

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA



**Estimaciones de los tiempos de recambio en fiordos de
la provincia de Aysén, Chile**

Valentina Isabel Olmos Salvo

**Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico**

Enero de 2012

UNIVERSIDAD DE CONCEPCIÓN
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE GEOFÍSICA

**Estimación de los tiempos de recambio en fiordos de la
provincia de Aysén, Chile**

Valentina Isabel Olmos Salvo

**Habilitación Profesional
para optar al Título de Geofísico**

Profesor Guía:

Dr. Elías Ovalle

Comisión:

Dr. Óscar Pizarro, Dr.(c) Manuel Castillo



Enero de 2012

*A mi pequeña gran familia: Valentina, mi queridísima mamá, a mi genial hermano
Álvaro y a mi Ziggy, mi gatita.*

Agradecimientos

Quisiera agradecer de todo corazón a mi familia por todo el cariño, paciencia y apoyo recibido durante mis estudios.

A los miembros de la comisión, partiendo con el profesor Elías Ovalle, por compartir su oficina durante este tiempo y por todos los consejos y enseñanzas recibidas, al profesor Óscar Pizarro por considerarme y confiar en mí para este proyecto y Manuel Castillo por su buena disposición en revisar este informe y entregarme sus valiosas observaciones . A Úrsula Cifuentes por su infinita paciencia para responder siempre mis consultas.

A todo el grupo humano que conforma el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, sus profesores, compañeros y personal administrativo, en particular a Aldo Montecinos y el profesor Dante Figueroa quienes fueron Jefes de Carrera y de los cuales siempre obtuve la ayuda necesaria para salir adelante. También quisiera aprovechar de reconocer y agradecer toda la ayuda y confianza entregada por el profesor Andrés Sepúlveda. A Ricardo Giesecke y su familia por la experiencia de compartir su hogar mientras realizaba mi práctica profesional en Valdivia. Agradezco al Programa COPAS-Sur Austral por el financiamiento de este trabajo de investigación y de mi práctica profesional, en el marco del proyecto INNOVA regional para el estudio de la región de Aysén PFB-31/2007. A Rossana Álvarez por su gentileza y amabilidad.

Contenidos

Agradecimientos	ii
Listado de Tablas	vi
Listado de Figuras	vii
Resumen	xi
Capítulo 1 Introducción	1
1.1 Antecedentes del estudio	2
1.2 Justificación del estudio.	2
1.3 Objetivo general	3
1.4 Objetivos específicos	3
Capítulo 2 Fundamentación teórica	5
2.1 Definición de estuario	5
2.1.1 Estructura salina de los estuarios	6
2.2 Técnica de balance de volúmen y sal.	10
2.2.1 Teorema hidrográfico de Knudsen	10
2.3 Procesos en umbrales y control hidráulico	16
2.4 Flujos en canales abiertos	17

2.4.1	El control hidráulico	21
2.5	Tiempo de recambio	23
Capítulo 3 Metodología		25
3.1	Descripción de la zona de estudio	25
3.2	Materiales y método	27
3.2.1	Estimación del tiempo de recambio mediante las fórmulas de Knudsen	30
3.2.2	Estimación del tiempo de recambio mediante el método de con- trol hidráulico	31
3.2.3	Información hidrográfica utilizada	33
3.3	Morfología física de los fiordos	39
3.3.1	Canales Jacaf y Puyuhuapi	39
3.3.2	Fiordo Aysén	42
3.3.3	Fiordo Cupquelán y estero Elefantes	45
Capítulo 4 Resultados		50
4.1	Caracterización hidrográfica de los fiordos	50
4.1.1	Crucero CIMAR-Fiordos 1	50
4.1.2	Crucero CIMAR-Fiordos 7, Invierno	52
4.1.3	Crucero CIMAR-Fiordos 7, Primavera	56
4.1.4	Crucero CIMAR-Fiordos 13, Invierno	59
4.1.5	Crucero CIMAR-Fiordos 13, Primavera	61
4.1.6	Campaña OFC, Invierno	63
4.1.7	Campaña OFC, Primavera	65
4.2	Balances de masa y sal	67
4.2.1	Canal Jacaf	67

4.2.2	Canal Puyuhuapi	68
4.2.3	Fiordo Aysén	70
4.3	Estimación de los flujos de volumen, método de control hidráulico . .	73
4.3.1	Canal Jacaf	73
4.3.2	Canal Puyuhuapi	74
4.3.3	Fiordo Aysén	74
4.3.4	Fiordo Cupquelán	75
4.3.5	Estero Elefantes	75
Capítulo 5 Discusión		76
5.1	Aspectos hidrográficos	76
5.2	Tiempos de recambio de la capa superior	77
5.2.1	Método de Knudsen	77
5.2.2	Método de control hidráulico	79
5.2.3	Comparación entre los métodos y otros resultados de investiga- ciones efectuadas en otros puntos geográficos.	81
Capítulo 6 Conclusiones		84
Referencias Bibliográficas		86
Apéndice A Perfiles de CTD de las estaciones ancladas a los fiordos		ii

Listado de Tablas

3.1	Estaciones de medición en fiordo Aysén, OFC	35
3.2	Estaciones de medición en canal Jacaf, cruceo CIMAR-Fiordos 7 . . .	36
3.3	Estaciones de medición en canal Puyuhuapi, cruceo CIMAR-Fiordos 7	37
3.4	Estaciones de medición en estero Elefantes, cruceo CIMAR-Fiordos 13	38
3.5	Estaciones de medición en fiordo Cupquelán, cruceo CIMAR-Fiordos 1	38
3.6	Características geomorfológicas de los fiordos Jacaf y Puyuhuapi . . .	42
3.7	Características geomorfológicas de fiordo Aysén	44
3.8	Características geomorfológicas de fiordo Cupuelán y estero Elefantes	48
4.1	Balance de volúmen y salinidad en canal Jacaf en invierno	67
4.2	Balance de volúmen y salinidad en canal Jacaf en primavera	68
4.3	Balance de volúmen y salinidad en canal Puyuhuapi en invierno . . .	69
4.4	Balance de volúmen y salinidad en canal Puyuhuapi en primavera . .	70
4.5	Balance de volúmen y salinidad en fiordo Aysén en invierno	71
4.6	Balance de volúmen y salinidad en fiordo Aysén en primavera	72
5.1	Resumen del intercambio de flujos y tiempos de recambio de agua dulce, método de Knudsen	79
5.2	Resumen del intercambio de flujos y tiempos de recambio, método de control hidráulico	80

Listado de Figuras

2.1	Estructura salina de un estuario de cuña salina. Distribución de salinidad de una sección longitudinal de un estuario, los números corresponden a estaciones (Extraído de Tomczack, 1998)	7
2.2	Estructura salina de un estuario altamente estratificado tipo fiordo. Distribución de salinidad de una sección longitudinal de un fiordo, los números corresponden a estaciones (Extraído de Tomczack, 1998)	9
2.3	Esquema que ilustra la relación entre flujos, velocidades y salinidad (Tomczack, 1998)	11
2.4	Esquema inicial para la derivación del balance de masa. Notar que en la notación del esquema se identifica la velocidad, área y salinidad de superficie (salida) con el subíndice 1 (Tomczack, 1998)	13
2.5	Esquema iterativo del balance de Knudsen en las estaciones i e $i-1$. R corresponde el caudal de agua dulce	14
2.6	Variación de la energía con la superficie de elevación para una sección transversal y descarga específicas (Fenton, 2007)	18
2.7	Sección transversal de un canal con incremento en el nivel del agua (Fenton, 2007)	19

2.8	Una sección en el umbral de un fiordo altamente estratificado. S_1 , u_1 y ρ_1 corresponden a la salinidad, velocidad y densidad del fluido de la capa superior, y S_2 , u_2 y ρ_2 son los valores respectivos del fluido en la capa inferior. A diferencia de este esquema, en este trabajo se ha considerado la profundidad de la capa salobre-superior como la profundidad de la haloclina. (Tomczak 1998)	23
3.1	Mapa del área de trabajo	26
3.2	Curvas hipsográficas de los fiordos	27
3.3	Esquema simplificado del proceso de circulación en la superficie de un fiordo	28
3.4	Ríos de interés para las estimaciones de los flujos de salida de los fiordos	29
3.5	Corte vertical de la boca de un fiordo y las variables de interés para la estimación del flujo de salida acorde al método de control hidráulico .	32
3.6	Estaciones de medición de CTD en fiordo Aysén (OFC)	34
3.7	Estaciones de medición en canales Jacaf y Puyuhuapi correspondientes al crucero CIMAR-Fiordos 7	36
3.8	Estaciones de medición en Estero Elefantes y fiordo Cupquelán correspondientes al crucero CIMAR Fiordos 13 y CIMAR Fiordos 1 respectivamente.	37
3.9	Batimetría de los fiordos Jacaf y Puyuhuapi	40
3.10	Perfil longitudinal del fiordo Jacaf	41
3.11	Perfil longitudinal del fiordo Puyuhuapi	41
3.12	Batimetría del fiordo Aysén, en grados decimales	43
3.13	Perfil longitudinal del fiordo Aysén	44
3.14	Batimetría de fiordo Cupquelán	46

3.15	Batimetría de estero Elefantes	47
3.16	Perfil longitudinal del fiordo Cupquelán	49
3.17	Perfil longitudinal de estero Elefantes	49
4.1	Distribución longitudinal de la temperatura en Cupquelán, primavera de 1995. Notar que para una mejor visualización se graficó de forma separada los primeros 20 metros de profundidad del fiordo.	51
4.2	Distribución longitudinal de la salinidad en Cupquelán, primavera de 1995.	51
4.3	Distribución longitudinal de la temperatura en canal Jacaf periodo de Invierno, basados en mediciones realizadas durante el crucero Cimar-Fiordos 7	53
4.4	Distribución longitudinal de la salinidad en canal Jacaf periodo de Invierno, basados en mediciones realizadas durante el crucero Cimar-Fiordos 7	53
4.5	Distribución longitudinal de la temperatura en canal Puyuhuapi periodo Invierno	55
4.6	Distribución longitudinal de la salinidad en canal Puyuhuapi periodo Invierno	55
4.7	Distribución longitudinal de la temperatura en canal Jacaf periodo Primavera	57
4.8	Distribución longitudinal de la salinidad en canal Jacaf periodo Primavera	57
4.9	Distribución longitudinal de la temperatura en canal Puyuhuapi periodo Primavera	58
4.10	Distribución longitudinal de la salinidad en canal Puyuhuapi periodo Primavera	58

4.11	Temperatura estero Elefantes Invierno	60
4.12	Salinidad estero Elefantes Invierno	60
4.13	Temperatura estero Elefantes Primavera	62
4.14	Salinidad estero Elefantes Primavera	62
4.15	Temperatura Aysén Invierno	64
4.16	Salinidad Aysén Invierno	64
4.17	Temperatura Aysén Primavera	66
4.18	Salinidad Aysén Primavera	66
A.1	Perfiles de CTD Jacaf Invierno	iii
A.2	Perfiles de CTD Jacaf Primavera	iii
A.3	Perfiles de CTD Puyuhuapi Invierno	iv
A.4	Perfiles de CTD Puyuhuapi Primavera	iv
A.5	Perfiles de CTD Aysén Invierno	v
A.6	Perfiles de CTD Aysén Primavera	v
A.7	Perfiles de CTD Cupquelán Primavera	vi
A.8	Perfiles de CTD Elefantes invierno	vii
A.9	Perfiles de CTD Elefantes primavera	vii

Resumen

Utilizando el método de balance de agua y sal, y una metodología de control hidráulico en el umbral se calcularon los tiempos de recambio de agua salobre y agua dulce en la capa superficial (~ 20 m) de los fiordos de la norpatagonia chilena, compuestos por los canales Jacaf y Puyuhuapi, fiordo Aysén y Cupquelán y estero Elefantes (entre 47° y 42° S, y 72° y 74° O). Asimismo, con datos de temperatura y salinidad provenientes de los cruceros CIMAR y las campañas realizadas por el grupo de Oceanografía Física y Clima de la Universidad de Concepción (OFC), se caracterizaron los perfiles longitudinales de los fiordos. Las metodologías mostraron resultados diferentes, mientras que el método de balances de Knudsen presentó tiempos más grandes, en particular en el periodo de primavera, el método de control hidráulico exhibió tiempos más breves dado por la gran magnitud del flujo de salida.

Palabras clave: Fiordos Tiempos de recambio Knudsen Control hidráulico

Capítulo 1

Introducción

Este trabajo tiene como objetivo principal la estimación de los tiempos de recambio en las aguas superficiales en los fiordos del norte de la IX región de Chile. Para este fin se usaron dos metodologías independientes. La primera metodología se basa en la técnica de balance de volúmen y sal propuesto por Knudsen (1900) y la segunda asume control hidráulico en el umbral. La comparación entre ambas metodologías está acotada por el limitado número de observaciones en la región. El tiempo de recambio es un parámetro fundamental en el conocimiento de los cuerpos de agua semicerrados. Este parámetro es de gran utilidad para el control y planificación de la industria acuícola. Con el presente estudio se busca aportar al conocimiento de la renovación de las aguas, con el fin de tener una referencia preliminar del potencial estado de vulnerabilidad de los sistemas naturales en que desarrollan importantes actividades acuícolas.

Los estuarios y fiordos son el hábitat natural de diversas especies marinas. Se les ha denominado *criaderos del mar* [Oberrecht, 2008], porque constituyen un ambiente protegido en donde se provee de condiciones ideales para la reproducción de peces y moluscos. Muchas de las especies de peces pasan alguna parte de su ciclo

de vida en los estuarios. Además de los peces, muchas especies de aves dependen de los estuarios, en lo que respecta a los alimentos y las áreas de anidación [NOAA, 2008].

1.1 Antecedentes del estudio

El programa CIMAR-Fiordos desde el año 1995 ha proporcionado diversos antecedentes de la zona austral de Chile. Sus estudios se han centrado principalmente en la investigación de las características químicas y biológicas de las aguas, circulación y variación de flujos y densidad de los canales. En lo referente a tiempos de recambio se pueden destacar los estudios centrados en los fiordos Reloncaví y Aysén ([Silva et al.], [Calvete, 2010] y [Salinas, 2004]). La investigación en los fiordos Jacaf, Puyuhuapi, Elefantes y Cupquelán se ha concentrado especialmente en el estudio de nutrientes, sedimentos y zooplankton [Sepúlveda, 2005]. La investigación en los fiordos más australes, como Elefantes y golfo Elefantes son esencialmente glaciológicos [Glasser, 2006].

1.2 Justificación del estudio.

Chile es un país de extensas costas, por lo que tiene gran interés en la adecuada administración de los recursos en su espacio costero.

Además de su utilidad en la producción acuícola, los mecanismos que controlan el tiempo de recambio es fundamental para lograr una adecuada administración ecológica de los estuarios. Por muchos años los océanos han sido y siguen siendo un destino para la deposición de desechos industriales. El tiempo de recambio es ampliamente utilizado para determinar cuanto tiempo puede un estuario tolerar una

sustancia dañina antes de que se vea afectado en un grado significativo. El tiempo de recambio debe interpretarse como una herramienta científica para la toma de decisiones.

El presente trabajo de titulación está basado en la información hidrográfica recolectada en diferentes cruceros CIMAR Fiordos (1, 7 y 13), y otros cruceros realizados por el Grupo de Oceanografía Física y Clima de la Universidad de Concepción en el marco del Programa COPAS sur Austral (PFB-31/2007) y un Proyecto INNOVA Regional para el estudio del Fiordo Aysén.

