

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE VALPARAISO

FACULTAD DE RECURSOS NATURALES

ESCUELA DE CIENCIAS DEL MAR

**Influencia del viento sobre la circulación residual en el  
fiordo Aysén**

Trabajo de Titulación para optar al Título de Oceanógrafo

Naity Rodríguez Benavides

Valparaíso, 2016

**Comisión de Titulación:**

Profesor Guía: Dr. Manuel Castillo Silva.

\_\_\_\_\_

Profesor: Msc. Sergio Salinas Marchant.

\_\_\_\_\_

Profesor: Dr. Oscar Pizarro Arriagada.

\_\_\_\_\_

## **AUTORIZACIÓN DE USO**

Al presentar este Trabajo de Titulación como último requisito para la obtención del título de Oceanógrafo, autorizo a la biblioteca de la Escuela de Ciencias del Mar de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, para que disponga libremente de ella. Autorizo además reproducciones parciales o totales de este documento sólo con fines académicos.

---

Naity Rodríguez Benavides

*“Nunca es demasiado el  
agradecimiento a quién no te  
abandonó en tus peores momentos”.*  
*Para ti Mamá*

## AGRADECIMIENTOS

Finaliza con este trabajo una etapa importante en mi vida, es por ello que no quisiera dejar pasar este espacio para agradecer a todos los que me han acompañado durante este largo proceso.

A Dios por acompañarme y no dejarme flaquear cuando pensaba que no podría lograrlo. Gracias Mamá por estar ahí desde que empezó esto, aun cuando el primer día de universidad sentí que esto no era lo mío, así después de mucho tiempo sigues a mi lado dándome tu amor y ánimo. Gracias también al resto de mi familia y a las personitas que siempre estuvieron ahí, preguntándome cómo iba todo y dándome ánimo.

A mis amig@s (mención especial para Margarita y Willy por compartir su hogar conmigo, muchas gracias y los quiero mucho), compañeros de universidad, a la cabina 7 (UdeC), y al LOFISAT, que hicieron de este camino uno más agradable y de los cuales aprendí mucho, gracias por compartir su conocimiento y amistad conmigo.

A mi profesor guía Manuel Castillo, por apoyarme, enseñarme y guiarme. Por darse el trabajo de responder cada duda aun cuando tomara toda la mañana, por convencerme de que Matlab es bueno jajaja y por mostrarme en cada de sus lecciones lo que uno puede lograr si le apasiona lo que hace. También agradecer al profesor Oscar Pizarro por instarme a mejorar como científica, por responder mis dudas, por corregirme y ayudarme cuando parecía no tener clara algunas cosas, también profesor Sergio Salinas gracias por el conocimiento traspasado durante mi estadía por la escuela, por estar siempre atento a mis dudas, por responder el e-mail cuando aún no sabía qué hacer para la tesis. A los tres muchas gracias.

Por último y no menos importante, gracias Amor por darme ánimos y acompañarme durante casi toda esta etapa. Te Amo ♥.

Esta tesis fue financiada en parte por el Proyecto FONDECYT N° 1131063 del Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP), COPAS SUR AUSTRAL (PFB 31/2007) y por FONDECYT N° 3130639.

## CONTENIDOS

<b>Portada</b>	<b>i</b>
<b>Comisión de Titulación</b>	<b>ii</b>
<b>Autorización de uso</b>	<b>iii</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>iv</b>
<b>Agradecimientos</b>	<b>v</b>
<b>CONTENIDOS</b>	<b>vi</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>ix</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xi</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>01</b>
<b>HIPÓTESIS</b>	<b>04</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>05</b>
<b>Objetivo general</b>	<b>05</b>
<b>Objetivo específicos</b>	<b>05</b>
<b>MATERIALES Y MÉTODOS</b>	<b>06</b>
<b>1. Área de estudio</b>	<b>06</b>
<b>2. Información utilizada y procesamientos de datos</b>	<b>06</b>
<b>2.1. Mediciones de CTD-O</b>	<b>06</b>
<b>2.2. Mediciones meteorológicas</b>	<b>08</b>
<b>2.3. Descargas de los ríos y mediciones de nivel del mar</b>	<b>09</b>
<b>2.4. Mediciones de corrientes: ADCPs anclados</b>	<b>11</b>
<b>3. Análisis de la información</b>	<b>13</b>
<b>3.1. Análisis espectral:</b>	<b>13</b>

<b>autoespectros</b>	
<b>3.2. Análisis espectral: Ondelet</b>	<b>14</b>
<b>3.3. Análisis a través de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF)</b>	<b>15</b>
<b>3.4. Variabilidad de baja frecuencia</b>	<b>15</b>
<b>RESULTADOS</b>	<b>16</b>
<b>1. Descarga de ríos</b>	<b>16</b>
<b>2. Vientos</b>	<b>16</b>
<b>3. Nivel del mar</b>	<b>18</b>
<b>4. Características hidrográficas</b>	<b>19</b>
<b>4.1. Campaña de mediciones del 23 de septiembre de 2009</b>	<b>20</b>
<b>4.2. Campaña de mediciones del 20 de Julio de 2010</b>	<b>22</b>
<b>5. Corrientes</b>	<b>24</b>
<b>5.1. Velocidad media de la componente longitudinal en las estaciones Cuervo y Gato</b>	<b>24</b>
<b>5.2. Relación viento y corrientes en profundidad</b>	<b>25</b>
<b>5.3. Variabilidad temporal y espacial de las corrientes a lo largo</b>	<b>27</b>
<b>DISCUSION</b>	<b>29</b>
<b>1. Descarga de ríos</b>	<b>29</b>
<b>2. Estacionalidad de los vientos del sector</b>	<b>30</b>
<b>3. Estructura de la hidrografía lo largo del fiordo</b>	<b>30</b>

<b>4. Corrientes</b>	<b>34</b>
<b>CONCLUSIÓN</b>	<b>39</b>
<b>REFERENCIAS</b>	<b>41</b>
<b>Anexo-Figuras</b>	<b>47</b>

## RESUMEN

En un sistema estuarino típico se observa un flujo neto superficial de aguas de baja salinidad hacia fuera del fiordo, sobre un flujo neto de aguas de mayor salinidad que entra al fiordo. Sin embargo, se ha observado que este esquema clásico de dos capas podría ser alterado por la acción sostenida del viento soplando hacia el interior del fiordo (Cáceres *et al.*, 2007), no obstante existen otros factores como la marea, las variaciones de densidad y del nivel del mar al interior del que pueden también modificar este patrón (Valle-Levinson *et al.*, 2012).

En el presente trabajo se analizó la circulación en el fiordo Aysén (45°22'S 73°05'W), un análisis preliminar mostró que el patrón de circulación residual a lo largo del fiordo Aysén, se encuentra altamente influenciado por el esfuerzo superficial del viento, por lo que el objetivo fue analizar la circulación de baja frecuencia del fiordo y determinar la influencia del viento en los residuales de las corrientes a lo largo del eje del fiordo. Para esto se utilizó información de corrientes, nivel del mar y vientos del periodo septiembre 2009 y mayo 2010, además de datos de CTD obtenidos en septiembre del 2009 y julio del 2010 y series extensas de descarga de los ríos Aysén, Gato y Cuervo facilitadas por DGA.

Los resultados mostraron una intensificación de los vientos en la tarde (12:00 a 19:00 h) durante todo el periodo de medición. En la época de primavera-verano los vientos fueron principalmente vientos del suroeste los cuales fueron más intensos que en otoño-invierno. Durante este periodo los vientos presentaron una dirección más variable, los resultados sugieren que la estructura media de la corriente a lo largo del fiordo, presenta un flujo superficial hacia la cabeza cuando ocurren eventos de viento intenso, lo cual se contrapone al flujo gravitacional de dos capas típico de los sistemas estuarinos descrito anteriormente. Ahora bien la variabilidad de la estructura media de la corriente a lo largo del fiordo fue atribuida al estrés superficial del viento, que según un análisis de wavelet, explicaría el ~ 60% de esta variabilidad. Además se observó que existe una fuerte relación

entre el estrés superficial del viento y la pendiente del nivel del mar, lo cual sugiere que el viento inclina la superficie del mar incrementando o debilitando el gradiente de presión a lo largo del fiordo generando los cambios en las corrientes descritos anteriormente.

## ABSTRACT

In a typical estuarine system, a two layered flows are observed: an upper and low-salinity outflow layer, over an high-salinity inflow layer.. Nevertheless, this classical two layers scheme could be modified by the persistent action of the wind stress when blowing into the fjord (Caceres et al., 2007). There are other forcing which modified the typical pattern like tides, density gradient, bathymetry an others (Valle-Levinson et al., 2012).

Here, we analyze the circulation dynamics on the Aysen Fjord (45 ° 22'S, 73° 05'W), previous studies suggest that the residual pattern of the along-fjord currents in the Aysen fjord, could be influenced by surface wind stress which change the typical two-layer pattern. The main goal of the present study was to analyze the low frequency circulation within the fjord and determine the wind stress role on the residual along-fjord currents. The study use time series of currents, sea level and winds measured between september of 2009 and may of 2010. In addition, 14 CTD stations made in september of 2009 and july of 2010 were analyzed to describe the distribution of Temperature, Salinity and Dissolved Oxygen within the fjord. The fresh water inputs were analyzed using an extensive time series of discharge from the rivers Aysen, Gato and Cuervo.

The results showed a marked daily intensification of the afternoon winds, especially during spring and summer seasons, here winds were mainly southwesterly. In winter and autumn, winds presented variable directions but nearly calm magnitude. The mean pattern of the along-fjord currents showed a thin upper inflow during intense (XX m/s) into the fjord winds, which were opposite to the typical two-layered gravitational circulation of estuarine systems. The variability of the mean pattern of the along-fjord currents was attributed to the surface wind stress. This study indicated that ~ 60% of the variability of the along-fjord currents were explained by the winds. Furthermore, there is a significant relationship between the surface wind stress and sea level surface slope, which suggest that

the setup of the wind increase or weakening the along the fjord pressure gradient which also generate changes on the along-fjord dynamics.

## INTRODUCCIÓN

Los estuarios son cuerpos de agua semicerrados con comunicación libre con el océano adyacente. En estos sectores el agua salada del océano es diluida por el agua dulce de los ríos (Pritchard, 1967). El encuentro de aguas de distinta salinidad establece un gradiente longitudinal de densidad generando un patrón de circulación baroclínico conocido como circulación gravitacional estuarina (Farmer & Freeland, 1983).

Los sistemas estuarinos se pueden clasificar de acuerdo a diferentes factores: como; el balance de agua y sal; la estructura vertical de la salinidad; la hidrodinámica; la geomorfología; además de otros factores de origen biogeoquímico (Officer, 1976; Valle-Levinson, 2010).

Los fiordos son estuarios de altas latitudes cuyas cuencas han sido modeladas por la erosión glacial y parcialmente llenadas con agua de mar. Son más largos en relación a su ancho, posee paredes relativamente empinadas y cuencas profundas, normalmente poseen uno o más umbrales, y cuentan con la descarga de un río en la cabeza. Típicamente poseen un umbral poco profundo en la boca, lo cual condiciona la circulación y la mezcla en su interior (Knudsen, 1900; Farmer&Freeland, 1983; Stigebrandt, 1977).

En la dinámica de estos sistemas estuarinos el aporte de agua dulce en la cabeza juega un papel principal, generando un gradiente de presión a lo largo del fiordo. Este gradiente, fuerza un patrón de circulación que presenta un flujo neto superficial de aguas de baja salinidad hacia fuera del fiordo, el cual se desplaza sobre una capa de mayor salinidad que entra al fiordo. Los factores que pueden alterar y/o modificar este patrón de circulación están relacionados con: variaciones en el aporte de agua dulce, intensificación del esfuerzo del viento y la desigualdad quincenal de la marea, entre otros (Valle-Levinson, 2010).

En la región austral de Chile se ubica uno de los sistemas de fiordos y canales más extensos del mundo (Palma & Silva, 2004). Este sistema tiene una longitud de más de 1600 km, y abarca una superficie aproximada de 240.000 km<sup>2</sup>, con un alto grado de complejidad geomorfológica e hidrográfica (Castillo, 2012). Esta extensa área se divide en tres regiones, la región norte se extiende desde el norte de Puerto Montt (41,4°S) hasta la península de Taitao (46,5°S). La región central, abarca desde Cabo Pilar (occidente) hasta la entrada del Estrecho de Magallanes (52,7°S), y desde allí hasta el Seno Almirantazgo (54,5°S) se extiende la región sur de los fiordos (Pickard, 1971).

Ubicado en la región central antes definida se encuentra el fiordo Aysén. Este uno de los fiordos que ha sido objeto de diversas mediciones en el marco de los cruceros CIMAR (ver Palma & Silva, 2006). Estos cruceros se han enfocado principalmente en la descripción de los patrones estacionales de variables como temperatura, salinidad y oxígeno (e.g. Guzmán, 2000; Calvete, 2006; Calvete & Sobarzo, 2011). En esta región, la temperatura aumenta levemente en profundidad, y presenta una clara disminución hacia la cabeza del fiordo asociada principalmente a la descarga del río Aysén (Guzmán, 2000). El campo de salinidad, presenta una capa superficial de aguas salobres y la salinidad aumenta rápidamente con el incremento de la profundidad, generando una haloclina en torno a los 10 m de profundidad (Silva *et al.*, 1995 ; Guzmán, 2000), bajo la haloclina la salinidad aumenta levemente hasta los 31,4 psu (Guzmán & Silva, 2002). Las mediciones de corrientes en el sector son muy escasas y estas han estado limitada a registros de corta duración (1 día) centrados principalmente en determinar las características del flujo residual de mareas pero en un día en particular (e.g. Valle-Levinson *et al.*, 2002; Cáceres *et al.*, 2002).

Los estudios de corto período han mostrado que el fiordo Aysén se caracteriza por una intensa estructura estuarina en su parte superior (sistema de dos capas), sin embargo, el intenso esfuerzo del viento a lo largo del fiordo puede modificar este esquema clásico y generar un sistema de tres capas (Cáceres *et al.*, 2002). Además el balance dinámico

transversal puede variar en la superficie desde geostrófico (sin viento) a ageostrófico (vientos moderados a intensos). Estos estudios sugieren que en la circulación de este fiordo el viento puede llegar a jugar un papel relevante, sin embargo la corta duración de las mediciones con las cuales se han efectuado estas aseveraciones limita su validez y no han permitido evaluar otros factores que influyen en su dinámica. De hecho Valle-Levinson *et al.* (2014), indica que existen otros factores como los gradientes de densidad o la marea que también pueden generar una estructura vertical de tres capas (Ianello, 1979; Winant, 2008).

En este trabajo se utilizan series de tiempo de corrientes de más de 4 meses de duración, de diferentes puntos a lo largo del fiordo Aysén complementadas con mediciones de CTD-O, nivel del mar y viento, entre los años 2009 y 2010. El objetivo de este estudio es caracterizar las condiciones oceanográficas del fiordo, especialmente el flujo residual y analizar sus principales forzantes.

## **HIPOTESIS**

Los antecedentes antes expuestos, permiten el planteamiento de la siguiente hipótesis:

“El patrón de circulación residual en el fiordo Aysén es altamente influenciado por el esfuerzo superficial del viento.”

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo General**

Analizar la circulación de baja frecuencia ( $>1$  día) del fiordo Aysén y determinar la influencia del viento en los residuales de las corrientes a lo largo del fiordo.

### **Objetivos Específicos**

Describir y entender el comportamiento del viento en el fiordo Aysén.

Caracterizar la hidrografía (temperatura, salinidad y oxígeno disuelto) en el interior del fiordo durante los periodos de medición.

Determinar las características de la circulación residual en el fiordo Aysén.

## MATERIALES Y METODOS

### 4.1. Área de estudio

El Fiordo de Aysén, centrado a los 45°22'S 73°05'W, está ubicado en la Patagonia Occidental de la XI Región de Chile y forma parte de uno de los ecosistemas de canales y fiordos más extensos del planeta. Tiene una orientación general Este-Oeste (Pickard, 1971), Presenta un valle en forma de U en su sección transversal, posee una longitud de 65 km, un ancho promedio de 5,5 km, y una superficie de unos 470 km<sup>2</sup>.

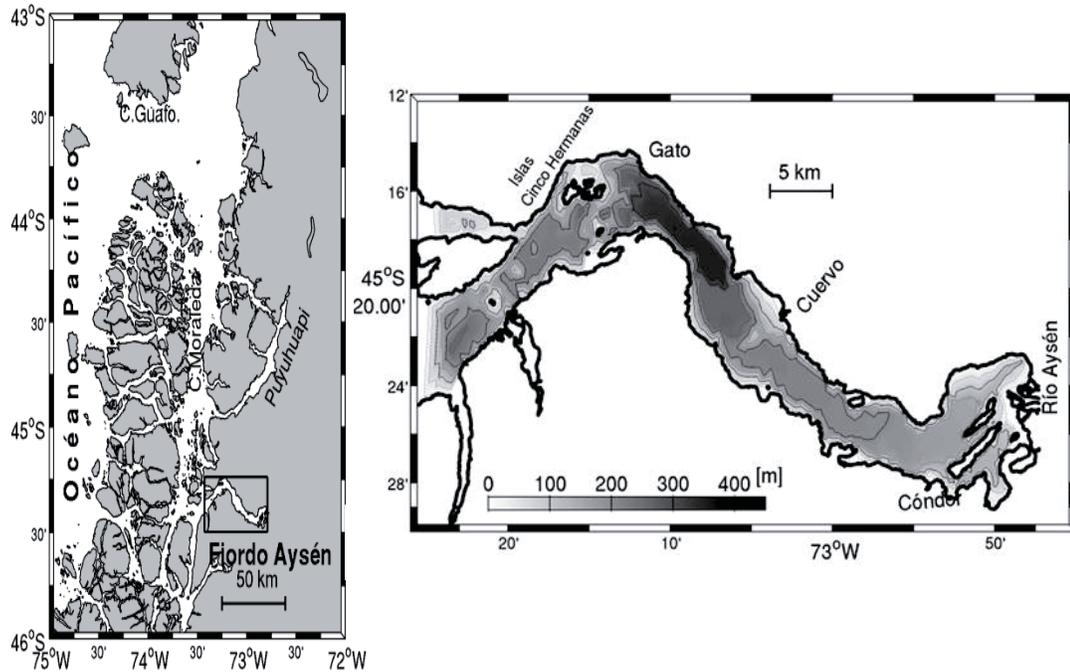
La característica batimétrica más importante de esta zona es la presencia de un umbral de baja profundidad (< 100 m), frente a las islas Cinco Hermanas (45°16' S 72°47'W), que se ubica en el primer tercio del fiordo (tomando como inicio la boca del fiordo). Este umbral separa la parte profunda del fiordo Aysén en dos microcuencas (una ubicada al Oeste de las Islas Cinco Hermanas y la otra al Este de ésta). La porción Oeste del fiordo presenta un ensanchamiento hacia la boca y se conecta a los canales Costa y Moraleda, presentando una profundidad media de 250 m, mientras la porción Este, se encuentra aislada de la influencia de la microcuenca Oeste de características más oceánicas, debida al efecto que ejerce el umbral (Islas Cinco Hermanas). La influencia fluvial en esta cuenca es marcada, debido a que desembocan los ríos: Cuervo, Cóndor y Aysén (Guzmán, 2004) (Fig.1).

