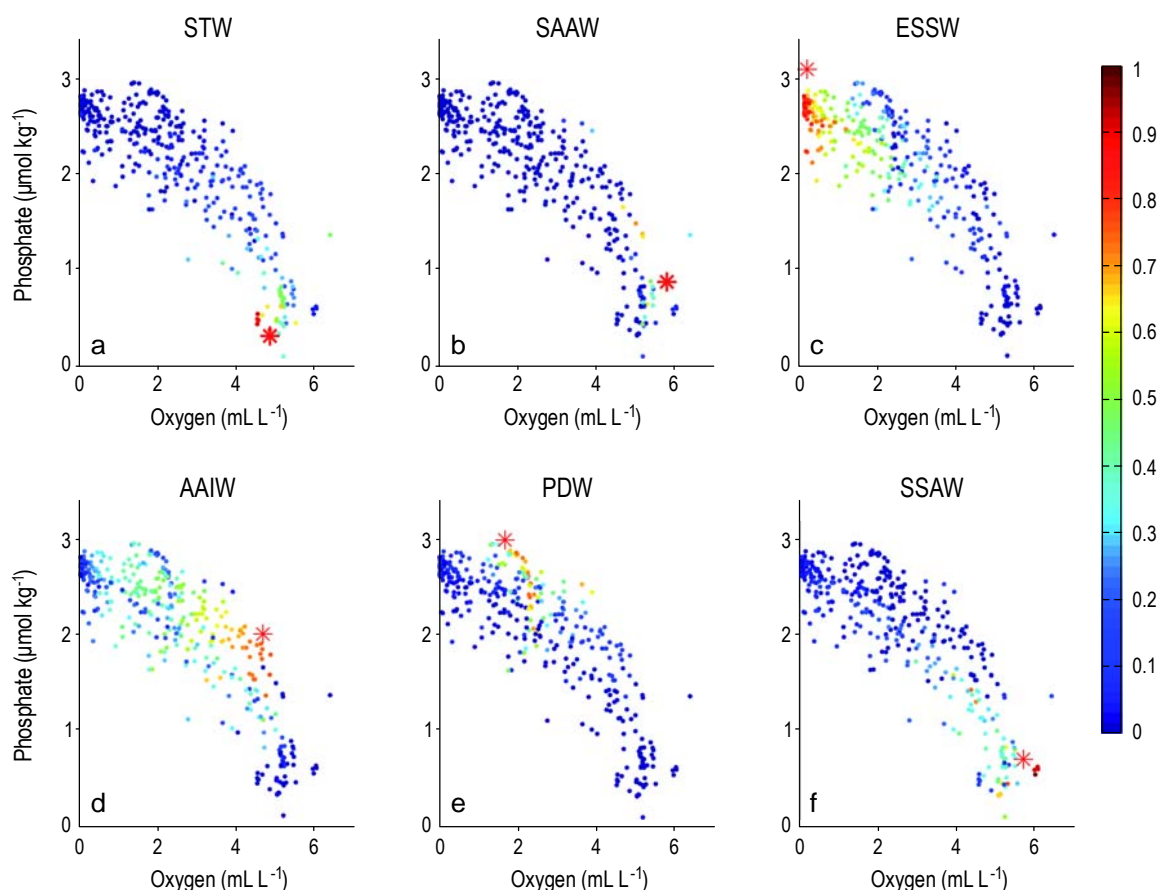


**Figure 6.** Potential temperature-salinity diagrams showing the relative contribution of each water mass (color-coded): (a) Subtropical Water (STW), (b) Subantarctic Water (SAAW), (c) Equatorial Subsurface Water (ESSW), (d) Antarctic Intermediate Water (AAIW), (e) Pacific Deep Water (PDW), and (f) Summer Subantarctic Water (SSAW). The water types corresponding to each water mass are shown as a red star. **Figura 6.** Diagramas temperatura potencial-salinidad que muestran la contribución relativa de cada masa de agua (en color): (a) Agua Subtropical (STW), (b) Agua Subantártica (SAAW), (c) Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW), (d) Agua Antártica Intermedia (AAIW), (e) Agua Profunda del Pacífico (PDW) y (f) Agua Subantártica de Verano (SSAW). \*Los valores tipo correspondientes a cada masa de agua se muestran con un asterisco rojo.

Our first task has been to properly identify the potential temperature, salinity, dissolved oxygen, and inorganic nutrient values (water types) that characterize the six masses types in the region: SAAW, SSAW, STW, ESSW, AAIW, and PDW. To our knowledge there are no inorganic nutrient and dissolved oxygen values in the literature that characterize these water masses, and neither potential temperature nor salinity values for SAAW. With the objective of defining these water types we have examined the available data and have used the classic and quasi-extended OMP methods to optimize the definition of the water types through an iterative procedure that leads to minimum residuals. The water types comprise all the data points (in all different property-property domains, including the classical salinity-potential temperature diagram), and the OMP analysis is able to properly resolve the different contributions of the six water masses to all data points. Table 1 summarizes the characteristic water types representing each of the six water masses found in our study area.

muestreado. Con esta información es posible representar las contribuciones de las diferentes masas de agua a lo largo del transecto latitudinal y de los transectos zonales cubiertos durante la campaña oceanográfica Humboldt-09. Las figuras 9 y 10 proporcionan información útil acerca de la trayectoria recorrida por las masas de agua y de la manera en que se mezclan entre ellas a lo largo de su trayectoria.

