

## **CARACTERÍSTICAS DEL FLUJO RESIDUAL EN CANALES PULLUCHE Y CHACABUCO\***

CHARACTERISTICS OF RESIDUAL FLOW IN  
PULLUCHE AND CHACABUCO CHANNELS

MARIO CÁCERES<sup>1</sup>  
ARNOLDO VALLE-LEVINSON<sup>2</sup>  
JUAN FIERRO<sup>3</sup>  
MÓNICA BELLO<sup>3</sup>  
MANUEL CASTILLO<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Valparaíso,  
Borgoño 16344, Viña del Mar, Chile.  
E-mail: mario.caceres@uv.cl

<sup>2</sup>University of Florida,  
Gainesville, FL 32611, USA.

<sup>3</sup>Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada,  
Errázuriz 254, Valparaíso, Chile.

<sup>4</sup>Pontificia Universidad Católica de Chile,  
Casilla 114-D, Santiago, Chile.

*Fecha de recepción: marzo de 2006 - Versión corregida aceptada: mayo de 2007.*

### RESUMEN

Utilizando mediciones de corrientes con un Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP), se calcularon flujos residuales en tres sitios seleccionados de los canales Pulluche y Chacabuco, para estudiar el rol de esta vía de conexión en el intercambio de los flujos entre el área interior de fiordos del sur de Chile (Lat. 45,7° S) con el área oceánica adyacente.

Se realizaron estimaciones de las magnitudes de los flujos de entrada y salida en las secciones transversales de los sitios de estudio, observándose la dominancia del típico patrón de flujo estuarino de dos capas en las distribuciones verticales, con profundidad de la capa superficial entre 20 y 30 m. Se propone un esquema de circulación donde los flujos de salida superficial del canal Errázuriz y del paso Tres Cruces, confluyen hacia el oeste a través del canal Chacabuco. Parte de este flujo se evacuaría a través del canal Pulluche y otra lo haría a través del canal Utarupa en dirección noroeste. Bajo la capa superficial, el flujo de entrada de aguas oceánicas a través del canal Pulluche estaría seriamente limitada por la constricción, estimándose que el intercambio hacia el canal Chacabuco a través de esta vía es mínimo o nulo. Se sugiere que el principal aporte de agua oceánica al canal Chacabuco se realiza a través del canal Utarupa. Al llegar a la confluencia con el canal Errázuriz, el flujo de entrada lo hace principalmente hacia el norte por este canal.

---

\* Proyecto CONA-C9F 03-03.

El efecto de la constricción y los patrones de distribución de velocidades en relación con la batimetría son discutidos en este artículo.

**Palabras claves:** Flujo residual, ADCP, estuarios, fiordos, Chile.

## ABSTRACT

Using ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) current measurements, residual fluxes on three selected sites of Pulluche and Chacabuco channels were estimated to study the role of this connection in the exchange of flows between the inland sea and the shelf of southern Chile (Lat. 45,7° S)

Estimates of flux magnitudes for inflows and outflows in the cross sections showed dominance of the typical estuarine circulation pattern of two layers in the distributions. The depth of the surface layer was typically 20-30 m. A circulation diagram is proposed where the surface outflows coming from Errázuriz channel and Tres Cruces pass converge to Chacabuco channel on its eastern side. A portion of this westward flow would exit to the shelf through Pulluche channel, while the other portion would follow northwestward through Utarupa channel. Below the outflow surface layer, inflows through Pulluche channel would be severely blocked by a region of sill and contraction, which would make inflow exchanges scarce or inexistent. The suggestion is that the main source of oceanic waters to Chacabuco channel comes through Utarupa channel, which bifurcate chiefly northward at the confluence with Errázuriz channel.

The effect of the contraction and the patterns of the cross-sections velocity fields in relation to bathymetry are discussed in the text.

**Key words:** Residual flows, ADCP, estuaries, fjords, Chile.

## INTRODUCCIÓN

El término "corriente residual" es definido aquí como aquella parte de la corriente que queda después de remover las señales de frecuencia semidiurna y diurna durante uno o más ciclos de marea. En la mayoría de los estuarios, es bien sabido que una partícula de agua no retornará a su posición inicial después de transcurrido un ciclo de marea. Esto se debe a las asimetrías de las corrientes de marea durante la llenante y la vaciante, producidas por una diversidad de factores tales como el efecto del viento, la descarga de ríos, batimetría y morfología de la costa, entre otros.

Los flujos residuales son importantes por el rol que ellos juegan en un amplio rango de fenómenos estuarinos que incluyen, entre otros,

balances de sal, generación de zonas de máxima turbidez, dispersión de fitoplancton y contaminantes, transporte de sedimento en suspensión e identificación de zonas de retención de partículas (Kjerfve *et al.*, 1981, Jay *et al.*, 1996). Su comprensión es también un área de constantes desafíos en el campo de la mecánica de fluidos debido a los múltiples mecanismos no lineales que los generan.

En sistemas de fiordos un perfil vertical de velocidades residuales para una circulación de tipo estuarina típica mostrará un patrón de dos capas, con una primera capa superficial de flujo de salida (fiordo abajo) y una segunda capa profunda de entrada (fiordo arriba) del sistema (Dyer, 1997). En la primera capa habrá dominancia de la vaciante generalmente atribuida al efecto de la descarga del río y en la segunda

capa dominancia de la llenante por efecto de la acción de la marea. Se ha observado, sin embargo, que este clásico esquema de dos capas podría ser alterado por la acción sostenida del viento soplando hacia el interior de un fiordo, presentándose una tercera capa de flujo compensatorio de salida cercana al fondo (Cáceres *et al.*, 2002). En la dimensión transversal, se han encontrado correlaciones con la topografía de fondo y asimetrías laterales (Li & O'Donnell, 1997; Wong, 1994; Cáceres *et al.*, 2003; Valle-Levinson & Atkinson, 1999; Valle-Levinson & Lwiza, 1995, 1997), y alteraciones al balance dinámico transversal (Cáceres *et al.*, 2002).

La ruta definida por la unión de los canales Pulluche y Chacabuco (Fig. 1), constituye la

vía de intercambio zonal ubicada más al sur de la región de fiordos del sur de Chile entre 41° S y 47° S, conectando el mar interior y la zona de la plataforma continental adyacente. Esta constituye también una de las rutas de navegación habituales para las naves que transitan desde el área oceánica hacia el canal Errázuriz y viceversa. La importancia y el rol de esta conexión como ruta de intercambio de flujos con el océano adyacente no ha sido aun estudiada. Se estima que ésta es la principal vía de intercambio este-oeste en esta latitud, ya que la circulación a través de la única ruta alternativa ubicada levemente al sur, se encontraría severamente restringida por la estrechez de morfología costera en la zona sur del canal Alejandro (ver figura 1).

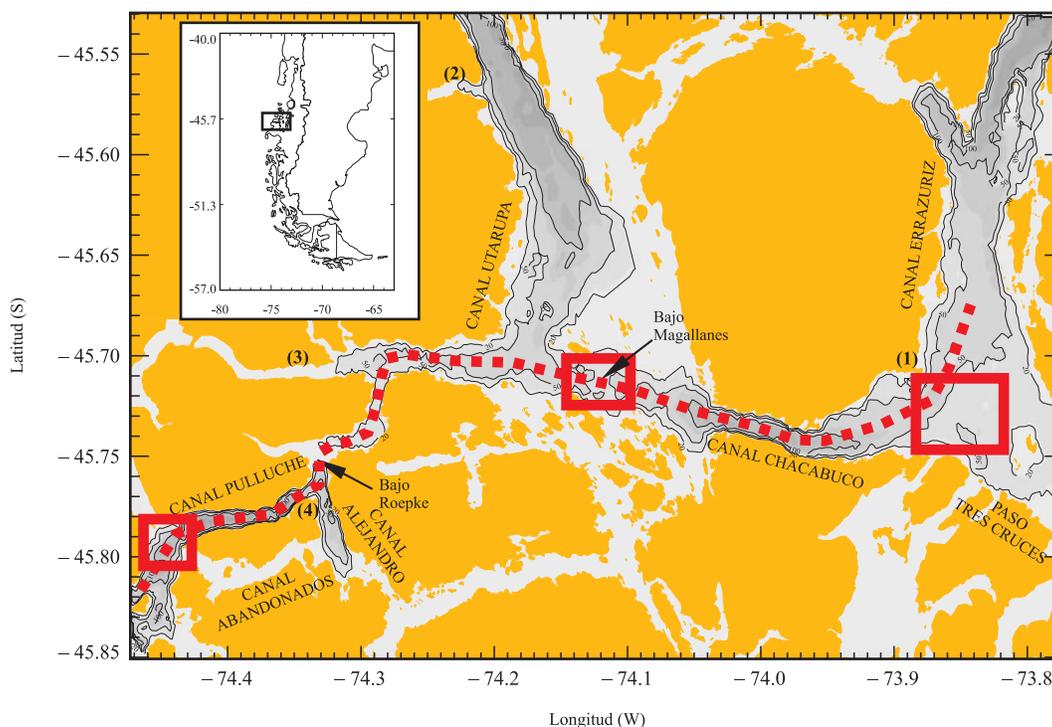


Fig. 1: Área de estudio. Línea punteada indica la unión de canales Pulluche y Chacabuco. Los rectángulos muestran los sitios de mediciones con ADCP remolcado. Los contornos de la batimetría son 20, 50 y 100 m. Números entre paréntesis son estaciones de mareas históricas (ver texto para denominación)

Fig. 1: Study area. Dotted line represents the connection between Pulluche and Chacabuco channels. Boxes depicts the places of ADCP towed measurements. Bathymetric contours are 20, 50 and 100 m. Numbers in brackets are locations of historical tidal gauge (see names in the text).