1.3 Objetivo general

Estimar los tiempos de recambio de las aguas superficiales de los canales Jacaf y Puyuhuapi, fiordo Aysén, fiordo Cupquelán y estero Elefantes mediante técnicas de balance de volúmen y sal, y control hidráulico en la zona del umbral.

1.4 Objetivos específicos

- Describir la distribución de temperatura y salinidad de los fiordos Jacaf, Puyuhuapi, Aysén, Cupquelán y Elefantes.
- Estimar el caudal de salida en diferentes fiordos del sur de Chile mediante las relaciones de Knudsen.
- Estimar el caudal superficial de salida de los fiordos asumiendo un control hidráulico.

- Comparar los resultados de los tiempos de recambio basados en las distintas estimaciones de caudal.

Capítulo 2

Fundamentación teórica

2.1 Definición de estuario

Una definición clásica de estuario es la dada por Cameron y Pritchard [Pritchard, 1967], ellos afirman que *un estuario es un cuerpo o masa de agua costera semi-cerrada, con conexión libre al mar abierto, y en el cual es medible la dilución del agua de mar por agua dulce proveniente de la tierra*. Que el estuario sea semi-cerrado significa que su circulación es influenciada considerablemente por las fronteras laterales. La conexión con el mar abierto permite que exista intercambio de propiedades tales como temperatura, salinidad y transmisión de energía de marea. A su vez, los autores clasifican los estuarios de acuerdo a su origen, formación y características físico-morfológicas. Otra categorización de estuarios es propuesta por Valle-Levinson [Valle-Levinson, 2010], en términos de la estructura lateral de los flujos netos de intercambio.

Este trabajo se centrará en un tipo particular de estuario denominado fiordo. Los fiordos suelen ubicarse en latitudes altas en donde hubo glaciación, un número importante de ellos se encuentran amurallados por altas montañas, que contribuyen al encajonamiento del viento. En su fondo marino presentan barras rocosas conoci-

das como *sills* o umbrales que demarcan cuencas interiores. Los fiordos usualmente reciben las descargas de agua dulce provenientes del derretimiento de hielos a través de los ríos y también por el aporte de la precipitación. Generalmente tienen un ancho transversal de unos pocos kilómetros (menores a 10 kilómetros) y profundidades de alrededor de cientos metros. La profundidad de los umbrales varían entre unas decenas de metros hasta aproximadamente 200 metros. Los umbrales juegan un rol fundamental en el estudio de la dinámica de fiordos, ya que debido a ellos el agua que se encuentra debajo de su profundidad permanece aislada de la influencia externa del fiordo, y suele estancarse en las cuencas más profundas. Los fiordos suelen encontrarse en regiones a lo largo de las costas del sur de Chile, Nueva Zelanda, Canadá, Alaska, Groenlandia, Noruega, Siberia, Escocia y otros países [Farmer y Freeland, 1983].

2.1.1 Estructura salina de los estuarios

Dada la existencia de una gran variedad de estuarios debido a variaciones de marea, descarga de los ríos, y como estos factores interactúan con la topografía submarina, es complejo poder realizar una clasificación única de estos canales. En la mayoría de los estuarios estudiados se ha establecido que las mayores diferencias entre ellos radica en los patrones de circulación, estratificación de densidad y en los procesos de mezcla. En consecuencia, una clasificación más global es aquella que esté basada en en la distribución de salinidad y en características del flujo dentro de los estuarios [Dyer,1999].

De acuerdo a Cameron y Pritchard (1963), los estuarios pueden clasificarse según su estructura salina en altamente estratificados o de cuña salina (tipo fiordos), parcialmente mezclados y homogéneos o bien mezclados.

Estuarios altamente estratificados tipo cuña salina

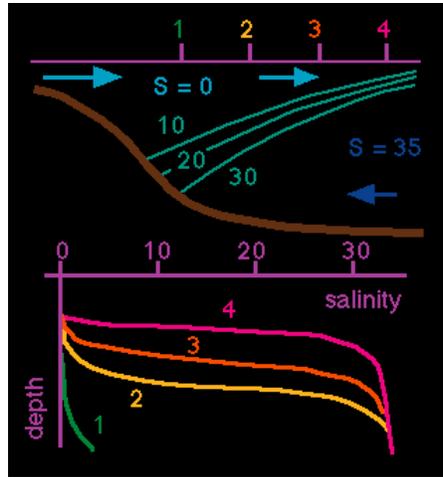


Figura 2.1: Estructura salina de un estuario de cuña salina. Distribución de salinidad de una sección longitudinal de un estuario, los números corresponden a estaciones (Extraído de Tomczack, 1998)

Si consideramos inicialmente un estuario que se vacía hacia el océano, con una fuente de agua dulce en su extremo interior a la tierra, como se puede ver en la figura 2.1. Al introducir una fuerza de fricción en forma de viscosidad, producirá un cizalle en el flujo del fluido cerca de la interfase la cual creará fricción entre la cuña salina y la superficie de agua dulce. La cuña salina será empujada con la corriente hasta que su capa superior forme una pendiente que le permita resistir a la fuerza de fricción. La cuña perderá su punta y la superficie se inclinará más profundamente hacia el mar. La fuerza de Coriolis influirá en las pendientes laterales del agua, inclinándola interfase hacia la izquierda y la superficie del mar hacia la derecha en estuarios localizados en el hemisferio sur.

Debido al cizalle de velocidad que cruza la interfase, una capa delgada de la superficie de la cuña salina será desplazada en dirección al mar. Cuando el cizalle es lo suficientemente intenso se formarán ondas que romperán con la interfase, produciéndose la mezcla entre agua dulce y salina. Este proceso se conoce como entrainment, y es un

proceso unidireccional [Dyer,1999].

Para conservar la continuidad, un flujo pequeño en dirección a la tierra será necesario para reemplazar el agua salada que fue transferida a la capa superior. De esta manera la capa más profunda perderá gradualmente su salinidad, y esta pérdida será compensada con el ingreso lento de agua oceánica. Por consiguiente, el mecanismo de entrainment produce un aumento en el volumen del flujo de agua superficial que sale por la boca del estuario.

Estuarios altamente estratificados tipo fiordo

Estos estuarios poseen varias similitudes con los estuarios de tipo cuña salina. Sin embargo, la capa profunda suele ser muy profunda y de salinidad constante. El flujo del río prevalece por sobre el flujo de marea, y el proceso de entrainment vuelve a ser el mecanismo de mezcla entre agua oceánica y dulce. La capa superficial suele ser muy delgada con una profundidad casi constante, en promedio entre 1 y 15 metros, a pesar de que el flujo superior suele aumentar al aproximarse a la boca. El umbral rocoso controla la entrada y salida de agua oceánica y promueve la formación de las ondas internas que ocasiona el entrainment.

Cuando la descarga de río es alta, la capa superficial es prácticamente homogénea y el gradiente máximo de salinidad sucede justo debajo de la superficie figura 2.2. En el caso en que la descarga de río sea menor, como en las cercanías de la boca, la capa superior es menos homogénea y el gradiente máximo de salinidad ocurre en la superficie (Pickard, 1961).

La temperatura generalmente disminuye al aumentar la profundidad, sin embargo

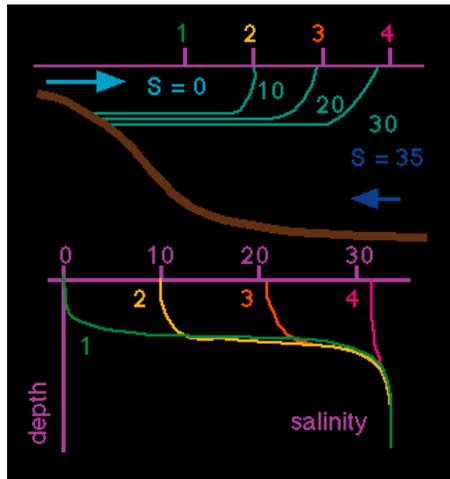


Figura 2.2: Estructura salina de un estuario altamente estratificado tipo fiordo. Distribución de salinidad de una sección longitudinal de un fiordo, los números corresponden a estaciones (Extraído de Tomczack, 1998)

en los casos de los fiordos que perciben el ingreso de aguas dulces producto del derretimiento de glaciares pueden poseer diversos máximos y mínimos de temperatura (Pickard, 1971).

Debido a las mayores velocidades de marea por encima de los umbrales, la mezcla puede ser muy intensa y la estratificación se debilita. De todos modos, la circulación en los umbrales podría ser completamente diferente a lo que ocurre dentro del fiordo. En general, el flujo entrante que pasa por sobre el umbral está compuesto de una mezcla entre agua oceánica y el flujo de salida. A mayores profundidades la influencia de marea es menor, por lo que se forma una estructura de capas que muestran la intrusión sucesiva de agua salada. Esta renovación de aguas las aguas profundas suele ocurrir anualmente, y en fiordos cuyos umbrales son muy pequeños la renovación de aguas es tan poco frecuente que condiciones anoxia se desarrollan en el fondo.

2.2 Técnica de balance de volúmen y sal.

El balance de volúmen y sal es un método utilizado para determinar los transportes de volúmenes a partir de distribuciones verticales de salinidad que se basan en el principio de la conservación de salinidad [Tomczack, 1998]. Esta técnica resulta apropiada cuando no se cuenta con estimaciones directa de los caudales.

2.2.1 Teorema hidrográfico de Knudsen

Los fiordos de cuña salina y los altamente estratificados son especialmente accesibles a una descripción sencilla de su circulación, porque el transporte de sal es un balance entre dos procesos, advección horizontal y vertical de la sal [Tomczack, 1998]. Esto hace que sea posible derivar esquemas simples de cálculo para la determinación de la circulación media. Estos esquemas se basan en el principio de conservación del volúmen y salinidad y se conocen como el teorema hidrográfico de Knudsen (1900).

Consideremos la siguiente situación: el agua fluye a través de un canal con un área de entrada A_1 y una salida de la zona A_2 . Se define la dirección del flujo que va de A_1 a A_2 . En otras palabras, significa que el flujo es de A_1 a A_2 , si la velocidad del flujo es positivo y de A_2 a A_1 si es negativo.

Como se puede apreciar en la figura 2.3, definimos la velocidad de entrada por u_1 y la velocidad de salida por u_2 . La salinidad del agua que entra en el canal por S_1 y la salinidad del agua que sale del canal por S_2 . El volúmen de transporte por unidad de tiempo o flujo volumétrico Q viene dado por $Q_1 = A_1 u_1$ en la sección de entrada y $Q_2 = A_2 u_2$ en la salida. La cantidad de sal que entra en el canal por unidad de



Figura 2.3: Esquema que ilustra la relación entre flujos, velocidades y salinidad (Tomczack, 1998)

tiempo o de flujo de la sal está dada por $Q_1 S_1$ y el flujo de la sal a la salida por $Q_2 S_2$. El objetivo es determinar el flujo que pasa a través del canal es decir, Q_1 y Q_2 , a partir de mediciones de la salinidad S_1 y S_2 en la entrada y salida. Suponemos ahora que tenemos una fuente de agua dulce en el canal, por ejemplo un río ubicado en la cabeza del fiordo con un flujo volumétrico de $R[m^3/s]$. En el estado estacionario, la conservación de volúmen requiere que la cantidad de agua que entra por el canal por unidad de tiempo debe ser equilibrada por la cantidad de agua que sale, es decir

$$Q_1 + R = Q_2 \quad (2.1)$$

Por otra parte, la conservación de masa de sal requiere que la cantidad de sal por unidad de tiempo que entra en el canal esté en balance con la cantidad de sal que sale de ella

$$\rho_1 Q_1 S_1 = \rho_2 Q_2 S_2 \quad (2.2)$$

dado que las variaciones de densidad son pequeñas con respecto a la densidad de referencia, se puede considerar $\rho_1 \approx \rho_2$. En tal caso la ecuación anterior se simplifica a

$$Q_1 S_1 = Q_2 S_2 \quad (2.3)$$

El balance de volúmen (ecuación 2.1) y el balance de sal (ecuación 2.3) nos dan dos ecuaciones con dos incógnitas Q_1 y Q_2 [Dyer,1999]. Podemos resolver por Q_1 y Q_2 y encontrar

$$Q_1 = \frac{R}{\frac{S_1}{S_2} - 1} \quad (2.4)$$

$$Q_2 = \frac{R}{1 - \frac{S_2}{S_1}} \quad (2.5)$$

Una inspección rápida de este resultado muestra que si $R > 0$ (es decir hay incorporación de agua dulce) el agua se mueve desde la región de alta salinidad a la región de baja salinidad, como se esperaba, consiguiendo dilución en el camino: Si $S_1 > S_2$ fluye de A_1 a A_2 (Q_1 y Q_2 son positivos), si $S_2 > S_1$ fluye de A_2 a A_1 (Q_1 y Q_2 son negativos). Si por el contrario, la evaporación a través del canal supera la precipitación, tenemos $R < 0$ y el flujo es de la región de baja salinidad en la región de alta salinidad, con la concentración de sal en el camino.

Consideremos un caso distinto, como el mostrado en la figura 2.4, el cual representa de mejor manera una versión simplificada de un fiordo, es evidente que toda el agua que entra en la capa inferior del estuario a través de A_2 tiene que salir por la capa superior. En un estuario altamente estratificado esto se logra mediante entrain-

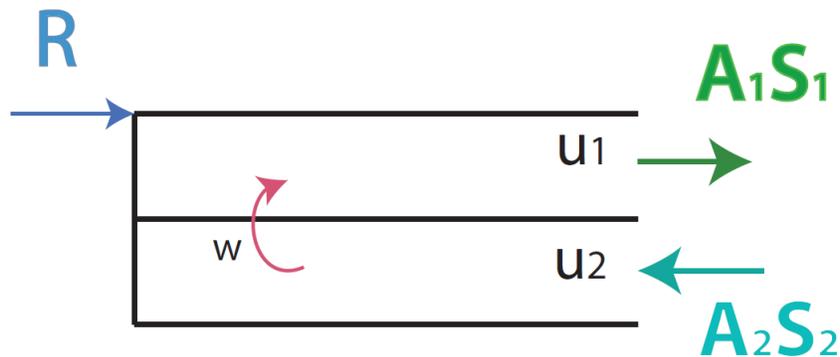


Figura 2.4: Esquema inicial para la derivación del balance de masa. Notar que en la notación del esquema se identifica la velocidad, área y salinidad de superficie (salida) con el subíndice 1 (Tomczack, 1998)

ment.

Las ecuaciones 2.4 y 2.5 nos permiten determinar el incremento del flujo de volúmen desde el río hasta el mar a partir de una única medición de la salinidad en función de la profundidad en las cercanías de la boca del fiordo. Todo lo que se requiere hacer es definir la interfaz entre las dos capas y luego determinar las salinidades medias S_1 y S_2 de las capas superior e inferior, además del caudal R . Para obtener un resultado fiable, la medición debe hacerse en un lugar donde la salinidad muestre una clara variación con la profundidad.

Podemos generalizar este resultado al observar el balance del volúmen y salinidad para determinados sectores del estuario. Supongamos que las observaciones de la salinidad se tomaron a lo largo de un fiordo en un número de estaciones y se examina las condiciones entre dos estaciones de vecinas i y $i - 1$ [Tomczack, 1998].

