

*Short Communication*

## **Doble difusión a partir de mediciones de microestructura en los canales Martínez y Baker, Patagonia chilena central (47,85°S)**

**Iván Pérez-Santos<sup>1,3</sup>, José Garcés-Vargas<sup>2</sup>, Wolfgang Schneider<sup>1,3</sup>, Sabrina Parra<sup>4</sup>  
Lauren Ross<sup>4</sup> & Arnoldo Valle-Levinson<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Departamento de Oceanografía, Universidad de Concepción, Campus Concepción  
Víctor Lamas 1290, P.O. Box 160-C, Concepción, Chile

<sup>2</sup>Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas, Facultad de Ciencias  
Universidad Austral de Chile, Edificio Pujín, Campus Isla Teja, Valdivia, Chile

<sup>3</sup>Centro COPAS Sur-Austral, Universidad de Concepción, Campus Concepción  
P.O. Box 160-C, Concepción, Chile

<sup>4</sup>Department of Civil and Coastal Engineering, University of Florida  
Gainesville, FL 32611, USA

**RESUMEN.** Con un microperfilador SCAMP (Self Contained Autonomous MicroProfile) se detectó un proceso de Doble Difusión Convectiva (DDC), en los canales Martínez y Baker de la Patagonia central, Chile. Este perfilador midió temperatura y salinidad en la columna de agua con una resolución del orden de milímetros. El muestreo se efectuó en diciembre 2011, en 19 estaciones oceanográficas de ~55 m de profundidad. Los registros del microperfilador permitieron detectar la formación de escaleras termohalinas que caracterizan la formación de la DDC. Por medio del ángulo de Turner se confirmó que debajo de una capa superficial fuertemente estratificada (7-10 m) se registraron eventos de DDC a profundidades entre 15 y 45 m. La DDC fue débil en la mayoría de los registros pero se evidenciaron eventos fuertes entre 15 y 40 m. En la capa subsuperficial, su origen se debió al intercalamiento de las masas aguas estuarinas (aguas frías y menos saladas) encima de las oceánicas (aguas más cálidas y saladas), mientras que en la superficie la interacción océano-atmósfera favoreció su ocurrencia. La DDC en conjunto con el viento, las mareas y las ondas internas, puede constituir un mecanismo importante para la mezcla vertical, influenciando los flujos de calor, el hábitat de las especies marinas en estas profundidades y la exportación de carbono hacia los sedimentos.

**Palabras clave:** doble difusión, convección, escaleras termohalinas, canales australes, Patagonia chilena.

## **Double diffusion from microstructure measurements in the Martínez and Baker channels, central Chilean Patagonia (47.85°S)**

**ABSTRACT.** Double-diffusive convection (DDC) has been detected in the Martínez and Baker channels of central Patagonia (Chile) by employing a Self Contained Autonomous Micro-Profiler (SCAMP). This profiler measures temperature and salinity in the water column with a vertical resolution on the millimetre scale. The expedition took place in December 2011 and included 19 vertical high-resolution profiles from surface to ~55 m depth. The formation of thermohaline staircase patterns, resulting from the DDC process, could be documented by the micro-profiler's measurements. DDC events, below the shallow but strongly stratified surface layer (7-10 m), were confirmed to occur in intermediate depths between 15 and 45 m by means of the Turner angle. Most of these events were usually weak but several strong ones could also be detected between 15 and 40 m. DDC is initiated at the interface between sub-surface waters of estuarine origin (cold and less salty) and intermediate waters of oceanic origin (warmer and saltier), with upward heat and salt fluxes. DDC together with mixing caused by winds, tides, and internal waves, constitute an important mechanism for mixing the water column with implications for small organisms therein.

**Keywords:** double diffusion, mixing, thermohaline staircase, austral channels, Chilean Patagonia.

El proceso de doble difusión ocurre cuando el gradiente vertical de temperatura y salinidad tienen el mismo signo, lo cual no es usual en mar abierto. Este proceso se divide en Doble Difusión Convectiva (DDC) (gradientes verticales con signo negativo) y Dedos de Sal (DS) (gradientes verticales con signo positivo) (Schmitt, 1994; You, 2002). En la DDC la temperatura y la salinidad aumentan con la profundidad, mientras que en los DS ocurre lo contrario (Schmitt, 2001).