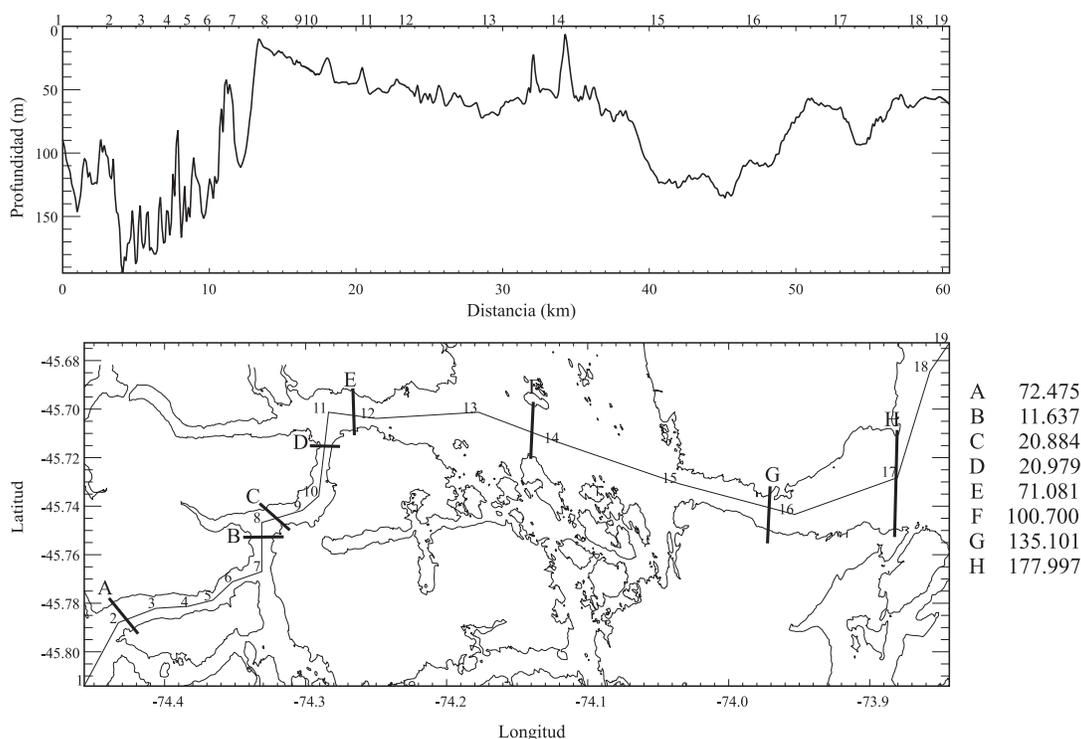


Fig. 2: Perfil batimétrico del fondo (panel superior) y ubicación de los puntos seleccionados (panel inferior). Las áreas de las secciones transversales (en  $m^2$ ) se indican en la tabla de la derecha.

Fig. 2: Bottom profile (upper panel) and location of selected point (lower panel). Transverse sectional areas ( $m^2$ ) are shown on the right.

La observación de un perfil batimétrico a lo largo de la línea punteada (Fig. 2), muestra que la región más estrecha del canal Pulluche, en el sector del bajo Roepke, es también la más somera de todo el perfil y la de menor área de sección transversal (letra B, figura 2), sugiriendo una severa restricción a la circulación en la dirección general este-oeste. Las características de la circulación en esta sección zonal, además, son escasamente conocidas, no existiendo a la fecha trabajos publicados que reporten sus rasgos principales. La escasa información existente se refiere a lo informado por el Derrotero de la Costa de Chile (SHOA), que reporta observaciones de corrientes no instrumentales en el sector del bajo Roepke de hasta 2 m/s, aceleraciones esperadas por la batimetría y constricción de la línea de costa. Este mismo documento informa la tendencia del flujo a desplazar las naves que circulan en

el canal Chacabuco hacia el norte en la región del bajo Magallanes y hacia la costa norte en la confluencia de este canal con el canal Errázuriz.

Los máximos rangos de marea en sicigias reportados en la carta náutica SHOA N° 8640 (2ª edición, 2003) para este sector son, de este a oeste, de 2,64 m en punta Harchy (1), 2,17 m en caleta Aurora (2), 2,28 m en estero Lyng (3) y 2,09 en punta Morro (4) (Fig. 1). El aporte de agua de baja salinidad que ingresa al canal Chacabuco por el este proviene desde el canal Errázuriz, que recoge una parte de la pluma del fiordo Aysén y otros aportes menores, y desde el paso Tres Cruces, que recoge los aportes de glaciares y ríos que desembocan al estero Elefantes. Sólo existen mediciones de descarga de ríos en el río Aysén, principal fuente de agua dulce al fiordo del mismo nombre, que alcanza

un valor medio anual de 620 m<sup>3</sup>/s (Niemeyer & Cereceda, 1984)

Una estimación de los flujos de entrada y de salida a partir de las velocidades residuales obtenidos en esta sección zonal podría ayudar a la comprensión de los mecanismos de intercambio con el océano adyacente. En particular, una estimación del efecto del bajo Roepke y la constricción del canal Pulluche en el quiebre de la circulación estuarina de dos capas, es un aspecto que merece revisión.

Las mediciones de velocidades de corrientes en estuarios haciendo uso de ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) desde embarcaciones móviles han tomado un fuerte impulso en los últimos 20 años, constituyendo una herramienta de resolución espacial y temporal sin precedentes para el estudio de los componentes marales y residuales del campo de velocidades. Algunos ejemplos de su aplicación se dan en Geyer & Signell, 1990; Valle-Levinson & Lwiza, 1995; Jay *et al.*, 1996; Valle-Levinson & Atkinson, 1999 y Cáceres *et al.*, 2004.

Haciendo uso de métodos de mediciones de velocidades con ADCP remolcado, el propósito del presente trabajo es describir los principales rasgos del flujo residual en un sector del canal Pulluche y en dos sectores del canal Chacabuco, y hacer estimaciones de la magnitud y destino de los flujos observados en las secciones transversales de los tres sitios.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se efectuaron mediciones de corrientes con Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) para estudiar la variabilidad del flujo en tres sitios de la región de fiordos: canal Pulluche, en el sector central del canal Chacabuco y en la confluencia de éste con el canal Errázuriz (Figs. 1 y 3, Tabla I). Los datos de canal Pulluche fueron obtenidos durante la segunda etapa del crucero CIMAR 9 Fiordos, mientras que los datos en el canal Chacabuco correspondieron a mediciones efectuadas en una campaña de mediciones de corrientes del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) en abril del año 2004. Las tres campañas de mediciones fueron realizadas con un ADCP RDI WH de 307.2 kHz instalado mirando hacia abajo en un catamarán de 3 m de largo, remolcado a una velocidad máxima de 5 nudos por la L/M "Petrel" (canal Pulluche) y por el AGOR "Vidal Gormaz" (canal Chacabuco).

Se efectuaron repeticiones de los circuitos mostrados en la figura 3 siguiendo la secuencia de las letras indicadas en los vértices. El número de repeticiones, tiempo total de las mediciones, tamaño de celda vertical y tiempo promedio entre perfiles verticales se indica en la Tabla I. El alcance máximo del instrumento permitió la obtención de datos confiables hasta los 100-120 m de profundidad. Los datos de navegación fueron obtenidos con un GPS Leica.

Tabla I. Características de las mediciones con ADCP.

Table I. ADCP measurement features.

	Fecha	Tiempo total (h)	Repeticiones	Tamaño celda vertical (m)	Tiempo entre perfiles (s)
Canal Pulluche	15 nov. 2003	24	31	2	30
Canal Chacabuco (en bajo Magallanes)	9 abril 2004	121,1	11	1	28
Canal Chacabuco (en confluencia C. Errázuriz)	10 abril 2004	12,3	8	2	28

Los datos de compás del ADCP fueron corregidos siguiendo el método de Joyce (1989) y los datos erróneos de velocidades fueron removidos siguiendo el procedimiento explicado por Valle-Levinson & Atkinson (1999). La señal semidiurna de la marea, representada por la constituyente  $M_2$  con un período de 12.42 horas, y la señal diurna (en el circuito de 24 horas), representada por la constituyente  $K_1$ , con un período de 23.93 horas, fueron separadas de la señal submareal de los componentes del flujo observado usando análisis de regresión sinusoidal de mínimos cuadrados (ver Lwiza *et al.*, 1991). La señal residual (o submareal) representó así una aproximación a la media del tiempo de observación. En los tres sitios el ajuste de los datos con el análisis de mínimos cuadrados explicó sobre el 85% de la variación de éstos.