Consideremos los flujos que se transportan en la capa superior y en la dirección opuesta en la capa inferior 2.5. Las ecuaciones de equilibrio involucran cuatro áreas,

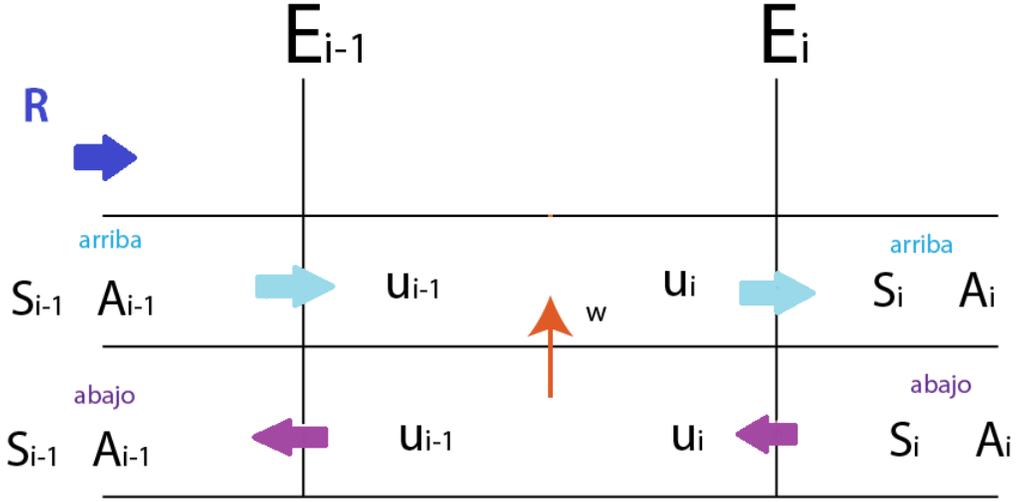


Figura 2.5: Esquema iterativo del balance de Knudsen en las estaciones i e $i-1$. R corresponde el caudal de agua dulce

A_i^{arriba} y A_i^{abajo} , A_{i-1}^{arriba} y A_{i-1}^{abajo} y cuatro velocidades, u_i^{arriba} , u_i^{abajo} , u_{i-1}^{arriba} y u_{i-1}^{abajo} . El propósito del cálculo es determinar el transporte de la capa superior e inferior a través de esta parte del estuario a partir de mediciones de salinidad.

Efectuando un balance de los flujos, se tiene

$$Q_i^{arriba} - Q_i^{abajo} = Q_{i-1}^{arriba} - Q_{i-1}^{abajo} \quad (2.6)$$

similarmente para los flujos de salinidad

$$(Q_i^{arriba} S_i^{arriba}) - (Q_i^{abajo} S_i^{abajo}) = (Q_{i-1}^{arriba} S_{i-1}^{arriba}) - (Q_{i-1}^{abajo} S_{i-1}^{abajo}) \quad (2.7)$$

Estas dos ecuaciones tienen cuatro incógnitas Q_i^{arriba} , Q_i^{abajo} , Q_{i-1}^{arriba} y Q_{i-1}^{abajo} .

El problema puede resolverse si conocemos las variables en una de las dos estaciones. Asumiremos que conocemos los valores en la estación $i-1$. Eso nos permite resolver las ecuaciones para Q_i^{arriba} y Q_i^{abajo} .

$$Q_i^{arriba} = \frac{Q_{i-1}^{arriba}(S_{i-1}^{arriba} - S_i^{abajo}) + Q_{i-1}^{abajo}(S_i^{abajo} - S_{i-1}^{abajo})}{S_i^{arriba} - S_i^{abajo}} \quad (2.8)$$

$$Q_i^{abajo} = \frac{Q_{i-1}^{arriba}(S_{i-1}^{arriba} - S_i^{arriba}) + Q_{i-1}^{abajo}(S_i^{arriba} - S_{i-1}^{abajo})}{S_i^{arriba} - S_i^{abajo}} \quad (2.9)$$

Con estas ecuaciones se formará un sistema iterativo, una vez que se conoce la solución en un lugar $i-1$, se puede obtener la solución en el lugar i . Podemos entonces aplicar el régimen de iteración si tenemos datos de salinidad a partir de una serie de estaciones a lo largo del fiordo. Si denotamos por R el volúmen de flujo del río, que consta únicamente de agua dulce, y hacemos que entra al sistema en la capa superior de la cabeza del fiordo. Se tiene:

$$Q_0^{arriba} = R \quad (2.10)$$

$$Q_0^{abajo} = 0 \quad (2.11)$$

$$S_0^{arriba} = 0 \quad (2.12)$$

Según este esquema, no hay capa más baja en la estación 0, por lo que no podremos aplicar las ecuaciones 2.9 y 2.10 para determinar Q_1^{abajo} pero sabemos que Q_1^{abajo} tiene que suministrar el flujo de volúmen necesario para aumentar el flujo de

volúmen de la capa superior de R en la estación de 0 a en la estación 1:

$$Q_1^{abajo} = Q_0^{arriba} - R \quad (2.13)$$

Esto completa el esquema de iteración, el primer paso es calcular de las ecuaciones 2.4 y 2.5, usando ecuaciones 2.10 y 2.12

$$Q_1^{arriba} = R \frac{1}{1 - \frac{S_1^{arriba}}{S_1^{abajo}}} \quad (2.14)$$

determinando Q_1^{arriba} se puede utilizar la ecuación 2.13 para determinar Q_1^{abajo} .

$$Q_1^{abajo} = R \frac{1}{1 - \frac{S_1^{abajo}}{S_1^{arriba}}} \quad (2.15)$$

2.3 Procesos en umbrales y control hidráulico

Una forma de estimar los flujos de salida y de entrada en un fiordo puede lograrse suponiendo la existencia de un control hidráulico en la constricción del umbral. El método fue propuesto por Stommel y Farmer en los años 50. Más recientemente Stigebrandt ha revisado si la hipótesis de control hidráulico se puede aplicar a los fiordos noruegos [Stigebrandt, 1996]. En esta habilitación profesional, nosotros aplicaremos esta metodología, y compararemos nuestros resultados con estimaciones de los flujos obtenidos mediante la técnica de Knudsen del balance de sal.

2.4 Flujos en canales abiertos

Consideremos el flujo en un canal abierto, es decir, uno que tenga una superficie libre. La energía asociada a un elemento de volumen en un fluido, en estado estacionario, se puede escribir en la forma

$$E = \int (p + \rho g z + \frac{\rho}{2} |\mathbf{u}^2|) dA \quad (2.16)$$

donde g es la aceleración de gravedad ($9.8 \frac{m}{s^2}$), ρ ($\frac{kg}{m^3}$) es la densidad del fluido, p es la presión y \mathbf{u} es la velocidad. Elijamos un sistema de referencia donde el fondo del canal está en z_{min} y la superficie libre en $z = \eta$. En este caso $p = \rho g(\eta - z)$ y los dos primeros términos son iguales a $\rho g \eta Q$, donde Q ($\frac{m^3}{s}$) es el caudal volumétrico definido por

$$Q = \int \mathbf{u} \cdot d\mathbf{A} \quad (2.17)$$

El tercer término de (2.22) se puede escribir en términos de la velocidad media U , definido por $Q = UA$, en la forma

$$\int |\mathbf{u}^2| \cdot dA = U^3 A = \frac{Q^3}{A^2} \quad (2.18)$$

Por lo tanto (2.22) se puede reescribir como

$$E = \rho g Q \left(\eta + \frac{Q^2}{2gA} \right) \left[\frac{kgm^2}{s^3} \right] \quad (2.19)$$

En hidráulica, es costumbre utilizar unidades de longitud para las energías

(energía potencial = mgh), por lo cual se redefine E, dividiendo (2.25) por $g\rho Q$

$$H = \eta + \frac{Q^2}{2gA} [m] \quad (2.20)$$

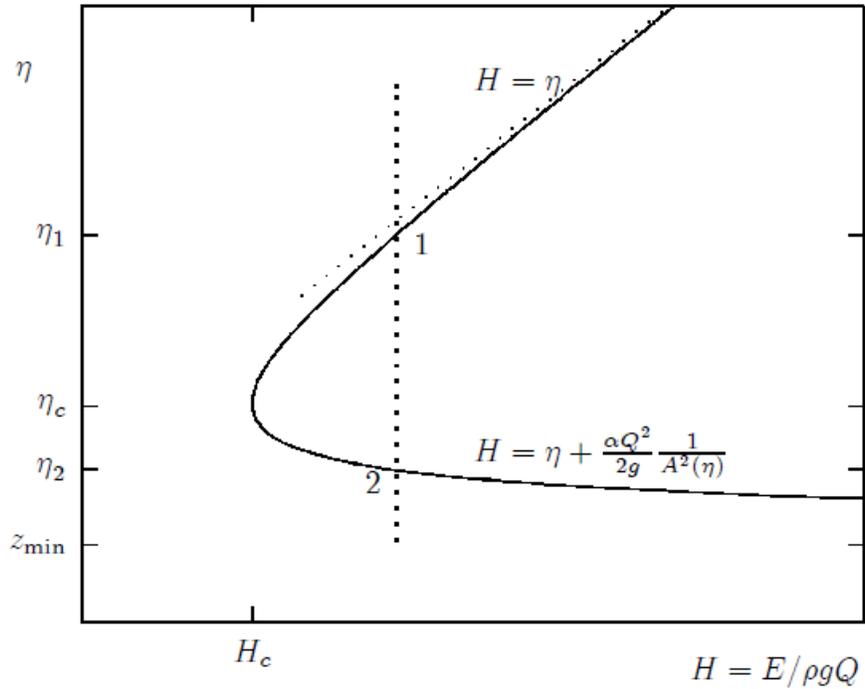


Figura 2.6: Variación de la energía con la superficie de elevación para una sección transversal y descarga específicas (Fenton, 2007)

Si no existen pérdidas, el valor de H debería ser constante en todas las secciones del canal si consideramos un caudal constante. En el otro caso, el valor de H (o E) iría disminuyendo debido a procesos de fricción.

Debido a que en general el área es una función de η , la correspondencia entre H y η en general no es unívoca, como se muestra en la figura 2.6.

Es decir, dada una cierta energía del flujo, la superficie libre puede adoptar en ciertas condiciones dos valores distintos, que corresponden a dos regímenes de

flujo. Las coordenadas de la mínima energía posible, se denominan (η_c, H_c) , donde el subíndice "c" significa crítico. La condición de flujo crítico, se encuentra extremando (2.26)

$$\frac{dH}{d\eta} = 1 - \left(\frac{Q^2}{gA^3} \right) \left(\frac{dA}{d\eta} \right) = 0 \quad (2.21)$$

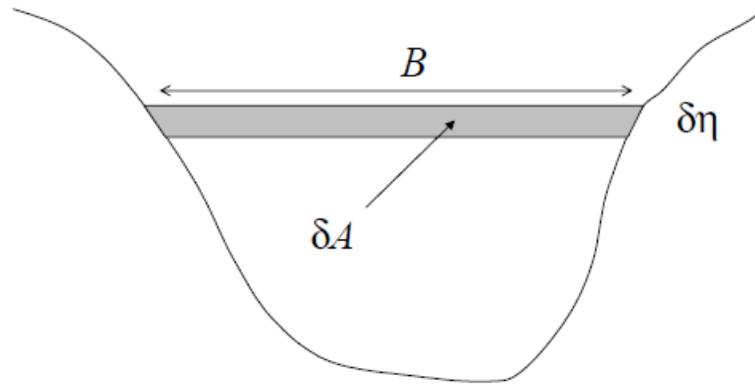


Figura 2.7: Sección transversal de un canal con incremento en el nivel del agua (Fenton, 2007)

Si B es el ancho de la sección transversal como se muestra en la figura 2.7, entonces $\delta A = B\delta\eta$ y la condición (2.27) se reduce a la expresión

$$\frac{Q^2 B}{gA^3} = 1 \quad (2.22)$$

Como $\frac{Q}{A} = U$ y si introducimos la profundidad media $D = \frac{A}{B}$, la última expresión se puede escribir en términos del número de Froude

$$Fr = \frac{\frac{Q}{A}}{\sqrt{\frac{gA}{B}}} = \frac{U}{gD} \quad (2.23)$$

en la forma $F^2 = 1$. Físicamente, el cuadrado del número de Froude es una relación entre la energía cinética media del flujo y su energía potencial. Números de

Froude mayores que la unidad, corresponden a flujos denominados supercríticos y los menores, subcríticos. La profundidad media crítica está dada por

$$D_c = \frac{U^2}{g} = \frac{Q^2}{gA^2} \quad (2.24)$$

Consideraciones parecidas, establecen que cuando el flujo es crítico, se minimiza también la transferencia de momentum, definido por

$$M = \int (p\hat{\mathbf{n}} + \rho g \mathbf{u} \mathbf{u} \cdot \hat{\mathbf{n}}) d\mathbf{A} \quad (2.25)$$

En los fiordos, el flujo es altamente estratificado, razón por la cual, una buena aproximación es considerar el flujo en un canal formado por dos capas de alturas h_1 y h_2 (superior e inferior), donde el flujo tiene velocidades medias u'_1 e u'_2 y densidades ρ_1 , ρ_2 respectivamente. En este caso, la formulación hidráulica varía un poco, pero los conceptos de flujo crítico, subcrítico y supercrítico permanecen.

El modelo de un canal de dos capas, considera el número de Froude G^2 , el cual se define como la suma de los cuadrados de los números de Froude de cada una de las capas, es decir $G^2 = Fr_1^2 + Fr_2^2$. Cuando el flujo es crítico, G^2 , es igual a la unidad, es decir [Armi,1986]

$$G^2 = Fr_1^2 + Fr_2^2 = \frac{u_1'^2}{g'h_1} + \frac{u_2'^2}{g'h_2} = 1 \quad (2.26)$$

donde g' se define como gravedad reducida

$$g' = \frac{g\Delta\rho}{\rho_2} \quad (2.27)$$

con $\Delta\rho = \rho_2 - \rho_1$

El número de Froude crítico ($Fr = 1$), corresponde al estado en el cual la velocidad del flujo se iguala a la velocidad de ondas largas que se propagan por la capa superior a una velocidad denominada crítica [Turner, 1973] lo cual favorece la transferencia de momentum entre las dos capas. Cuando el flujo es supercrítico ($Fr > 1$), las perturbaciones no se pueden propagar aguas arriba y cualquier obstáculo que se presente al flujo, tendrá un efecto local. Cuando el flujo es subcrítico ($Fr < 1$), ondas de corta longitud de onda pueden incluso permanecer en reposo relativas al obstáculo. Como el régimen crítico es mas conveniente desde un punto de vista energético, este tiende a establecerse en las cercanías de los umbrales de los fiordos. La tendencia del flujo a comportarse en un régimen cercano al crítico se denomina control hidráulico.

2.4.1 El control hidráulico

El concepto de control hidráulico en un fiordo fue presentado por primera vez el año 1957 por Stommel y Farmer [Stommel], aplicado a un flujo simple de dos capas. Posteriormente en 1986 Armi [Armi,1986] presentaron esquemas de clasificación para flujos de dos capas con control hidráulico a través de contracciones y umbrales respectivamente, basados las componentes del flujo barotrópico y los números de Froude internos o de las capas individualizadas. Los cambios en la geomorfología de los canales debido a los umbrales o contracciones provocan un aumento en la aceleración advectiva del fluido, con variaciones significativas en el número de Froude. El flujo, por tanto, es controlado en un punto específico, dependiendo de la componente barotrópica del flujo, en donde la velocidad local y su profundidad se adaptan mutuamente para resultar en un flujo que alcanza una velocidad máxima que corresponde al valor crítico, es decir, un número de Froude crítico de uno ($Fr = 1$). De

acuerdo a Armi y Farmer y Armi, un punto de control hidráulico se localiza en un frente de densidad, con condiciones supercríticas detrás del frente [MacDonald, 2003].