El atlas global climatológico de la doble difusión evidencia que este proceso es favorable en el 44% de los océanos, correspondiendo el 30% a los DS y el 14% a la DDC (You, 2002). En ese estudio el potencial de ocurrencia de los DS fue reportada en aguas centrales y profundas donde la evaporación fue mayor a las precipitaciones, *e.g.* en el norte del Océano Índico, el este del Atlántico norte, Mar Rojo y Mar Mediterráneo. Sin embargo, la DDC se observó en la región polar y subpolar del Ártico y la Antártida, golfo de Alaska y de Okhotsk, y el mar de Labrador y Noruega. En estas regiones la capa superficial del mar es más fría y menos salada debido a los aportes del derretimiento de hielo (You, 2002). Por lo tanto, agua fría y menos salada se sitúa encima de agua más cálida y salada, ocurriendo una transferencia de calor de abajo hacia arriba generando una convección vertical (Schmitt, 2001).

En dicho atlas climatológico no se incluyeron las mediciones hidrográficas realizadas en los fiordos y canales de la Patagonia chilena. Considerando que, en estos lugares influenciados por agua dulce, la salinidad típicamente aumenta con la profundidad y que la temperatura también lo hace a ciertas profundidades, se espera que ocurra la DDC (Farmer & Freeland, 1983). Para detectar la DDC, se realizó una expedición científica, cerca de la caleta Tortel (canal Martínez, desembocadura del río Baker y canal Baker) en la Patagonia Central de Chile (Fig. 1a). En esta campaña oceanográfica se usó un micropofilador SCAMP (Self Contained Autonomous MicroProfile) que permite registrar la variación vertical de la temperatura y salinidad del mar a 100 Hz, lo cual resulta en una alta resolución vertical (alrededor de 1 mm). Las mediciones se realizaron en 19 estaciones durante diciembre 2011 (Fig. 1a).

Los registros se promediaron cada 10 cm para el cálculo del ángulo de Turner ( $Tu$ ), el cual cuantifica e identifica la presencia de la DDC. Para esto se empleó la metodología propuesta en TEOS-10 (Thermodynamic Equation of Seawater–2010). TEOS-10 introduce nuevas variables derivadas en la oceanografía, *e.g.* la salinidad absoluta ( $S_A$ ) y la temperatura conservativa ( $\Theta$ ) (IOC *et al.*, 2010). La salinidad

absoluta (unidades  $g\ kg^{-1}$ ) representa la variación espacial de la composición de agua de mar, teniendo en cuenta sus diferentes propiedades termodinámicas y el gradiente de densidad horizontal en el océano abierto. Por otro lado, la temperatura conservativa es similar a la temperatura potencial, pero representa con más precisión el contenido de calor del agua de mar.

El ángulo de Turner (expresado en grados de rotación), fue utilizado por primera vez por Ruddick (1983) para determinar las contribuciones de la doble difusión en datos hidrográficos. También es un método para estudiar la presencia de los dedos de sal y cuantificar la influencia relativa de la temperatura y la salinidad en la estratificación de la columna de agua. Se define como,  $Tu = \arctan(R\rho)$ , donde  $R\rho$  es el radio de estabilidad (o razón de densidad), y en TEOS-10 la ecuación utilizada es la siguiente:

$$Tu = \tan^{-1}(\alpha^\Theta \Theta_z + \beta^\Theta (S_A)_z, \alpha^\Theta \Theta_z - \beta^\Theta (S_A)_z)$$

donde,  $\alpha^\Theta = -\rho^{-1}(\frac{\delta\rho}{\delta\Theta})$  es el coeficiente de expansión