## 2. Información utilizada y procesamiento de datos

### 2.1. Mediciones de CTD-O (Conductividad, Temperatura, Profundidad y Oxígeno)

En este trabajo se analizaron datos de CTD-O obtenidos en 2 campañas realizadas durante Septiembre (2009) y Julio (2010) al interior del fiordo Aysén. El instrumento

utilizado fue un CTD SeaBird 25 equipado con un sensor de oxígeno SeaBird 43 y un sensor de fluorescencia (ECO-AFL) Wet-Lab/Wet-Star.



**Figura 1.-**Ubicación del fiordo Aysén en el contexto de la región de los fiordos de la Patagonia austral (izquierda), el área de estudio se presenta a la derecha.

Las mediciones de CTD-O contemplaron la realización de una transecta a lo largo del fiordo, con 14 estaciones realizadas en los días 23-24 de Septiembre de 2009, y 17 estaciones desde el 20 al 22 de Julio del 2010 (Fig. 2).

## 2.2. Mediciones meteorológicas

Se instaló una estación meteorológica Vantage PRO2, en el área de Puerto Chacabuco. La estación estuvo provista de sensores de dirección y magnitud del viento, radiación solar, pluviosidad, presión atmosférica y temperatura del aire, y fue programada para registrar la información cada 10 minutos. Además se tuvo acceso a información de una estación meteorológica ubicada en Puerto Aysén, la cual contó con datos de dirección y magnitud del viento, registrados cada 15 minutos (Tabla 1, Fig. 2).

Para caracterizar el ciclo anual del viento, se realizaron gráficos de rosas de vientos, utilizando la convención meteorológica, mientras que para observar la estacionalidad del ciclo diario se utilizó la convención oceanográfica.

Con la finalidad de efectuar comparaciones directas entre el viento y las corrientes, el vector viento (originalmente en dirección desde donde proviene) fue rotado  $180^\circ$  (dirección hacia donde se dirige). Luego se descompuso el vector en sus correspondientes componentes ortogonales  $u$  y  $v$ . Utilizando estas componentes se obtuvo el estrés del viento, en base a Large & Pond (1981);

$$\tau_{(u,v)} = C_d \rho_{air} |V| \cdot (u, v) \quad (1)$$

En la ecuación (1),  $C_d = 0,0013$ , es el coeficiente de arrastre del viento, referido a 10 m sobre el nivel del mar,  $\rho_{air} = 0,00122 \text{ Kg}\cdot\text{m}^{-3}$ , es la densidad del aire,  $|V|$  representa la magnitud de la velocidad del viento ( $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ), con componentes  $u$  y  $v$ .

Por otra parte, se definieron vientos intensos y vientos débiles, tomando en cuenta que la frecuencia de magnitud de los vientos posee una distribución  $\chi^2$ . En general en geofísica vientos, corrientes, entre otras, poseen este tipo de distribución.

La distribución  $\chi^2$  se caracteriza por ser asimétrica presentando colas estrechas que se extienden a la derecha, lo cual quiere decir que presenta un sesgo en esa dirección. En relación a los vientos, las magnitudes más bajas (altas) presentan frecuencias más altas (baja) representando la parte más ancha en el lado izquierdo de esta distribución.

Considerando lo anterior se calculó;

$$\text{Viento Intenso} = \bar{x} + 2 \cdot \sigma$$

$$\text{Viento Débil} = \bar{x} - \sigma$$

Donde,  $\bar{x}$  es el promedio de la magnitud de los vientos, en tanto que,  $\sigma$  es la desviación estándar de los datos con respecto al promedio.

### **2.3. Descargas de los ríos y variaciones del nivel del mar**

La información de descargas de los ríos Aysén, Cóndor y Cuervo fueron proporcionados por la Dirección General de Aguas (Tabla 1). Los registros corresponden a promedios mensuales para el río Aysén entre los años 1995 y 2014, en tanto que para el río Cóndor la serie de datos se extendió entre 1985 y 2014, y finalmente para el río Cuervo se analizaron datos entre 1985 y 1988.

Tabla 1. Período de mediciones y posición de las estaciones meteorológicas, fluviométricas y de nivel del mar.

Instrumento	Estación	Fecha de inicio	Fecha de término	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Prof. Del instrumento. (m)
Estación meteorológica	Puerto Chacabuco	22/9/2009	13/7/2010	45°27.832'	72°49.412'	-
Mareógrafo	Punta Contreras	25/09/2009	04/05/2010	45°24.520'	72°50.035'	~ 5.0
Sensor de presión	Caleta gato	23/09/2009	06/05/2010	45°17.919'	73°11.928'	~ 7.5
Estación Fluviométrica	Río Aysén en puerto Aysén (DGA)	1995	2014	45° 24'21''	72° 37' 23''	-
	Río Cóndor (DGA)	1985	2014	45° 28'00''	72° 56'00''	-
	Río Cuervo (DGA)	1985	1988			-

Las variaciones del nivel del mar fueron registrados al interior del fiordo Aysén utilizando un sensor de presión HOBO-U20 en la cercanías de caleta Gato y un oleomareógrafo SeaBird SBE-26 en Punta Contreras en la cabeza del fiordo (Fig. 2). El intervalo de muestreo del U20 fue cada 20 minutos, en tanto que para SBE-26, fue de 10 minutos, ambos midieron entre septiembre del 2009 y mayo del 2010 (Tabla 2).

Para analizar el efecto de la marea en el nivel del mar, se realizó un análisis armónico con el fin de obtener los constituyentes armónicos de acuerdo a lo sugerido por Pawlowicz et al., (2002). El régimen de mareas del sector se definió de acuerdo a la amplitud de los armónicos de marea diurnos ( $K_1$ ,  $O_1$ ) y semidiurnos ( $M_2$ ,  $S_2$ ) más importantes de acuerdo al parámetro de forma F;

$$F = \frac{K_1 + O_1}{M_2 + S_2} \quad (2)$$

De acuerdo a este parámetro, se definen los regímenes de mareas;

$0 < F < 0,25$  marea es semidiurna

$0,25 < F < 1,25$  marea semidiurna mixta

$1,25 < F < 3,0$  marea diurna mixta

$F = 0$  marea diurna

Dado que, se registró el nivel del mar ( $\eta$ ) en la cabeza y cerca de la boca del fiordo, es posible obtener el gradiente de presión barotrópico a lo largo del fiordo  $\partial\eta/\partial y$ , donde  $\partial\eta$  representa la diferencia de nivel del mar entre la boca (caleta Gato) y la cabeza (Punta Contreras), mientras que  $\partial y$  es la distancia entre ambas estaciones. De esta forma, se obtuvo el gradiente de presión a lo largo del fiordo.

#### **2.4. Mediciones de corrientes: ADCPs anclados**

Se instalaron 3 sistemas anclados con correntómetros perfiladores acústicos Doppler (ADCP) marca Teledyne-RD Instruments. En el sector caleta Gato se instalaron un ADCP Work Horse de 300 kHz y un Long Ranger 75 kHz, mientras que en el sector central se instaló un Work Horse de 600 kHz. Con el objetivo de capturar la capa superficial los ADCPs superficiales se situaron a una profundidad menor a 30 m. Las mediciones contemplaron un total de 9 meses de medición, entre el 20 de septiembre de 2009 y el 6 de mayo de 2010 (Tabla 3).

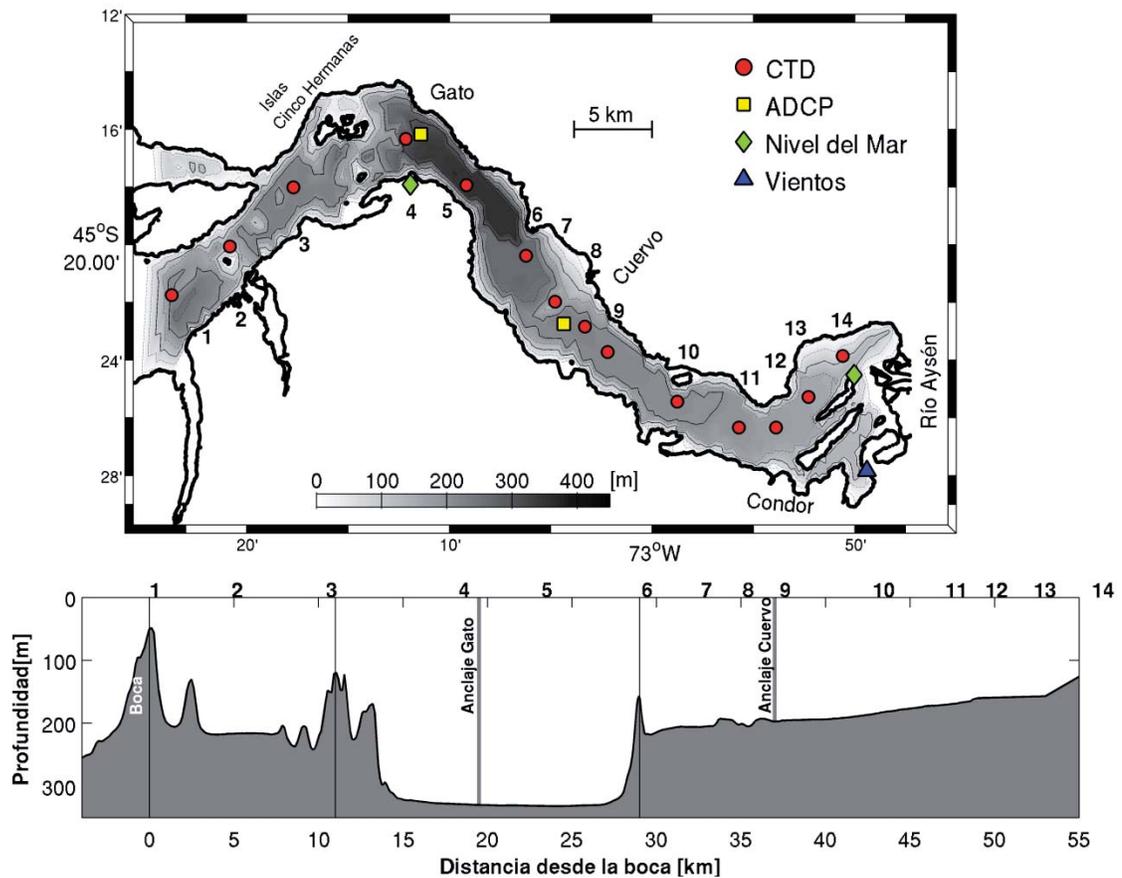
Cada ADCP fue configurado a un intervalo de tiempo y espesor de capa determinado, que varió entre 10 y 20 minutos y entre 0,5 y 10 m. Además en todos los ADCPs utilizados el número de pings fue ajustado para mantener un error  $< 2 \text{ cm s}^{-1}$ .

Tabla 3. Periodo de medición, posición y profundidad de los ADCPs utilizados en los distintos anclajes al interior del fiordo Aysén.

Frecuencia ADCP [kHz]	Estación	Fecha de inicio	Fecha de término	Latitud (°S)	Longitud (°W)	Fondo [m]	Profundidad [m]
600	Cuervo	31/09/2009	24/01/2010	45°22.750'	73°04.350'	218	33.5
300	Gato	20/09/2009	19/02/2010	45°16.165'	73°11.400'	307	31.1
75	Gato	20/09/2009	06/05/2010	45°16.165'	73°11.400'	307	307.0

Al igual que el vector viento, el vector corrientes fue descompuesto en sus correspondientes componentes ortogonales  $u$  (Este-Oeste) y  $v$  (Norte-Sur), dado que en el fiordo las corrientes tienden a dirigirse a lo largo del eje del fiordo, se procedió a rotar los ejes de tal forma que, la componente  $u$  ( $v$ ) se encuentra a lo largo (a lo ancho) del eje del fiordo. En este nuevo marco, la componente  $u$  es positiva (negativa) hacia el interior (exterior) del fiordo.

La importancia de la marea en las variaciones de las corrientes fue estimada mediante el análisis por mínimos cuadrados propuesto por Pawlowicz *et al.*, (2002), en forma similar que el nivel del mar. El porcentaje de variabilidad explicado por la marea, fue expresado en perfiles.



**Figura 2.-** (a) Ubicación del instrumental (ADCPs, Nivel del mar y Vientos) y de las estaciones de CTD, (b) batimetría longitudinal del fiordo.

### 3. Análisis de la información

#### 3.1. Análisis espectral: Autoespectros

Con el objetivo de analizar la distribución de energía en función de la frecuencia se utilizó análisis espectral, debido a que este método permite analizar la varianza o energía de las series de tiempo en función de la frecuencia, permitiendo además detectar la componentes de variabilidad periódicas o semiperiódicas que se encuentran en la serie de

tiempo (Emery & Thompson, 2001). Con la información de nivel del mar, vientos y corrientes a lo largo del fiordo se estimaron los autoespectros de Welch.

Dado el limitado número de observaciones, y la relevancia de efectuar un análisis estadísticamente confiable, se procedió a dividir las series en trozos o segmentos de igual tamaño (sin solapamiento), con cada segmento se calcula un espectro que luego se promedia para cada frecuencia (Emery & Thomson, 1997). Cada estimación espectral posee una distribución  $\chi^2$  con dos grados de libertad. Asumiendo que cada estimación es independiente, los grados de libertad del espectro promedio serán iguales al doble del número de trozos (Jenkins & Watts, 1968; Bendat & Piersol, 1986).

### **3.2. Análisis espectral: Ondelet**

El análisis ondelet se ha convertido en una herramienta muy utilizada en meteorología y oceanografía, donde ha sido aplicado a series de tiempo de mediciones de turbulencia, ondas gravitacionales superficiales, frentes fríos de bajo nivel y ondas ecuatorial Yani, entre otras. Esta técnica permite una estimación instantánea de la amplitud y fase de cada componente espectral en el conjunto de datos, lo que le da al análisis wavelet una ventaja en el análisis de series de datos no estacionarios sobre por ejemplo la transformada de Fourier, ya que las amplitudes y fases de las componentes de armónicas pueden estar cambiando rápidamente en el tiempo o en el espacio (Emery & Thomson, 2001)

Por lo tanto, mediante este método es posible descomponer una serie de tiempo en el espacio tiempo-frecuencia, lo que permite determinar no sólo los modos dominantes de la variabilidad, sino que también cómo estos modos varían en el tiempo (Torrence & Compo, 1998). Todas las estimaciones realizadas consideraron el uso de la ondelet de Morlet.

Con la finalidad de establecer y cuantificar el grado de relación entre variables analizadas, se complementó el análisis de ondelet con un análisis de ondelet cruzado, siguiendo la metodología sugerida por Torrence & Compo (1998) y Grinsted *et al.*, (2004).

### **3.3. Análisis a través de Funciones Ortogonales Empíricas (EOF)**

El análisis mediante funciones ortogonales empíricas permite descomponer las fluctuaciones del conjunto de las series de distintas profundidades en nuevas series o funciones (modos) que capturan la variabilidad conjunta o covarianza de las series originales, por otra parte provee una descripción compacta de la variabilidad espacial y temporal de una serie de datos en términos de funciones ortogonales, o “modos” estadísticos. Usualmente, la mayor parte de la varianza de una serie distribuida espacialmente se encuentra en las primeras funciones ortogonales cuyos patrones pueden estar relacionados a posibles mecanismos dinámicos. Cabe destacar que no existe necesariamente una relación física o matemática directa entre la EOF estadística y cualquiera de los modos dinámicos relacionados (Emery & Thomson, 2001).

Ahora bien en el campo de la Oceanografía, como es el interés de este trabajo, este análisis ha encontrado una amplia aplicación tanto en el dominio del tiempo como de la frecuencia. Cabe mencionar además que estas funciones son llamadas “empíricas” para reflejar el hecho de que son definidas por la estructura de la covarianza del set de datos específicos que está siendo analizado (Emery & Thomson, 1997).

### **3.4. Variabilidad de baja frecuencia**

El análisis de la variabilidad de baja frecuencia en el sector, considero filtrar las series de corrientes, vientos y nivel del mar con un filtro pasa bajos Coseno-Lanczos de amplitud media de 40 horas. Este filtro mostró ser efectivo para eliminar la energía de oscilaciones menores a 1 día.