En condiciones estacionarias puede mostrarse que hay un límite superior en la capacidad de transporte en los dos sentidos de la constricción. En la constricción, la condición de control puede expresarse como

$$F_1^2 + \frac{\rho_1}{\rho_2} F_2^2 = 1 \quad (2.28)$$

donde $F_1 = \frac{u_1}{\sqrt{(g'h_1)}}$ y $F_2 = \frac{u_2}{\sqrt{(g'h_2)}}$ son los números de Froude densimétricos para la capa superior e inferior respectivamente. u_1 y u_2 son las velocidades de flujo promediadas estacionalmente y h_1 y h_2 son las alturas de las capas superior e inferior. El parámetro $g' = g \frac{(\rho_2 - \rho_1)}{\rho_0}$ es la gravedad reducida, con ρ_1 y ρ_2 las densidades de las capas superior e inferior respectivamente. La sección vertical en donde se aplica la ecuación 2.21 debiera estar ubicada en la boca en donde hay una constricción en el ancho como también podría haber una contracción en la profundidad (un umbral). Esta zona es la denominada sección de control.. Cuando la constricción es profunda en relación a la altura de la capa superior, la ecuacion 2.21 se simplifica a

$$F_1^2 \simeq 1 \quad (2.29)$$

Dada la condición descrita en la ecuación 2.22, junto al requerimiento de conservación de salinidad, masa y la ecuación de estado, es posible determinar bajo condiciones estacionarias la profundidad relativa de la interfase en la constricción teniendo las tasas de mezcla y la descarga de agua dulce, y por consiguiente la velocidad del fluido.

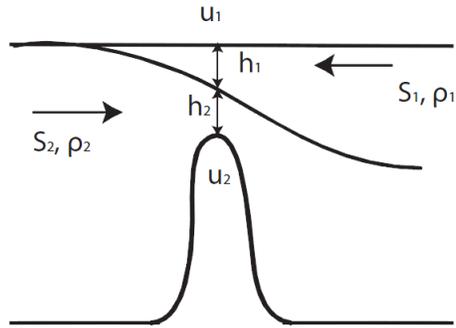


Figura 2.8: Una sección en el umbral de un fiordo altamente estratificado. S_1 , u_1 y ρ_1 corresponden a la salinidad, velocidad y densidad del fluido de la capa superior, y S_2 , u_2 y ρ_2 son los valores respectivos del fluido en la capa inferior. A diferencia de este esquema, en este trabajo se ha considerado la profundidad de la capa salobre-superior como la profundidad de la haloclina. (Tomczak 1998)

La relevancia de la teoría de control hidráulico de dos capas en frentes estuarinos ha sido abordada varios estudios anteriores de fiordos altamente estratificados, que incluyen el estuario de Mississippi (Wright y Coleman, 1971), y el estuario de Ishikari (Kashawamura y Yoshida, 1978). Estos trabajos demostraron que el número de Froude es cercano a uno próximo a las cercanías del umbral [MacDonald, 2003].

2.5 Tiempo de recambio

El tiempo de recambio (del inglés *flushing time*) al interior de una cuenca es una variable clave para determinar el estado de salud de un estuario. Un recambio rápido asegura que no hay tiempo suficiente para la acumulación de sedimentos o el agotamiento del oxígeno disuelto en su interior. También afecta a otros parámetros tales como metales pesados, nutrientes disueltos, partículas en suspensión, y la proliferación de algas que pueden afectar la salud de los estuarios [Tomczack, 2000].

El tiempo de recambio τ_F , es un parámetro integral o de carga que describe el in-

tercambio general de características de un cuerpo de agua sin identificar los procesos físicos subyacentes, o su distribución espacial [Monsen, 2002]. Es una escala de tiempo idealizada de mezcla-transporte relativamente sencilla de estimar mediante modelos estacionarios. Se estima dividiendo el volúmen de agua en una región específica por la tasa de salida del flujo. El volúmen de agua se asume constante.

Los métodos para determinar el tiempo de recambio son esencialmente advectivos, permiten resolver rápidamente y de manera simplificada situaciones de contaminación y evacuado en los estuarios.

Capítulo 3

Metodología

3.1 Descripción de la zona de estudio

La región austral de Chile comprende uno de los sistemas de fiordos y canales más complejos y extensos del planeta [Palma, 2004]. Como se mencionó anteriormente los fiordos se encuentran en áreas que en el pasado estuvieron cubiertas de hielo durante la época del Pleistoceno. La presión del hielo profundizó y ensanchó el lecho del río y formó barras de roca (umbrales) en la boca que obstaculizan el intercambio de agua oceánica con el agua de los ríos ([Rodrigo, 2006], [Silva, 1981] y [Bell,1996]).

En particular, los cuerpos costeros en la undécima región se formaron por la erosión glacial durante el Cuaternario y por el hundimiento tectónico del valle central. Ésta área se extiende desde Puerto Montt hasta Cabo de Hornos [Marín, 2008], y está compuesta por una inmensidad de islas, fiordos y canales con relieves que pueden alcanzar desde los 500 hasta 2000 metros de altura [Silva et al.]. La topografía del fondo marino está conformada por umbrales frecuentes e irregulares, que actúan como barreras para la circulación de las aguas más profundas, favoreciendo la sedimentación y la disminución de la cantidad de oxígeno disuelto [Silva et al.].

El clima de la región de Aysén está influenciado por vientos polares y subpolares durante todo el año. El patrón de precipitación anual muestra un fuerte gradiente meridional con 4000 milímetros al año en la zona Oeste de los fiordos hasta 600 milímetros al año en el Este, próximo a Argentina. La temperatura promedio atmosférica anual de la zona es entre 7°C y 9°C, con máximos en Enero ($\approx 18^\circ\text{C}$) y un mínimo en Julio ($\approx 2^\circ\text{C}$) [Marín, 2008].

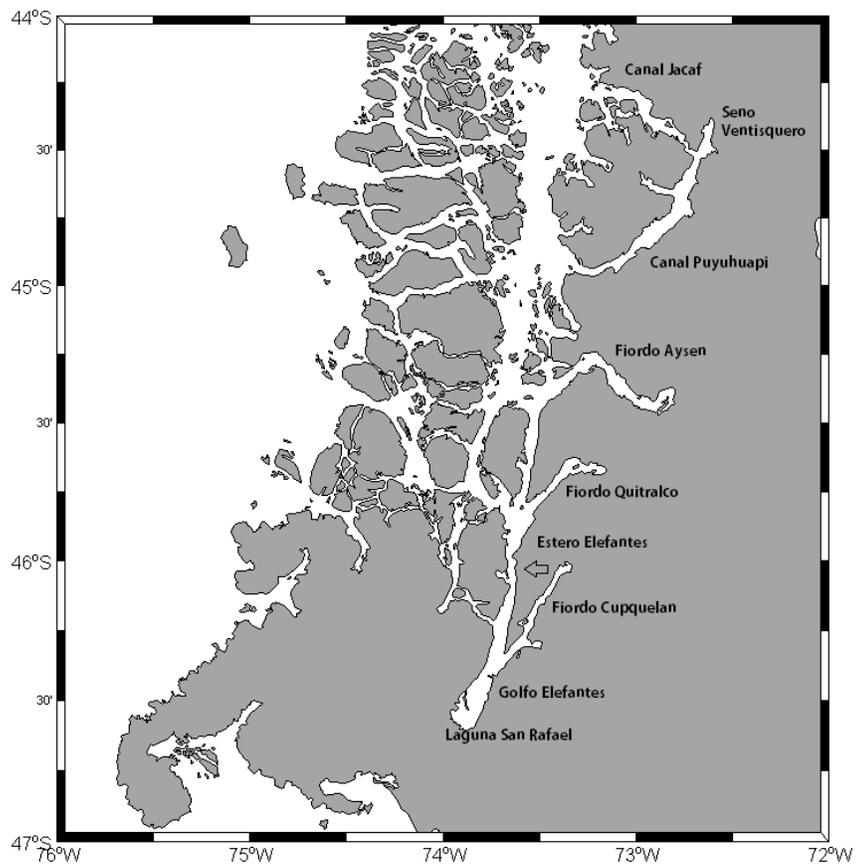


Figura 3.1: Mapa del área de trabajo

3.2 Materiales y método

Se usaron cartas batimétricas y líneas de costa proporcionados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) de los canales Jacaf y Puyuhuapi (8500), fiordo Aysén (8610), Estero y Golfo Elefantes (8660), fiordo Cupquelán (8600) y Quitralco (8670) (3.1).

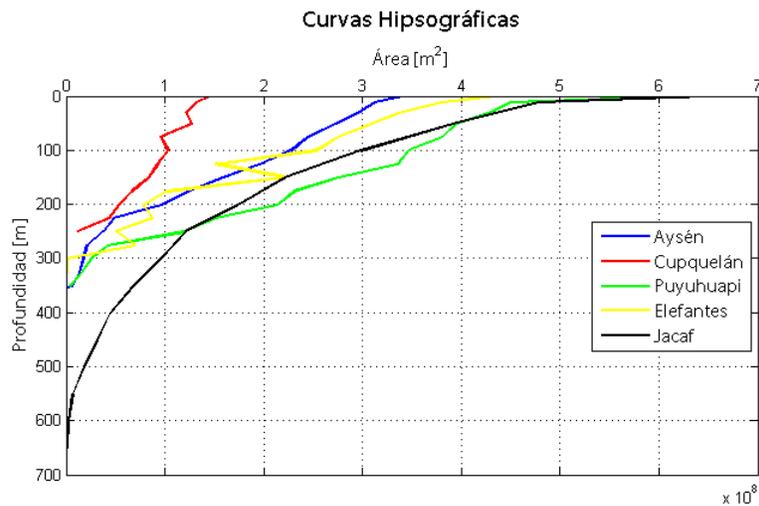


Figura 3.2: Curvas hipsográficas de los fiordos

Con la información batimétrica se confeccionan diagramas de nivel de profundidad en función al área superficial de los fiordos. Estos diagramas se conocen como curvas hipsográficas (figura 3.2). El volumen geomorfológico total de la cuenca mayor del fiordo se calculó multiplicando la profundidad media por el área superficial.

Por otra parte se analizaron los perfiles de temperatura, salinidad y densidad obtenidos con CTD en estaciones seleccionadas de diferentes cruceros. Las estaciones fueron seleccionadas para abarcar la máxima extensión de los fiordos. Puesto que queremos conocer la variabilidad estacional del tiempo de recambio de la capa salobre, las estaciones también cumplieron el criterio de que sus anclajes estén ubicados

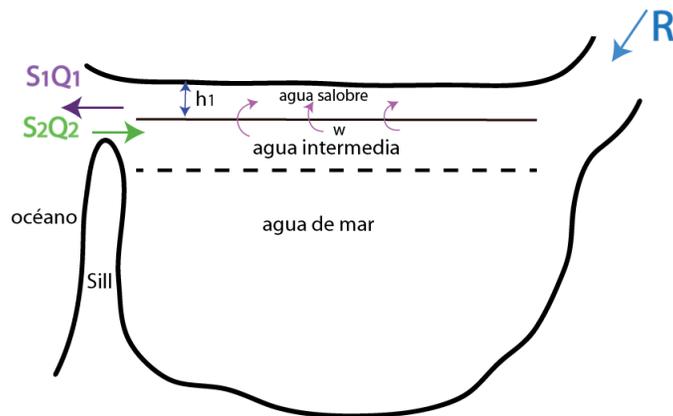


Figura 3.3: Esquema simplificado del proceso de circulación en la superficie de un fiordo

en un punto similar en ambas etapas del los cruceros. Dada la escasez de observaciones en los fiordos Jacaf, Puyuhuapi, Elefantes y Cupquelán, no fue posible definir un patrón uniforme de distribución espacial entre las estaciones de medición. El perfil más relevante es el que nos entrega la salinidad, de ella identificamos el límite inferior de la haloclina con el fin de identificar la profundidad de la capa salobre del fiordo. Por simplicidad, la capa inferior incluirá el resto de las capas posteriores hasta el fondo. Para cada estrato (superior e inferior) se calculan sus respectivos promedios de salinidad con el fin de ingresarlos a las ecuaciones hidrográficas de Knudsen.

Para completar la información necesaria para el modelo de balance de Knudsen, se requiere la información de los caudales medios de los ríos que desembocan en los fiordos. De acuerdo a la figura 3.4, los ríos que aportan agua dulce al canal Jacaf son el Aldunate, Rauco y el río Ventisquero ¹; para el canal Puyuhuapi el río Ventisquero y Cisnes y finalmente el río Aysén para el fiordo Aysén. Los caudales de los ríos Aldunate, Rauco, Ventisquero y Cisnes fueron extraídos de la estimaciones

¹El río Ventisquero no desemboca directamente en el canal Jacaf, sin embargo, fue considerado para el balance porque la información de caudales es muy limitada.

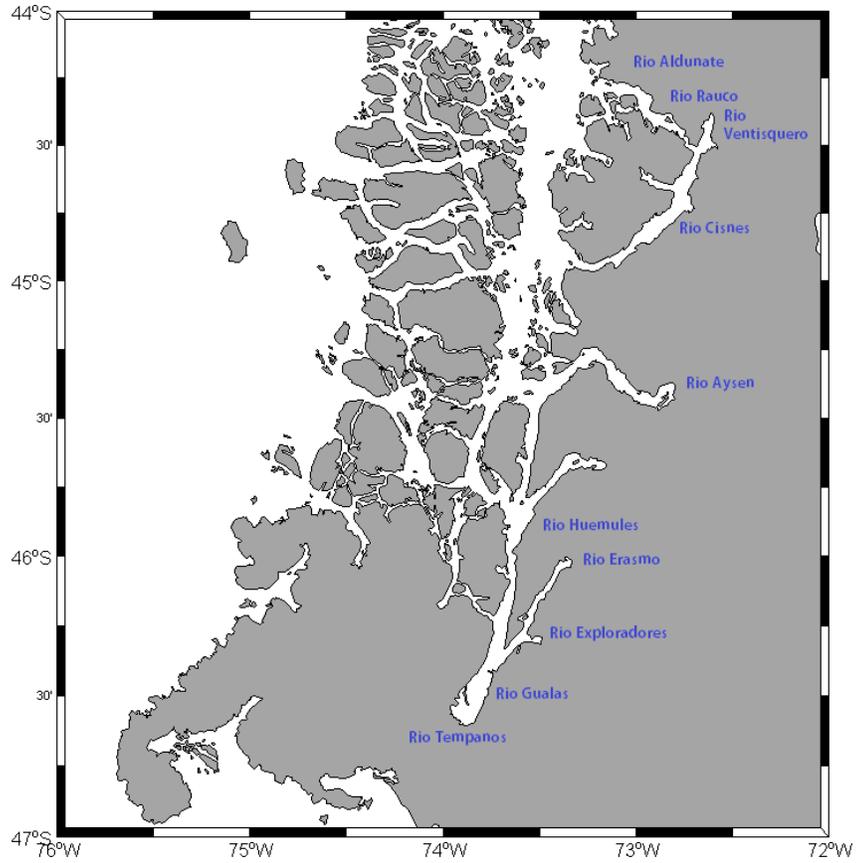


Figura 3.4: Ríos de interés para las estimaciones de los flujos de salida de los fiordos realizadas en el trabajo de Prado-Fiedler y Salcedo [Prado, 2008], ya que en este trabajo se realizaron mediciones en las misma fecha del muestreo de salinidad en ambos canales, mientras que el caudal medio del río Aysén se obtuvo de la Dirección General de Aguas (DGA) de la región de Aysén.