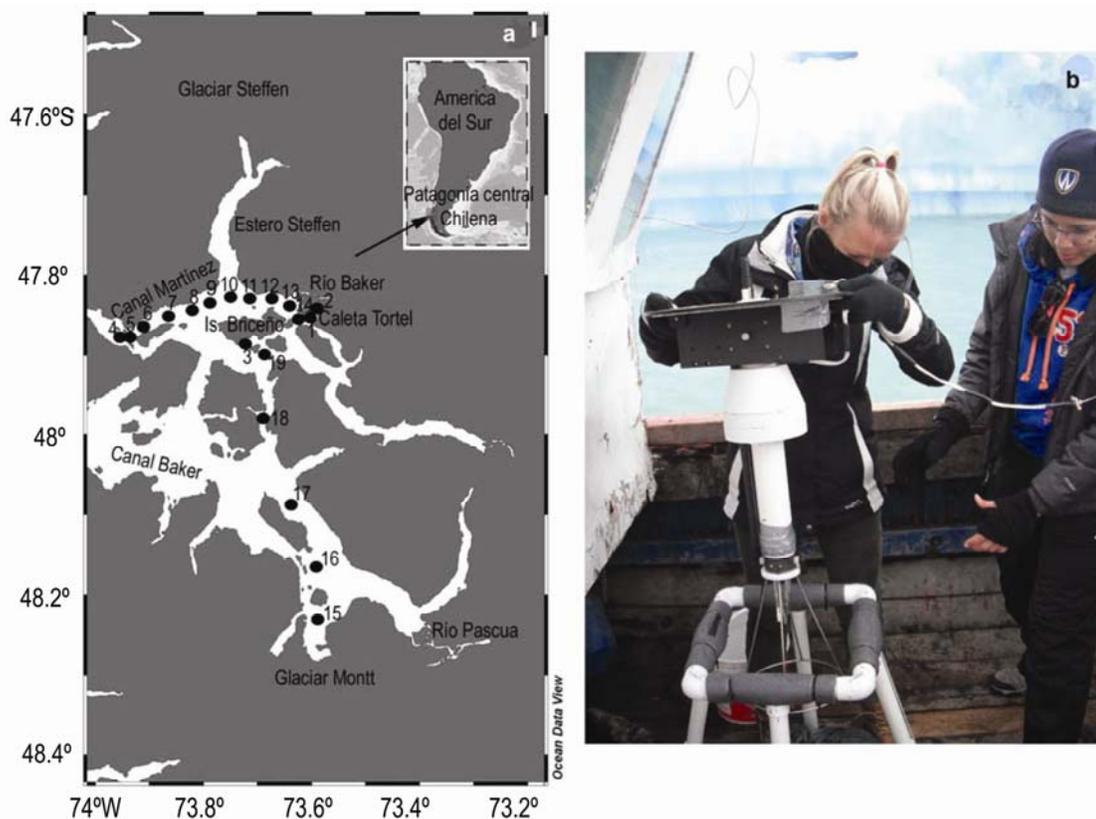
térmica,  $\beta^\Theta = -\rho^{-1}(\frac{\delta\rho}{\delta S_A})$  el coeficiente de contrac-

ción halina y  $\rho$  es la densidad del mar; el subíndice  $z$  indica diferenciación con respecto a la profundidad.

Para la interpretación del ángulo de Turner se utilizó el esquema propuesto por You (2002; su figura 3), donde  $Tu$  es expresado en cuatro cuadrantes de la función arco-tangente. Así, un valor de  $Tu$  entre  $-45^\circ$  y  $-90^\circ$  demuestra que el proceso de DDC puede ocurrir. Cuando  $Tu$  se encuentra entre  $45^\circ$  y  $90^\circ$  la estructura de los DS se puede observar en los datos hidrográficos y, cuando  $Tu$  muestra valores entre  $-45^\circ$  y  $45^\circ$ , la estratificación de la columna de agua es posible debido a la temperatura o la salinidad de acuerdo a esta clasificación; la DDC también puede ser dividida en fuerte ( $Tu$  entre  $-90^\circ$  y  $-75^\circ$ ), media ( $Tu$  entre  $-75^\circ$  y  $-60^\circ$ ) y débil ( $Tu$  entre  $-60^\circ$  y  $-45^\circ$ ).

Los perfiles de temperatura y salinidad del mar de la estación 19, muestran a partir de los 12 m la forma de escaleras (Figs. 2a-2b), evidenciando por tanto el proceso de doble difusión. En esta estación los peldaños (capas mezcladas) de las escaleras tienen una profundidad de  $\sim 2-3$  m (Figs. 2c-2d).

La figura 3, muestra los perfiles de la temperatura conservativa (Fig. 3a), la salinidad absoluta (Fig. 3b) y la frecuencia de flotabilidad o de Brunt-Vaisala (Fig. 3c), en cinco estaciones distribuidas en diferentes áreas de la región de estudio. Así, las estaciones 5, 10 y 13 se localizan en el canal Martínez, influenciadas por los aportes del río Baker y el estero Steffen, la estación 15 se encuentra cerca del glaciar Montt y la 19 al sur de la isla Briceño (Fig. 1a). En estas estacio-