Se adoptó un sistema de coordenadas en el cual los componentes de velocidad de la corriente a lo largo y a lo ancho de los canales eran  $u$  y  $v$ , respectivamente. Los datos de velocidad fueron rotados en la dirección contra los punteros del reloj en un ángulo orientado a la dirección de más alta variabilidad e intensidad de las corrientes de marea y de los más débiles flujos de marea a lo ancho del fiordo.

Se hicieron estimaciones de los flujos ( $F$ ) en las secciones transversales interpolando los datos de velocidades ( $u$ ) a una grilla regular con celdas de tamaño vertical original ( $h$ ) indicado en la Tabla I (en m) y de tamaño horizontal ( $d$ ) normalizado a 100 m, un poco mayor que el dato original típico de 75 m, variable por la velocidad de la embarcación. Se utilizó la expresión

$$\langle F \rangle = \Sigma \langle u_{ik} \rangle \cdot h \cdot d$$

donde  $u_{ik}$  es la velocidad (m/s) en la profundidad  $i$  y en la distancia  $k$ , y los paréntesis en ángulo indican residual o promedio en uno o dos ciclos de marea. Los datos positivos de  $\langle F \rangle$  correspondieron a flujos de entrada (hacia el continente) y los datos negativos a flujos

de salida (hacia el mar), mientras que el flujo neto a la diferencia entre ambos.

Datos de viento fueron obtenidos a bordo del AGOR "Vidal Gormaz" durante la realización de las repeticiones en las estaciones indicadas en la Tabla I. En el canal Pulluche las condiciones de viento fueron preferentemente de calma, con rachas ocasionales menores a 2 m/s durante las 24 horas del experimento. En el canal Chacabuco, la intensidad media del viento en bajo Magallanes fue de 4,5 m/s y en Chacabuco-Errázuriz de 6,9 m/s.

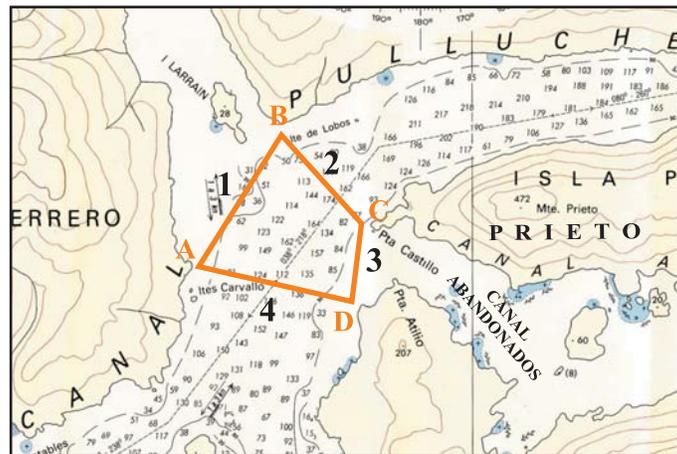
## RESULTADOS

El estudio de la variabilidad de los flujos residuales en dos canales que conectados entre sí sugieren una vía de intercambio de las aguas estuarinas del mar interior con aquellas de la plataforma adyacente, es abordado en este trabajo. Aunque se otorga énfasis a la dimensión transversal, también se analizan en algunos casos aspectos de la variabilidad longitudinal del flujo.

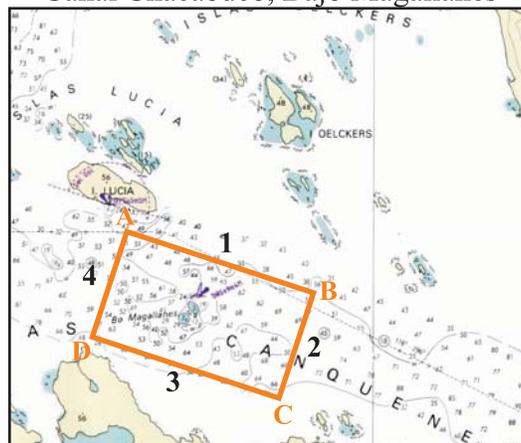
### *Canal Pulluche*

En este canal (Fig. 4) se muestran los flujos residuales en dos transectos transversales. En el transecto 2 dominan los flujos de salida (en azul) en la mayor parte de la sección transversal, con flujos débiles de entrada (en amarillo) en la región central de ésta. En el transecto 4 también dominan los flujos de salida pero hay una región de entrada del flujo sobre el lado del vértice D de la sección, representativo del flujo que entra hacia el canal Abandonados. Una segunda región de flujo de entrada se observa cercana al fondo y sobre el lado del vértice A, representativo del flujo de marea que accede al canal de la isla Larrain. Los flujos residuales en la forma de vectores a dos profundidades son mostrados en la figura 5. En la capa superficial, representada por los vectores a 5 m, el flujo es preferentemente de salida hacia el océano, alcanzando valores residuales típicos de 10 cm/s. La evacuación de las aguas

Canal Pulluche



Canal Chacabuco, Bajo Magallanes



Canal Chacabuco, Canal Errázuriz

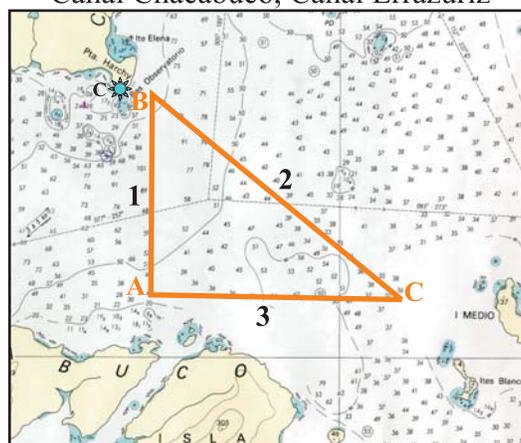


Fig. 3: Ubicación de los circuitos de ADCP remolcado en los tres sitios de mediciones. Números indican transectos.

Fig. 3: Locations of the three circuits of ADCP towed measurements. Numbers depict transects.

del canal Abandonados en superficie también ocurre a través del canal Pulluche. En la región más profunda, representada por las velocidades a 50 m, dominan los flujos de salida con excepción del lado del vértice D en el transecto 4 y del lado del vértice B en el transecto 2, que lo hacen hacia el interior del canal. Parte del flujo de entrada también se deriva hacia el sector norte de la isla Larraín en la región profunda.

#### *Canal Chacabuco en bajo Magallanes*

La figura 6 muestra los contornos del flujo residual en los transectos 2 y 4. En ambos casos se observan dos capas de flujo, una superficial de salida del sistema, y otra profunda de entrada. La profundidad de la capa superficial es, sin embargo, aproximadamente 10 m menos en el transecto 4. Los vectores de veloci-

dad residual son mostrados en la figura 7. En la capa superficial (4 m) las velocidades residuales son mayores en el lado del transecto 1 en comparación con el lado del transecto 3, y en el transecto 2 en comparación con el 4. Los vectores del lado del transecto 1 siguen la dirección del eje del canal, mientras que los del lado del transecto 3 tienden a irse hacia el sur. En la zona profunda (40 m) las velocidades son menores que en superficie, pero la tendencia general es a seguir la dirección del eje del canal. Los vectores del transecto 4 muestran una tendencia a circular por el lado norte del bajo Magallanes.

#### *Canal Chacabuco en confluencia con canal Errázuriz*

La figura 8 muestra los contornos del flujo residual en los transectos 2 y 3. No se presenta

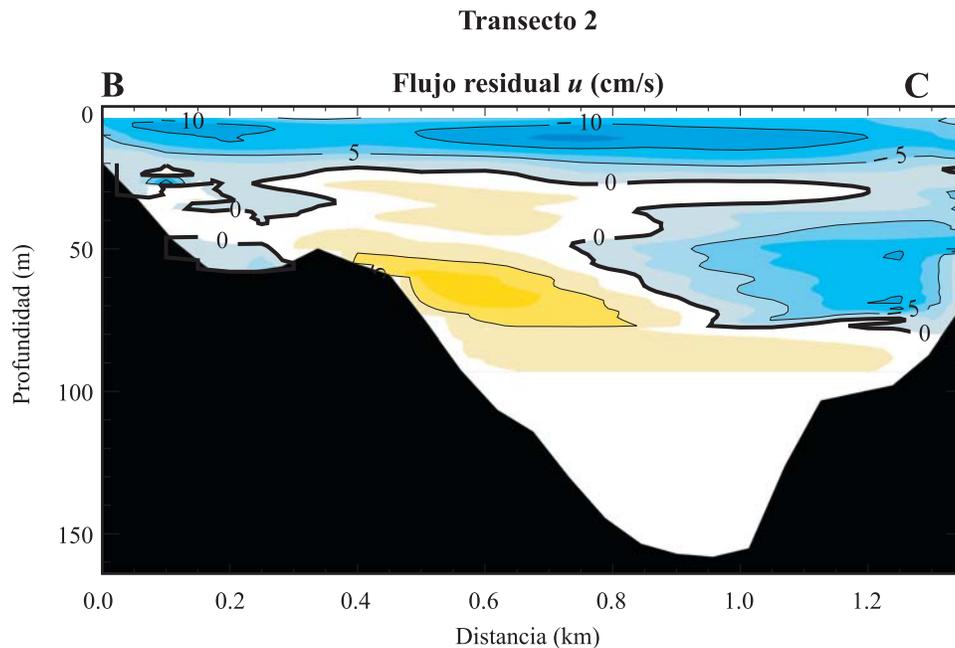


Fig. 4: Contornos de velocidades residuales ( $u$ ) longitudinales en canal Pulluche. Tonos amarillos (positivos) son flujos de entrada y azules (negativos) flujos de salida. Banda blanca sobre el fondo corresponde a datos contaminados por el efecto lateral del lóbulo de emisión del instrumento, no considerados en el análisis. Mirando hacia el interior del canal.