Cálculo del tiempo de recambio

En su forma más simplificada se define el tiempo de recambio τ_F como el tiempo necesario para drenar un volúmen a través de una salida de área A con una velocidad u_1 , como se ve en la figura 2.4. El propósito es conocer el tiempo que tarda un fiordo en vaciar el volúmen de su capa superficial, que contiene una mezcla de agua oceánica y dulce². Este volúmen está definido como V_F y corresponde al volúmen de agua con salinidad cero que se requiere para obtener agua de salinidad S_1 en la parte superior del fiordo, dado que se está mezclando con agua oceánica de salinidad S_2 .

3.2.1 Estimación del tiempo de recambio mediante las fórmulas de Knudsen

Esta metodología se basa en las ecuaciones de balance de salinidad de las relaciones de Knudsen [Tomczack, 2000]. Si R se define como la tasa de descarga de río, Q^{abajo} y Q^{arriba} son los volúmenes de transporte de agua entrantes y salinantes del estuario en su boca con sus salinidades respectivas S^{abajo} y S^{arriba} , la ecuación de continuidad de masa entregan

$$Q^{arriba} - Q^{abajo} = R \quad (3.1)$$

$$Q^{arriba} S^{arriba} = Q^{abajo} S^{abajo} \quad (3.2)$$

resolviendo para Q^{arriba} y señalando que el tiempo de recambio viene dado por

²En este trabajo se menciona capa salobre y capa superficial indistintivamente.

el volúmen de la capa salobre V_F dividido por Q_{arriba} , se obtiene

$$\tau_F = \frac{V_F S^{abajo} - S^{arriba}}{R} = \frac{V_F}{R} \left(1 - \frac{S^{arriba}}{S^{abajo}}\right) \quad (3.3)$$

Esta expresión corresponde al tiempo que tarda el agua dulce en renovarse. La expresión puede simplificarse para encontrar el tiempo de recambio del agua salobre al dividir el volúmen de la capa superior por el flujo saliente dado por Q_{arriba}

$$\tau_F = \frac{V_F}{Q_{arriba}} \quad (3.4)$$

Esta determinación del tiempo de recambio requiere el conocimiento del volúmen del fiordo y de los caudales de los ríos que desembocan él, además de las mediciones de salinidad en la capa subsuperficial S^{abajo} y superficial S^{arriba} , que se obtienen de la estación localizada en la boca del fiordo.

El supuesto básico de la fórmula de Knudsen es que toda el agua de mar que entra en el estuario abandona la capa superior después de ser mezclada completamente con agua dulce.

3.2.2 Estimación del tiempo de recambio mediante el método de control hidráulico

La metodología del control hidráulico supone que en un fiordo altamente estratificado y con un caudal de agua dulce fuerte, el número de Froude es cercano a 1. Ello implica que la velocidad del flujo es similar a la velocidad de la onda interna de la capa superior

$$Fr = \frac{u_1}{\sqrt{g'h_1}} \approx 1 \quad (3.5)$$

donde g' es la gravedad reducida y h_1 la altura de la capa de agua salobre.

Como se trata de un cuerpo de agua altamente estratificado, se puede descartar la influencia de las variaciones de temperatura y presión, por lo que la densidad será sólo función de la salinidad

$$\rho = \rho(S, T, p) \sim \rho(S, T) \sim \rho(S) \quad (3.6)$$

por ello se debe calcular la gravedad reducida,

$$g' = g \frac{\Delta\rho}{\rho} = g \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_0} \quad (3.7)$$

Los valores de ρ_1 y ρ_2 se determinan a partir de la información de los CTD de las estaciones cercanas a la boca del fiordo, y ρ_0 es la densidad de referencia del agua de mar ($\approx 1025[\frac{kg}{m^3}]$). Estas observaciones también permiten estimar la profundidad de la capa superior h_1 , de manera similar a la utilizada en la metodología del balance de Knudsen. Como la velocidad crítica $u_1 \approx \sqrt{g'h_1}$ es posible evaluar caudal de volúmen de salida de la capa superior.

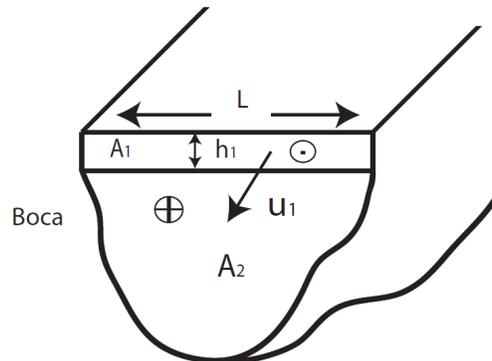


Figura 3.5: Corte vertical de la boca de un fiordo y las variables de interés para la estimación del flujo de salida acorde al método de control hidráulico

Por consiguiente, el cálculo del flujo de salida del fiordo mediante la técnica de control hidráulico queda expresado por

$$Q^{arriba} = u_1 h_1 L_1 \quad (3.8)$$

donde u_1 es la velocidad de salida de la capa superior, h_1 es la altura de la capa superior (o salobre) y L_1 corresponde al ancho de la boca del fiordo, como se puede ver en la figura 3.5

y el tiempo de recambio viene dado por

$$\tau_F = \frac{V_F}{Q^{arriba}} \quad (3.9)$$

En síntesis, las dos formulaciones de tiempo de recambio del volúmen de agua en la capa superior son equivalentes

$$\tau_F = \frac{V_F}{R} = -\frac{V_F}{Q^{arriba}} \quad (3.10)$$

en donde V_F corresponde al volúmen de agua salobre contenido en la capa superficial, R es el caudal de agua dulce y Q^{arriba} es el caudal del flujo de salida del fiordo.

3.2.3 Información hidrográfica utilizada

Los datos hidrográficos del fiordo Aysén provienen de las mediciones recolectadas por el Grupo de Oceanografía Física y Clima de la Universidad de Concepción (OFC) en el marco del programa COPAS sur Austral y un Proyecto INNOVA Regional para el estudio del fiordo, la primera etapa de primavera correspondiente entre los días 23 y 27 de Septiembre de 2009 y la segunda etapa de invierno entre el 20 y 25 Julio de

2010 [Pizarro et al.].

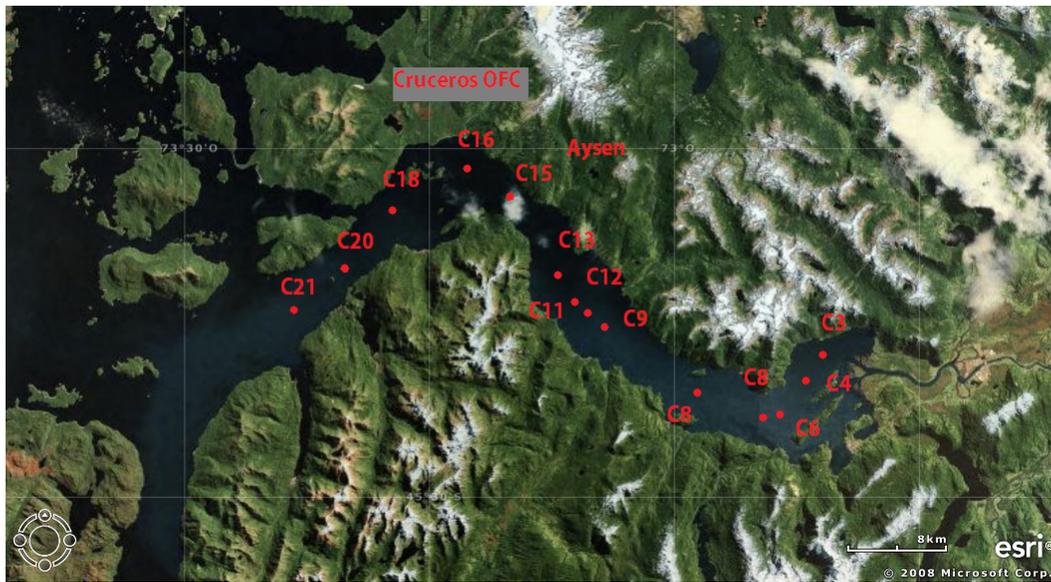


Figura 3.6: Estaciones de medición de CTD en fiordo Aysén (OFC)

Estación	Longitud	Latitud
C3	-73.38	-45.35
C4	-73.34	-45.33
C6	-73.30	-45.30
C7	-73.20	-45.26
C8	-73.16	-45.29
C9	-73.11	-45.33
C11	-73.09	-45.35
C12	-73.08	-45.36
C13	-73.06	-45.37
C15	-72.98	-45.42
C16	-72.92	-45.43
C18	-72.89	-45.43
C20	-72.87	-45.41
C21	-72.83	-45.39

Tabla 3.1: Estaciones de medición en fiordo Aysén, OFC

Para el resto de los fiordos se utilizaron los datos obtenidos en los cruceros de investigación científica CIMAR-Fiordos coordinados por el Comité Oceanográfico Nacional (CONA). Para la zona de los canales Jacaf y Puyuhuapi se emplearon las mediciones recolectadas del crucero CIMAR-Fiordos 7. Este crucero fue realizado en dos etapas, la primera entre 7 y 21 de Julio de 2001, y la segunda etapa entre el 12 y 27 de Noviembre de 2001. Para el fiordo Cupquelán se emplearon los datos del crucero CIMAR-Fiordos 1, realizado entre octubre y noviembre de 1995, y finalmente para el estero Elefantes se utilizaron las mediciones obtenidas del crucero CIMAR-Fiordos 13 cuya primera etapa se inició el 23 de Julio de 2007.

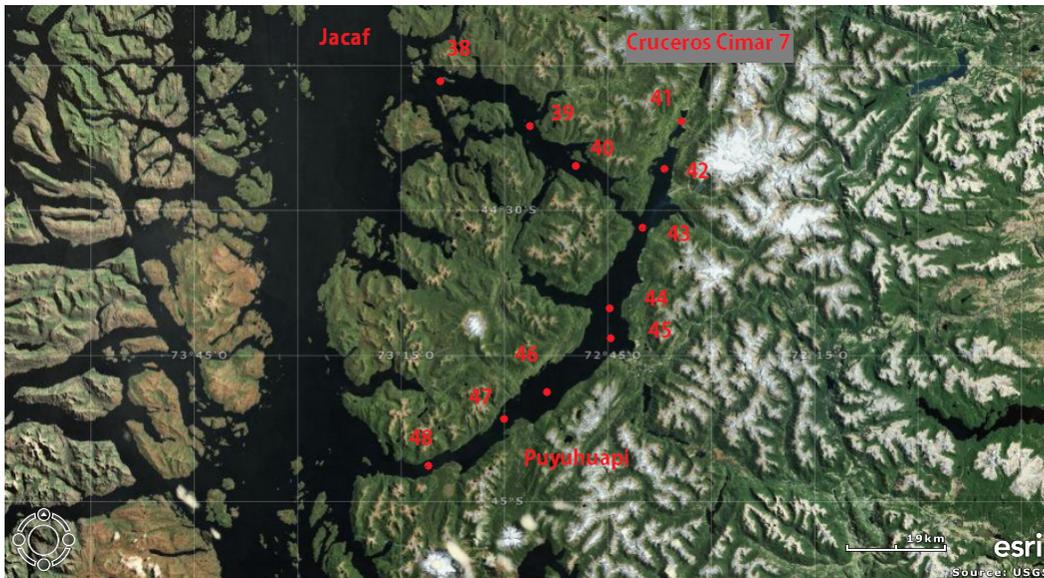


Figura 3.7: Estaciones de medición en canales Jacaf y Puyuhuapi correspondientes al crucero CIMAR-Fiordos 7

Estación	Longitud	Latitud
E40	-72.83	-44.82
E39	-72.97	-44.32
E38	-73.17	-44.28

Tabla 3.2: Estaciones de medición en canal Jacaf, crucero CIMAR-Fiordos 7

Estación	Longitud	Latitud
E41	-72.57	-44.35
E42	-72.62	-44.43
E43	-72.67	-44.52
E44	-72.75	-44.67
E45	-72.72	-42.72
E46	-72.93	-44.82
E47	-73.03	-44.88
E48	-73.28	-44.93

Tabla 3.3: Estaciones de medición en canal Puyuhuapi, cruceo CIMAR-Fiordos 7



Figura 3.8: Estaciones de medición en Estero Elefantes y fiordo Cupquelán correspondientes al cruceo CIMAR Fiordos 13 y CIMAR Fiordos 1 respectivamente.

Estación	Longitud	Latitud
E52	-73.76	-46.43
E51	-73.71	-46.32
E50	-73.66	-46.18
E49	-73.63	-46.06
E48	-73.58	-45.87
E47	-73.65	-45.30
E46	-73.53	-45.51

Tabla 3.4: Estaciones de medición en estero Elefantes, cruceo CIMAR-Fiordos 13

Estación	Longitud	Latitud
E56	-73.4	-46.04
E55	-73.49	-46.14
E54	-73.55	-46.24
E57	-73.61	-46.21
E53	-73.67	-46.34

Tabla 3.5: Estaciones de medición en fiordo Cupquelán, cruceo CIMAR-Fiordos 1

3.3 Morfología física de los fiordos

3.3.1 Canales Jacaf y Puyuhuapi

Los canales Jacaf y Puyuhuapi se encuentran entre las latitudes $44^{\circ}18'$ y $44^{\circ}41'$ y longitudes $72^{\circ}58'$ y $72^{\circ}45'$, estos canales circundan la isla Magdalena (ver carta 8500). La morfología de los perfiles longitudinales nos muestra que el canal Jacaf tiene aproximadamente 60 kilómetros de extensión, su topografía submarina posee características que lo diferencian marcadamente del resto de los fiordos tratados en este trabajo: su fondo es muy irregular, posee numerosos umbrales que a su vez son muy profundos (del orden de 500 metros) y la presencia de depresiones intra-umbrales rellenas por espesas capas sedimentarias [Vieira, 2002]. Las subcuencas internas del canal están a profundidades superiores a la de los canales vecinos, una de ellas de aproximadamente superior a los 650 metros [Rodrigo, 2006]. Las cubetas más profundas coinciden con la intersección de los fiordos tributarios, el canal Puyuhuapi y el Seno Ventisquero. Su boca se comunica con el Canal Moraleda, lugar en donde se encuentran las islas Castillo, Enríque y Manuel. Los ríos conocidos que desembocan directamente son el Aldunate y Rauco, ubicados en la zona central del canal. El canal Jacaf corresponde a la cuenca principal más seccionada de los canales norpatagónicos por la confluencia de diversos canales y senos [Vieira, 2002]. El ancho medio del canal Jacaf es de aproximadamente 5 kilómetros mientras que el ancho medio del canal Puyuhuapi es cercano a los 7 kilómetros.