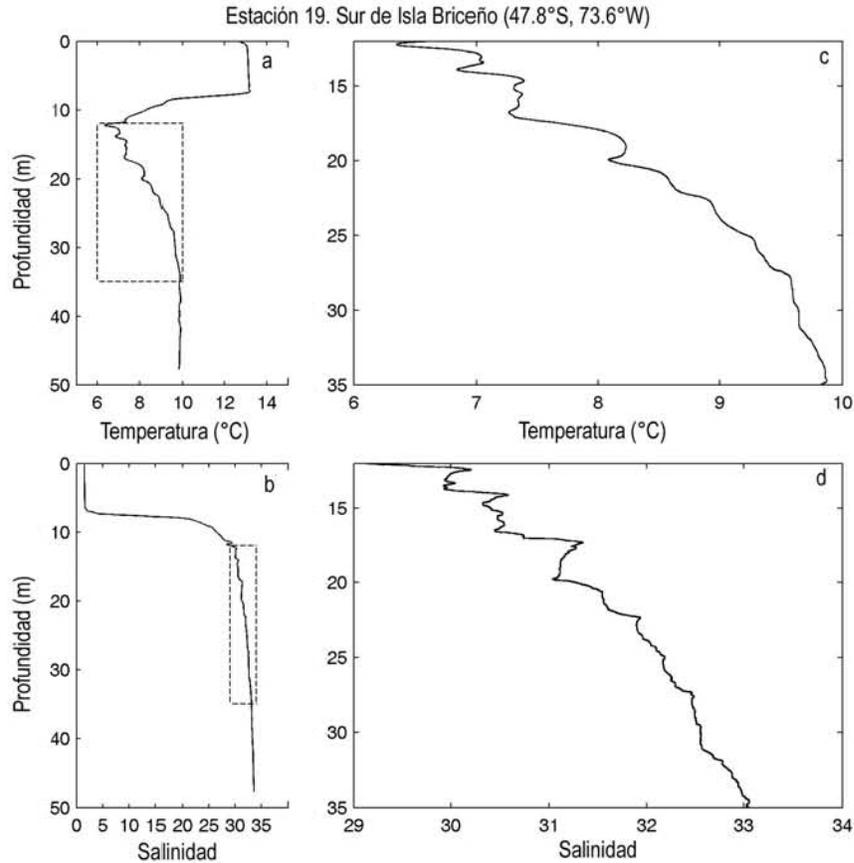
**Figura 1.** a) Área de estudio de la Patagonia central, los puntos negros muestran las estaciones de medición, b) toma de muestras con el microperfilador SCAMP (Self Contained Autonomous MicroProfiler), en la estación 15, cerca de los témpanos de hielos desprendidos del glaciar Montt.

nes se pueden apreciar eventos de DDC justo donde la temperatura y salinidad aumentan ligeramente hasta los  $\sim 7$  primeros metros de profundidad, aproximadamente 2 m por sobre la pycnoclina (Fig. 3).

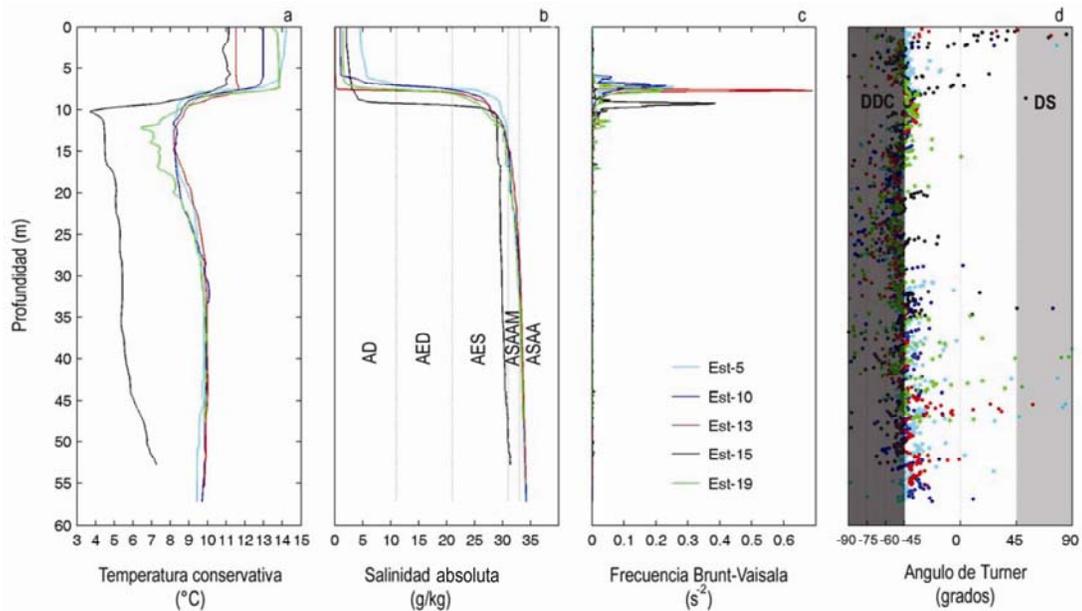
Debajo de la pycnoclina, nuevamente se observó la DDC con un mayor número de eventos entre 15 y 45 m. La ocurrencia de algunos eventos de DS se detectaron en la superficie y entre 35 y 43 m, debido a pequeños cambios de signo de ambas variables (la temperatura y salinidad disminuyeron con la profundidad). La DDC se mostró débil ( $Tu$  entre  $-60^\circ$  y  $-45^\circ$ ) en la mayoría de los registros, pero algunos mostraron intensidad media ( $Tu$  entre  $-75^\circ$  y  $-60^\circ$ ) y fuerte ( $Tu$  entre  $-90^\circ$  y  $-75^\circ$ ) (Fig. 3d). Bajo los 30 m, la temperatura comenzó a disminuir con la profundidad en la mayoría de los perfiles; exceptuando la estación 15 cerca del glaciar Montt; mientras la salinidad continuó aumentando (Figs. 3a-3b). A partir de esa profundidad, comienzan a desaparecer las condiciones que propician la ocurrencia de la DDC (la temperatura y salinidad aumentan con la profundidad), registrándose un gran número de eventos en el rango