Fig. 4: Residual velocity ( $u$ ) contours of the longitudinal component in Pulluche Channel. Yellow tones (positives) are inflows and blue tones (negatives) are outflows. White band over the bottom mask contaminated data by side lobe effect of the instrument, and they are not considered in the analysis. Looking up-fjord.

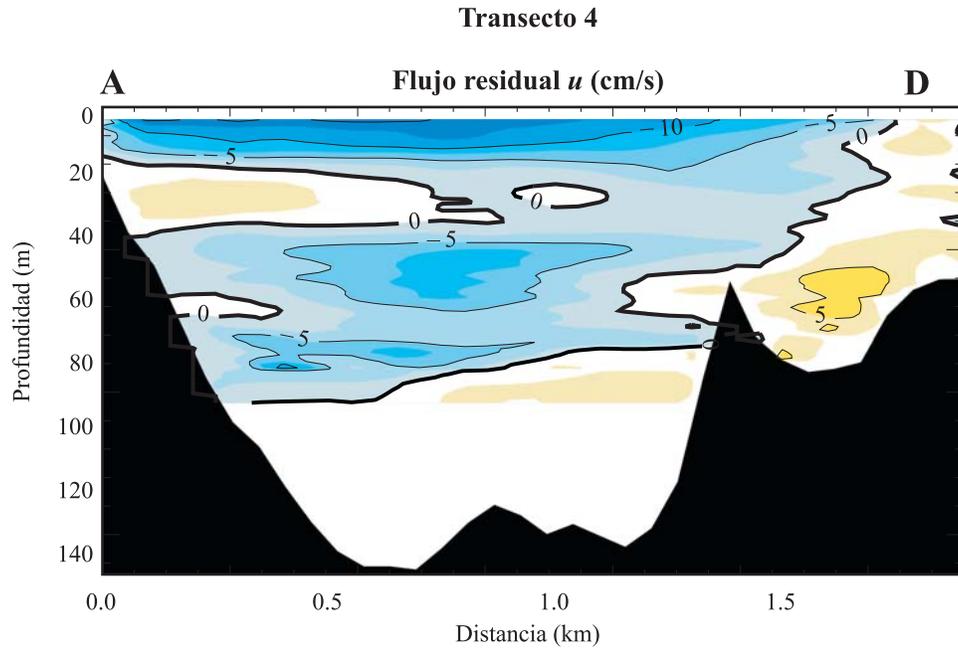


Fig. 4: Continuación.  
 Fig. 4: To be continued.

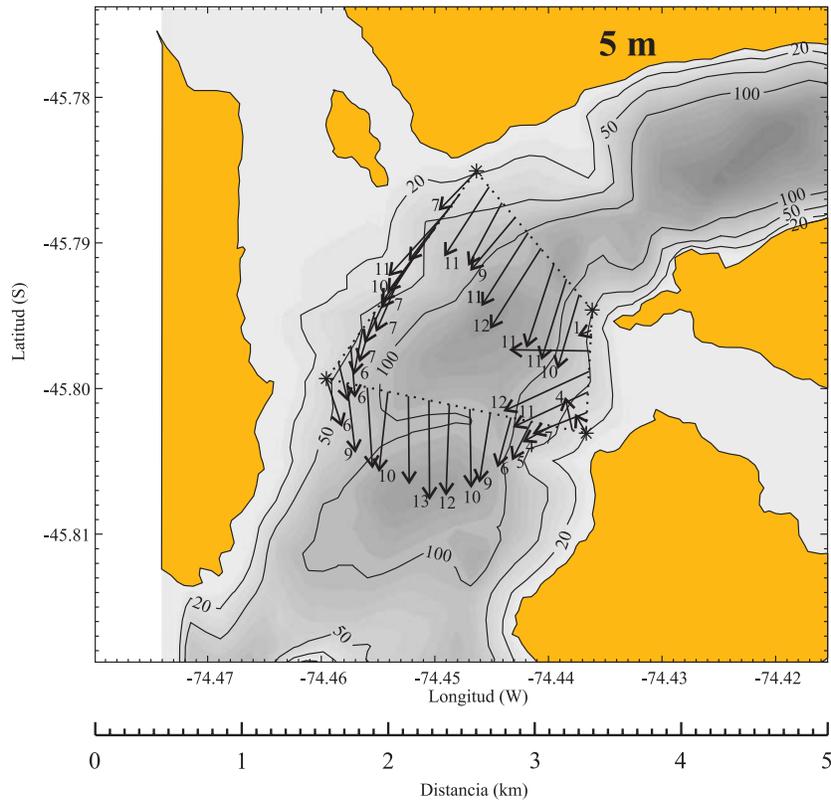


Fig. 5: Vectores de velocidad residual a dos profundidades en canal Pulluche.  
 Fig. 5: Residual velocity vectors at two selected depths in Pulluche Channel.

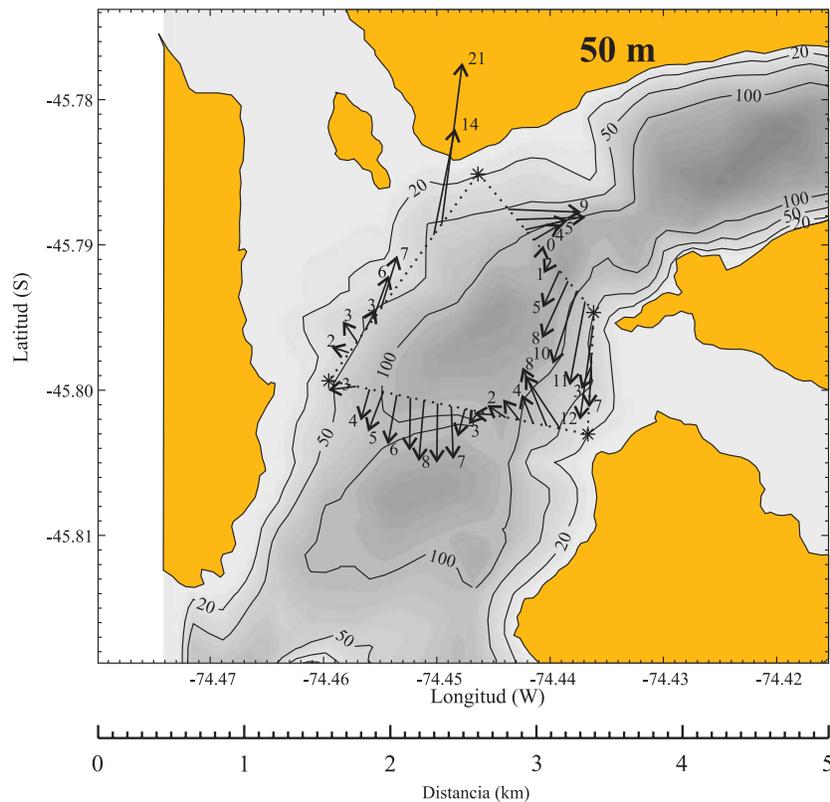


Fig. 5: Continuación.

Fig. 5: To be continued.

el flujo residual en contornos del transecto 1 debido a una marcada dominancia de flujos laterales hacia el norte, originados por el canal profundo de orientación noreste-suroeste, que distorsiona la distribución en la componente longitudinal u de las velocidades, usada para estimar los flujos a lo largo. En el transecto 2 se observan dos capas de flujo, una superficial de salida del sistema, y otra profunda de entrada concentrada en el canal. El transecto 3 muestra flujo hacia el sur en la mayor parte de la sección, sin evidencias de dos capas, y flujo hacia el norte concentrado preferentemente en el sector oeste en superficie. Los vectores de velocidad residual (Fig. 9) muestran los flujos en superficie provenientes del canal Errázuriz y del paso Tres Cruces que confluyen hacia el oeste por el canal Chacabuco. En la zona profunda, el flujo que entra sigue la dirección ge-

neral del canal que se curva desde la dirección este hacia el norte. Sólo una pequeña porción del flujo ingresa en la zona profunda hacia el paso Tres Cruces, la que se asume se disipará por efecto de la disminución de profundidades hacia el sur. Así, la mayor parte del flujo de entrada seguirá su curso por el canal Errázuriz hacia el norte.

### Flujos

La Tabla II muestra los flujos de entrada, salida y flujo neto en las distintas secciones transversales durante los experimentos, estimados a partir de las velocidades residuales. Se incluye, además, una columna con la profundidad aproximada de la primera capa de salida del flujo residual, estimada a partir de la observación de las figuras 4, 6 y 8.

Tabla II. Flujos en las secciones transversales estimadas de las velocidades residuales.

Table II. Fluxes in transversal sections estimated from residual velocities.