En la figura 9 se muestra la distribución de contribuciones de las distintas masas de agua para el transecto M. El gráfico superior se centra en las capas superficiales, abarcando desde la superficie hasta 180 m de profundidad. El gráfico inferior representa la columna de agua de 180 a 1400 m de profundidad. En las capas superficiales encontramos SSAW, con su núcleo localizado entre 43° y 36° S, presente en toda la sección S (fig. 10). Dicho núcleo se erosiona progresivamente conforme avanza hacia el ecuador al mezclarse con SAAW y STW. Debajo del SSAW encontramos SAAW, a profundidades desde 40 hasta 120 m en la región más costera de la sección S, profundizándose más aún conforme nos alejamos de



**Figure 7.** Phosphate-oxygen diagrams showing the relative contribution of each water mass (color-coded): (a) Subtropical Water (STW), (b) Subantarctic Water (SAAW), (c) Equatorial Subsurface Water (ESSW), (d) Antarctic Intermediate Water (AAIW), (e) Pacific Deep Water (PDW), and (f) Summer Subantarctic Water (SSAW). The water types corresponding to each water mass are shown as a red star.

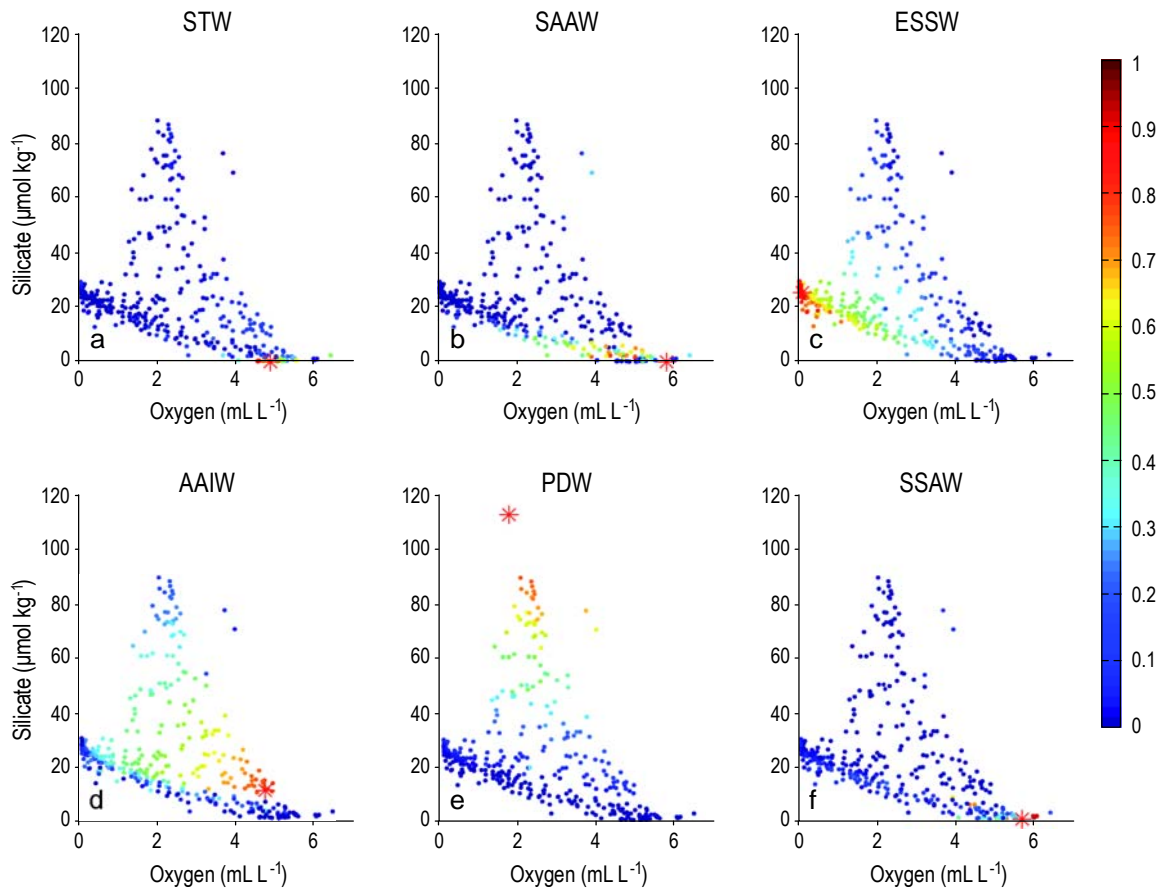
**Figura 7.** Diagramas fosfato-oxígeno que muestran la contribución relativa de cada masa de agua (en color): (a) Agua Subtropical (STW), (b) Agua Subantártica (SAAW), (c) Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW), (d) Agua Antártica Intermedia (AAIW), (e) Agua Profunda del Pacífico (PDW) y (f) Agua Subantártica de Verano (SSAW). Los valores tipo correspondientes a cada masa de agua se muestran con un asterisco rojo.

The area of interest exhibits a transition from waters of subantarctic origin to those of equatorial and tropical origin. After calculating the contribution of each water mass to all data points we have examined how these relative contributions are depicted in the meridional and zonal sections. The along-slope (meridional) water mass transition is relatively smooth, in contrast to much faster changes in the cross-slope (zonal) direction. This is true at all depths except for deep waters where PDW is the single dominant water mass.