de valores de  $Tu$  entre  $-45^\circ$  y  $45^\circ$  (Fig. 3d). Esto indica que la estratificación de la columna de agua es posible, aunque en esta profundidad no se presente su máximo, reportado con anterioridad entre 7 y 10 m de profundidad (Fig. 3c).

Las mediciones hidrográficas de alta resolución vertical realizadas con el microperfilador SCAMP permitieron reportar, por primera vez, la ocurrencia de la doble difusión en fiordos de la Patagonia central de Chile. En general, este proceso se presentó como DDC debido a la presencia de las masas de aguas frías y menos salinas encima de aguas más cálidas y salinas en los primeros 50 m de la columna de agua (Fig. 3b). Las masas de agua se clasificaron de acuerdo al criterio de la salinidad presentado por Sievers & Silva (2008). Bajo  $\sim 12$  m se determinó la presencia del Agua Estuarina Salada (AES), con temperaturas más bajas y salinidades menores que el Agua Subantártica Modificada (ASAAM) situada por debajo de esta. Hacia el fondo se encontró el Agua Subantártica (ASAA), que fue más cálida y salina que las masas de aguas superiores (AES y ASAAM), (Figs. 3b-3d).



**Figura 2.** Perfiles de a) temperatura y b) salinidad del mar en la estación 19, realizada al sur de la isla Briceño el 20 de Diciembre 2011, c) y d) ampliación de los perfiles donde se localizó la Doble Difusión Convectiva.



**Figura 3.** a) Perfiles de la temperatura conservativa, b) salinidad absoluta, c) frecuencia de Brunt-Vaisala, y d) ángulo de Turner, para las estaciones 5, 10 y 13 realizadas en el canal Martínez, la estación 15 en las cercanías del glaciar Montt y la estación 19 al sur de la isla Briceño. En (b) se muestran las masas de agua, Sievers & Silva (2008), donde: AD (Agua Dulce,  $0 < \text{Salinidad} < 11$ ), AED (Agua Estuarina Dulce,  $11 < \text{Salinidad} < 21$ ), AES (Agua Estuarina Salada,  $21 < \text{Salinidad} < 31$ ), ASAAM (Agua Subantártica Modificada,  $31 < \text{Salinidad} < 33$ ), y ASAA (Agua Subantártica, salinidad  $> 33$ ).

El intercalamiento de las masas de agua favoreció la transferencia de calor hacia arriba, provocando que la capa situada por debajo aumentara su densidad y entonces se hundiera, originando un efecto en cascada en dirección hacia el fondo, que se detiene cuando la convección ya no es posible. En los primeros 7 m de la columna de agua, donde también se reportó la DDC, esta debió originarse por la ligera pérdida de calor en la superficie debido a los procesos de interacción océano-atmósfera que ocurren en la capa superficial durante la época de primavera y verano (Silva & Calvete, 2002).