## RESULTADOS

### 1. Descarga de ríos

La hoya hidrográfica del fiordo Aysén, posee un área aproximada de 11.000 Km<sup>2</sup>, y está formada principalmente por tres ríos. El más importante es el río Aysén con un caudal promedio anual de 546,4 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Los otros ríos son el Cóndor y el Cuervo, los cuales poseen caudales promedios anuales de 45,4 y 95,4 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> respectivamente. Ambas representan aproximadamente un 26% de lo que vierte el río Aysén al fiordo.

La descarga del río Aysén, no muestra una variabilidad interanual con un patrón definido. Si es posible destacar años donde la descarga ha sido mayor a 3000 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (Fig. 3). El ciclo anual del caudal del río Aysén muestra valores sobre el promedio durante el segundo semestre (junio-diciembre) alcanzando un máximo cercano a 700 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> en octubre (Fig.4a). El ciclo anual del río Cóndor, muestra un máximo principal en el mes de junio, cercano a 53 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, seguido de una disminución en el período julio-septiembre, donde alcanza caudales cercanos a 35 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, para finalmente presentar un máximo secundario en el mes diciembre de unos 50 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (Fig. 4b). El registro del caudal del río Cuervo muestra un aumento de su caudal entre abril-junio, donde alcanza valores superiores a 120 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, para luego mantener caudales cercanos a 90 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup> (Fig.4c).

### 2. Vientos

Las frecuencias relativas (%) de los vientos al interior del fiordo Aysén durante el periodo 2009-2010 muestran las máximas intensidades (9-10 m s<sup>-1</sup>) correspondieron a vientos del NE en los meses de junio y noviembre, representando menos del 1% de los casos en ambos meses. En tanto, los vientos con magnitudes <1 m s<sup>-1</sup> fueron >35% en los meses de marzo, abril, mayo, junio, julio, y septiembre.

En los meses de enero y febrero se observó una predominancia de los vientos SW con porcentajes de frecuencia ~50% y ~40% para cada mes respectivamente, el rango de intensidades de estos vientos se encontró entre 1 y 8 m s<sup>-1</sup>, siendo las intensidades de entre 3 m s<sup>-1</sup> y 6 m s<sup>-1</sup> más frecuentes (>50%) (Fig.5a b). En marzo y abril, cerca del 30% correspondieron a vientos SW, es decir, disminuyeron su frecuencia en comparación con los meses anteriores, además los vientos S y W fueron más frecuentes en marzo, con un porcentaje de ocurrencia cercano a 50%, con intensidades entre 1 y 4 m s<sup>-1</sup> casi en un 60%. En abril los vientos NE explicaron el 15% de los casos, consistentemente disminuyó la presencia de los vientos S y W (Fig.5c-d). En mayo aumentó la presencia de los vientos NE (~25%), aunque los vientos de mayor intensidad (>6 m s<sup>-1</sup>) continuaron estando asociados a la dirección SW (Fig.5e). Durante junio la intensidad de los vientos NE aumentó, alcanzando los 9 m s<sup>-1</sup>, mientras que los vientos W y SW alcanzaron intensidades en torno a 8m s<sup>-1</sup>(Fig.5f). En julio los vientos NE disminuyeron importancia (~20%) e intensidad, registrando magnitudes < 3m s<sup>-1</sup> que representaron prácticamente el 90% de las magnitudes. Por otra parte, los vientos S y SW representaron cerca del 35% de las direcciones (Fig.5g). Durante el mes de agosto, los vientos NE aumentaron su presencia (30%) e intensidad (4 m s<sup>-1</sup>), sin embargo fueron los vientos SW los más intensos, alcanzando magnitudes en torno a 7m s<sup>-1</sup>(Fig.5h). En septiembre y octubre, los vientos SW fueron más importantes e intensos, explicando el 30% y 43% de los casos, con intensidades en torno a los 5 m s<sup>-1</sup> y 8 m s<sup>-1</sup> respectivamente (Fig.5i-j). En el mes de noviembre, explicando el 70% de los casos los vientos más importantes fueron SW y NE, los cuales presentaron magnitudes de 7 m s<sup>-1</sup> y 9 m s<sup>-1</sup> respectivamente (Fig.5k). Por último, durante el mes de diciembre la importancia e intensidad de los vientos SW disminuyó (~ 40% y 5 m s<sup>-1</sup>), mientras que los vientos W explicaron el 20% de los casos y alcanzaron magnitudes de 5 m s<sup>-1</sup> (Fig.5l).

La estacionalidad del viento (Fig.6), muestra una predominancia de los vientos del SW durante las estaciones de primavera y verano e incluso parte de otoño, es decir, desde septiembre a mayo, mientras que en los siguientes meses de otoño y en el periodo de

invierno (de junio a agosto), aun cuando se observa la presencia de viento del SW, se observaron vientos del W-S-SW. Durante todo el año se observaron los vientos más intensos durante la segunda mitad del día (entre las 12 h y 20 h), es decir, se observa un ciclo diario bien definido. Por otra parte, la intensidad del viento es mayor en los meses de primavera y verano ( $\geq 2,8 \text{ m s}^{-1}$ ), que la intensidad de otoño e invierno.

Por otra parte el espectro del esfuerzo del viento, presentó niveles de energía similar en prácticamente todas las frecuencias, con un incremento significativo en la banda diurna y semidiurna (Fig.7).

### **3. Nivel del Mar**

La serie de nivel del mar de Punta Contreras (cabeza del fiordo), mostró que durante los períodos de sicigia, el rango del nivel del mar alcanzó los 3,4 m. En tanto que, durante los periodos de cuadratura se redujo a 2,2 m. Para la estación Gato (más cercana a la boca del fiordo), se observó que durante los períodos de sicigia el rango del nivel del mar fue de 3,2 m, mientras que en cuadratura se redujo a 2 m aproximadamente (Fig.8).

Por otra parte, considerando ambas series de datos, a través de las componentes armónicas de marea y el parámetro F, es posible indicar que el fiordo Aysén posee un régimen de marea semidiurno mixto ( $F=0,31$ ), donde la componente armónica de mayor amplitud fue  $M_2$  (lunar principal). La diferencia de fase entre ambas estaciones fue consistente con la propagación boca-cabeza de esta componente en el fiordo. La variabilidad del nivel del mar en ambos sectores (cabeza y boca), está principalmente asociada a la marea (99%).

Tabla 4.- Componentes Armónicas de Marea.

Componentes Armónicas de Marea	Estación Punta Contreras		Estación Gato	
	Amplitud (m)	Fase	Amplitud (m)	Fase
M <sub>2</sub>	0.7764	158.39	0.7540	158.49
S <sub>2</sub>	0.2859	170.68	0.2776	170.75
K <sub>1</sub>	0.1963	75.23	0.1916	75.83
O <sub>1</sub>	0.1380	32.50	0.1355	31.83

Además en los dos espectros de energía, estación Punta Contreras y estación Gato, se pudieron diferenciar picos asociados a las frecuencias diurna y semidiurna, presentándose este último con mayor energía, asimismo aunque presentaron niveles de energía menor, fue posible distinguir máximos en las bandas de frecuencias asociadas a M<sub>4</sub> (6h) y M<sub>6</sub> (4h). En general, ambos espectros presentan niveles de energía similar en todas las frecuencias de la ventana espectral utilizada (Fig.9).

#### 4. Hidrografía del fiordo Aysén

Para describir las condiciones hidrográficas del fiordo Aysén, a continuación se presentarán por separado los resultados de las dos campañas hidrográficas realizadas desde el 23 a 24 de septiembre de 2009 y desde el 20 a 25 de julio de 2010. Estas campañas consideraron la realización de 14 estaciones de CTDOF a lo largo del fiordo.

#### 4.1. Campaña de mediciones del 23 de septiembre de 2009

Durante este periodo de medición los vientos fueron principalmente del SW (con una frecuencia de ~50%) siendo a su vez los más intensos ( $\sim 6 \text{ m s}^{-1}$ ). Por otra parte el caudal promedio del río Aysén durante este periodo fue  $394 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . El nivel del mar alcanzó, en este periodo una amplitud 1,3 m. Note que estas mediciones se efectuaron durante un periodo de cuadratura (Fig. 10).

La temperatura superficial del agua en el interior del fiordo en el mes de septiembre fluctuó entre  $7,7 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $9,1 \text{ }^\circ\text{C}$  observándose aguas más frías provenientes de la cabeza del fiordo, comportamiento que se mantuvo hasta los 65 m de profundidad aproximadamente. A profundidades  $> 65 \text{ m}$ , se observó la presencia de una lengua de agua más cálida ( $> 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ) que se extendió a lo largo del fiordo. Además, esta agua más cálida presentó un enfriamiento hacia la boca del fiordo, donde alcanzó valores cercanos a  $10,4 \text{ }^\circ\text{C}$  (Fig.11a).

En profundidad, se presenta una inversión de temperatura con aguas profundas relativamente cálidas, respecto a las aguas de superficie. Entre 0 y 10 m, las aguas registraron temperaturas entre  $7,7 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $9,4 \text{ }^\circ\text{C}$  en el sector más cercano a la cabeza del fiordo (Est. 12, 13, 14) y entre  $9 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $9,4 \text{ }^\circ\text{C}$  en el sector más cercano a la boca (Est. 1, 2, 3). En profundidades intermedias (entre 10 - 150 m), las aguas registraron altas temperaturas mayores alcanzando un máximo de  $10,7 \text{ }^\circ\text{C}$  (Fig.11a).

La salinidad superficial (0-10m) aumentó desde la cabeza hacia la boca del fiordo, esta capa registró una lengua de agua menos salina desde la cabeza, en donde presentó valores en torno a 1, y se extendió unos 20 km en dirección a la boca, sector donde las aguas de esta lengua eran más salinas con valores en torno a los 25. La distribución de salinidad horizontal en profundidad presenta el mismo comportamiento que en superficie, es decir, tiende a aumentar hacia la boca del fiordo, pero su variabilidad es mucho menor (Fig.11c).

En profundidad, se observaron aguas de mayor salinidad las que superaron los 33 de salinidad, sin embargo existe una mayor variabilidad en las capas superiores. Al contrario, desde los 10 m de profundidad hacia abajo, aun cuando aumentó la salinidad, la tasa de incremento es menor. En estas mediciones el rango en el que variaron los valores de salinidad en todo el fiordo fue de 0,7 a 31,7 psu (Fig.11c).

Con respecto al comportamiento de la densidad, esta siguió la distribución de la salinidad descrita en los párrafos anteriores. Del mismo modo, la profundidad de la Isotherma de 15°C coincidió con la profundidad de la pycnoclina.

Se observó una mayor estratificación en la cabeza del fiordo durante esta campaña de medición. La pycnoclina se presentó a 3 m de profundidad en las estaciones cercanas a la boca, de la estación 1 a la 7, siendo en esta última estación donde se comenzó a profundizar, llegando a los 10 m aproximadamente en la cabeza del fiordo. Por otra parte, desde la estación 7 a la 14, en los primeros 10 m, se encontraron aguas menos densas. Bajo la pycnoclina, a lo largo de todo el fiordo las aguas son más densas, con valores de  $\sigma_t$  levemente superiores a  $24 \text{ kg m}^{-3}$  (Fig.11e).

Las aguas más oxigenadas se encontraron en superficie, con concentraciones de oxígeno disuelto (OD) mayores a  $8 \text{ mL L}^{-1}$ , asociado a la cabeza del fiordo. Posteriormente, bajo esta capa superficial ( $> 10 \text{ m}$ ) se observaron aguas menos oxigenadas, con concentraciones que van desde  $4 \text{ mL L}^{-1}$  a  $2 \text{ mL L}^{-1}$  aproximadamente (Fig.11g). En la cabeza del fiordo, bajo la capa superficial (entre 0 y 10 m), el OD disminuyó rápidamente hasta un mínimo en torno a  $5 \text{ mL L}^{-1}$  centrado aproximadamente en los 70 m de profundidad. Sin embargo, a los 150 m de profundidad en la cabeza del fiordo, es posible notar los valores mínimos de OD, en torno a los  $2 \text{ mL L}^{-1}$ .

## 4.2. Campaña de mediciones del 20 de Julio de 2010

Durante este periodo de medición los vientos fueron principalmente del NE-E (con una frecuencia cercana al 50%), sin embargo más del 60%, corresponden a periodos de calma. Por otra parte el caudal promedio del río Aysén durante estos días de medición fue  $475 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Las variaciones del nivel del mar alcanzaron una amplitud de 2 m. Estas mediciones se efectuaron durante periodo de sicigia (Fig.10).

La distribución de la temperatura superficial del agua a lo largo del fiordo en el mes julio fluctuó entre  $5,9 \text{ }^\circ\text{C}$  y  $8,5 \text{ }^\circ\text{C}$  (Fig.11b), y a diferencia del mes de septiembre, no es posible asociar aguas más frías hacia la cabeza del fiordo y/o agua más cálida a la boca de este en superficie.

Por otra parte, verticalmente las aguas más profundas son más cálidas que las aguas presentes en superficie. Entre los 0 y 10 m, la temperatura fluctuó entre  $5,9 \text{ }^\circ\text{C}$  en superficie y  $9,9 \text{ }^\circ\text{C}$  en torno a los 10 m. En profundidades intermedias (entre 10 - 150 m), al igual que en la capa superior, las aguas más cálidas se encontraron a profundidades mayores, alcanzando una temperatura máxima de  $10,6 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cabe hacer mención que mientras en algunos sectores las aguas se mantienen con la misma temperatura en profundidad, en otros se enfrían.

Además, se observó que tanto en la capa de profundidades intermedias, como en la capa más profunda ( $> 150 \text{ m}$ ), las aguas en la boca son más frías que en la cabeza del fiordo (Fig.11b).

Por otra parte, con respecto a la distribución de salinidad horizontal, en los primeros m de profundidad se observó la presencia de una pequeña lengua de agua menos salina que se originó entre la estaciones 8-9 donde se encontró el mínimo  $10,6$ , sin embargo en torno a esta lengua se registraron aguas más salinas tanto hacia la cabeza como hacia la boca, con salinidades de 22 y 26 respectivamente. En profundidad ( $> 10 \text{ m}$ ), el comportamiento de la

salinidad a lo largo del fiordo se mantiene cuasi homogéneo, ya que existe cierta variabilidad pero esta es más bien pequeña (Fig.11d).

Con respecto a la distribución vertical de salinidad, se encontraron aguas menos salinas entre los 0 y 10 m, donde además se observó una mayor variabilidad. Al contrario ocurre en profundidades  $> 10$  m, donde aun cuando la salinidad aumentó la tasa de incremento es mucho menor. En este mes el rango total en el que variaron los valores de salinidad (desde los 0 a los 300 m profundidad) fue desde 10,6 a 31,4 (Fig.11d).

Se observó que la distribución de salinidad controló en gran medida la distribución vertical de densidad. En cuanto a la distribución horizontal esta presentó pequeñas variaciones a lo largo del fiordo sólo en los primeros 5 m de profundidad. Además se observó que la profundidad a la que se encuentra la pycnoclina coincide mejor con la I18. Bajo la pycnoclina,  $\sigma_t$  aumentó, alcanzando valores levemente superiores a  $24 \text{ kg m}^{-3}$  (Fig.11f).

Con respecto al comportamiento del oxígeno disuelto (OD), las aguas más oxigenadas se encontraron en la capa superficial (0-10 m) con concentraciones ligeramente menores a  $7 \text{ mL L}^{-1}$  asociadas a la cabeza del fiordo. En profundidades  $> 10$  m se observaron aguas menos oxigenadas, sin embargo, la disminución de la concentración de OD ocurrió de manera gradual hacia profundidades mayores. A su vez se observó una lengua, de alrededor de 15 m de ancho, que se extendió a lo largo de todo el fiordo, la cual presentó valores entre  $4 \text{ mL L}^{-1}$  a  $5 \text{ mL L}^{-1}$ . Bajo esta lengua, la concentración de oxígeno disuelto disminuyó lentamente, hasta alcanzar  $2 \text{ mL L}^{-1}$  a los 150 m de profundidad cerca de la cabeza (Fig.11h).

Por último, es necesario mencionar que, tanto en el mes de septiembre como en el mes de julio, las aguas más oxigenadas se encontraron en superficie y principalmente hacia la cabeza del fiordo consistente con una mayor solubilidad asociada al decrecimiento de la temperatura.

## 5. Corrientes

### 5.1. Velocidad media de la componente longitudinal (u) en las estaciones Cuervo y Gato

A partir de los datos de ADCPs anclados ubicados al interior del fiordo Aysén, en las estaciones Cuervo (en el centro del fiordo) (Fig.2a) y Gato (ubicada cerca de la boca) se obtuvieron perfiles promedios de la velocidad de la componente longitudinal (u) de las corrientes, es decir, a lo largo del fiordo.

El perfil promedio de la rapidez en la estación Cuervo a lo largo del fiordo (Fig. 12b) mostró que existe una intensificación de las corrientes,  $>2 \text{ cm s}^{-1}$  en dirección a la cabeza del fiordo entre los 0 y 5 m de profundidad, bajo esta capa (entre 0 y 5 m) el flujo promedio ( $5 \text{ cm s}^{-1}$ ) se dirigió hacia la boca del fiordo, en tanto que, bajo esta capa ( $> 10 \text{ m}$ ) se observó un flujo medio de  $4,6 \text{ cm s}^{-1}$  hacia la cabeza del fiordo. Finalmente hasta los 29 m de profundidad la intensidad de las corrientes disminuyó, alcanzando  $1 \text{ cm s}^{-1}$  en dirección a la boca del fiordo.

Por otra parte a lo largo del fiordo, en el perfil promedio de la componente en Gato (Fig.12d), presentó al igual que en la estación Cuervo una intensificación de las corrientes en los primeros metros de profundidad (4m) en dirección a la cabeza del fiordo, luego al contrario de esta capa superficial se observó un flujo en dirección a la boca del fiordo el cual alcanzó intensidades en torno a  $4,5 \text{ cm s}^{-1}$ . Posteriormente, bajo estas capas superiores las intensidades de las corrientes disminuyeron y cambiaron de dirección observándose un flujo hacia la cabeza del fiordo con intensidades cercanas a  $2 \text{ cm s}^{-1}$  (12 m de profundidad), finalmente y hasta los 290 m de profundidad las intensidades disminuyeron gradualmente ( $< 0,5 \text{ cm s}^{-1}$ ).