Tran.		Entrada (x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /s)	Salida (x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /s)	Flujo neto (x 10 <sup>3</sup> m <sup>3</sup> /s)	Profundidad aprox. capa superficial (m)
1	Pulluche transecto 4	11,2	-42,1	-30,8	20+
2	Pulluche transecto 2	12,7	-31,3	-18,6	20+
3	Chacabuco en bajo Magallanes transecto 4	44,5	-33,2	11,3	20
4	Chacabuco en bajo Magallanes transecto 2	62,3	-92,1	-29,8	30
5	Chacabuco en canal Errázuriz transecto 2	110,8	-54,4	56,3	20
6	Chacabuco en canal Errázuriz transecto 3	25,2	-57,5	-32,3	20-

(<sup>+</sup>) Indica que los flujos de salida se extienden a sectores más profundos por los costados de la sección transversal.

## DISCUSIÓN

La estimación inicial de una diferencia en las características de los flujos del canal Chacabuco con los del canal Pulluche, por efecto de la constricción y baja profundidad en el sector del bajo Roepke, se aborda a continuación a partir del análisis de los resultados.

La observación de los contornos de velocidades residuales (figuras 4, 6 y 8) muestra con claridad la presencia de dos capas en los transectos del canal Chacabuco, indicio de estratificación vertical, situación que no es tan clara en los transectos del canal Pulluche. Esto sugiere flujos de entrada débiles en el canal Pulluche, lo que es corroborado en la Tabla II, donde éstos son notoriamente menores (2 a 3 veces menos) en el canal Pulluche que los observados en el canal Chacabuco. Los de salida, en cambio, son comparables entre sí.

Una interesante aproximación al efecto de la batimetría de la región somera del canal Pulluche, sobre el intercambio de los flujos en la dirección este-oeste surge del análisis de la Tabla II. Los valores del flujo de salida en el transecto 4 del bajo Magallanes y del transecto

2 del canal Pulluche, los más cercanos a la región somera del canal Pulluche, son similares entre sí; y la profundidad de la capa superficial de flujo de salida entre ambos transectos es de alrededor de 20 m. Esta profundidad es mayor a las más someras del canal Pulluche (10 m en bajo Roepke), por lo que existen altas probabilidades de que la sección transversal en esta región somera sea ocupada exclusivamente por el flujo de salida superficial.

Un anclaje de ADCP instalado a 17 m de profundidad sobre una sonda de 20 m en el bajo Roepke, durante la campaña de mediciones del canal Chacabuco, mostró magnitudes de la velocidad máxima en la componente  $v$  (la que contiene más del 90% de la variabilidad del sector) del orden de 2 m/s. En el sitio del anclaje la sección transversal tiene un área de 11.637 m<sup>2</sup> (letra B, figura 2) Si se asumieran condiciones de velocidades homogéneas en toda la sección, el máximo flujo intrama-real que permitiría esta sección sería de 23.000 m<sup>3</sup>/s aproximadamente, lo que aún es bajo comparado con cualesquiera de los flujos residuales de salida de la Tabla II. Es decir, aún en las condiciones de máxima salida del flujo durante la vaciante, la capacidad de esta cons-

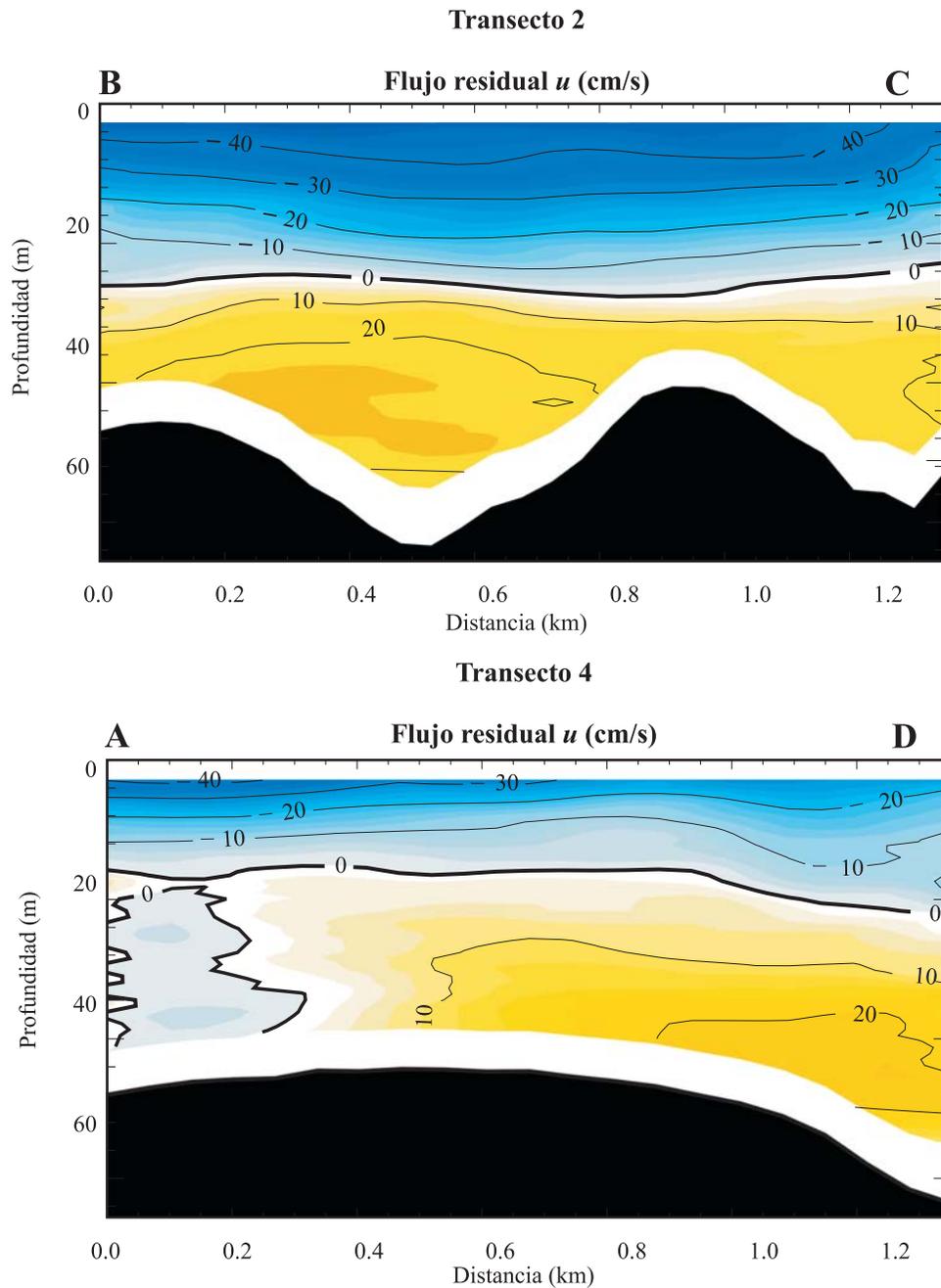


Fig. 6: Contornos de velocidades residuales ( $u$ ) longitudinales en canal Chacabuco en bajo Magallanes. Tonos amarillos (positivos) son flujos de entrada y azules (negativos) flujos de salida. Banda blanca sobre el fondo corresponde a datos contaminados por el efecto lateral del lóbulo de emisión del instrumento, no considerados en el análisis. Mirando hacia el interior del canal.

Fig. 6: Residual velocity ( $u$ ) contours of the longitudinal component in Chacabuco Channel on Magallanes bank. Yellow tones (positives) are inflows and blue tones (negatives) are outflows. White band over the bottom mask contaminated data by side lobe effect of the instrument, and they are not considered in the analysis. Looking up-fjord.

tricción no alcanza a evacuar la totalidad del flujo residual de la capa superficial, sugiriendo que aquella parte que no es evacuada por esta vía lo hace a través del canal Utarupa. Los datos del flujo medio en los dos meses de mediciones en dicho anclaje se muestran en la Tabla III. Estos indican que la mayor parte del flujo en un perfil vertical corresponde a flujo de salida, existiendo sólo una delgada capa de flujo de entrada de no más de 3 m de espesor cercana al fondo. Los cambios de grosor o eventual desaparición de esta capa de fondo en su trayectoria hacia el interior del sistema son materia de futuros estudios. Considerando la dimensión de la sección transversal en el bajo Roepke y la dominancia del flujo medio de salida en un perfil vertical, se estima improbable que una parte significativa del flujo de entrada ingrese al canal Chacabuco a través del canal Pulluche, tendiendo más bien a actuar como una región de bloqueo.