Por otra lado, la mayor cantidad de eventos de DDC media y fuerte se localizaron en el canal Martínez, mientras en la zona cercana al glaciar Montt se observó la DDC más débil (no se muestra la figura). Si bien, los aportes de agua dulce de los ríos Baker y Pascua y aquellos procedentes del derretimiento, principalmente del glaciar Montt, que permitieron que el agua dulce se extendiera de forma homogénea en la capa superficial de los canales, fueron primordialmente las diferencias de la temperatura del agua las que influyeron en los cambios de la DDC de débil a media y fuerte. La descarga de aguas frías (4-6°C), desde el glaciar Montt, originaron una convección por debajo de la estratificación y hasta el final de las mediciones (~50 m), formando una capa homogénea que disminuyó el gradiente de temperatura, haciendo que la DDC fuera débil en esta región. Además, en esta zona, no se observó la presencia de las masas de aguas oceánicas y mezcladas, *e.g.*, ASAAM y ASAA, debido a que la fuerte convección por temperatura no sólo profundizó las isotermas, sino también las isohalinas, resultando entonces en un menor gradiente de salinidad, que también contribuyó a la disminución de la intensidad de la DDC. La ocurrencia de la DDC por debajo de la capa estratificada de la columna de agua (7-10 m) conjuntamente con el viento, mareas y ondas internas (Aiken, 2008), constituyen un mecanismo importante para la mezcla vertical, influenciando el hábitat de las especies marinas en estas profundidades y a la exportación de carbono hacia los sedimentos (González *et al.*, 2011). Queda por determinar la magnitud de los flujos de calor hacia la superficie desde el ASAA por medio del mecanismo de la DDC. Dicha cuantificación permitirá proponer si la DDC pudiera ser un mecanismo que favorece el derretimiento de hielo en cuerpos de agua delimitados por capa de hielo superficiales. La detección e implicancias físicas y biológicas de la DDC en el sistema de fiordos y canales de la Patagonia chilena abren una nueva línea de investigación en que la ciencia marina podrá concentrar su atención en el futuro.

## AGRADECIMIENTOS

Los resultados obtenidos en esta investigación forman parte del proyecto Postdoctoral FONDECYT-3120038 del Dr. Iván Pérez-Santos. Además, cuenta con el apoyo del proyecto FONDAP-COPAS, RP1 y el COPAS Sur-Austral, línea 4. Finalmente, queremos agradecer el apoyo en terreno del técnico Rodrigo Mansilla.

## REFERENCIAS

- Aiken, C.M. 2008. Barotropic tides of the Chilean Inland Sea and their sensitivity to basin geometry. *J. Geophys. Res.*, 113, C08024, doi: 10.1029/2007JC004593.
- Farmer, D.M. & H.J. Freeland. 1983. The physical oceanography of fjords. *Prog. Oceanogr.*, 12: 147-220.
- González, H.E., L. Castro, G. Daneri, J.L. Iriarte, N. Silva, C. Vargas, R. Giesecke & N. Sánchez. 2011. Seasonal plankton variability in Chilean Patagonia fjords: carbon flow through the pelagic foodweb of the Aysen Fjord and plankton dynamics in the Moraleda Channel basin. *Cont. Shelf Res.*, 31: 225-243.
- Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC), SCOR & IAPSO. 2010. The international thermodynamic equation of seawater – 2010: Calculation and use of thermodynamic properties. IOC Manuals and Guides No. 56, UNESCO, 196 pp.
- Ruddick, B.R. 1983. A practical indicator of the stability of the water column to double-diffusive activity. *Deep-Sea Res.*, 30: 1105-1107.
- Schmitt, R.W. 1994. Double diffusion in oceanography. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 26: 255-285.
- Schmitt, R.W. 2001. Double-Diffusive convection. *Encyclopedia of Ocean Sciences*, R.A. Weller, S. 3100-314, doi:10.1006/rwos.2001.0159.
- Sievers, H. & N. Silva. 2008. Water masses and circulation in austral Chilean channels and fjords. In: N. Silva & S. Palma (eds.). *Progress in the oceanographic knowledge of Chilean interior waters, from Puerto Montt to Cape Horn*. Comité Oceanográfico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 53-58.
- Silva, N. & C. Calvete. 2002. Physical and chemical oceanographic features of southern Chilean inlets between Penas Gulf and Magellan Strait (Cimar-Fiordo 2 cruise). *Cienc. Tecnol. Mar*, 25(1): 23-88.

You, Y. 2002. A global ocean climatological atlas of the Turner angle: implications for double-diffusion and water-mass structure. *Deep-Sea Res.*, 1(49): 2075-2093.

*Received: 26 March 2012; 17 January 2013*