Con respecto al perfil promedio de la componente transversal de la velocidad, tanto para Cuervo como para Gato, las intensidades no superaron  $1 \text{ cm s}^{-1}$ , por lo que no se distinguió una clara dirección en estas corrientes.

En la estación Gato, la marea explicó menos del 6% de la varianza observada en la capa superficial (entre 0 y 3 m de profundidad), luego la variabilidad explicada por la marea aumentó alcanzando un máximo de 34% a 90 m de profundidad. En profundidades > 90 m y < 190 m la variabilidad explicada por la marea se mantiene en torno a 34% disminuyendo notoriamente a los 280 m de profundidad, en donde menos del 20% de la variabilidad está asociada a la marea (Fig.13a).

En forma similar, en Cuervo, se observó que entre los 0 y 4 m de profundidad la marea explicó menos del 7% de la variabilidad a lo largo del fiordo, bajo esta capa la variabilidad explicada por la marea aumentó a un 22% (11 m), para disminuir a menos de 10% a los 28 m de profundidad (Fig.13b).

Se estimaron los auto-espectros para todas las profundidades de cada sector, para una ventana espectral de 1 semana, con 20 grados de libertad. Sin embargo, con fines informativos se han seleccionado las profundidades de 5 m, 20 m y 250 m (Sólo para el caso de Gato), los cuales se presentan en las figuras 14a y 14b.

Tanto en Gato (Fig.14a) como en Cuervo (14b), el auto-espectro de la componente u a 5 m de profundidad, presentó una mayor densidad espectral, llegando incluso a mostrar una diferencia de dos órdenes de magnitud con los autoespectros de profundidades mayores, sin embargo, esta diferencia se redujo para frecuencias más altas. Por otra parte en Gato se observaron dos picos en los tres autoespectros, correspondientes a las bandas diurna y semidiurna, en tanto que, para Cuervo sólo se distinguió un pico bien definido en el autoespectro de los 20 m, el cual correspondió con la banda semidiurna.

## **5.2. Relación viento y corrientes en profundidad**

Con el objetivo de obtener el patrón medio de las corrientes del sector, se obtuvieron los perfiles medios de las componentes a lo largo fiordo para Cuervo y Gato. En

ambos sectores se observó que este patrón desarrolló corrientes hacia la cabeza en superficie y hacia la boca sub-superficialmente (Fig.12), lo cual no es consistente con el patrón típico. Uno de los factores que puede modificar el típico patrón estuarino es la influencia del viento, por esta razón se procedió a evaluar los perfiles medios de las corrientes durante eventos de viento débil y durante vientos intensos.

En Cuervo, durante viento débil (magnitudes  $\leq 0,5 \text{ m s}^{-1}$ ) se observaron corrientes con intensidades  $> 10 \text{ cm s}^{-1}$  en la capa superficial (profundidad  $< 3 \text{ m}$ ), esta capa en promedio se dirige hacia la boca del fiordo. Bajo esta capa, las corrientes se dirigieron hacia la cabeza del fiordo con una intensidad que alcanzó los  $5 \text{ cm s}^{-1}$  (a  $11 \text{ m}$  de profundidad), posteriormente la intensidad de las corrientes disminuyó hasta los  $0,8 \text{ cm s}^{-1}$  (a  $26 \text{ m}$  de profundidad) (Fig.15b).

En condiciones de viento intenso (magnitudes  $\geq 6 \text{ m s}^{-1}$ ), las corrientes se dirigieron hacia la cabeza del fiordo desde la superficie ( $19 \text{ cm s}^{-1}$ ) hasta los  $17 \text{ m}$  de profundidad ( $0,2 \text{ cm s}^{-1}$ ). Bajo los  $17 \text{ m}$  de profundidad, las corrientes se dirigieron hacia la boca del fiordo con intensidades medias de  $1,5 \text{ cm s}^{-1}$  (a  $26 \text{ m}$  de profundidad) (Fig.15).

Las corrientes de Gato durante viento débil, mostraron un flujo superficial (entre  $0$  y  $6 \text{ m}$ ) hacia la boca del fiordo con una intensidad media de  $8 \text{ cm s}^{-1}$ , bajo esta capa las corrientes se dirigieron hacia la cabeza del fiordo, sin embargo, su intensidad no superó los  $1,5 \text{ cm s}^{-1}$ . En la capa entre  $20$  y  $290 \text{ m}$  de profundidad, la intensidad de la corriente no superó los  $0,4 \text{ cm s}^{-1}$ , con variaciones mínimas en la dirección del flujo (Fig.15a). En este sector, durante condiciones de viento intenso, se observó que desde la superficie hasta los  $12 \text{ m}$  de profundidad la dirección de las corrientes fue hacia la cabeza del fiordo, con una intensidad máxima de  $8 \text{ cm s}^{-1}$ . Bajo esta profundidad, el flujo de las corrientes se dirigió hacia la boca del fiordo, aunque su intensidad no supera los  $1,3 \text{ cm s}^{-1}$ . Entre los  $30$  y los  $290 \text{ m}$  de profundidad no se presentaron intensidades mayores a  $0,3 \text{ cm s}^{-1}$ , con mínimos cambios de dirección del flujo (Fig.15).

Con la finalidad de subrayar la relación entre el viento y las corrientes del sector, se seleccionaron 4 períodos de viento débil y 4 periodos de viento intenso.

En Cuervo, los perfiles promedios de la corriente residual durante los eventos de viento débil (Fig.17c), mostraron que desde superficie hasta los 10 m de profundidad el flujo se dirigió hacia la boca del fiordo, bajo esta capa (entre los 10 a 29 m) el flujo se dirigió hacia la cabeza del fiordo, es decir, durante viento débil el perfil de la corriente residual es similar al perfil típico estuarino. En tanto que, durante eventos de viento intenso el perfil es diferente a lo antes descrito, en la capa superficial (entre 0 y 10 m) el flujo tiende a mantenerse hacia la cabeza en la misma dirección que el viento, bajo esta capa el flujo se dirigió hacia la boca del fiordo, contrario a lo esperado en la circulación típica estuarina.

En la estación Gato, los perfiles promedio de la corriente residual durante periodos de viento débil (Fig.16c), entre 0 y 10 m de profundidad mostraron un flujo hacia la boca del fiordo, mientras que bajo esta capa el flujo se dirigió hacia la cabeza del fiordo, a profundidades mayores ( $> 30$  m) el perfil presentó amplitudes  $< 1 \text{ cm s}^{-1}$ . Sin embargo, durante eventos de viento intenso los perfiles presentaron un comportamiento similar a los perfiles durante viento débil, a excepción del perfil 2 (Fig.16).

#### **5.4. Variabilidad temporal y espacial de las corrientes a lo largo**

Con el objetivo de describir los principales modos de variabilidad de las corrientes de baja frecuencia del sector, se efectuó un análisis de funciones ortogonales empíricas (EOF's en sus siglas en inglés). Más del 80% de la variabilidad se encontró contenida en los tres primeros modos en ambos sectores, por lo tanto, en adelante los resultados se limitan a describir y analizar estos tres primero modos de variabilidad.

En Gato (Cuervo), el primer modo explicó 56% (56,5%), mientras que el segundo explicó un 22,3% (25,7%), el tercer modo explicó 12,1% (8,9%) de la variabilidad de las corrientes a lo largo en estos sectores. La variabilidad espacial (en este caso profundidad) mostró que, tanto el primer como el tercer modo poseen una mayor amplitud cerca de la superficie (profundidades menores a 4 m), sub-superficialmente (en torno a los 4 m de profundidad) el segundo modo mostró poseer asociada una mayor amplitud (Fig. 18).

Dado que los primeros 3 modos explicaron más del 80% de la variabilidad en ambos sectores, se procedió a efectuar la reconstrucción de las corrientes de baja frecuencia (> 1 día) con estos modos dominantes (Fig. 19 y 20).

Tanto en Gato como en Cuervo las series reconstruidas mostraron tener una buena relación con el gradiente de presión y el estrés del viento. Se observó que entre los 0 y 8 m de profundidad existe una mayor variabilidad, tanto así que se observaron intensos flujos entrando y saliendo del fiordo. A su vez se observó que los flujos que van hacia la cabeza (boca) del fiordo coinciden con un aumento (disminución) del estrés del viento en la misma dirección, el cual a su vez coincide con un aumento en el gradiente de presión barotrópico. Posteriormente entre los 8 y los 15 m de profundidad, en Gato no se mostró una variabilidad marcada contrario a lo observado en Cuervo, donde se observaron flujos menos intensos los cuales poseen una dirección variable, la dirección de estos flujos tiende a ser contraria a la dirección que posee el flujo superior (Fig. 19 y 20).

## DISCUSION

### 1. Descarga de ríos

Estudios previos (Cáceres *et al.*, 2002; Guzmán 2004; Prado-Fiedler & Salcedo, 2008; Silva & Vargas, 2014) han mostrado que el aporte más importante de agua dulce al fiordo Aysén proviene del río Aysén, aportes secundarios serían efectuados por los ríos Cuervo y Cóndor. En el presente estudio se analizaron los caudales mensuales de estos ríos, lo cual mostró que el río Aysén presentó un caudal medio de  $546,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , en tanto que el río Cuervo registró una media de  $95,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Mientras que el río Cóndor presentó una media de  $45,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Cabe destacar que, existen diferencias relativamente importantes con los caudales medios informados por Guzmán (2004), esto probablemente está asociado a diferencias en la extensión de los datos utilizados, ya que Guzmán (2004) consideró una serie de datos mensuales durante 6 años, mientras que el presente estudio consideró el análisis de 19 años, permitiendo establecer con mayor confianza estadística los promedios mensuales de largo plazo (ciclo anual) del aporte del río Aysén (Fig. 4). Por ejemplo, el ciclo anual presentó un caudal que se mantuvo bajo el promedio en el periodo enero-mayo, mientras que entre junio-diciembre se registró un caudal sobre la media, consistente con lo observado por Guzmán (2004). El caudal alcanzó un máximo secundario en junio ( $600 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) y un máximo principal en octubre ( $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ). La descarga de junio, probablemente está dominado por el aporte pluvial, mientras que entre octubre y diciembre la descarga está dominada por los deshielos.

El ciclo anual del caudal del río Cuervo presentó un aumento en invierno-verano y una disminución en otoño-primavera. En tanto que el río Cóndor, en su ciclo anual mostró un máximo principal en el mes de junio, y un máximo secundario en el mes diciembre, semejante al ciclo anual descrito por Guzmán (2004).

Por otra parte el caudal del río Aysén presentó una anomalía negativa en el mes de julio de 2010 durante el periodo en que se realizaron las mediciones de CTD-O. Distinto fue en septiembre de 2009 donde casi no hay diferencia entre el valor típico del caudal y el valor correspondiente al periodo de medición.

## **2. Estacionalidad de los vientos del sector**

Los vientos del SW predominan en la época de primavera-verano, los cuales además son más intensos que en otoño-invierno, época donde se presentaron vientos más variables en cuanto a dirección e intensidad. Este comportamiento coincide en parte con lo propuesto por Cáceres *et al.*, 2002 y el Servicio Meteorológico de la Armada de Chile quienes plantean que durante el período de otoño-invierno los vientos norte y noroeste son dominantes, cosa que no es consistente con lo observado en este estudio. No obstante, el comportamiento descrito es sólo una guía general, ya que estudios relacionados con el efecto del viento en la hidrodinámica de fiordos han revelado que el viento se acelera y se canaliza por la acción de las elevadas y abruptas paredes terrestres que encierran estos cuerpos de agua (Farmer, 1976; Vera, 2005) (Fig.6). Por otra parte, el ciclo diario del viento mostró que, durante todo el año los vientos son más intensos durante la segunda mitad del día (entre las 12 h y 20 h) (Fig.6).

El espectro del esfuerzo del viento, presentó un aumento significativo en la banda diurna, el cual sería atribuido a la diferencia termal tierra- océano, producto del ciclo diario de calentamiento y enfriamiento. Este es un rango típico observado en fiordos (Farmer & Farmer 1983) y es consistente con lo observado por Vera (2005) en el fiordo Aysén.

## **3. Estructura de la hidrografía a lo largo del fiordo Aysén**

Los campos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto a lo largo del fiordo, presentaron mayor variabilidad en la cabeza del fiordo; esta está asociada al aporte directo

de agua dulce de los ríos Aysén y Cuervo en esa región. En la boca, la estratificación disminuye notoriamente debido a que los aportes de agua dulce se reducen considerablemente y a la mezcla con el agua subsuperficial que tiene lugar entre la cabeza y la boca.

La distribución de la temperatura en la capa superficial (entre 0 y 10 m) al interior del fiordo, mostró mayor variabilidad en julio. En septiembre, se observaron aguas más frías provenientes de la cabeza del fiordo, no así durante julio, cuando se observó una capa de agua más fría a lo largo de todo el fiordo (Fig. 11a-b). Estas diferencias de estratificación estarían asociadas a la estacionalidad del aporte de agua dulce en la región y a cambios en la mezcla generados por el viento. Es probable que, la combinación entre un mayor aporte de agua dulce y un periodo de vientos débiles, promueva la poca estratificación de la zona superficial que se presentó durante el mes de julio.

En ambos periodos se observó una inversión térmica, es decir, las aguas más profundas son más cálidas que las aguas presentes en superficie, comportamiento típico en los fiordos de la Patagonia austral Chilena (e.g. Silva *et al.* 1995, Guzmán, 2000; Guzmán & Silva, 2002; Guzmán, 2004; Schneider *et al.*, 2014; Castillo *et al.*, 2016) y que está relacionado con una renovación de las aguas profundas por aguas más cálidas y salinas, provenientes de la zona de los canales por penetración a nivel intermedio, durante alguna época del año. Condiciones para que esta inversión térmica tenga lugar son la presencia de aguas superficiales menos densas, y que la estructura de densidad se encuentre fuertemente dominada por la salinidad, esto genera que la eficiencia de la transferencia de calor desde y hacia la superficie disminuya (Sievers & Prado, 1994 ; Aiken, 2012)

La distribución de salinidad mostró una capa superficial menos salina, tanto en septiembre como en julio. Hacia la cabeza del fiordo en septiembre, se observaron las salinidades más bajas ( $< 1$ ) (Fig. 11c), mientras que en julio estas bajas salinidades se

presentaron entre las estaciones 8 y 9, producto de la descarga directa al fiordo del río Cuervo (Fig. 1 y Fig. 11d).

Ahora bien, en sistemas estuarinos, los cambios de densidad son explicados en forma significativa por cambios en la salinidad (90%), y en menor medida por los cambios en la temperatura (10%) (Pickard, 1973). Esta relación salinidad/densidad fue observada en el fiordo Aysén, especialmente en la capa superficial. Las diferencias en estratificación en ambos periodos de medición fueron importantes, de hecho la picnoclina (estimada por el máximo gradiente de salinidad) se presentó bien desarrollada en septiembre, con una evidente profundización hacia la cabeza del fiordo (Fig.11e). En tanto que, en julio una picnoclina muy debilitada se presentó cerca de la superficie a lo largo de todo el fiordo (Fig.11f). El comportamiento de la picnoclina, podría no sólo ser debido a diferencias en el aporte de agua dulce de ambos meses, sino también podría existir una influencia del viento, forzante que ayudaría a fortalecer o debilitar la circulación estuarina, como se ha observado en el fiordo Reloncaví (Montero *et al.*, 2011) y en otros estuarios en Canadá (Farmer & Osborn, 1976).

Por lo tanto debido a que los aportes de agua dulce son bajos en comparación con el promedio, la circulación estuarina se ve debilitada, disminuyendo eventualmente el espesor del agua salobre hacia la boca (Cifuentes, 2012). Considerando que ocurre un aumento del forzamiento del viento en primavera (Montero *et al.*, 2011), el cual sopla hacia la cabeza del fiordo, la profundización de la capa superior de agua salobre en primavera se favorece, generando, a su vez la, profundización de la picnoclina a partir de su relación con el comportamiento de salinidad.

La distribución de oxígeno disuelto, presentó un capa de agua más oxigenada en superficie a lo largo de todo el fiordo en ambos periodos de medición y es resultado, por una parte, del intercambio con la atmósfera y por otra de la productividad primaria que ocurre en las capas superficiales, lo cual aumenta el contenido de oxígeno disuelto

(Guzmán & Silva, 2002). Además durante septiembre y julio las concentraciones de oxígeno observadas ( $> 8 \text{ mL L}^{-1}$ ) hacia la cabeza del fiordo estarían asociadas a la descarga de los ríos que se encuentran en esta área. Por otra parte, en profundidad hacia la cabeza las concentraciones mínimas de OD en ambos periodos de medición fueron en torno a  $2 \text{ mL L}^{-1}$  (150 m), lo cual estaría asociado a una fuerte actividad de descomposición de materia orgánica, producto del aporte de material particulado de los ríos que desembocan cerca o en la cabeza del fiordo (Silva *et al.*, 1999). En la cuenca interior del fiordo, las concentraciones se mantienen en niveles cercanos a estos niveles mínimos, lo que indica que el umbral (sill) de la boca del fiordo (Fig.1) no restringe el intercambio exterior-interior del fiordo y mantienen las aguas del fondo sobre la hipoxia. Esto parece ser una característica de los fiordos de la Patagonia Austral Chilena (Silva & Vargas, 2014; Castillo *et al.*, 2016), lo cual contrasta significativamente con fiordos escandinavos como el fiordo By, el cual alcanzó niveles de eutroficación tan extremos que fue necesario efectuar una ventilación forzada de sus aguas (Stigebrandt *et al.*, 2014).