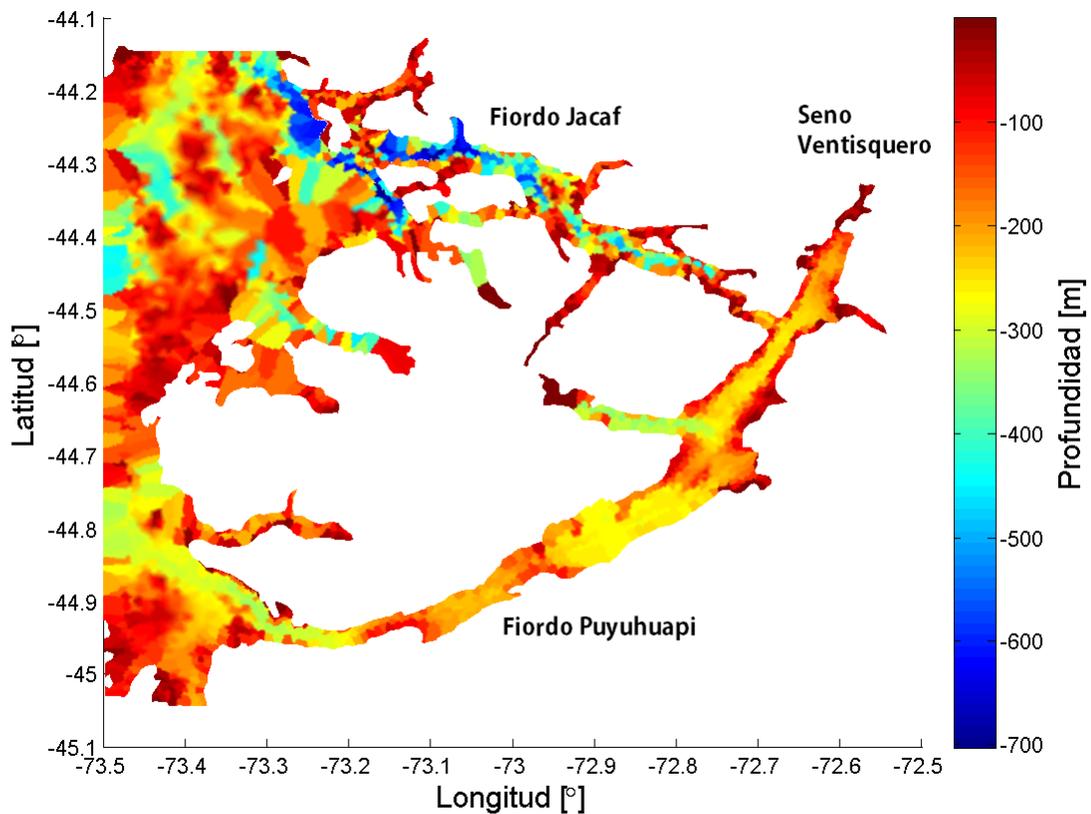


Figura 3.9: Batimetría de canal Jacaf y canal Puyuhuapi

El canal Puyuhuapi tiene una longitud aproximada de 105 kilómetros, y su eje principal está orientado en dirección suroeste- noroeste. Hacia la zona proximal se comunica con el canal Jacaf y con el Seno Ventisquero, a través de los pasajes Sibbald y Galvarino respectivamente. En su parte distal se conecta con el canal Moraleda. La profundidad del canal varía de entre los 50 metros en la cabeza del fiordo hasta los 260 metros en el sector central. Este canal no presenta islas en su interior. El pasaje Galvarino representa un estrechamiento, disminuyendo el ancho del canal de 2 kilómetros a 200 metros.

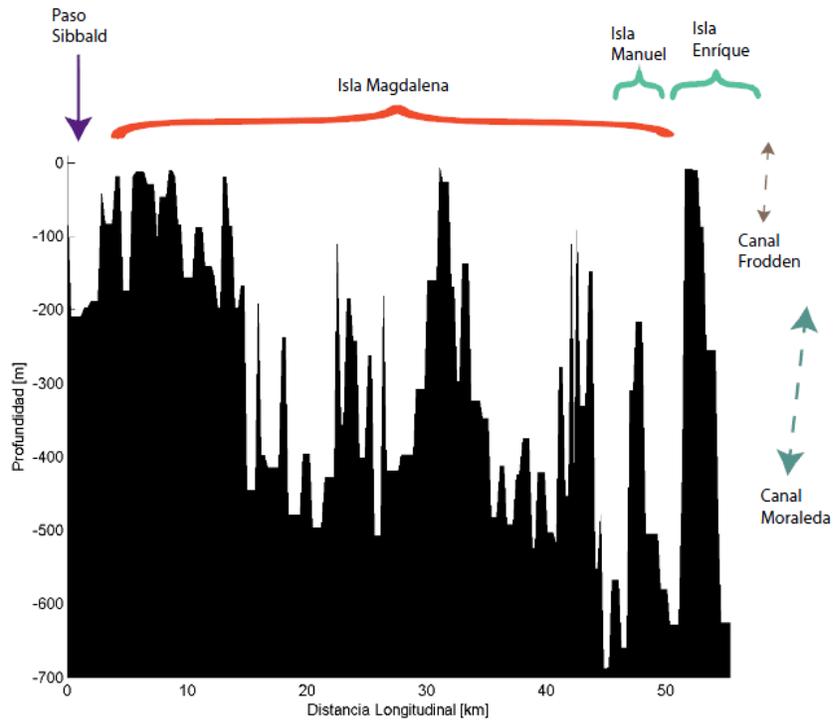


Figura 3.10: Perfil longitudinal del fiordo Jacaf

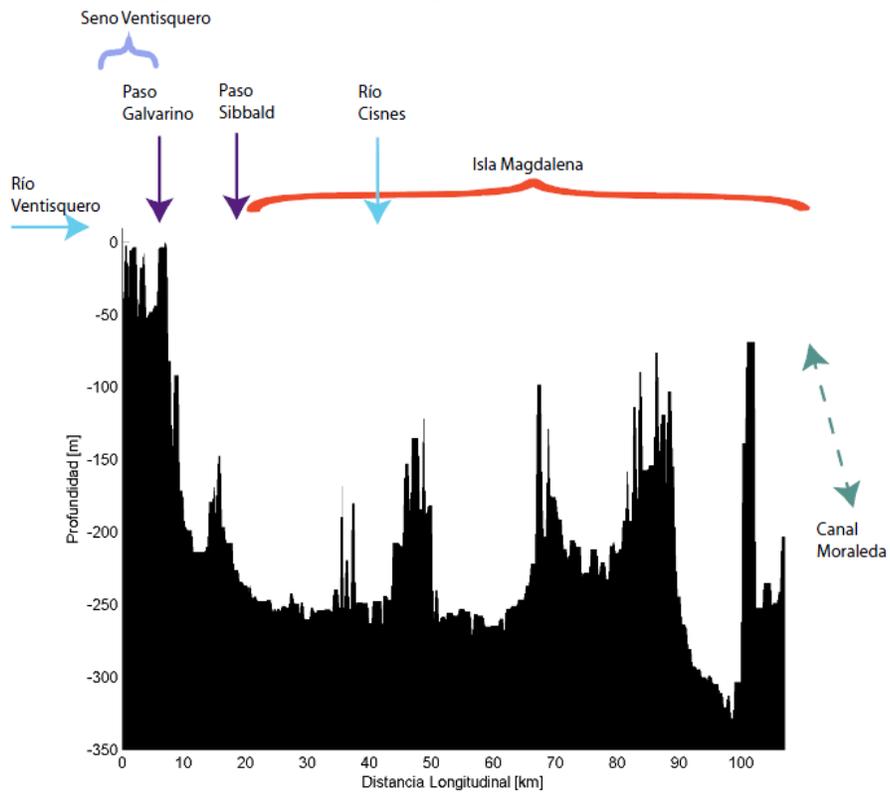


Figura 3.11: Perfil longitudinal del fiordo Puyuhuapi

Parámetro estimado	Jacaf	Puyuhuapi
Área superficial [m^2]	265.8×10^6	450.18×10^6
Volúmen total [m^3]	52.24×10^9	79.474×10^9
Profundidad máxima [m]	670	341
Profundidad media [m]	196.55	176.54
Longitud máxima [km]	55.32	110
Ancho boca [km]	3.17	4.51

Tabla 3.6: Características geomorfológicas de los fiordos Jacaf y Puyuhuapi

3.3.2 Fiordo Aysén

El fiordo Aysén se localiza en la latitud $45^{\circ}12'$ sur y longitud $73^{\circ}08'$ oeste, tiene una longitud aproximada de 58 kilómetros si se considera desde la segunda mitad de la isla Elena hasta la entrada en el río Aysén, posee un ancho medio de 6.5 kilómetros.

En su zona oeste se conecta con el canal Costa y Moraleda. Posee una profundidad media de 217 metros y puede alcanzar una máxima profundidad de 354 metros.

En la boca del fiordo se aprecia una abertura en forma de "v" que contiene un cúmulo de islas conocidas como islas Cinco Hermanos. Se comunica con el océano mediante el Canal Moraleda (ver carta hidrográfica 8610).

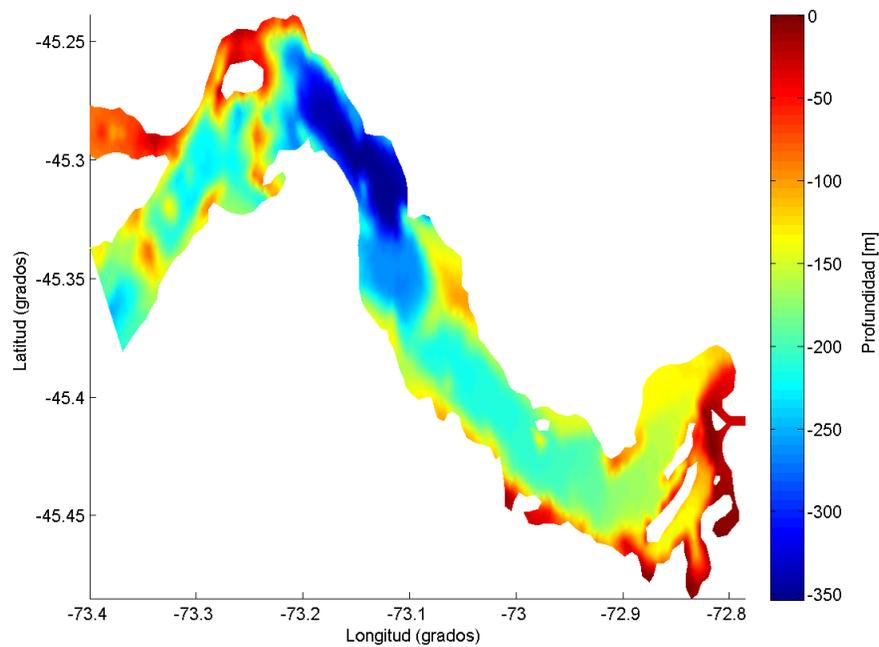


Figura 3.12: Batimetría del fiordo Aysén, en grados decimales

En el área proximal (cabeza) del fiordo Aysén posee una profundidad media de alrededor de 60 metros. La parte central del fiordo está caracterizada por la presencia de dos subcuencas, entre 10 y 15 kilómetros y por albergar las profundidades máximas (aprox. 350 metros). El desnivel que se observa entre las dos subcuencas coincide con una falla observada en la carta geológica del área figura 13. En la cabeza del fiordo hace ingreso el río Aysén, que posee como tributarios principales a los ríos Mañiguales, Simpson y Claro, mientras que el río Cuervo, Condor y el Lagunillas desembocan directamente en el fiordo.

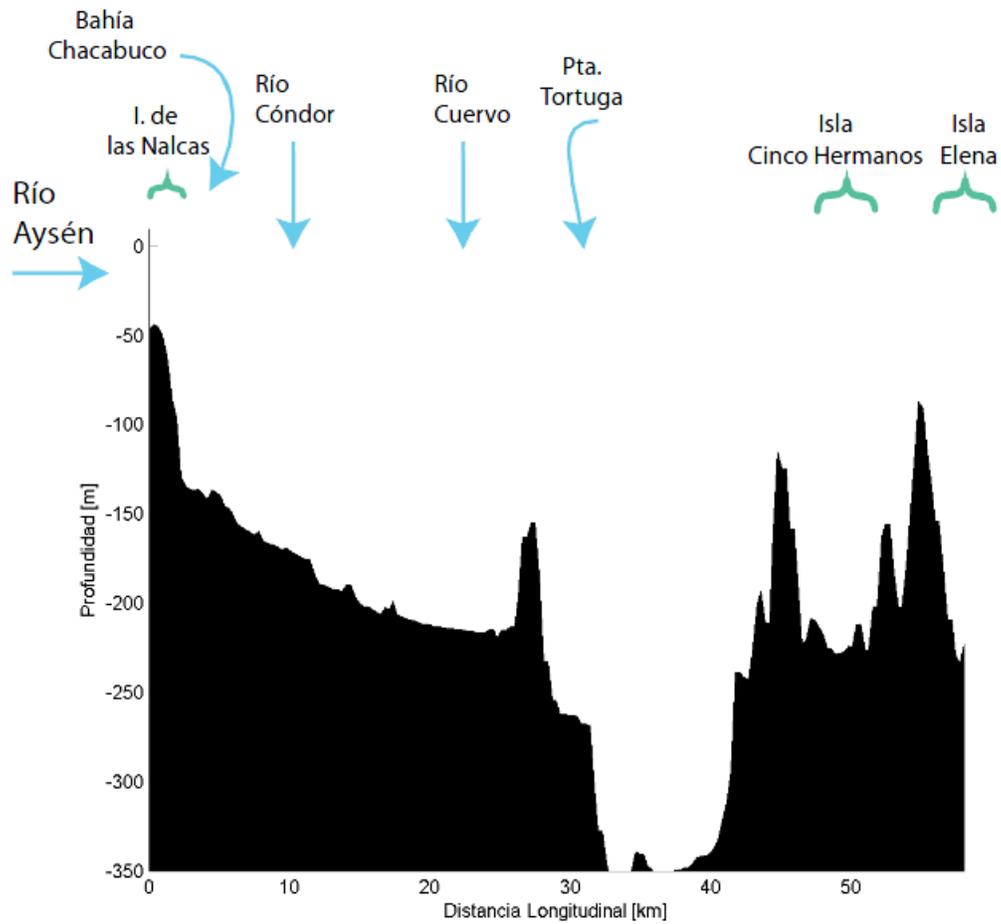


Figura 3.13: Perfil longitudinal del fiordo Aysén

Parámetro estimado	Valor
Área superficial [m^2]	312.08×10^6
Volúmen total [m^3]	50.87×10^{10}
Profundidad máxima [m]	354
Profundidad media [m]	163
Longitud máxima [km]	58.4
Ancho boca [km]	3.20

Tabla 3.7: Características geomorfológicas de fiordo Aysén

3.3.3 Fiordo Cupquelán y estero Elefantes

La sección canal Costa y golfo Elefantes corresponde a la cuenca sur del sistema canal Moraleda. Desde el punto de vista geomorfológico conforman una sola unidad, siendo relativamente estrechos y carentes de islas. El canal Costa presenta mayores profundidades en toda su extensión en comparación al estero Elefantes (ver cartas 8650 y 8660) [Vieira, 2002]. El estero Elefantes se encuentra separado del golfo Elefantes por medio de un umbral de aproximadamente 25 metros de profundidad. Los canales Costa y estero Elefantes tienen orientación de Norte a Sur, y poseen una extensión total de 160 kilómetros, correspondiendo los primeros 60 kilómetros al canal Costa, los siguientes 70 kilómetros al estero Elefantes y los últimos 30 kilómetros al golfo Elefantes. La profundidad media del estero Elefantes es de aproximadamente 50 metros. Percibe el ingreso de los ríos Exploradores, Gualas y Témpanos, que comunica el golfo Elefantes con la Laguna San Rafael.