As we move north the contributions from the different water masses change progressively. Near the surface (top 60 m) there is a progressive transition from SSAW and SAAW to STW. Just below, within the upper central waters (60–200 m), the southern and northern ends have very little SSAW and STW, respectively, which are replaced by SAAW and ESSW. Further deep, at the northern locations we find that AAIW encounters, subducts, and partially mixes with ESSW in the lower central stratum (200–400 m), while at the southern locations, AAIW is the single dominant

la costa en dicha sección (fig. 10). Esta masa de agua es transportada hacia el norte por la HC (Strub *et al.* 1998), mezclándose a lo largo de su recorrido con SSAW y STW, y hundiéndose finalmente bajo el STW en la Convergencia Subtropical a 35° S (Silva *et al.* 2009). En su camino hacia el norte se situará por encima del ESSW, ocupando una capa más delgada de los 20 a los 70 m de profundidad en el transecto C, y finalmente se reduce a una cuña de 20 m de ancho en el transecto N. El SAAW aflora cerca de la costa, desplazando el STW hacia el oeste en los transectos C y N (fig. 10).

El STW se encuentra en la superficie y ocupa una capa de hasta 45 m de espesor entre 23 y 26° S (fig. 9). El STW se extiende hacia el sur desde latitudes tropicales transportada por la PCCC (Silva *et al.* 2009). Durante su camino se encuentra con una cuña de SSAW y SAAW que la separa de la costa chilena, desplazándola hacia el oeste (fig. 10). Conforme avanza hacia el polo todavía pueden encontrarse indicios de STW a 75.3° W en el transecto C, pero dicha masa de agua desaparece totalmente en el transecto S. Debajo del



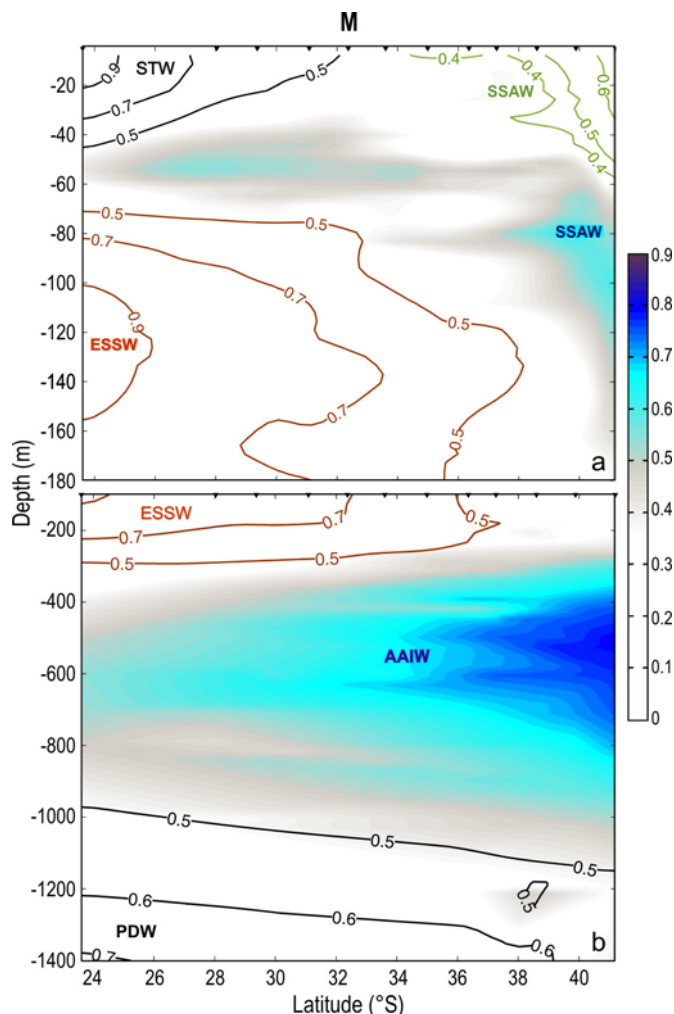
**Figure 8.** Silicate-oxygen diagrams showing the relative contribution of each water mass (color-coded): (a) Subtropical Water (STW), (b) Subantarctic Water (SAAW), (c) Equatorial Subsurface Water (ESSW), (d) Antarctic Intermediate Water (AAIW), (e) Pacific Deep Water (PDW), and (f) Summer Subantarctic Water (SSAW). The water types corresponding to each water mass are shown as a red star.

**Figura 8.** Diagramas silicato-oxígeno que muestran la contribución relativa de cada masa de agua (en color): (a) Agua Subtropical (STW), (b) Agua Subantártica (SAAW), (c) Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW), (d) Agua Antártica Intermedia (AAIW), (e) Agua Profunda del Pacífico (PDW) y (f) Agua Subantártica de Verano (SSAW). Los valores tipo correspondientes a cada masa de agua se muestran con un asterisco rojo.



intermediate water mass (400–1000 m). Between 1000 and 1100 m we still find AAIW at the southern locations but further north this depth range is occupied by PDW.