La marcada estratificación de septiembre, se presentó durante un periodo de menor descarga que en el mes de julio. En esta aparente contradicción, es probable que juegue un papel relevante las condiciones de marea o de vientos imperantes. En las condiciones de la hidrografía de un fiordo la variabilidad espacio-temporal de los procesos de salinidad y circulación está dominada en gran parte por ondas internas, ciclos de marea y eventos de viento (Schroeder *et al.* 1990; Dong *et al.* 2004; Liu *et al.* 2007; Buranapratheprat *et al.* 2008; Farmer & Osborn, 1976). Asimismo, la capa superficial está sujeta a calentamiento y enfriamiento producido por fluctuaciones anuales en la radiación solar y la advección de aguas exteriores frías o calientes, lo que genera estructuras verticales diferentes de temperatura y salinidad en diferentes fiordos, canales, estuarios y cuencas; en algunos se mezcla toda la columna de agua (e.g., Canal Magdalena,  $54^{\circ}\text{S}$ ; Hamamé and Antezana, 1999), mientras otros presentan una capa superior de agua dulce permanente (e.g., Canal Martínez,  $47.8^{\circ}\text{S}$ , Pérez-Santos *et al.*, 2014; Canales Martínez y Baker, Aiken, 2012; el Estuario de Reloncaví,  $41.5^{\circ}\text{S}$ , Valle-Levinson *et al.*, 2007; Fiordo de Reloncaví, Castillo *et*

*al.*, 2012). En el fiordo Puyuhuapi, la variabilidad de la capa superior se encuentra estacionalmente controlada (Schneider *et al.*, 2014), similares resultados se han observado en el fiordo Reloncaví (Castillo *et al.*, 2015), las diferencias estacionales observadas en la hidrografía del fiordo Aysén sugieren un comportamiento controlado estacionalmente.

Las mediciones de septiembre se efectuaron en fase de cuadratura, por lo que el efecto directo de la variabilidad mareal mostró ser menor en comparación con el gradiente de presión y el viento. Por el contrario, en julio (en fase de sicigia) el forzante mareal mostró ser más intenso, dominando la dinámica del sector. En este caso parte del flujo, asociado a la marea barotrópica, al pasar a través del sill hacia el interior del fiordo se acelera y crea ondas internas que se propagan tanto hacia el mar como hacia el interior, estas últimas ondas chocan contra el fondo creando turbulencia que mezcla el agua de diferente densidad en la capa inferior, no obstante esta mezcla fluye hacia capas más superficiales, causando una mezcla vertical eficaz. Por otra parte, un salto hidráulico interno también puede generar ondas internas que viajan en el interior del fiordo, sin embargo aun cuando el mecanismo de generación no está asociado directamente con el sill, el efecto de la mezcla será el mismo. (Stigebrandt *et al.*, 1976; Stigebrandt *et al.*, 1980).

#### **4. Corrientes**

Producto del mayor aporte de agua dulce (precipitación) en las cercanías de la cabeza, se promueve un gradiente de presión a lo largo del fiordo, generando un patrón de circulación de dos capas. Este patrón fue observado sólo en forma esporádica en el fiordo Aysén, cuando los vientos fueron de baja intensidad (ver Fig. 15). Sin embargo, durante eventos de viento intenso el patrón de las corrientes a lo largo presentó una capa muy superficial (1-2 m de ancho) que se dirige hacia la cabeza, bajo la cual se presenta una capa sub-superficial hacia la boca, seguida de una capa que se dirige nuevamente hacia la cabeza y que conforma al flujo de compensación típico de la circulación estuarina. En promedio, el patrón de corrientes fue más consistente con el observado durante eventos de viento

intenso, lo cual sugirió la influencia del viento en el patrón promedio o residual de las corrientes a lo largo (Fig.15)

El análisis armónico de las corrientes en la estación Gato mostró que la variabilidad asociada a las mareas aumenta en profundidad, lo cual es confirmado por el análisis espectral, donde se muestra que aún a los 250 m de profundidad la energía en la banda semidiurna se mantiene. Sin embargo, en la estación Cuervo, donde sólo existe un aumento de la variabilidad de las corrientes de marea hasta los 11 m de profundidad, el análisis espectral muestra un aumento en la energía asociado a la banda diurna a los 5 m y a la banda semidiurna a los 20 m, es decir, no se observa de igual forma que las corrientes sean moduladas por la influencia de la marea como si ocurre en la estación Gato. Por lo tanto, esto sugiere que existe un área del fiordo, más cercana a la boca la cual estaría siendo influenciada por la marea de mayor manera y otra en cuya dinámica pueden estar involucrados otros factores como el aporte de agua dulce por su cercanía a la desembocadura al río Aysén y/o también el viento.

Debido a que el perfil promedio clásico de velocidad en sistemas estuarinos puede ser revertido por el estrés del viento (Cáceres *et al.*, 2002), existiría una relación entre este forzante y el comportamiento de los residuales. De tal manera que cuando el estrés es intenso el perfil es modificado en la capa superficial, generando que el flujo se vea “detenido” o que ocurra un cambio de dirección (Klinck & O’Brien, 1981), lo cual fue observado en algunos perfiles (Ver Fig. 16-17). Asimismo, el gradiente de presión barotrópico presenta una alta correlación con el estrés del viento ( $R= 0.63$ ).

Considerando que el balance de momentum a lo largo de un fiordo en estado estacionario está dado aproximadamente por;

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} - fv = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial z} \left( Az \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

Desde la izquierda a la derecha, los primeros dos términos corresponden a los términos advectivos horizontales; el tercero corresponde al término vertical advectivo el cual es más pequeño que los otros dos términos anteriores. El cuarto término corresponde a la aceleración de Coriolis. En el lado derecho de la ecuación 3, se encuentran el gradiente de presión y el coeficiente de fricción vertical.

Se plantea que para este fiordo el balance de momentum a lo largo estaría dado por;

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} = Az \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (4)$$

Representado también por;

$$g \frac{\partial \eta}{\partial x} + \frac{g}{\rho} \int_z^{\eta} \frac{\partial p}{\partial x} dz = Az \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (5)$$

Donde los términos de la izquierda de la ecuación 5 corresponden al gradiente de presión barotrópico y baroclínico. Y el término de la derecha corresponde al coeficiente de fricción vertical, dado por el estrés del viento.

A continuación se plantean las condiciones en donde se cumple este balance. Sin embargo es necesario mencionar que el término correspondiente al gradiente de presión baroclínico no se puede evaluar en esta ocasión.

El primer caso corresponde a una estimación del gradiente de presión barotrópico durante el mes de septiembre, donde el promedio del estrés del viento a lo largo del fiordo ( $\tau_x$ ) fue  $5,4 \times 10^{-3} \text{ N Nm}^{-2}$ , la profundidad de la capa superficial (h) fue 8 m y la densidad del agua de mar ( $\rho_0$ ) fue  $1015 \text{ Kg m}^{-3}$ , a partir de esto se estableció que se cumple con el balance de momentum cuando el gradiente de presión barotrópico ( $g \frac{\partial \eta}{\partial x}$ ) es  $6,59 \times 10^{-7} \text{ ms}^{-2}$ .

El segundo caso corresponde a una estimación del gradiente de presión barotrópico durante el mes de julio, donde el promedio del estrés del viento a lo largo del fiordo ( $\tau_x$ ) fue  $-2.1 \cdot 10^{-3} \text{ N Nm}^{-2}$ , la profundidad de la capa superficial (h) fue 8 m y la densidad del agua de mar ( $\rho_0$ ) fue  $1020 \text{ Kg m}^{-3}$ , a partir de esto se estableció que se cumple el balance de momentum cuando el gradiente de presión barotrópico ( $g \frac{\partial \eta}{\partial x}$ ) es  $2,6 \times 10^{-8} \text{ ms}^{-2}$ .

Por otra parte a través del análisis de funciones ortogonales empíricas se obtuvo que el primer modo explica el 56% y 56,5% de la variabilidad del flujo residual a lo largo del fiordo en las estaciones Gato y Cuervo respectivamente, y presenta una mayor variabilidad en la capa superficial (entre los 0 y 8 m). La estructura temporal de este modo, analizada a través del análisis de ondelet indicó que existe una alta coherencia entre este modo y el estrés del viento durante eventos sinópticos de 8 días, esta alta coherencia se prolongó hasta fines de noviembre, esto coincidió con una fase negativa, lo que indica que la variabilidad de la corriente es en respuesta al forzamiento del viento (Ver Fig. 21b, c y 22b,c).

Por otra parte el segundo modo EOF, explica un 22,3% y 25,7% en las estaciones Gato y Cuervo respectivamente, y presenta una mayor variabilidad en la capa subsuperficial (entre 8 y 15 m). El análisis temporal de este modo permite asociarlo con el gradiente de presión, el cual al realizar el análisis de ondelet mostró tener una alta coherencia (Ver Fig. 21d, e y 22d, e).

. Los espectros de coherencia y fase mostraron que en la estación Gato desde septiembre hasta fines de octubre la alta coherencia tiende a coincidir con fases positivas y desde fines de octubre hasta enero coincide con fases negativas, a su vez esta alta coherencia tiende a ser marcada durante eventos de 6 días. Mientras que en la estación Cuervo, la coherencia es alta desde septiembre hasta fines de octubre y coincide con fases negativas, lo cual indica que durante ese periodo el gradiente de presión es el forzante que

actúa sobre la corriente, sin embargo durante el resto de la serie la correlación disminuye, coincidiendo con fases positiva en periodos superiores a 32 h.

Por último, la variabilidad representada por el tercer modo EOF, el cual explica el 12,1 % y el 8,9%, podría estar asociada a la suma de varios forzantes, ya que el estrés del viento y el gradiente de presión, los cuales parecen ser las variables encargadas de mantener el equilibrio en este sistema ya fueron correlacionadas con el primer y segundo modo correspondientemente.

## CONCLUSIÓN

Las características oceanográficas estudiadas a lo largo del fiordo evidencian una clara diferencia de estratificación entre ambos periodos de medición, siendo esta estratificación mayor en el mes de septiembre. En este periodo de medición las aguas más frías, menos saladas, menos densas y más oxigenadas se encuentran principalmente en la capa superficial hacia la cabeza del fiordo, distinto a lo observado en el mes de julio donde estas mismas aguas se encuentran a lo largo de todo el fiordo en la capa superficial.

El viento posee un marcado ciclo diario en la zona de estudio, caracterizada principalmente por una intensificación de los vientos en la tarde (12:00 a 19:00 h) durante todo el año. Por otra parte, estacionalmente, en la época de primavera-verano los vientos tienden a ser del suroeste y más intensos que en otoño-invierno, época donde poseen una dirección más variable.

El ciclo anual de la descarga del río Aysén presenta un régimen mixto, al igual que el río Cóndor, con un máximo primario durante primavera-verano. A su vez los promedios anuales calculados para los ríos Aysén ( $546 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ), Cuervo ( $95,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) y Cóndor ( $45,4 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ ) muestran que el río Aysén es el que genera un mayor aporte de agua dulce al fiordo Aysén. Con respecto al río Cuervo, no mostró un ciclo anual definido.

La variabilidad de la corriente residual es explicada por el estrés del viento en un 60% aproximadamente; cuando el estrés del viento es positivo hacia el interior del fiordo, el perfil típico de la circulación estuarina se modifica, de tal forma que las corrientes en la capa superficial son más intensas hacia el interior del fiordo, contrario al perfil típico.

Además, cambios en el gradiente de presión asociado a las variaciones del nivel de mar entre la cabeza y la boca, explica alrededor del 27% de la variabilidad de las corrientes residuales tanto en Gato como en Cuervo, presentando a su vez mayor coherencia que el

estrés del viento durante eventos sinópticos en el periodo de noviembre-diciembre. Por lo tanto en estado estacionario y para fluctuaciones de baja frecuencia el balance de momentum a lo largo del fiordo estaría dominado por estrés del viento y gradiente de presión barotrópico, mientras que los términos advectivos y Coriolis parecerían tener menor importancia.

Por último y debido a que más de la mitad de la variabilidad de la corriente residual está asociada al efecto del viento, es posible aceptar que este es un forzante que influye altamente en la circulación residual de este fiordo.

## REFERENCIAS

- Aiken, C.M., 2012. Seasonal thermal structure and exchange in Baker Channel, Chile. *Dynamics of Atmospheres and Oceans* 58, 1–19.
- Buranapratheprat A., T. Yanagi, & S. Matsumura. 2008. Seasonal variation in water column conditions in the upper Gulf of Thailand. *Continental Shelf Research* 28: 2509-2522.
- Calvete, C. (2006). “Caracterización de zonas ROFI y áreas frontales asociadas en los fiordos del sur de Chile ubicados entre la boca del Guafo (43°30' S) y laguna San Rafael.” Tesis de Magíster en Oceanografía. Universidad de Concepción, Concepción: 88 pp.
- Calvete C & M Sobarzo. 2011. Quantification of the surface brackish water layer and frontal zones in southern Chilean fjords between Boca del Guafo (43°30'S) and Estero Elefantes (46°30'S). *Continental Shelf Research* 31: 162-171.
- Cáceres, M., A. Valle-Levinson, H. H. Sepulveda, & K. Holdieried. 2002. Transverse variability of flow and density in a Chilean fjord. *Continental Shelf Research* 22: 1683-1698.
- Castillo, M. 2012. Circulación y mezcla del fiordo Reloncaví, Chile, Tesis, Universidad de Concepción. 104 pp.
- Castillo, M.I., Pizarro, O., Cifuentes, U., Ramirez, N., Djurfeldt, L., 2012. Subtidal dynamics in a deep fjord of southern Chile. *Continental Shelf Research* 49, 73-89.
- Castillo, M.I., Cifuentes, U., Pizarro, O., Djurfeldt, L., Cáceres, M., 2016. Seasonal hydrography and surface outflow in a fjord with deep sill: the Reloncavi fjord, Chile. *Ocean Sci.* 12, 533-544.

Cifuentes, U. 2012. Variabilidad estacional de las condiciones oceanográficas y tiempo de renovación en el fiordo Reloncaví( 41° 35' S; 72° 30' W). Tesis de Oceanografía. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 105 pp.

Dávila, P.M., Figueroa, D., Müller, E., 2002. Freshwater input into the coastal ocean and its relation with the salinity distribution off austral Chile (35–55\_S). *Continental Shelf Research* 22–3, 521–534.

Dong L, J.Su, L.Wong, Z. Cao,& J. Chen. 2004. Seasonal variation and dynamics of the Pearl River plume. *Continental Shelf Research* 24: 1761-1777.

Farmer, D. M., & H. J. Freeland. 1983. The physical oceanography of Fjords. *Progress in Oceanography* 12: 147-194.

Grinsted, A., J.C., Moore, & S. Jevrejeva. (2004). Application of the cross wavelet transform and wavelet coherence to geophysical time series, *Nonlinear Processes in Geophysics*. vol 11, 5/6, 561-566.

Guzmán, D. 2000. Caracterización física y química, y estimación del balance de sal, agua y nutrientes en el seno del fiordo Aysén. Tesis de Oceanografía. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 68 pp.

Guzmán, D. 2004. Caracterización Hidrográfica, oceanográfica y balance de nitrógeno y fósforo del fiordo Aysén. Tesis para optar al grado de Magister en Oceanografía. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y Universidad de Valparaíso. 74 pp.

Guzmán, D. & N. Silva. 2002. Caracterización física y química y masas de agua en los canales australes de Chile entre Boca del Guafo y Golfo Elefantes (Crucero Cimar Fiordos 4). *Ciencia y Tecnología del Mar* 25(2): 45-76.

- Hamamé, M., & T. Antezana. 1999. Chlorophyll and zooplankton in microbasins along the Straits of the Magellan-Beagle Channel passage. *Scientia Marina* 63 (Suppl. 1), 35–42.
- Ianniello, J. 1979. Tidally induced residual currents in estuaries of variable breadth and depth. *Journal of Physical Oceanography* 9: 962-974.
- Klinck, J. J. O'Brien & H. Svendsen, 1981. A simple model of fjord and coastal circulation interaction. *Journal of Physical Oceanography*, 21: 373-384.
- Knudsen, M. 1900. Ein hydrographischer Lehrsatz. *Ann. d. Hydrographie etc.*, 28, 316-320.
- Large, W.G. & S. Pond. 1981. Open Ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Oceanogr.*, 17, 1093-1104.
- Liu W-C, W-B. Chen, RT. Cheng, M-H Hsu, & AY. Kuo. 2007. Modeling the influence of river discharge on salt intrusion and residual circulation in Danshuei River estuary, Taiwan. *Continental Shelf Research* 27: 900-921.
- Montero, P., G. Daneri, H. E. González, J. L. Iriarte, F. J. Tapia, L. Lizárraga, N. Sanchez & O. Pizarro. 2011. Seasonal variability of primary production in a fjord ecosystem of the Chilean Patagonia: Implications for the transfer of carbon within pelagic food webs. *Continental Shelf Research*, 31 (3-4): 202-215.
- Officer, C. B. 1976. *Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters)*. John Wiley & Sons, Inc., New York, 465 pp.
- Palma, S. & N. Silva. 2004. Distribution of siphonophores, chaetognaths and euphausiids and oceanographic conditions in the fjords and channels of southern Chile. *Deep-Sea Res. II*, 51(6-9): 513-535.
- Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S., 2002. Classical tidal harmonic analysis with

errors in matlab using t-tide. *Computers & Geosciences* 28, 929–937.

Pérez-Santos, I., J. Garcés-Vargas, W. Schneider, A. Valle-Levinson, S. Parra & L. Ross, 2014. Diffusive layering and mixing in Patagonian fjords and channels. *Progress in Oceanography* (accepted for publication).

Pickard, G. L. 1971. Some physical oceanographic features of inlets of Chile. *Journal of the Fisheries Research Board of Canada* 28: 1109-1144.