La existencia de una zona de bloqueo al flujo de entrada puede ocurrir bajo condiciones de flujo "fuerte" descrita por Farmer & Armi (1986), para valores extremos asociados a flujo supercrítico. La solución de Stigebrandt (1980) para constricciones de corta longitud podría aplicarse para estudiar la magnitud del bloqueo. En el caso de la constricción del canal Pulluche, ésta tiene un largo aproximado de 8 km, corto comparado con la longitud de la onda de marea semidiurna, pero no lo suficientemente corto como para despreciar los efectos friccionales, por lo que esta solución

tiene aplicación. Mediciones de nivel del mar de largo plazo, no disponibles en este estudio, debieran efectuarse en ambos lados de la constricción para la aplicación de este cálculo. Sin embargo, contornos de salinidad obtenidos en estaciones a lo largo de la ruta en estudio (canales Pulluche y Chacabuco) (Silva *et al.*, 1998) no muestran rasgos de bloqueo, situación que podría atribuirse a que se trata de una observación aislada dentro de un ciclo de marea. El aporte de aguas de más alta salinidad provenientes desde el norte a través del canal Utarupa, podría también contaminar la comparación de salinidades de aguas profundas entre ambos extremos de la constricción. Así, la presencia de flujo de dos capas durante el período intramareal es una materia que requiere futura evaluación.

Otro aspecto que sobresale en la Tabla II es el notorio aumento del flujo de entrada en el transecto 2 de Chacabuco-Errázuriz, lo que generó el único transecto con valores positivos en el flujo neto. Es decir, está ingresando más agua de origen oceánico hacia el norte que aquella que sale hacia el sur, situación que puede atribuirse al efecto del viento, que, como se indicó, durante el experimento sopló con velocidades medias de 6,9 m/s, con mayor frecuencia en la dirección hacia el norte. Este aumento del flujo de entrada (y disminución del de salida) por efecto del viento ya había sido reportado por Valle-Levinson & Lwiza (1995) para un estuario somero, mientras que Cáceres *et al.* (2003) observaron que bajo condiciones

Tabla III. Velocidades promedio de la componente v (norte-sur) de la corriente en el anclaje de ADCP en bajo Roepke.

Table III. Current mean velocities of the v-component (north-south) in the ADCP mooring at Roepke.

Profundidad (m)	Velocidad (cm/s) (+) norte (-) sur
1	-4,82
5	-5,00
7	-6,30
10	-2,45
17	4,33

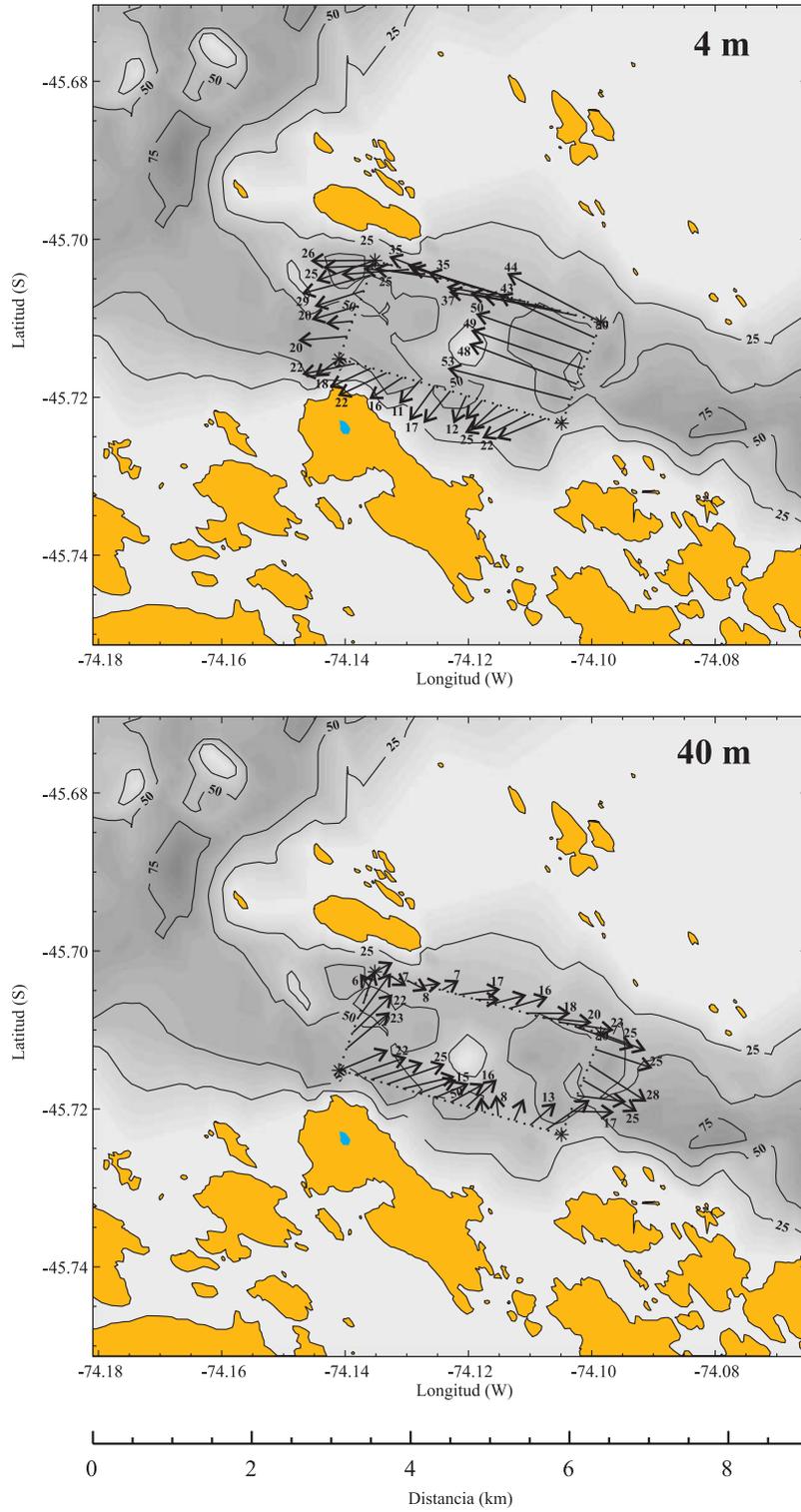


Fig. 7: Vectores de velocidad residual a dos profundidades en canal Chacabuco en bajo Magallanes  
 Fig. 7: Residual velocity vectors at two selected depths in Chacabuco Channel at Magallanes bank.

de viento superiores a 7 m/s en la dirección hacia el interior del fiordo, aumentaba el flujo de entrada subsuperficial y disminuía el de salida superficial. Tomando en consideración el efecto que puede estar produciendo la constricción, se propone un esquema de circulación integrado de los flujos de entrada y salida en la figura 10. Esta muestra que el flujo de salida

superficial proveniente principalmente del canal Errázuriz, confluye, junto al proveniente del paso Tres Cruces, hacia el oeste a través del canal Chacabuco. Una parte importante de este flujo puede estar evacuándose a través del canal Pulluche, mientras que una segunda parte debiera hacerlo a través del canal Utarupa en dirección noroeste, para salir finalmente al

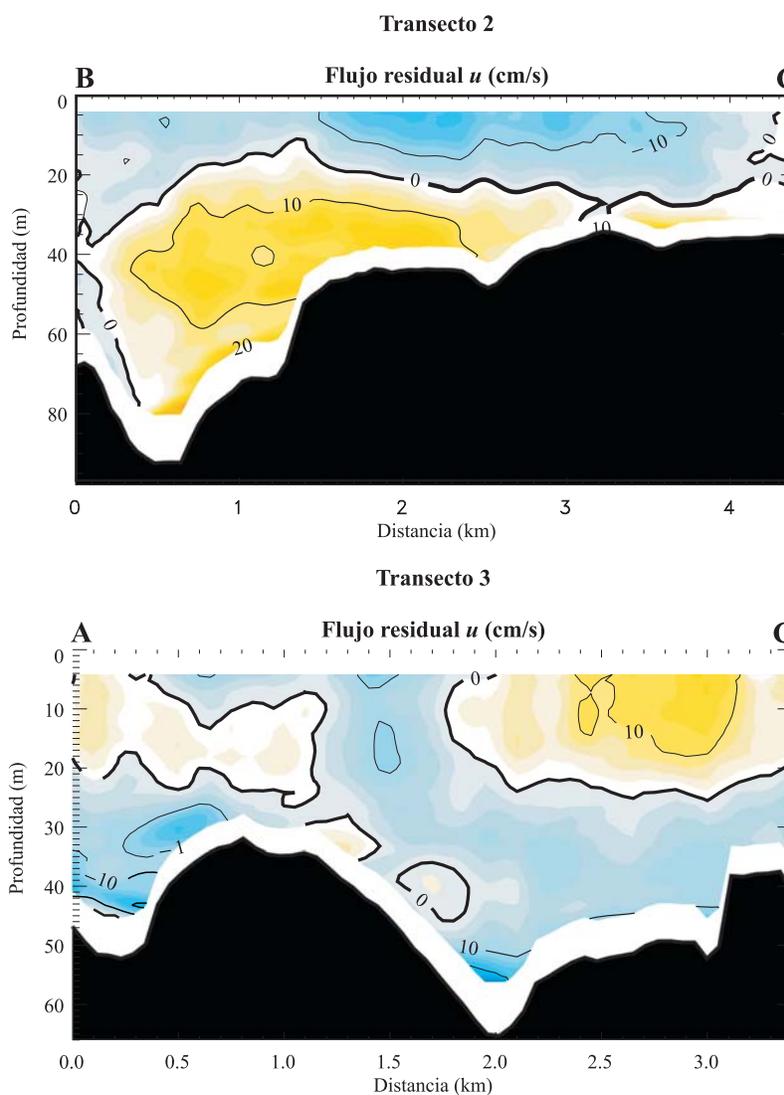


Fig. 8: Contornos de velocidades residuales ( $u$ ) longitudinales en canal Chacabuco en canal Errázuriz. Tonos amarillos (positivos) son flujos hacia el norte y azules (negativos) hacia el sur. Banda blanca sobre el fondo corresponde a datos contaminados por el efecto lateral del lóbulo de emisión del instrumento, no considerados en el análisis. Ambas figuras mirando hacia el norte.