In contrast with the smooth changes in water properties found along latitude, water masses change much more



**Figure 9.** Vertical distribution of the different water masses along the meridional section (M): (a) zoomed down to 180 m depth and (b) down to 1400 m depth. Green contour lines show the contributions of Summer Subantarctic Water (SSAW), brown contour lines show those of Equatorial Subsurface Water (ESSW), black contour lines show those of Subtropical Water (STW) in (a) and of Pacific Deep Water (PDW) in (b); and Subantarctic Water (SAAW) and Antarctic Intermediate Water (AAIW) contributions are shown by the color code.

**Figura 9.** Distribución vertical de las diferentes masas de agua a lo largo del transecto latitudinal (M): (a) Primeros 180 m de profundidad; y (b) hasta 1400 m de profundidad. Los contornos verdes muestran las contribuciones de Agua Subantártica de Verano (SSAW), los marrones las de Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW), los negros en (a) las de Agua Subtropical (STW) y en (b) las de Agua Profunda del Pacífico (PDW), mientras que en código colores se representan el Agua Subantártica (SAAW) y el Agua Antártica Intermedia (AAIW).

STW encontramos ESSW. A 23° S (fig. 9) esta masa de agua ocupa unos 500 m de la columna de agua, con un núcleo relativamente somero a 140 m de profundidad. El ESSW se mueve hacia el sur como una cuña transportada por la PU (Leth *et al.* 2004). En su camino hacia el polo, su parte superior se hunde bajo el SAAW, desde los 70 m en el transecto C hasta 140 m cerca de la costa del transecto S (fig. 10). El ESSW va perdiendo progresivamente su identidad al mezclarse con el SAAW en su parte superior y con el AAIW en su parte inferior (figs. 9, 10).

A profundidades intermedias identificamos el AAIW (desde los 400 hasta los 1000 m) (figs. 9, 10), formada al norte del Frente Polar Antártico (Hartin *et al.* 2011). El AAIW es transportada hacia el ecuador mezclándose y erosionándose progresivamente en su parte superior con el ESSW, más salada, y con el PDW en su parte inferior. Encontramos el AAIW a lo largo de todo el transecto latitudinal y en todos los transectos zonales aunque su participación en la columna de agua en latitudes tropicales es bastante escasa. Su núcleo está localizado a 600 m de profundidad y se extiende hacia el norte como una lengua de agua relativamente dulce con valores de salinidad entre 34.1 y 34.3. Además, el AAIW presenta un máximo local de oxígeno disuelto (3–4.7 mL L<sup>-1</sup>) y un mínimo local de nutrientes (P < 2 μmol kg<sup>-1</sup>, N < 30 μmol kg<sup>-1</sup>) (figs. 3, 4).

Debajo del AAIW, a profundidades mayores de 1200 m, se encuentra el PDW. En esta campaña sólo fue posible muestrear la parte superior de esta masa de agua que se extiende hasta los 3000 m de profundidad (Silva *et al.* 2009). Dicha masa de agua fluye lentamente hacia el sur mientras se mezcla con AAIW en su parte superior (figs. 9, 10). El PDW se caracteriza por presentar valores más altos de nutrientes y un menor contenido en oxígeno disuelto que el AAIW (tabla 1).