Pickard, G. 1973. Water structure in Chilean fjords. *Oceanography of the South Pacific 1972*, comp. R. Fraser, New Zealand Nat. Comm. for UNESCO. pp. 95-104.

Prado –Fiedler, R. & J. Salcedo. 2008. Aporte fluvial y pluvial de nitrógeno y fósforo al fiordo Aysén y canales Jacaf- Ventisquero Puyuhuapi. *Ciencia y Tecnología del Mar* 2008 31(2).

Pritchard, D. W. 1967. What is an Estuary Physical View Point. In J. P. Lauff [ed.], *Estuaries*.

Saavedra, N., E P. Müller. & A J. Foppiano. 2010. On the climatology of surface wind direction frequencies for the central Chilean coast. *Australian Meteorological and Oceanographic Journal* 60 (2010) 103-112.

Schneider, W. I. Pérez-Santos, L. Ross. L. Bravo, R. Seguel & F. Hernández. 2014. On the hydrography of Puyuhuapi Channel, Chilean Patagonia. *Prog. Oceanogr.* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.pocean.2014.03.007>.

Schroeder, WW, SP. Dinnel, & WJ Jr. Wiseman. 1990. Salinity stratification in a river-dominated estuary. *Estuaries and Coasts* 13: 145-154.

Sievers, H., & Silva, N., 2008. Water masses and circulation in austral Chilean channels and fjords. 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., H. Sievers, & R. Prado. 1995. Características oceanográficas y una proposición de circulación para algunos canales australes de Chile 41°20' S y 46°40' S. *Revista de Biología Marina y Oceanografía* 30(2): 207-254.

Silva, N., Calvete, C., 2002. Physical and chemical oceanographic features of southern Chilean inlets between Penas Gulf and Magellan Strait (Cimar- Fiordo 2 cruise). *Ciencia y Tecnología del Mar* 25 (1), 23–88.

Silva, N. & D. Guzmán. 2006. “Condiciones oceanográficas físicas y químicas, entre Boca del Guafo y Fiordo Aysén (Crucero Cimar 7 Fiordos).” *Ciencia y Tecnología del Mar* 29(1): 25-44.

Stigebrandt, A. 1977. On the effect of barotropic current fluctuations on the two-layer transport capacity of a constriction. *Journal of Physical Oceanography* 7: 118-122.

Torrence, C., & Compo, G.P., 1998. A practical guide to wavelet analysis. *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 79:61–78.

Valle-Levinson, A., M. Cáceres, H. Sepúlveda, & K. Holderied. 2002. “Patrones de Flujo en los canales asociados a la boca del seno Aysen.” *Ciencia y Tecnología del Mar* 25(2): 5-16.

Valle-Levinson, A., Sarkar, N., Sanay, R., Soto, D., & J. León. 2007. Spatial structure of hydrography and flow in a Chilean Fjord, Estuario Reloncavi. *Estuaries and Coasts* 30 (1), 113–126.

Valle-Levinson, A. 2010. Definition and classification of estuaries, in: Contemporary Issues in Estuarine Physics, Cambridge University Press, Cambridge, pp. 1-11.

Valle-Levinson, A., M. Cáceres, & O. Pizarro. 2014. Variations of tidally driven three-layer residual circulation in fjords. *Ocean Dynamics*, 64, 459–469, 2014.

Vera, A. 2005. Efecto del viento sobre las variaciones del nivel del mar en el fiordo Aysén. Tesis para optar al grado de Magister en Oceanografía. Pontificia Universidad Católica de Valparaíso y Universidad de Valparaíso. 57 pp.

Winant, C. D. 2008. Three-Dimensional Residual Tidal Circulation in an Elongated, Rotating Basin. *Journal of Physical Oceanography* 38: 1278-1295.

## ANEXO

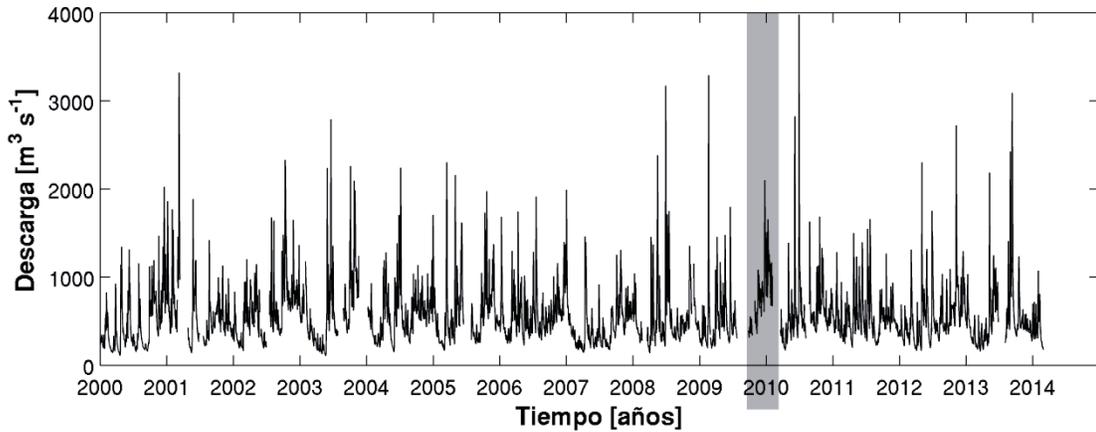


Figura 3.- Serie de datos mensuales (2000-2014) de descarga del Río Aysén.

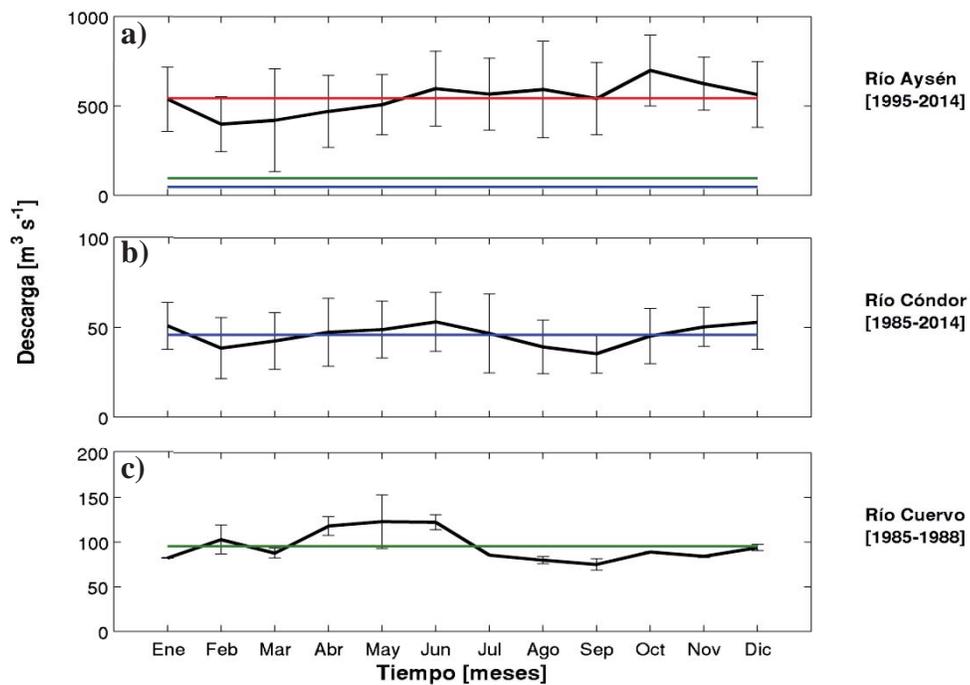


Figura 4.- Ciclo anual del aporte de agua dulce de cada río al fiordo Aysén. Las líneas de color rojo, azul y verde representan el promedio anual del caudal de los ríos Aysén, Cóndor y Cuervo respectivamente.

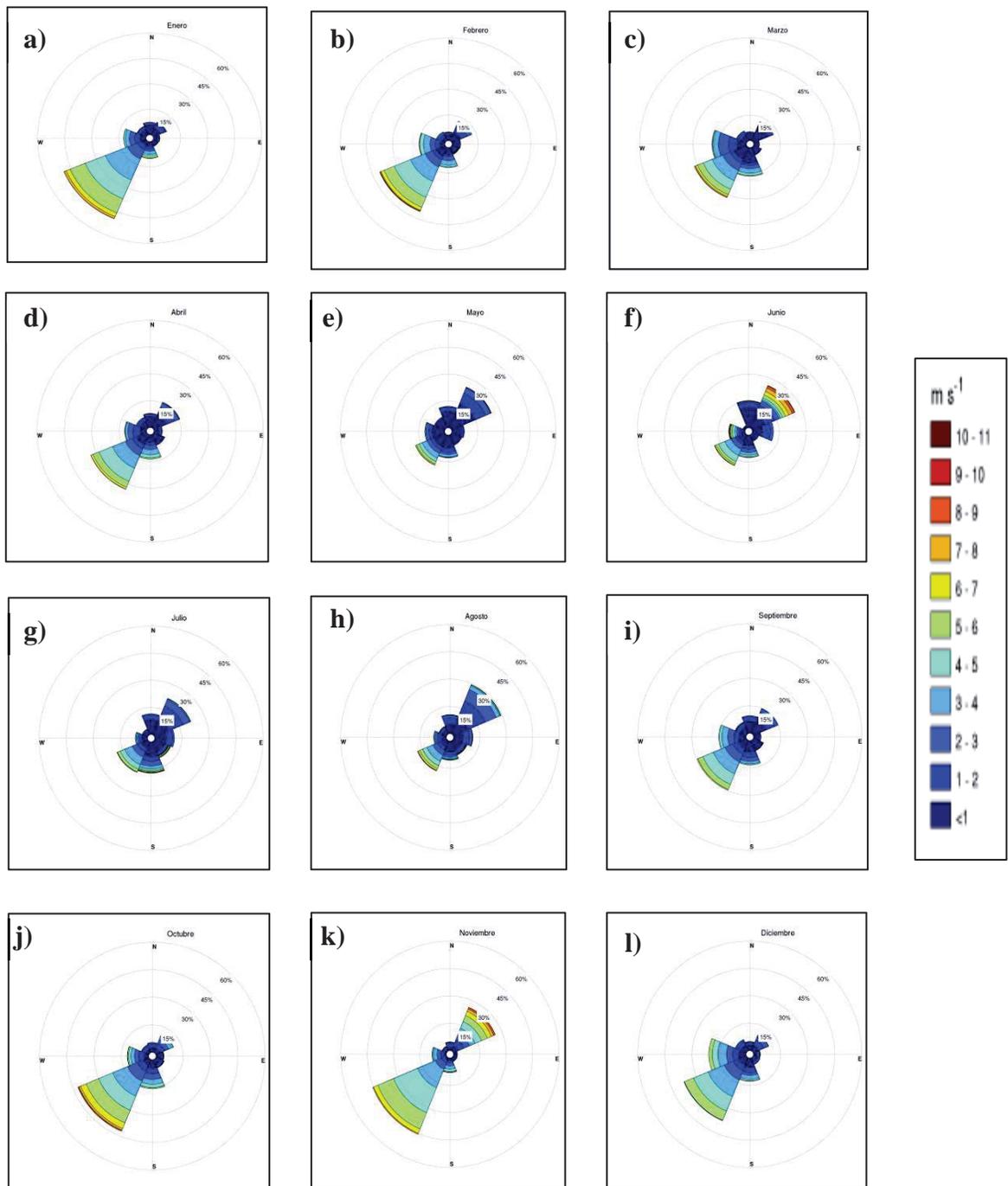


Figura 5.- Frecuencia de la magnitud y dirección del viento mensual, medidos en la estación Chacabuco y Aysén. Referidos a la dirección proveniente (convención meteorológica). Periodo de mediciones entre junio del 2009 y septiembre del 2010.

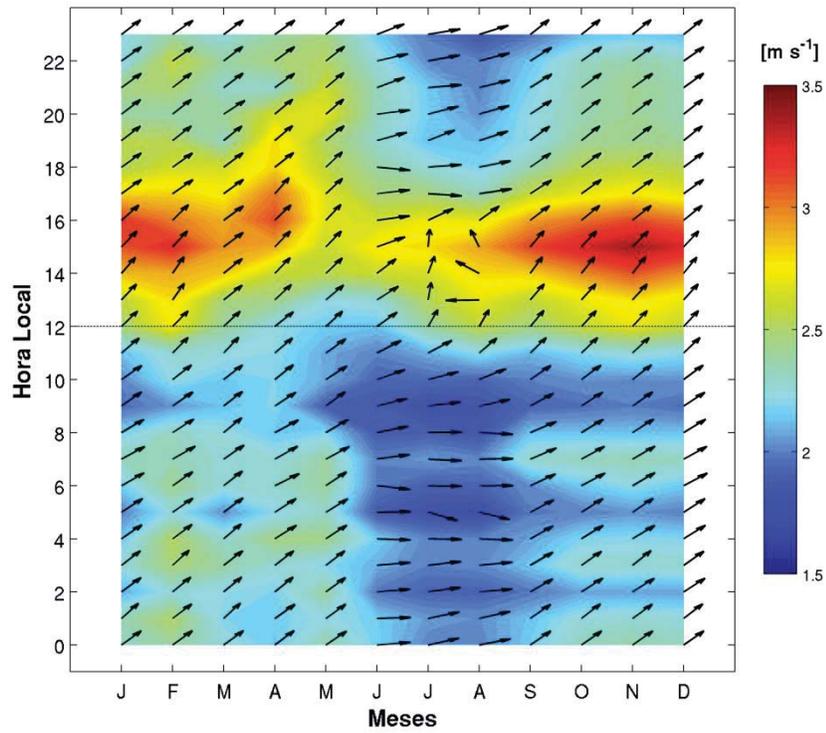


Figura 6.- Estacionalidad del ciclo diario del viento.

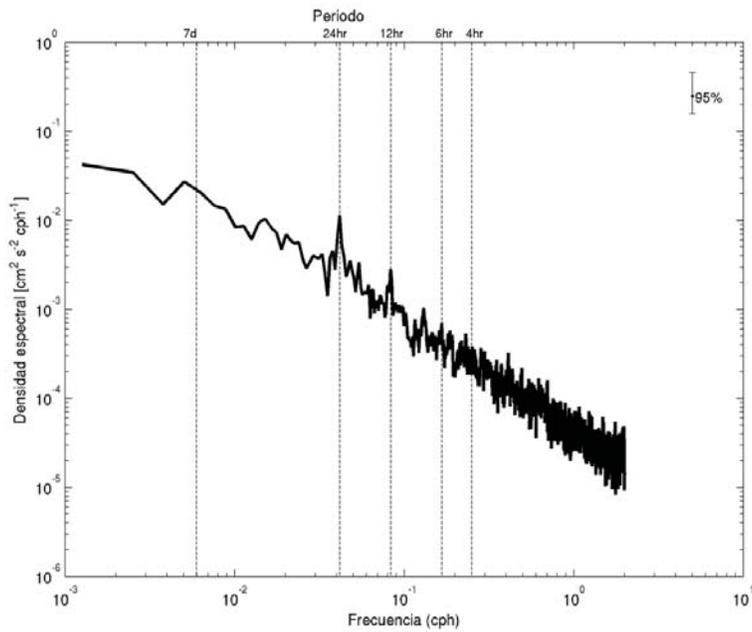


Figura 7.- Espectro de energía del viento a lo largo del fiordo.

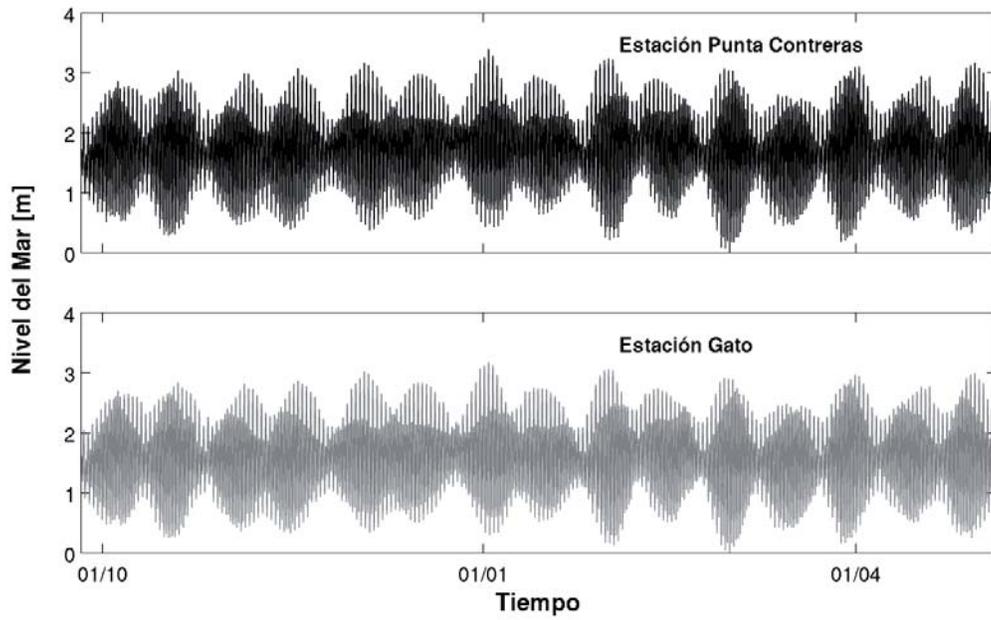


Figura 8.- Serie del nivel del mar en la cabeza (estación Punta Contreras) y en la boca del fiordo (estación Gato).