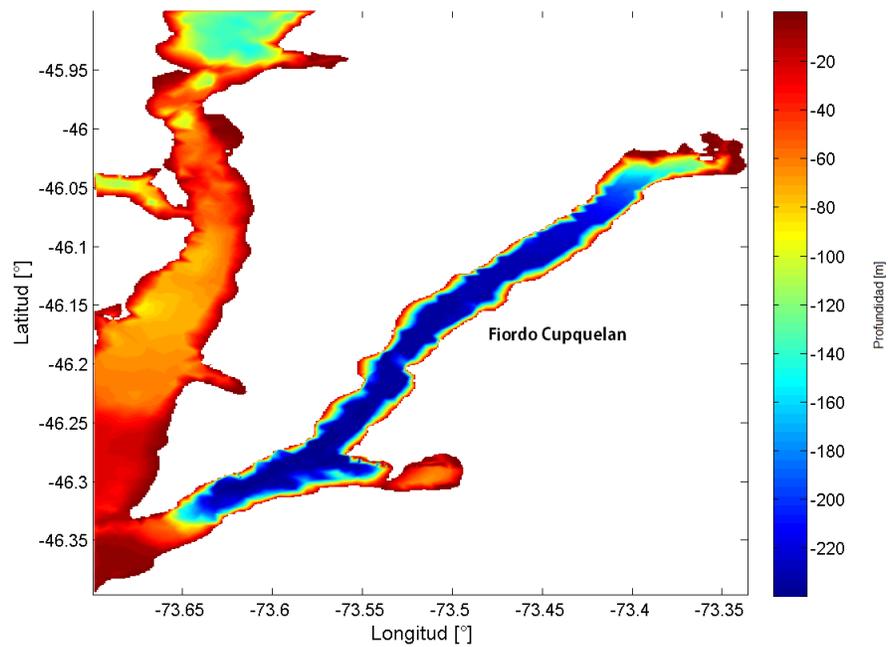


Figura 3.14: Batimetría de fiordo Cupquelán

El fiordo Cupquelán tiene una orientación noroeste y una longitud aproximada de 40 kilómetros. Su fondo es llano y carece de cubetas individualizadas y de islas. Su parte distal se conecta al estero Elefantes donde presenta un umbral cercano a los 200 metros de profundidad. En su parte proximal desemboca un río de origen glacial, presumiblemente el río Supesa de cuyo caudal se desconoce. La profundidad media de este fiordo es de alrededor de 200 metros, y su ancho promedio es aproximadamente de 6 kilómetros.

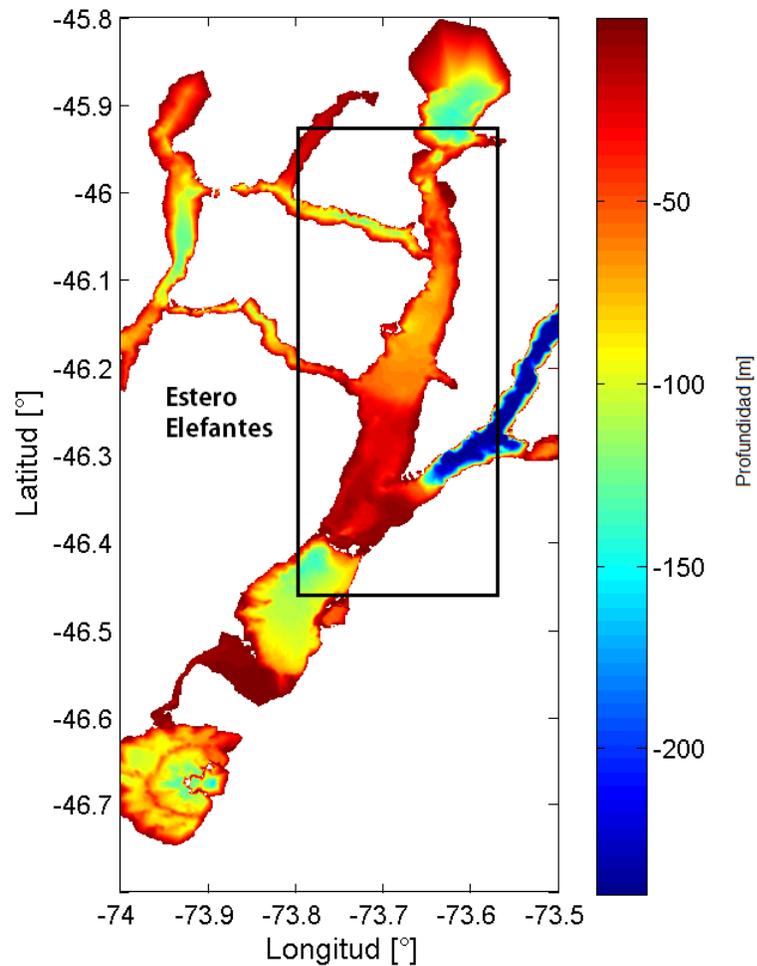


Figura 3.15: Batimetría de estero Elefantes

Los fiordos Quitralco y Cupquelán, cuyas partes distales se comunican con el estero Elefantes, tienen el fondo submarino transversalmente cóncavo. Según información de perfiles acústicos se determina que la naturaleza de sus umbrales es rocosa [Vieira, 2002]. En el fiordo Quitralco, la cubeta más relevante se extiende en la cabecera del fiordo.

El perfil longitudinal demuestra que el golfo Elefantes se encuentra en una plataforma alta, que va disminuyendo en dirección al canal Costa, en donde su límite lo demarca un umbral de 250 metros de profundidad al frente de la isla Meninea, alcanzando profundidades mayores a 300 metros y donde se forma la constricción del paso Quesahuén . El estero Elefantes es muy somero al poseer profundidades no mayores a los 70 metros. Su ancho promedio es superior a los 10 kilómetros.

Parámetro estimado	Cupquelán	Elefantes
Área [m^2]	146.1×10^6	280.25×10^6
Volúmen total [m^3]	111.56×10^8	15.12×10^9
Profundidad máxima [m]	240	72
Profundidad media [m]	76.36	54
Longitud máxima [km]	45	55
Ancho boca [km]	6.00	5.51

Tabla 3.8: Características geomorfológicas de fiordo Cupuelán y estero Elefantes

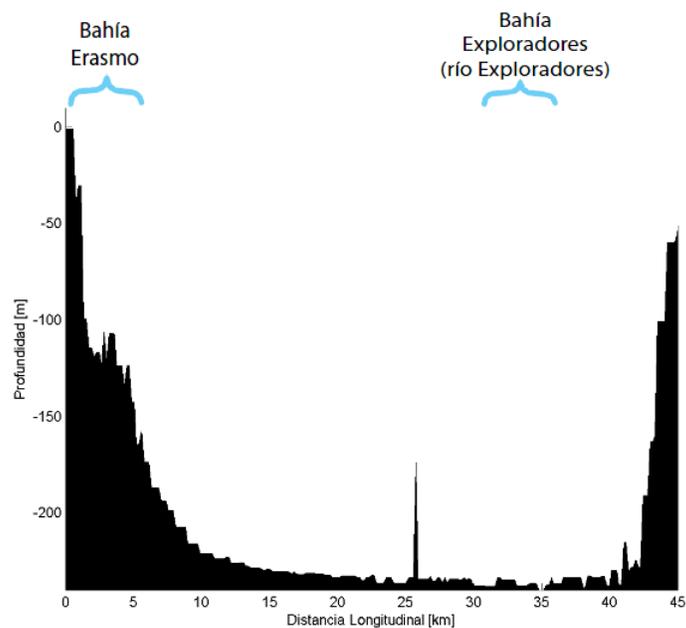


Figura 3.16: Perfil longitudinal del fiordo Cupuelán

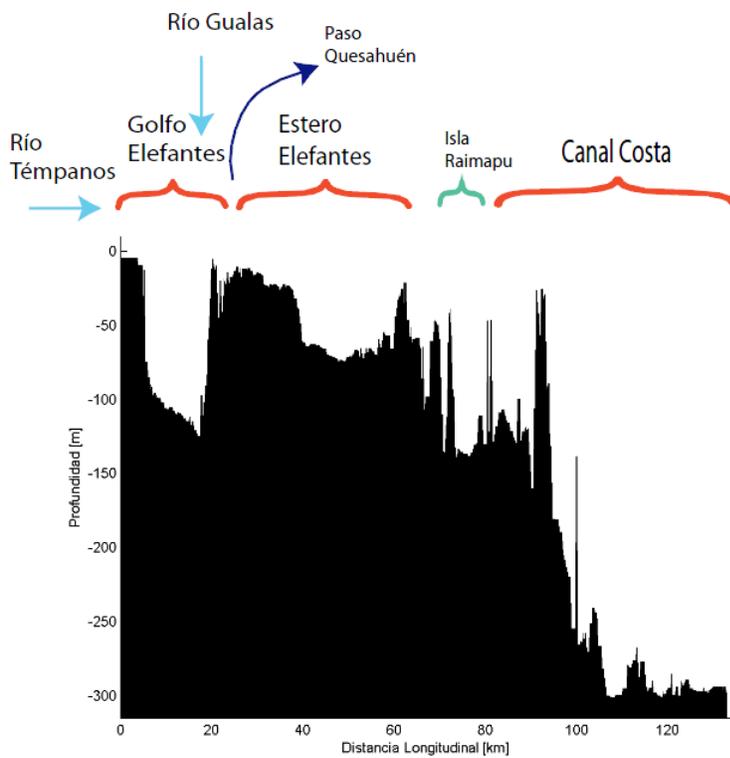


Figura 3.17: Perfil longitudinal de estero Elefantes

Capítulo 4

Resultados

4.1 Caracterización hidrográfica de los fiordos

4.1.1 Crucero CIMAR-Fiordos 1

Fiordo Cupquelán

Las mediciones de salinidad realizadas al interior del fiordo Cupquelán durante el crucero Cimar-Fiordos 1 durante los meses de Octubre y Noviembre de 1995, muestran un fuerte aporte de agua dulce cerca de la bahía Exploradores y en bahía Erasmo, sector cercano al río Supresa.

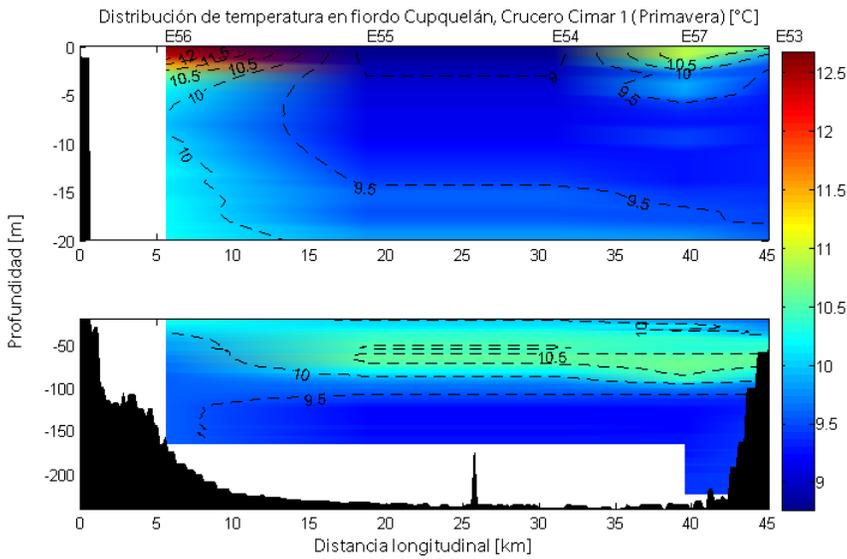


Figura 4.1: Distribución longitudinal de la temperatura en Cupquellán, primavera de 1995. Notar que para una mejor visualización se graficó de forma separada los primeros 20 metros de profundidad del fiordo.

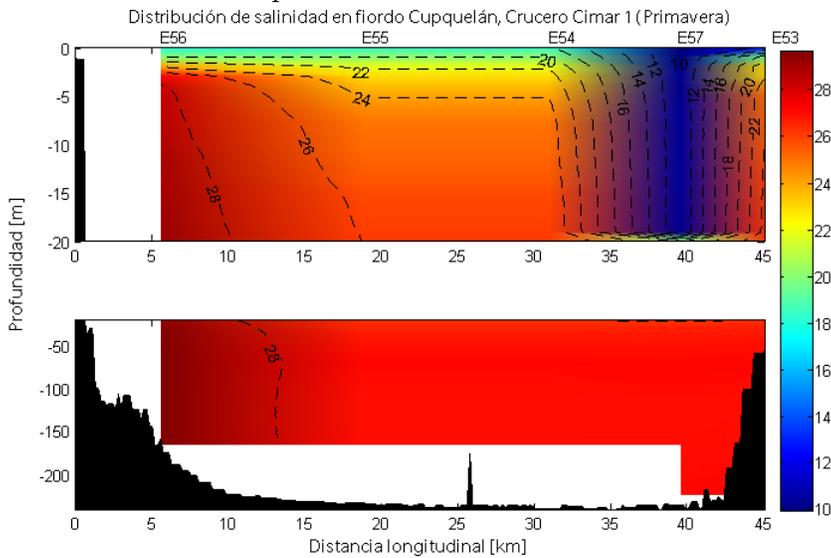


Figura 4.2: Distribución longitudinal de la salinidad en Cupquellán, primavera de 1995.

La temperatura superficial cambió entre un mínimo de 9.40°C y un máximo de

11.24°C ubicado en la cabeza 4.1. Las temperaturas más bajas se ubican al centro del fiordo. Bajo la capa superficial ocurre un aumento de temperatura en la profundidad de 50 metros

La salinidad superficial fluctuó entre los 11.60 y 27.76 psu, y sus valores más bajos se encontraron en la desembocadura del río Exploradores (cercano al kilómetro 32) y las mayores hacia el fondo del fiordo (figura 4.2).

4.1.2 Crucero CIMAR-Fiordos 7, Invierno

Sección canal Jacaf

La temperatura en los primeros 10 metros varió entre los 9.22°C y los 9.37°C. El mínimo de temperatura se encontró en torno a la estación E40, próximo a la boca del canal.

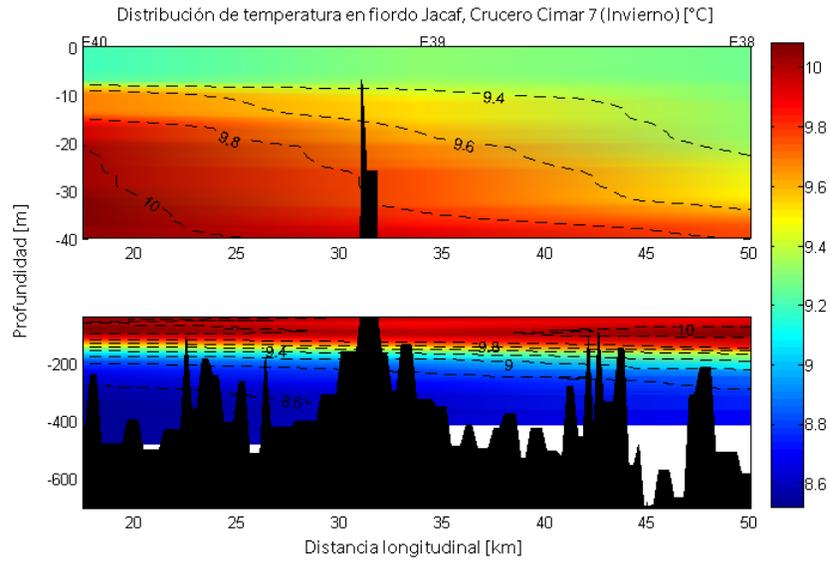


Figura 4.3: Distribución longitudinal de la temperatura en canal Jacaf periodo de Invierno, basados en mediciones realizadas durante el crucero Cimar-Fiordos 7

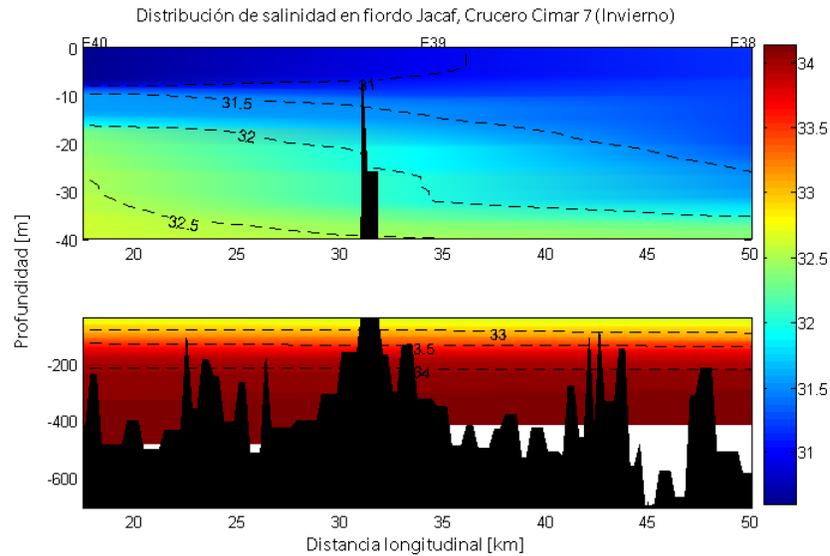


Figura 4.4: Distribución longitudinal de la salinidad en canal Jacaf periodo de Invierno, basados en mediciones realizadas durante el crucero Cimar-Fiordos 7

Bajo la capa superficial hasta los 100 metros la temperatura aumenta de manera paulatina, alcanzando los 9.93°C . Sin embargo, bajo los cien metros la temperatura

disminuye hasta los 8.66°C , mostrando una distribución homogénea en la sección longitudinal del canal.