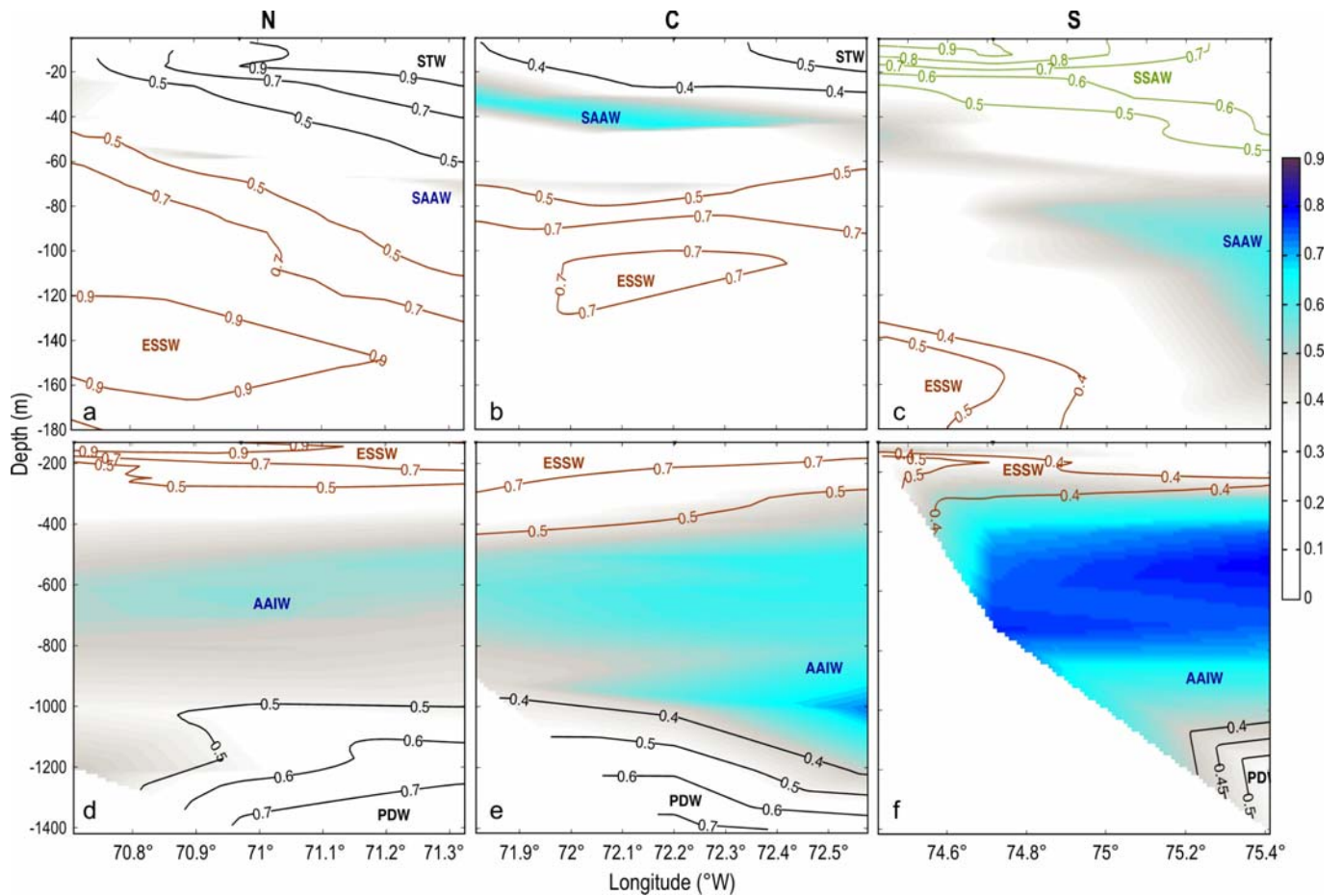
## CONCLUSIONES

El análisis de la temperatura potencial, la salinidad, los nutrientes inorgánicos y el oxígeno disuelto de los datos de la campaña Humboldt-09 indica la presencia de distintas masas de agua superficiales, intermedias y profundas que se mezclan progresivamente a lo largo de su recorrido, erosionando sus propiedades características. La distribución de las propiedades físicoquímicas a lo largo de los transectos zonales y del transecto latitudinal muestra claramente la estratificación de las distintas masas de agua. Estas masas de agua pueden distribuirse aproximadamente en cuatro estratos de agua: aguas superficiales (hasta unos 60 m), aguas centrales (desde 60 m hasta unos 200–400 m), aguas intermedias (desde 200–400 m hasta unos 1200 m) y aguas profundas (por debajo de 1200 m de profundidad). Una característica relevante de las aguas superficiales y centrales, formadas dentro del extenso giro subtropical del Pacífico sur, es que ocupan un estrato de agua relativamente delgado en comparación con las aguas intermedias y profundas de origen extratropical. Esto contrasta con

abruptly in the cross-shore direction. Near the sea surface (top 60 m), SSAW dominates in section S, SAAW and STW (further offshore) alternate in section C, and STW is the dominant water mass in section N. Just below (60–200 m) we find greater variability, with ESSW and SAAW present in all sections, ESSW dominating at low latitudes and higher depths, and SAAW at high latitudes. SAAW is found deeper as we move offshore in section N, but at shallower depths in section C. Further deep we find substantially less cross-shore variability, with ESSW as the single dominating water mass between 200 and 400 m except in section S, where some SAAW is present offshore. Below ESSW, AAIW is the predominant water mass down to 1100 m. Further deep, PDW is the prevailing water mass.

otros sistemas de frontera oriental, como los sistemas de corrientes de Canarias, Oregon y Benguela, donde las aguas centrales llegan a mayor profundidad (Tomczak y Godfrey 2003).

La primera tarea consistió en identificar adecuadamente los valores de temperatura potencial, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes inorgánicos que caracterizan las masas de agua presentes en la zona de estudio: SAAW, SSAW, STW, ESSW, AAIW y PDW. Antes de este estudio no existían en la literatura científica valores tipo de nutrientes inorgánicos y oxígeno disuelto para caracterizar estas masas de agua. Tampoco se habían sido definido con anterioridad los valores tipo de temperatura potencial y salinidad que caracterizan al SAAW. Con el objetivo de establecer correctamente



**Figure 10.** Vertical distribution of the different water masses along the three zonal transects: (a, d) northern (N), (b, e) central (C), and (c, f) southern (S) transects. Upper panels: zoomed down to 180 m depth; bottom panels: down to 1400 m depth. Green contour lines show the contributions of Summer Subantarctic Water (SSAW), brown contour lines show those of Equatorial Subsurface Water (ESSW), black contour lines show those of Subtropical Water (STW) in (a–c) and of Pacific Deep Water (PDW) in (d–f), whereas Subantarctic Water (SAAW) and Antarctic Intermediate Water (AAIW) contributions are shown by the color code.

**Figura 10.** Distribución en la vertical de las diferentes masas de agua a lo largo de los tres transectos zonales: (a, d) norte (N), (b, e) central (C) y (c, f) sur (S). Paneles superiores: primeros 180 m de profundidad; paneles inferiores: hasta 1400 m de profundidad. Los contornos verdes muestran las contribuciones del Agua Subantártica de Verano (SSAW), los marrones las del Agua Ecuatorial Subsuperficial (ESSW), y los negros las de Agua Subtropical (STW) en (a–c) y las de Agua Profunda del Pacífico (PDW) en (d–f), mientras que las del Agua Subantártica (SAAW) y las del Agua Antártica Intermedia (AAIW) se representan en código de colores.