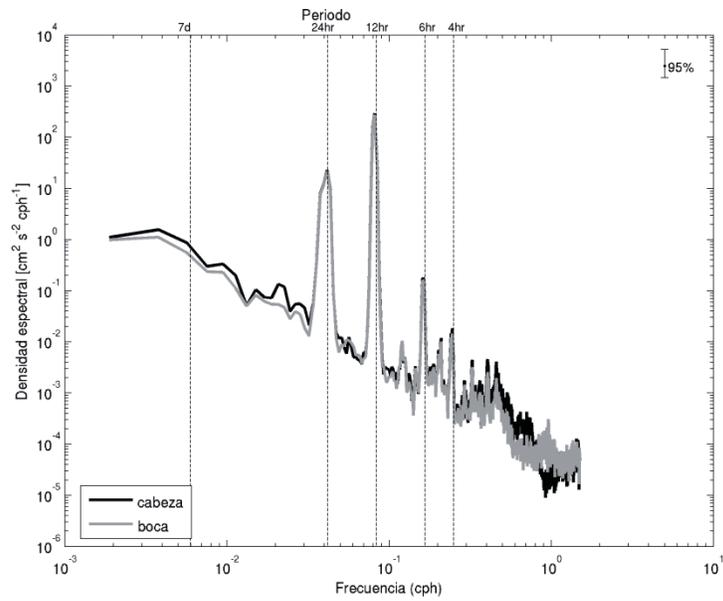


Figura 9.- Espectro de energía de las series del nivel de mar, estación Punta Contreras (cabeza) y estación Gato (boca).

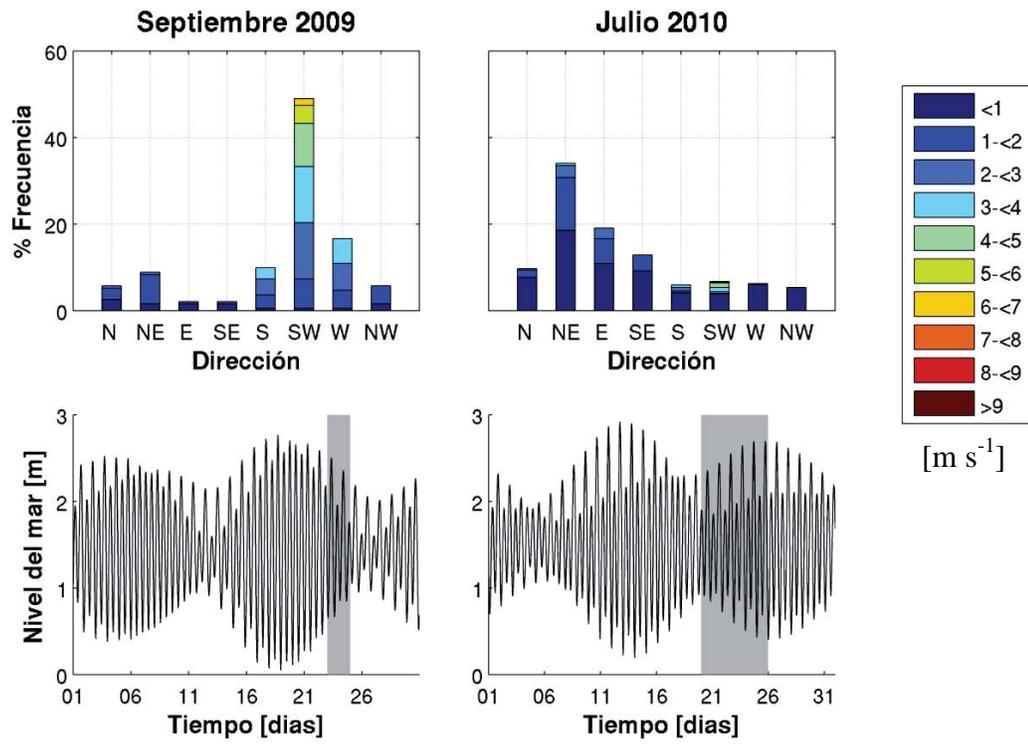


Figura 10.- Condiciones de viento y nivel de mar durante el periodo de medición de septiembre del 2009 y julio 2010. .

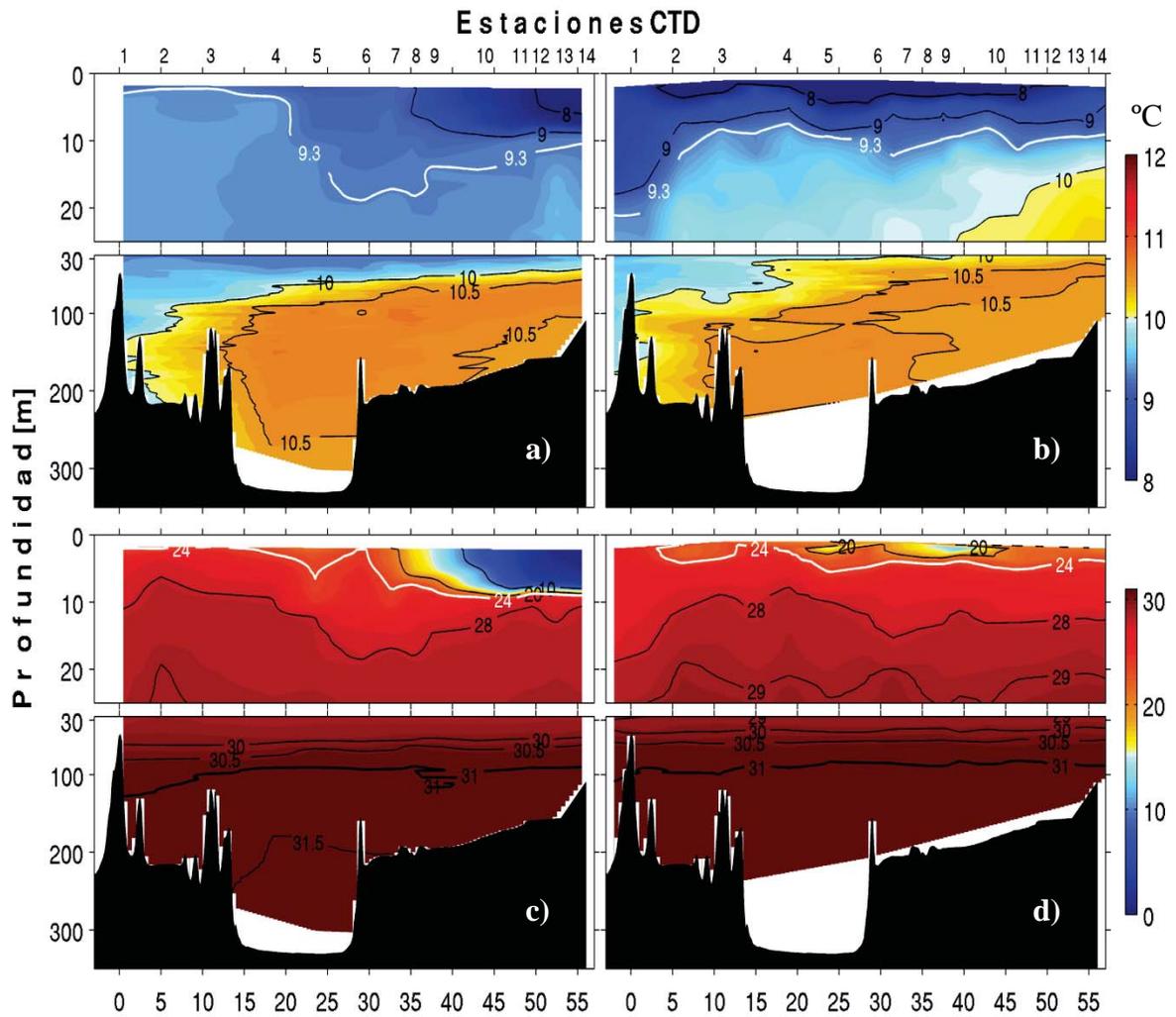


Figura 11.- Secciones de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), salinidad (psu), para Septiembre del 2009 (a y c) y Julio del 2010 (b y d).



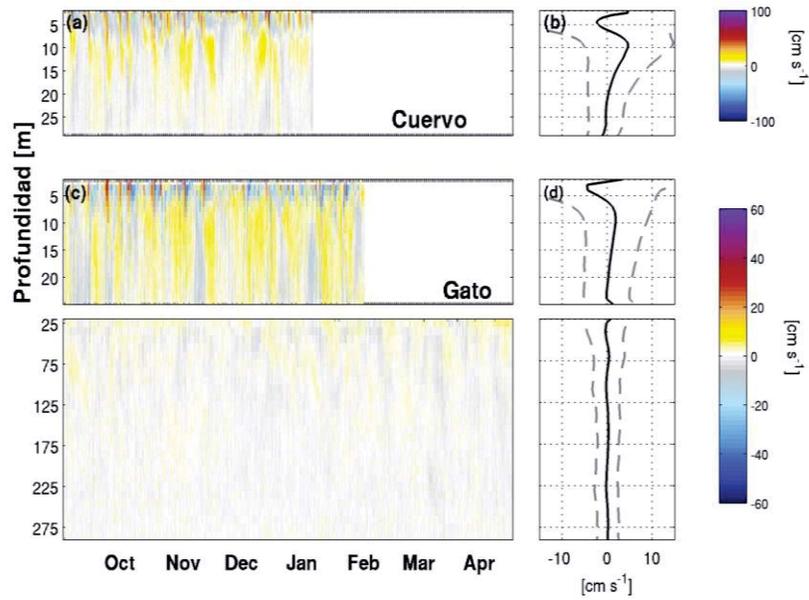


Figura 12.- Componente longitudinal de las corrientes y su perfil promedio en las estaciones Cuervo (a y b) y Gato (c y d).

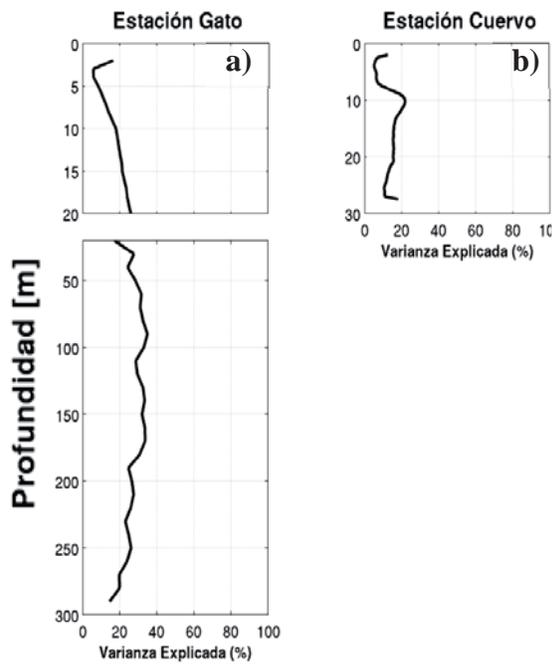


Figura 13.- Varianza del perfil promedio de la corriente explicada por la marea de las estaciones Gato y Cuervo.

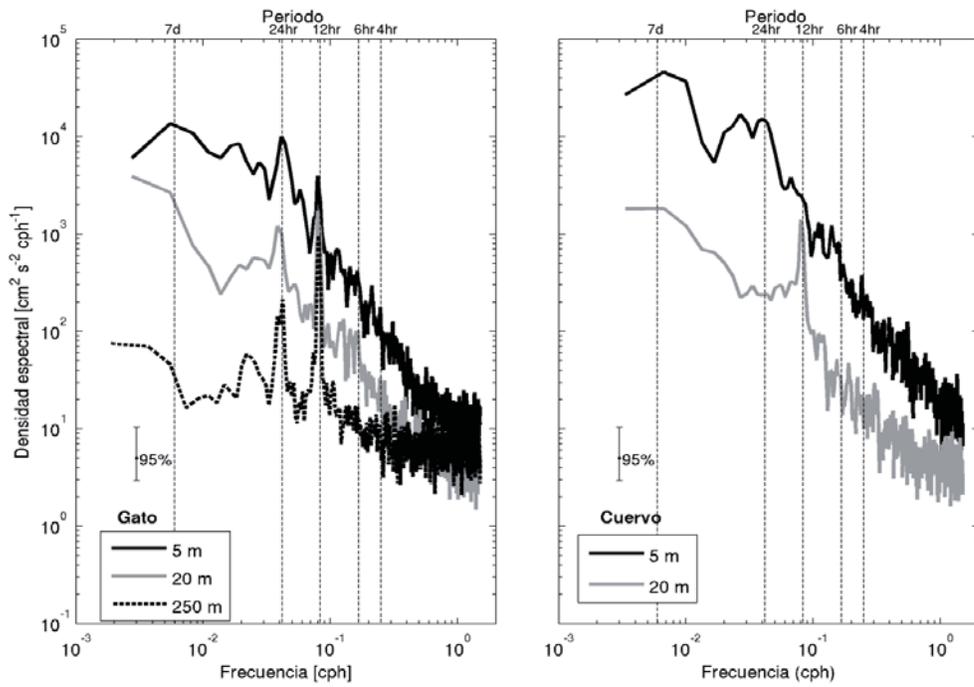


Figura 14.- Espectro de energía de la componente a lo largo de las corrientes, en las estaciones Gato y Cuervo.

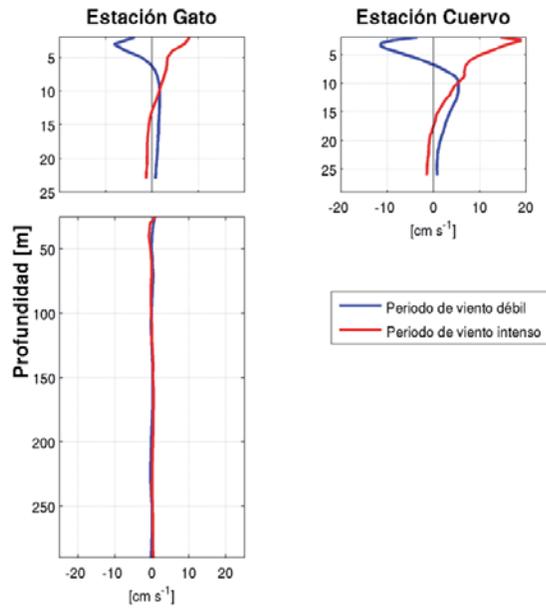


Figura 15.- Perfil promedio de la corriente durante periodos de vientos débiles e intensos, en las estaciones Gato y Cuervo.

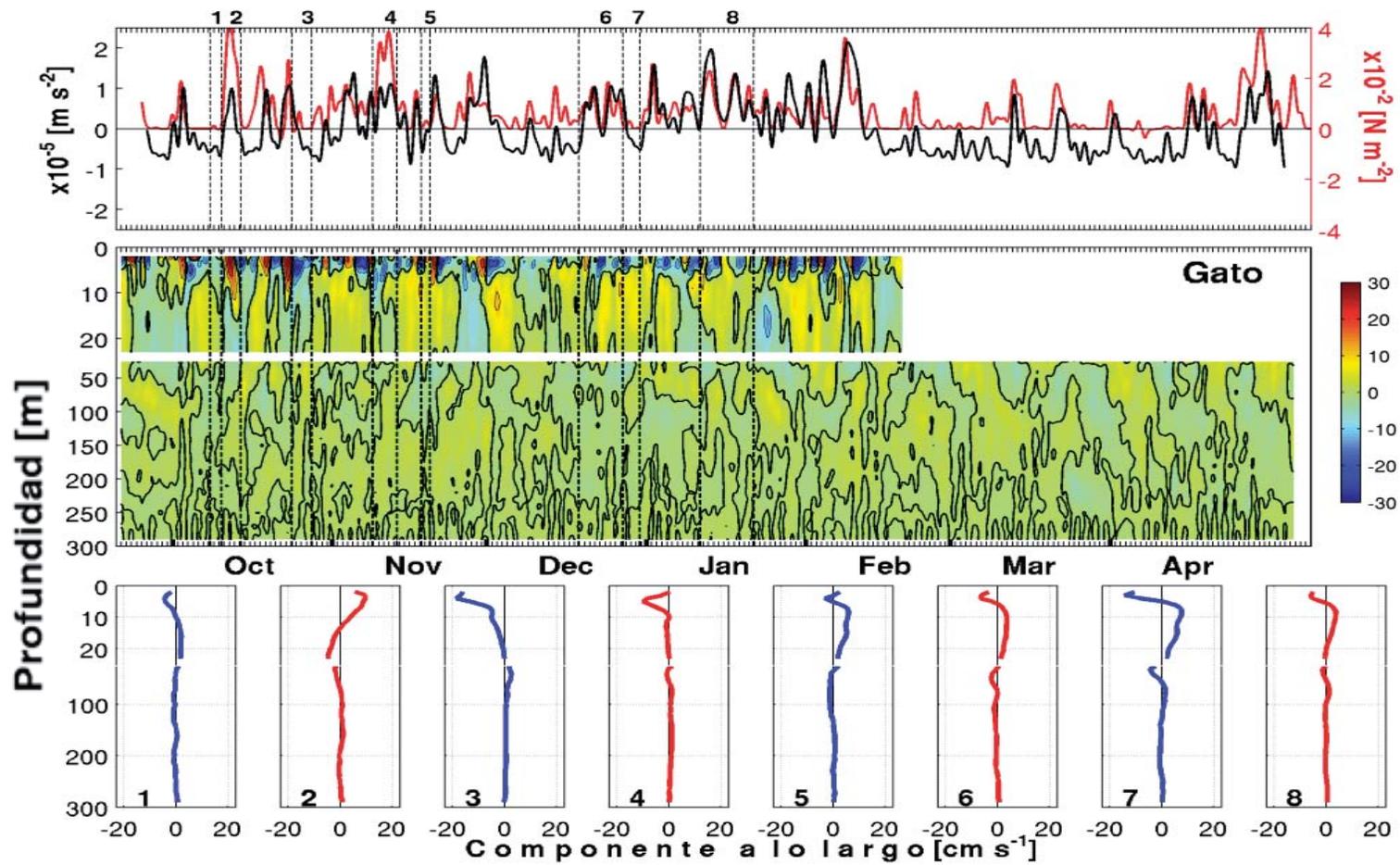


Figura 16.- Series de tiempo de la estación Gato de, (a) Estrés del viento (rojo), gradiente de presión (negro), (b) contornos de la componente a lo largo (U) de la corriente, (c) perfiles promedios de U durante los eventos indicados con número y línea punteada. Note que, en todos los casos (vientos y corrientes) valores positivos (negativos) se dirigen hacia la cabeza (boca) del fiordo