Fig. 8: Residual velocity ( $u$ ) contours of the longitudinal component in Chacabuco Channel on Magallanes bank. Yellow tones (positives) are northward flows and blue tones (negatives) are southward flows. White band over the bottom mask contaminated data by side lobe effect of the instrument, and they are not considered in the analysis. Both panels looking northward.

océano a través del acceso occidental del canal Darwin. Bajo la capa superficial, el flujo de entrada de aguas oceánicas a través del canal Pulluche estaría seriamente limitada por la constricción del bajo Roepke, estimándose que el intercambio hacia el canal Chacabuco a través de esta vía es mínimo o nulo. Surge así, la presunción de que el principal aporte de agua oceánica al canal Chacabuco se realiza a través del canal Utarupa. Al llegar a la confluencia con el canal Errázuriz, el flujo de entrada lo hace principalmente hacia el norte por este canal, con una mínima componente hacia el sur, la que luego se anulará por disminución de la profundidad en el paso Tres Cruces.

Por otra parte, del análisis particular de cada transecto emergen algunos rasgos asociados al efecto de la batimetría que conviene destacar. Las secciones del transecto 2 del canal Pulluche (Fig. 4), transecto 2 del canal Chacabuco en canal Errázuriz (Fig. 8) presentan un rasgo común que es la presencia de las más altas magnitudes del flujo residual de entrada dominando en la región profunda del perfil batimétrico en la sección transversal. Esto concuerda con lo observado por Cáceres *et al.* (2003) para el fiordo Aysén, donde la batimetría submarina tuvo influencia en determinar la concentración de las mayores intensidades del flujo residual en los canales a ambos lados del promontorio submarino. Esta observación está de acuerdo con lo esperado para un tipo de circulación gravitacional, como se observa en estuarios someros (Valle-Levinson & Lwiza, 1995, 1997), y también ha recibido atención para una solución analítica por Wong (1994). Usando una sección transversal en un estuario somero, este autor propuso un esquema en el que la batimetría rompe con el clásico patrón de estratificación vertical de dos capas por circulación estuarina. Utilizando una sección triangular como perfil de fondo, el flujo de entrada se concentra en el centro sobre la región profunda del perfil, mientras que el flujo de salida lo hace por los costados en las regiones someras. Esta solución, sin embargo, tiene aplicación sólo en estuario someros, siendo su

parametrización en estuarios profundos una materia aun pendiente por resolver. En correspondencia a lo observado por Valle-Levinson & Lwiza (1995, 1997), en el caso de la figura 8, también las más altas magnitudes del flujo de salida se encuentran en el sector más somero, creando así una notoria asimetría lateral entre los flujos residuales de entrada y salida.

En aquellas secciones donde el efecto batimétrico no era tan marcado (Fig. 6), la inclinación de la interfaz transversal de velocidades positivas y negativas, en este caso casi horizontal, no permite estimar aproximaciones al tipo de balance dinámico transversal, como lo presentan Cáceres *et al.* (2002) para el fiordo Aysén. Por otra parte, el promontorio submarino representado por el bajo Magallanes no parece tener un efecto destacable sobre las velocidades residuales mostradas en la figura 7.

En relación a la metodología, aunque los datos de flujo obtenidos (Tabla II) no cubren la totalidad de las secciones transversales en los canales estudiados, faltando en algunos casos porciones importantes en los costados y en sectores profundos, éstos permiten una aproximación al conocimiento de las magnitudes de los flujos presentes en estos sistemas. Las limitaciones a las estimaciones del flujo usando datos de ADCP remolcado son conocidas (Jay *et al.*, 1997). Entre ellas están la inhabilidad de los instrumentos para resolver adecuadamente los primeros 2 a 3 m superficiales y la contaminación de los datos cercanos al fondo por reflexión en un 15% de la profundidad total, por efecto de la inclinación de los lóbulos de emisión del instrumento. Además, la imposibilidad de cubrir totalmente hasta los bordes de la sección transversal por seguridad a la navegación, hace que sectores importantes de la sección queden sin muestrear. Sin embargo, los mismos autores señalan que aun con estas y otras limitaciones, la información proporcionada por estos instrumentos es fundamental para los estudios de flujos, y constituye la más avanzada tecnología disponible para este propósito. La integración de estas

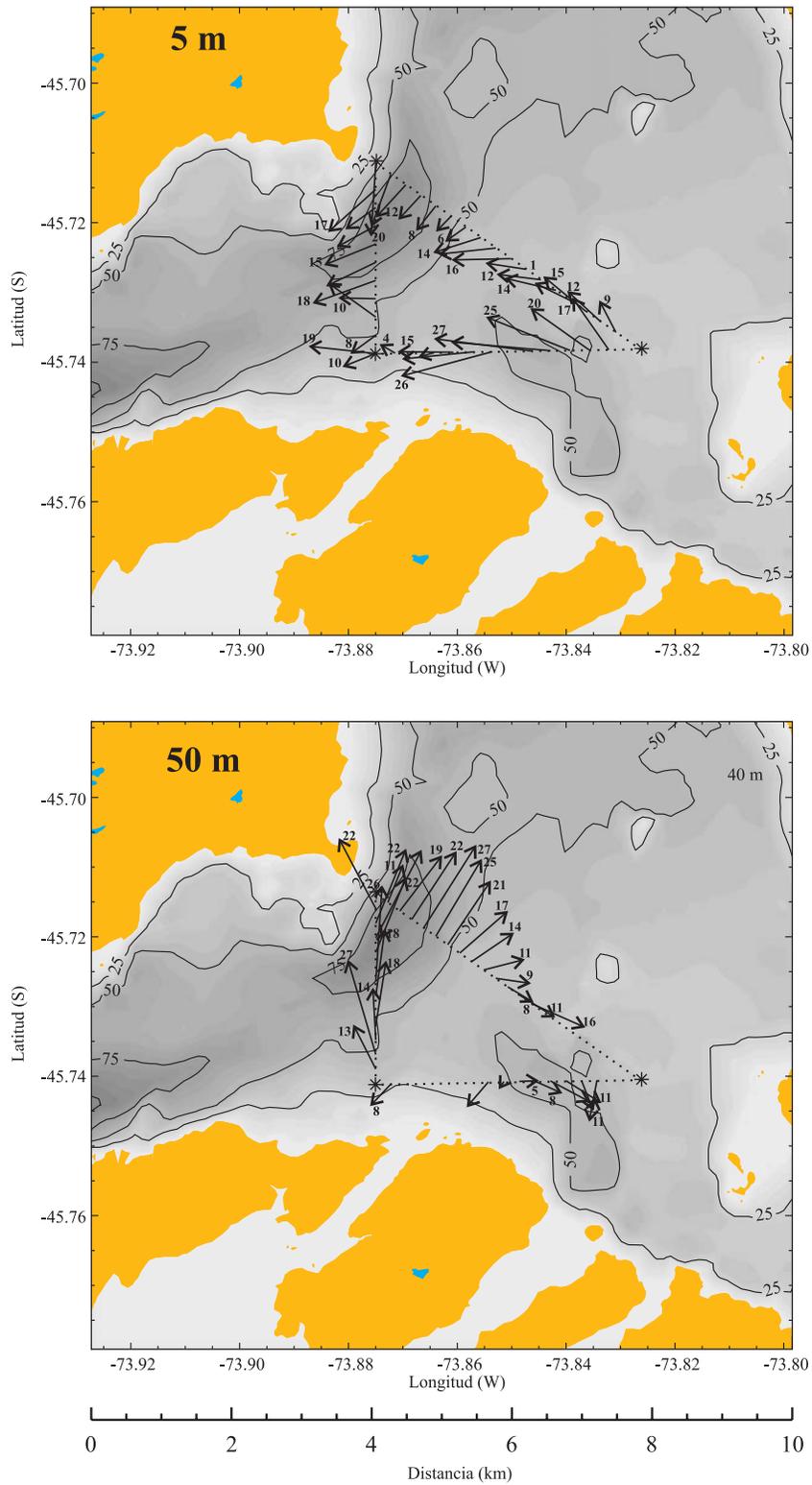


Fig. 9: Vectores de velocidad residual a dos profundidades en canal Chacabuco en canal Errázuriz.  
 Fig. 9: Residual velocity vectors at two selected depths in Chacabuco channel at Errázuriz channel.