A remarkable feature in our data is the contrast between low salinity, low nutrient, and high oxygen AAIW and relatively high salinity, high nutrient, and very low oxygen ESSW. These are the two dominant water masses between about 250 and 650 m throughout the meridional transect. Approximately 40% of AAIW is found between 250 and 1100 m at 44° S and between 550 and 650 m at 23° S (it deepens equatorward), while there is more than 40% ESSW between 550 and 650 m at 44° S and between 50 and 550 m at 23° S. ESSW is associated with very low dissolved oxygen and high nutrient values, i.e., with the OMZ. This tongue stretches south illustrating the penetration of this water centered at 250 m. The low oxygen content of ESSW may influence the underlying AAIW and even PDW at low latitudes, as suggested by Silva *et al.* (2009). The southern part of the OMZ in the eastern tropical South Pacific is ventilated by mixing on its upper side with SAAW and on its lower side with AAIW. Changes in the contribution of these water masses in the water column may reflect changes in the climatic conditions of their source regions. These changes could eventually disrupt the ventilation of the southern part of the OMZ, conditioning its future evolution. Since a long-term trend of expanding OMZ has been reported for the tropical oceans (Stramma *et al.* 2008), future studies might find the OMP method useful to explain how changes in the OMZ extension respond to changes in the water mass contributions to the water column in that region.

The differences observed in the meridional and zonal gradients are undoubtedly the outcome of the regional circulation patterns with rather narrow meridional jets that stretch over our whole domain (Silva *et al.* 2009). These jets become paths for substantial meridional transport over long distances, hence bringing tropical water into subantarctic regions and vice versa, but also act to enhance cross-slope zonal gradients. Our results can only give some hints about the regional offshore variability, being limited by the relatively low number of zonal sections and their small offshore extension, but yet indicate the high variability of the water masses in this important climatic region and the necessity of carrying out further physico-chemical characterizations of this region in the future.

## ACKNOWLEDGEMENTS

The first author was supported by a JAE-predoc assistantship from the Council for Scientific Research (CSIC, Spain) and the European Social Fund. The Humboldt-09 cruise was supported through project “Campaña Oceanográfica Humboldt-2009, Tránsito de Retorno del BIO *Hesperides* Primavera 2009” (CTM2008-02497-E/MAR), financed by the Spanish Ministry of Science and Innovation. The authors would like to thank the crew and technical staff of the R/V *Hesperides* during the Humboldt-09 cruise, particularly J Llinàs, J Vallo, and M Pastor for their help with the

estos valores tipo se examinaron los datos disponibles mediante los métodos OMP clásico y cuasi-extendido, sometidos a un proceso iterativo. Los valores tipo que caracterizan las diferentes masas de agua deben englobar todos los puntos muestreados en los diferentes espacios propiedad-propiedad, incluyendo el clásico diagrama de temperatura potencial-salinidad. El método OMP es capaz de resolver las contribuciones de las diferentes masas de agua en cada punto muestreado. La tabla 1 representa los valores tipo calculados para las diferentes masas de agua presentes en la zona de estudio.

En esta región se aprecia una transición de aguas de origen subantártico a aguas de origen ecuatorial y tropical. Después de haber calculado la contribución de cada masa de agua en cada uno de los puntos muestreados se examinó cómo dichas contribuciones se repartían a lo largo del transecto latitudinal y de los transectos zonales. El hecho más relevante es el contraste entre la progresiva transición latitudinal (en paralelo al talud continental) con la transición zonal mucho más brusca (perpendicular a la costa). Esto sucede en todas las profundidades excepto en las capas más profundas donde el PDW es la masa de agua dominante.

Conforme se avanza hacia el norte las contribuciones de las distintas masas de agua cambian progresivamente. Cerca de la superficie (primeros 60 m) existe una progresiva transición de SSAW y SAAW a STW. Justo debajo, en la parte superior de las aguas centrales (60–200 m), se encuentra una muy baja participación del SSAW en el extremo sur y del STW en el extremo norte. Dichas masas de agua son reemplazadas respectivamente por SAAW y ESSW a esas profundidades. A mayor profundidad y en la zona norte del área de estudio, el AAIW se encuentra con ESSW y se hunde ligeramente debajo de ella a la vez que se mezcla parcialmente en la parte baja del estrato central de agua (200–400 m). Sin embargo, en la zona sur de la región estudiada, el AAIW es la única masa de agua presente a niveles intermedios (400–1000 m). Entre 1000 y 1100 m de profundidad todavía pueden encontrarse remanentes de AAIW en la zona sur pero conforme se avanza hacia el norte, el PDW ocupa totalmente este rango de profundidades.

En contraste con los suaves cambios de propiedades oceánicas observados latitudinalmente, en la dirección perpendicular a la costa las masas de agua cambian de una manera mucho más abrupta. Cerca de la superficie (60 m superiores) el SSAW predomina en la sección S, con SAAW y STW (más mar adentro) alternándose en la sección C, y con STW como la masa de agua dominante en la sección N. Por debajo (de 60 a 200 m) se encuentra una mayor variabilidad, con ESSW y SAAW presentes en todas las secciones. El ESSW domina a mayores profundidades y en bajas latitudes, mientras que el SAAW predomina en latitudes altas. El SAAW se encuentra a mayor profundidad conforme se avanza mar adentro a lo largo del transecto N y aparece a menores profundidades en el transecto C. A mayor profundidad existe mucha menos variabilidad en la dirección



measurements. We are very grateful to F Fernández and J Peña for useful comments regarding the OMP analysis and to M Abad for the inorganic nutrient analysis.