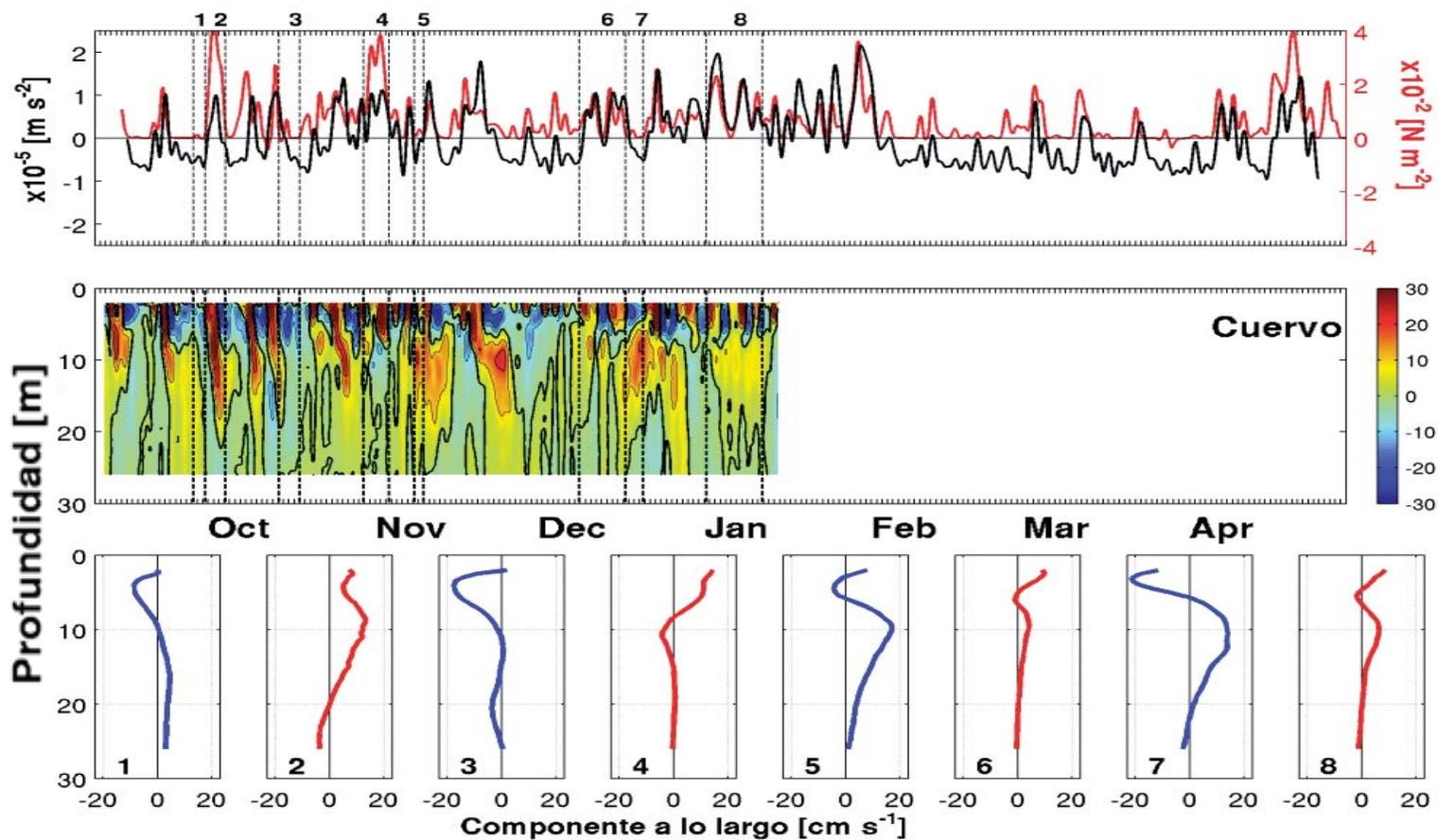


Figura 17.- Series de tiempo de la estación Cuervo de, (a) Estrés del viento (rojo), gradiente de presión (negro), (b) contornos de la componente a lo largo (U) de la corriente, (c) perfiles promedio de U durante los eventos indicados con número y línea punteada. Note que, en todos los casos (vientos y corrientes) valores positivos (negativos) se dirigen hacia la cabeza (boca) del fiordo.

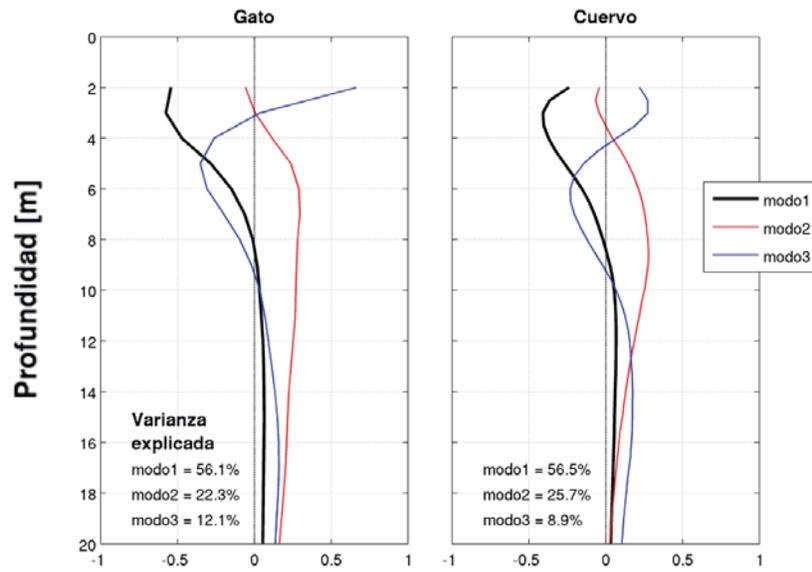


Figura 18.- Modos obtenidos del análisis de funciones ortogonales empíricas aplicado a las corrientes residuales de la componente a lo largo de la corriente en las estaciones Gato y Cuervo.

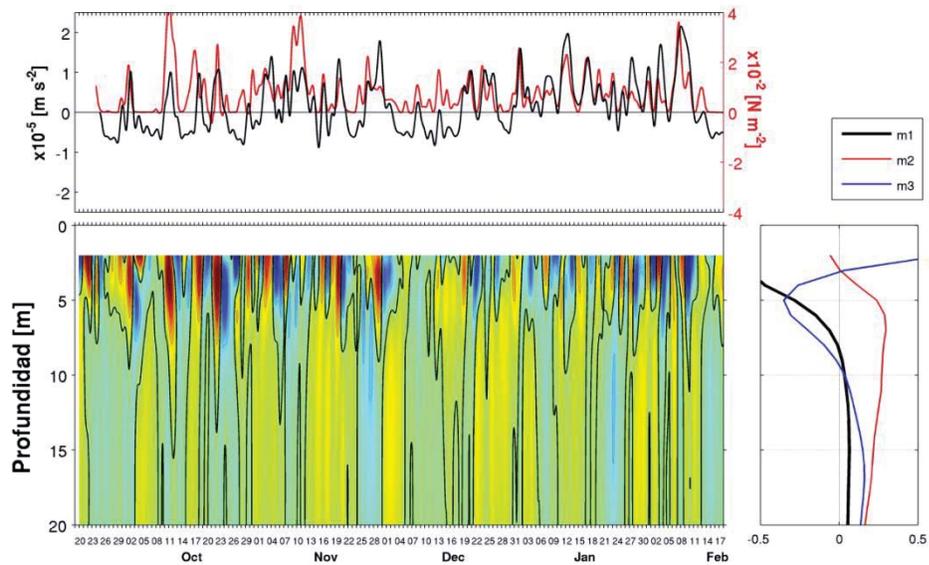


Figura 19.- Serie de tiempo de la estación Gato de a) estrés del viento (rojo) y del gradiente de presión. b) Componente a lo largo de la corriente residual del fiordo reconstruida a partir de los tres primeros modos de las funciones ortogonales empíricas.

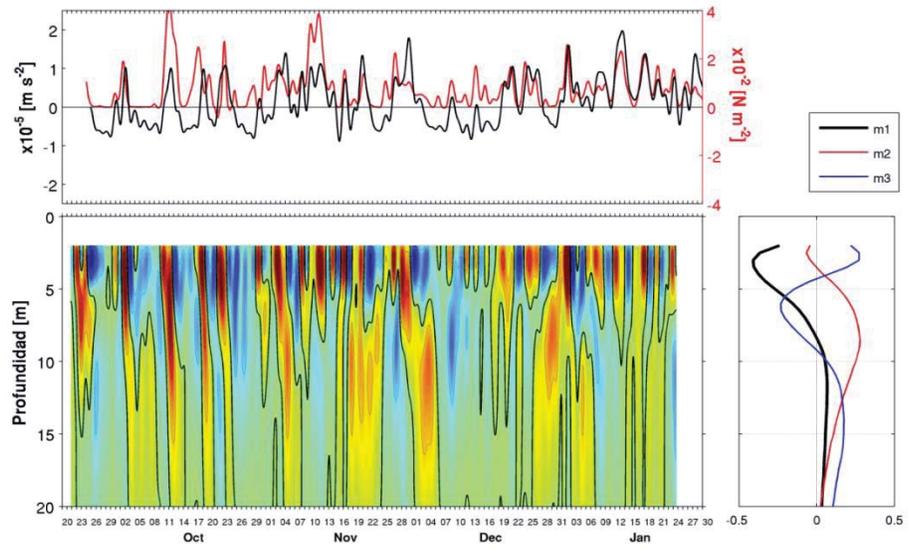


Figura 20.- Serie de tiempo de la estación Cuervo de a) estrés del viento (rojo) y del gradiente de presión. b) Componente a lo largo de la corriente residual del fiordo reconstruida a partir de los tres primeros modos de las funciones ortogonales empíricas.

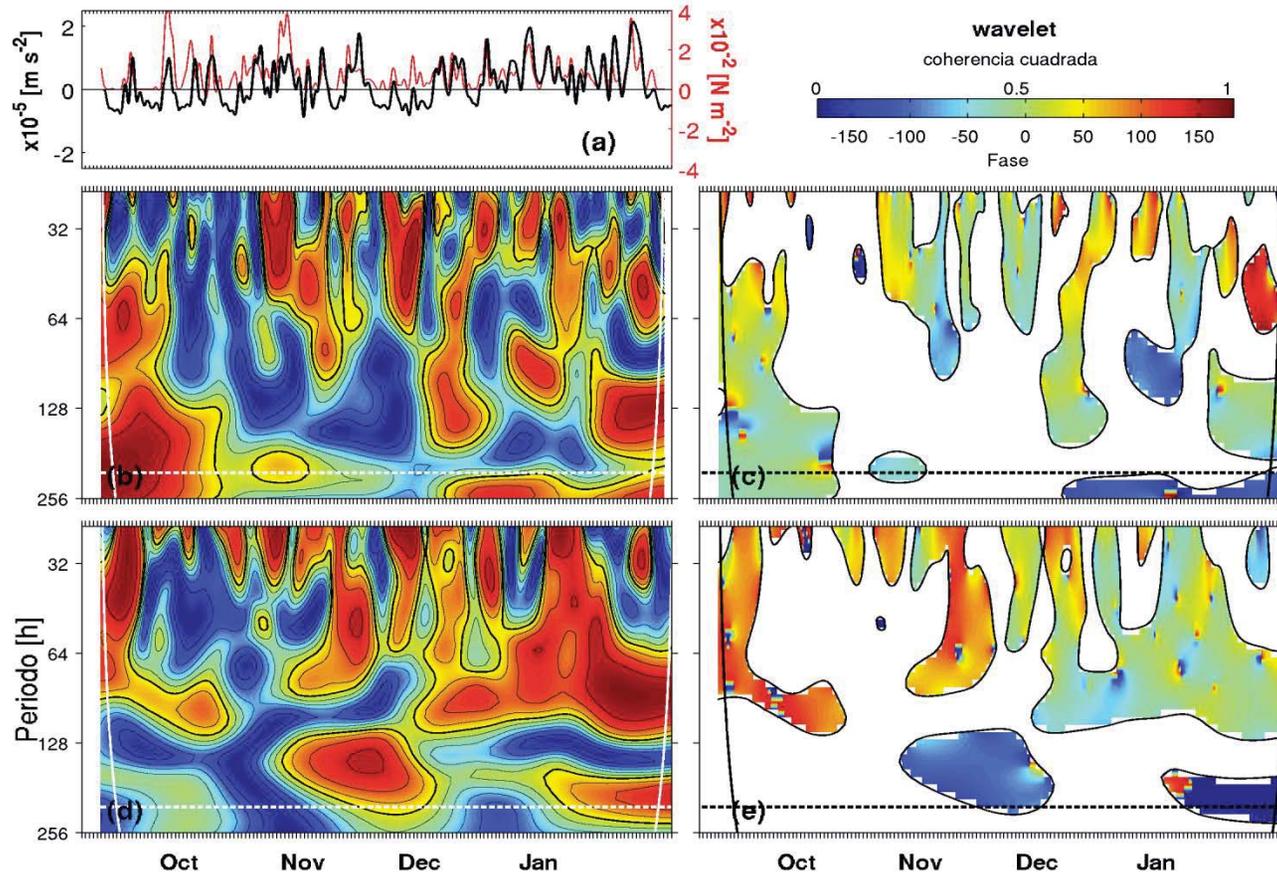


Figura 21.- Serie de tiempo de la estación Gato de a) estrés del viento (rojo) y del gradiente de presión. Espectro de coherencia y fase wavelet entre, b-c) estrés del viento y el primer modo y d-e) gradiente de presión y el segundo modo obtenido de las funciones ortogonales empíricas.

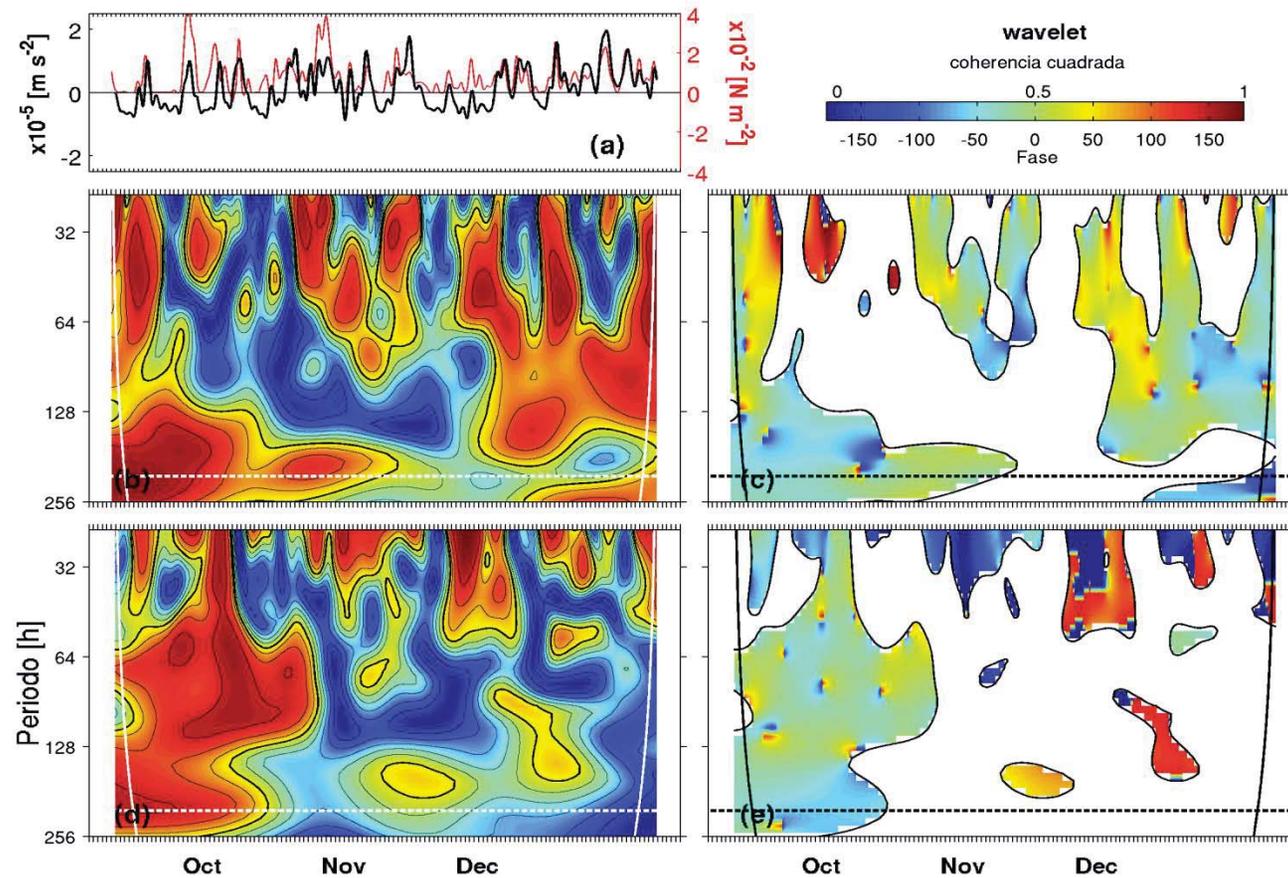


Figura 22.- Serie de tiempo de la estación Cuervo de a) estrés del viento (rojo) y del gradiente de presión. Espectro de coherencia y fase wavelet entre, b-c) estrés del viento y el primer modo y d-e) gradiente de presión y el segundo modo obtenido de las funciones ortogonales empíricas.