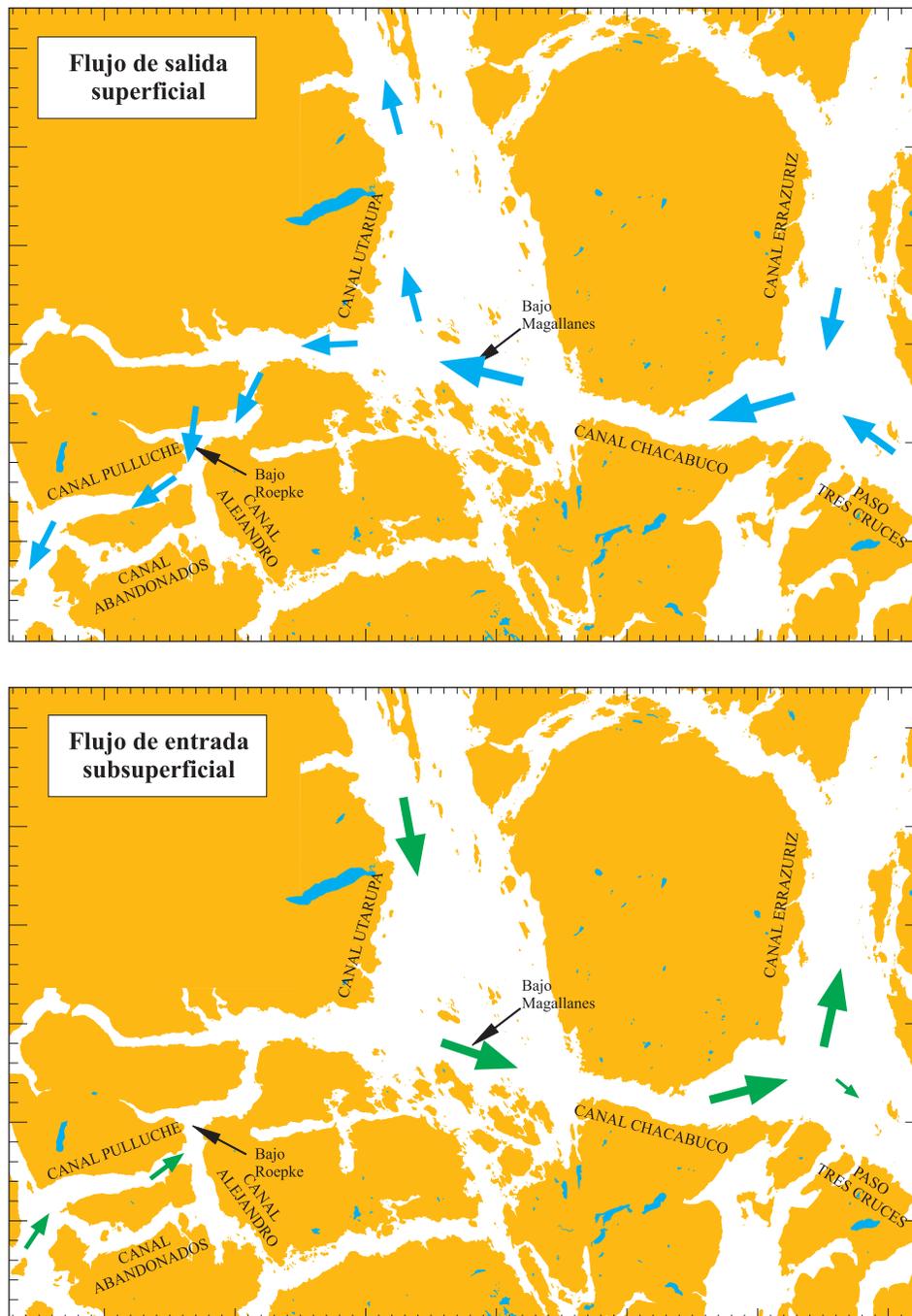


Fig. 10: Proposición de esquema circulación del flujo residual en dos capas.  
Fig. 10: Diagram proposed for the circulation of residual flows in two layers.

mediciones físicas con las biogeoquímicas constituye, entre otros aspectos, un aspecto de futura investigación.

### CONCLUSIONES

Haciendo uso de las mediciones de corrientes de ADCP disponibles para el área, se hace una aproximación a las magnitudes de los flujos de entrada y salida del sistema compuesto por los canales Pulluche y Chacabuco. Se estima que la entrada de aguas oceánicas al sistema está severamente limitada por la presencia de abrupta batimetría en la constricción del canal Pulluche, lo que sugiere que la mayor parte del flujo de entrada que entra al canal Chacabuco lo hace a través del canal Utarupa. El flujo de salida, en cambio, sería evacuado hacia el canal Pulluche a través de la constricción y hacia el canal Utarupa.

En las secciones transversales el flujo residual de entrada se observó concentrado en los canales y el de salida en la región somera, en concordancia con otros estudios en estuarios.

### AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Juan P. Belmar, Brian Sánchez, Rodolfo Muñoz, Alejandro Núñez y a la tripulación de la L/M "Petrel" por la colaboración en el muestreo de datos de ADCP en canal Pulluche. Los fondos para la realización de esta campaña fueron proporcionados por el Comité Oceanográfico Nacional en el marco de un proyecto CIMAR 9 Fiordos. También agradezco a Raúl Estrada y a los otros integrantes del grupo oceanográfico por el apoyo en las mediciones; como también al comandante, oficiales y tripulación del AGOR "Vidal Gormaz" por el apoyo del buque para la obtención de datos de ADCP en los dos sitios de canal Chacabuco. El financiamiento para la realización de esta campaña de corrientes fue otorgado por la Armada de Chile.

### REFERENCIAS

- CÁCERES, M., A. VALLE-LEVINSON, H. SEPÚLVEDA & K. HOLDERIED. 2002. Transverse variability of flow and density in a Chilean fjord. *Continental Shelf Research*, 22, 1.683-1.698.
- CÁCERES, M., A. VALLE-LEVINSON & L. ATKINSON. 2003. Observations of cross-channel structure of flow in an energetic tidal channel. *Journal of Geophysical Research*, vol.108(c4), 11-1: 11-10.
- DYER, K. 1997. *Estuaries, a physical introduction*. Ed. John Wiley & Sons, 2<sup>nd</sup> edition, 195 pp.
- FARMER, D. & L. ARMI. 1986. Maximal two-layer exchange over a sill and through the combination of a sill and contraction with barotropic flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 164: 35-76.
- GEYER, W. R. & R. SIGNELL. 1990. Measurement of tidal flow around a headland with a shipboard Acoustic Doppler current profiler. *Journal of Geophysical Research*, 95: 3.189-3.198.
- JOYCE, T. 1989. On in situ calibration of shipboard ADCPs. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 6, 169-172 .
- JAY, D. A., W. GEYER, R. J. UNCLES, J. VALLINO, J. LARGIER & W. BOYNTON. 1997. A review of recent developments in estuarine scalar flux estimation. *Estuaries*, 20 (2): 262-280.
- JAY, D. J., D. A. JAY & J. MUSIAK. 1996. Salt transport from Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) and Conductivity-Temperature-Depth (CTD) data: A methodological study. In: *Buoyancy Effects on Coastal and Estuarine Dynamics*, Coastal and Estuarine Studies volume 53, AGU Ed., pp. 195-212.

- KJERFVE, B., L. H. STEVENSON, J. PROEHL, T. H. CHRZANOWSKI & W. KITCHENS. 1981. Estimation of material fluxes in an estuarine cross section: A critical analysis of spatial measurement density and errors. *Limnology and Oceanography*, 26(2): 325-335.
- LI, C. & J. O'DONNELL. 1997. Tidally driven circulation in shallow estuaries with lateral depth variation. *Journal of Geophysical Research*, 102 (c13): 2.7915-2.7929.
- LWIZA, K. M. M., D. G. BOWERS & J. H. SIMPSON. 1991. Residual and tidal flow at a tidal mixing front in the North Sea. *Continental Shelf Research*, 11(11), 1.379-1.395.
- NIEMEYER, H. & P. CERECEDA. 1984. Hidrografía. En: *Geografía de Chile*. Vol. 8. Editado por Instituto Geográfico Militar 320 pp.
- SILVA, N., C. CALVETE & H. SIEVERS. 1998. Masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre Puerto Montt y Laguna San Rafael, Chile (Crucero CIMAR-Fiordo 1). *Cienc. Tecnol. Mar*, 21, 17-48.
- STIGEBRAND, T. A. 1980. Some aspects of tidal interactions with fjord constrictions. *Estuarine and Coastal Marine Science*, II : 151-166.
- VALLE-LEVINSON, A. & K. M. M. LWIZA. 1995. The effects of channels and shoals on exchange between the Chesapeake Bay and the adjacent ocean. *Journal of Geophysical Research*, 100 (C9), 18.551-18.563.
- VALLE-LEVINSON, A. & K. M. M. LWIZA. 1997. Bathymetric influences on the lower Chesapeake Bay hydrography. *Journal of Marine Systems*, 12, 221-236.
- VALLE-LEVINSON, A. & L. P. ATKINSON. 1999. Spatial gradients in the flow over an estuarine channel. *Estuaries*, 22 (2A), 179-193.
- VALLE-LEVINSON, A., M. CÁCERES, H. SEPÚLVEDA & K. HOLDERIED. 2002. Patrones de flujo asociados a la boca del Seno Aysén. *Cienc. Tecnol. Mar*, 25 (2): 5-16.
- WONG, K. C. 1994. On the nature of transverse variability in a coastal plain estuary. *Journal of Geophysical Research*, 99: 14.209-14.222.