## REFERENCES

- Anderson JJ, Okubo A, Robbins AS, Richards FA. 1982. A model for nitrite and nitrate distributions in oceanic oxygen minimum zones. *Deep-Sea Res.* 29(9A): 1113–1140.
- Anderson SA. 1995. On the hydrogen and oxygen contents of marine phytoplankton. *Deep-Sea Res.* 42: 1675–1680.
- Broecker WS. 1974. 'NO', a conservative water mass tracer. *Earth Planet. Sci. Lett.* 23: 100–107.
- Codispoti LA, Christensen JP. 1985. Nitrification, denitrification and nitrous oxide cycling in the eastern tropical South Pacific Ocean. *Mar. Chem.* 16: 227–300.
- Díaz M. 1984. Distribución de fosfatos, nitratos y nitritos en una sección frente a Iquique (201160S). *Invest. Pesq.* 31: 103–108.
- Fraga F, Ríos AF, Pérez FF, Figueiras FG. 1998. Theoretical limits of oxygen:carbon and oxygen:nitrogen ratios during photosynthesis and mineralisation of organic matter in the sea. *Sci. Mar.* 62: 161–168.
- Gouretski VV, Koltermann KP. 2004. WOCE Global Hydrographic Climatology. *Berichte des BSH* 35, 52 pp.
- Halpin PM, Strub PT, Peterson WT, Baumgartner TR. 2004. An overview of interactions among oceanography, marine ecosystems and human disruptions along the eastern margins of the Pacific Ocean. *Rev. Chil. Hist. Nat.* 77: 371–409.
- Hartin CA, Fine RA, Sloyan BM, Talley LD, Chereskin TK, Happell J. 2011. Formation rates of Subantarctic Mode Water and Antarctic Intermediate Water within the South Pacific. *Deep-Sea Res.* 1 58: 524–534.
- Karstensen J, Tomczak M. 1998. Age determination of mixed water masses using CFC and oxygen data. *J. Geophys. Res.* 103: 599–610.
- Karstensen J, Tomczak M. 1999. Manual for OMP Analysis Package for MATLAB, version 2.0. [http://www.ldeo.columbia.edu/~jkarsten/omp\\_std/](http://www.ldeo.columbia.edu/~jkarsten/omp_std/).
- Leth O, Shaffer G, Ulloa O. 2004. Hydrography of the eastern South Pacific Ocean: Results from the Sonne 102 cruise, May–June 1995. *Deep-Sea Res.* II 51: 2349–2369.
- Mackas DL, Denman KL, Bennett AF. 1987. Least-square multiple tracer analysis of water mass composition. *J. Geophys. Res.* 92: 2907–2918.
- Pastor MV, Peña-Izquierdo J, Pelegrí JL, Marrero-Díaz A. 2012. Meridional changes in water properties off NW Africa during November 2007/2008. *Cienc. Mar.* 38: 223–244.
- Penven P, Echevin V, Pasapera J, Colas F, Tam J. 2005. Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach. *J. Geophys. Res.* 110: C10021, doi: 10.1029/2005JC002945.
- Pérez FF, Mourino C, Fraga F, Ríos AF. 1993. Displacement of water masses and remineralization rates off the Iberian Peninsula by nutrient anomalies. *J. Mar. Res.* 51: 1–24.
- Pérez FF, Mintrop L, Llinas O, González-Dávila M, Castro CG, Alvarez M, Kortzinger A, Santana-Casiano M, Rueda MJ, Ríos AF. 2001. Mixing analysis of nutrients, oxygen and inorganic carbon in the Canary Islands region. *J. Mar. Syst.* 28: 183–201.
- 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.
- Schneider W, Fuenzalida RF, Núñez RG, Garcés-Vargas J, Bravo L, Figueroa DL. 2007. Discussion of the Humboldt Current system perpendicular a la costa, con ESSW como única masa dominante entre los 200 y 400 m excepto en la sección S, donde algo de SAAW está presente mar adentro. Por debajo del ESSW, la masa de agua que predomina hasta los 1100 m de profundidad es el AAIW. En las capas más profundas encontramos al PDW como masa de agua dominante.
- Es de reseñar el contraste del AAIW (con baja salinidad, bajo contenido de nutrientes y alto contenido en oxígeno) con el ESSW (con alta salinidad, alto contenido de nutrientes y muy bajo contenido de oxígeno). Estas son las dos masas de agua dominantes entre los 250 y 650 m a lo largo de todo el transecto latitudinal. Aproximadamente el 40% del AAIW se encuentra entre 250 y 1100 m a 44° S y entre 550 y 650 m a 23° S (se hunde conforme avanza hacia el ecuador). El ESSW se encuentra asociada a valores muy bajos de oxígeno disuelto y altos de nutrientes, es decir, con la OMZ. Una lengua de esta masa de agua penetra hacia el sur centrada en 250 m de profundidad. El bajo contenido de oxígeno disuelto del ESSW puede influenciar las propiedades de las masas de agua subyacentes (AAIW y PDW) como sugiere Silva *et al.* (2009). La parte sur de la OMZ del Pacífico suroriental se ventila mezclándose con SAAW en su parte superior y con AAIW en su parte inferior. Cambios en la contribución de dichas masas de agua en la columna de agua pueden reflejar cambios en las condiciones climáticas en sus respectivas zonas de formación. Estos cambios podrían alterar el patrón de ventilación de la parte austral de la OMZ, condicionando su evolución en el futuro. Dado que se ha detectado una tendencia a largo plazo de expansión de las OMZs de los océanos tropicales (Stramma *et al.* 2008), el método OMP podría ser de utilidad para trabajos futuros a la hora de explicar como los cambios en la extensión de la OMZ responden a cambios en las contribuciones de las distintas masas de agua en esa región.
- Las diferencias observadas en los gradientes zonales y latitudinal representan indudablemente los patrones de la circulación regional dominante, caracterizada por estrechas corrientes latitudinales que recorren toda el área de estudio (Silva *et al.* 2009). Estas corrientes se convierten en rutas que permiten un sustancial intercambio latitudinal de propiedades a larga distancia, transportando aguas de origen tropical hasta regiones subantárticas y viceversa. Como resultado de este esquema de corrientes los gradientes zonales se ven magnificados. Los resultados obtenidos en este estudio proporcionan una buena idea de la variabilidad regional, pero están limitados por el escaso número de transectos zonales y su reducida extensión; a pesar de esto permiten apreciar la gran variabilidad de las masas de agua presentes en esta importante región climática y enfatizan la necesidad de llevar a cabo más caracterizaciones físico-químicas de la región en el futuro.

## AGRADECIMIENTOS

El primer autor agradece la cofinanciación JAE-predoc del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) y

- and water masses in the north zone and center off Chile. *Cienc. Tecnol. Mar.* 30: 21–36.
- Scripps Institution of Oceanography. 1969. Physical and chemical data from SCORPIO Expedition in the South Pacific Ocean. USNS Eltain Cruises 28 and 29, 12 March–21 July 1967. SIO Reference 69–15; WHOI Reference 69–56, La Jolla, CA, 89 pp.
- Scripps Institution of Oceanography. 1974. Physical and Chemical Data Report, PIQUERO Expedition, 16 December 1968–16 April 1969. SIO Reference 74–27, 59 pp.
- Shaffer G, Hormazabal S, Pizarro O, Ramos M. 2004. Circulation and variability in the Chile Basin. *Deep-Sea Res. I* 51: 1367–1386.
- Silva N, Konow D. 1975. Contribución al conocimiento de las masas de agua en el Pacífico sudoriental, Expedición Krill, 3–4 julio–agosto 1974. *Rev. Com. Perm. Pac. Sur* 3: 63–75.
- Silva N, Rojas N, Fedele A. 2009. Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep-Sea Res. II* 56: 1004–1020.
- Stommel H, Stroup ED, Reid JL and Warren BA. 1973. Transpacific hydrographic sections at Lats. 43°S and 28°S: The SCORPIO Expedition. I. Preface. *Deep-Sea Res.* 20: 1–7.
- Stramma L, Johnson GC, Sprintall J, Mohrholz V. 2008 Expanding oxygen-minimum zones in the tropical oceans. *Science* 320: 655–658.
- Strub P, Mesias J, Montecino V, Rutllant J, Salinas S. 1998. Coastal ocean circulation off western South America. In: Robinson A, Brink K (eds.), *The Sea*, Vol. 11, *The Global Coastal Ocean*. Wiley, New York, pp. 272–313.
- Thomas WH. 1966. On denitrification in the northeastern Tropical Pacific Ocean. *Deep-Sea Res.* 13: 1109–1114.
- del Fondo Social Europeo. La campaña Humboldt-09 fue financiada a través del proyecto “Campaña Oceanográfica Humboldt-2009, Tránsito de Retorno del BIO *Hespérides* Primavera 2009” (CTM2008-02497-E/MAR), a cargo del Ministerio de Ciencia e Innovación de España. Los autores agradecen a la tripulación y al equipo técnico del BIO *Hespérides* la colaboración prestada, particularmente a J Llinàs, J Vallo y M Pastor su ayuda en los muestreos. No podemos terminar sin agradecer inmensamente a F Fernández y J Peña sus útiles comentarios en relación al análisis OMP y a M Abad el análisis de los nutrientes inorgánicos.
- 
- Tomczak M. 1981. A multi-parameter extension of temperature/salinity diagram techniques for the analysis of non-isopycnal mixing. *Prog. Oceanogr.* 10: 147–171.
- Tomczak M, Large DGB. 1989. Optimum multiparameter analysis of mixing in the thermocline of the eastern Indian Ocean. *J. Geophys. Res.* 94: 16141–16149.
- Tomczak M, Godfrey JS. 2003. *Regional Oceanography: An Introduction*. 2nd ed. Daya Publishing House, Delhi, 390 pp.
- Tomczak M, Liefvink S. 2006. Interannual variations of water mass properties and volumes in the Southern Ocean. *Ocean Sci. Discuss.* 3: 199–219.
- Wooster WS, Chow TJ, Barrett I. 1965. Nitrite distribution in Peru Current waters. *J. Mar. Res.* 23: 210–221.
- Zuta S, Guillen O. 1970. Oceanografía de las aguas costeras del Perú. *Bol. Inst. del Mar de Peru* 2: 157–324.

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