La distribución de salinidad en el canal muestra una columna de agua altamente estratificada, cuyas salinidades mínimas se encuentran entre las estaciones más cercanas a los ríos Aldunate y Rauco, ubicados en las latitudes $44^{\circ}18'$ y $44^{\circ}23'$ respectivamente. Los valores más bajos corresponden a 31.21 y 30.92, mientras que las mayores salinidades se localizan en las capas más profundas, próximo a los 180 metros con salinidad de 33.80 . Se podría inferir que el umbral más profundo restringe la extensión de una masa de agua menos salina proveniente de la zona proximal del canal Jacaf.

Sección canal Puyuhuapi

Los perfiles longitudinales de temperatura y salinidad en los primeros 10 metros durante el invierno presentaron cierta semejanza. Las temperaturas y salinidades más bajas se observaron hacia la zona del seno Ventisquero. Entre las estaciones E46 y E47 la temperatura fue de 12.60°C , mientras que en sus alrededores las temperaturas oscilan entre los 11.82°C y 12.22°C . Bajo los 40 metros de profundidad las temperaturas disminuyen paulatinamente, llegando hasta los 9.20°C a 200 metros de profundidad.

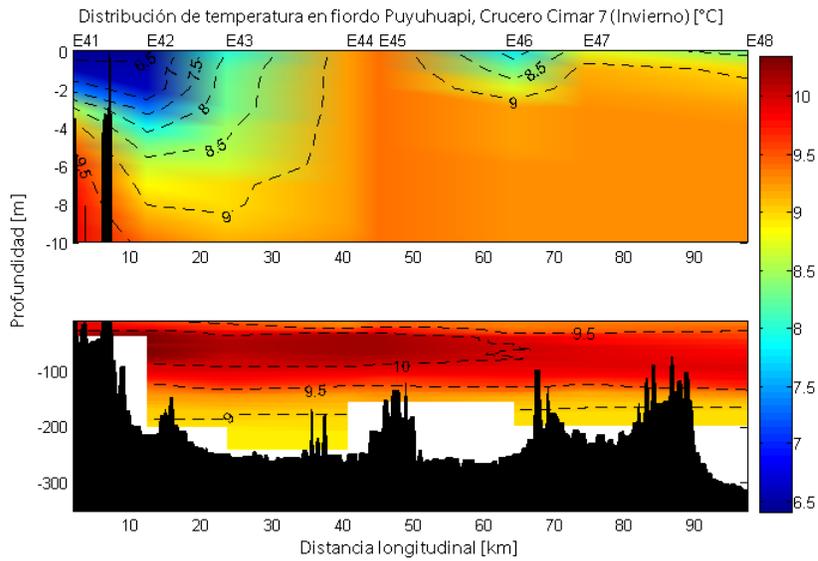


Figura 4.5: Distribución longitudinal de la temperatura en canal Puyuhuapi periodo Invierno

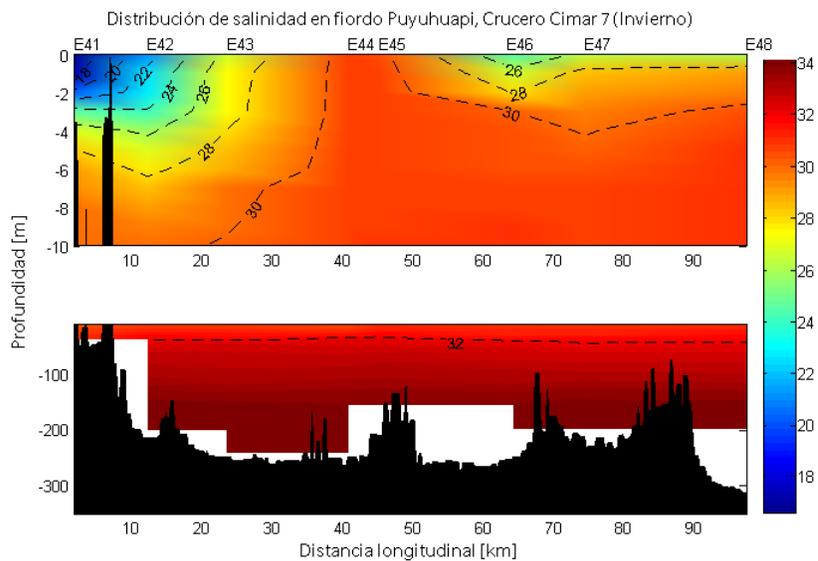


Figura 4.6: Distribución longitudinal de la salinidad en canal Puyuhuapi periodo Invierno

El canal Puyuhuapi exhibe una fuerte estratificación en torno al seno Ventisquero que alcanza los últimos 30 kilómetros, en donde la capa superficial indica

salinidades de 19.78 aumentando hasta 27.71 . En los alrededores del río Cisnes la salinidad vuelve a mostrar un valor cercano a los 24.54. Bajo los 50 metros la salinidad se torna estable y adquiere el valor más alto registrado de 32.47.

4.1.3 Crucero CIMAR-Fiordos 7, Primavera

Sección Canal Jacaf

Las temperaturas en el canal Jacaf durante la época de primavera se muestran uniformes a lo largo del canal, alcanzando los máximos valores en las capas superficiales ($> 11^{\circ}\text{C}$) mientras que los valores más bajos se observaron cerca en el fondo, aproximadamente 8.67°C .

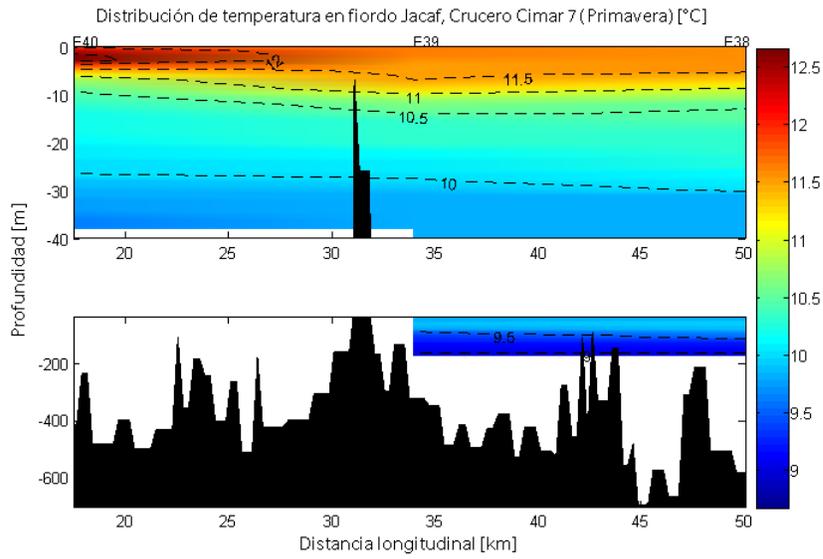


Figura 4.7: Distribución longitudinal de la temperatura en canal Jacaf periodo Primavera

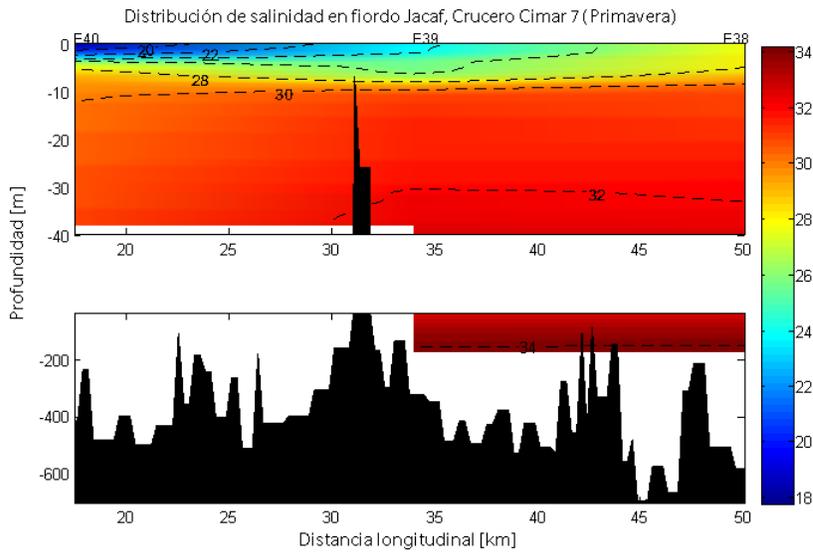


Figura 4.8: Distribución longitudinal de la salinidad en canal Jacaf periodo Primavera

La salinidad vuelve a mostrarse uniformemente estratificada, donde los primeros diez metros la salinidad aumenta desde los 22.22 en la capa más superficial, hasta los 29.67.

Sección Canal Puyuhuapi

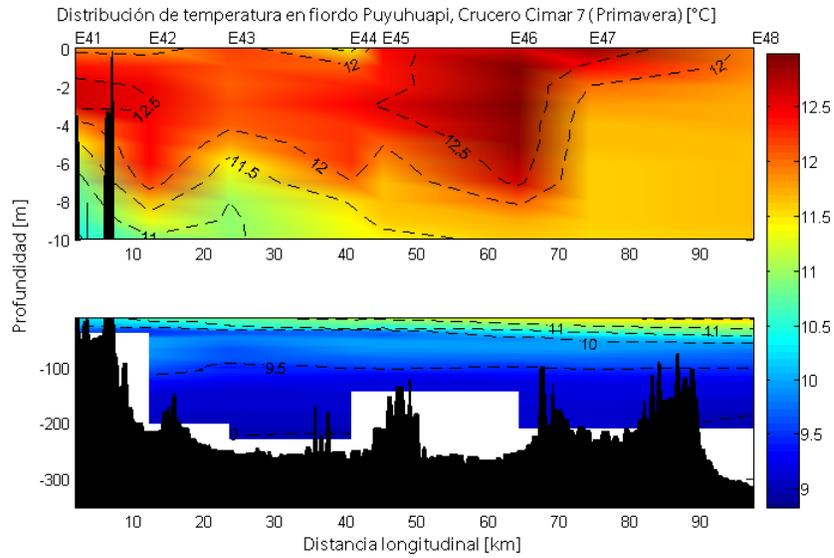


Figura 4.9: Distribución longitudinal de la temperatura en canal Puyuhuapi periodo Primavera

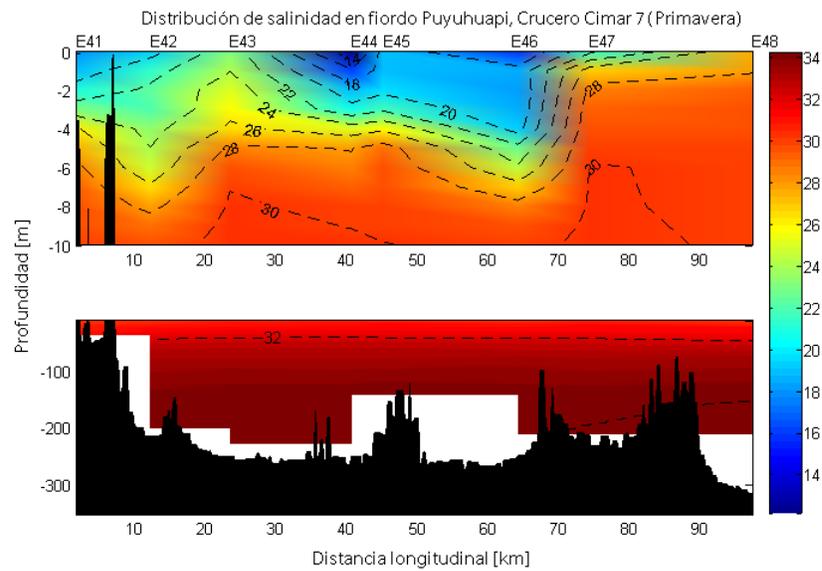


Figura 4.10: Distribución longitudinal de la salinidad en canal Puyuhuapi periodo Primavera

4.1.4 Crucero CIMAR-Fiordos 13, Invierno

Estero Elefantes

La distribución de temperatura y salinidad durante el crucero de invierno (Julio de 2007) se mostró bastante homogénea con valores de entre 7.66°C y 9.71°C los mínimos en la cabeza del golfo Elefantes y los máximos se ubicaron en el extremo norte de la sección, a 40 metros de profundidad.

La distribución de salinidad durante el mismo periodo presentó una estructura muy similar a la estructura de distribución de la temperatura , con valores entre 22.94 a 30.75. Los valores más bajos correspondieron a las estaciones localizadas en la cabeza del golfo Elefantes y los mayores valores en el extremo norte de la sección

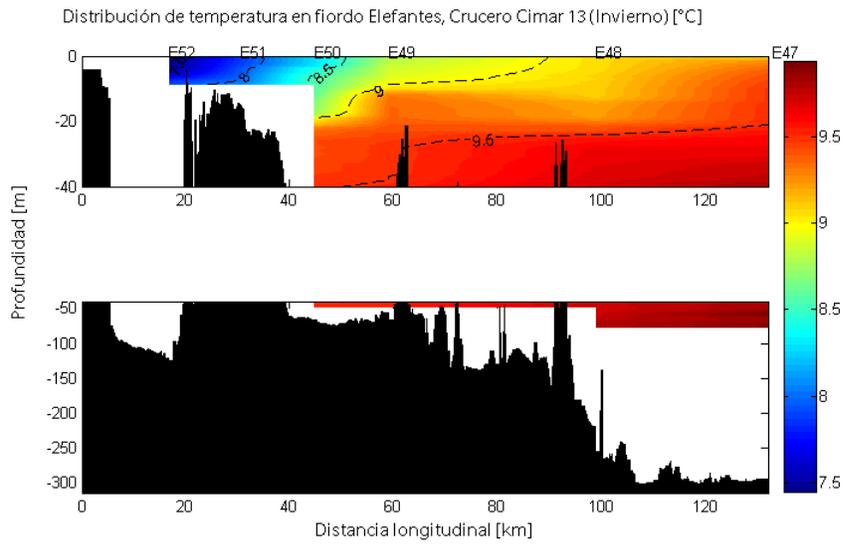


Figura 4.11: Temperatura estero Elefantes Invierno

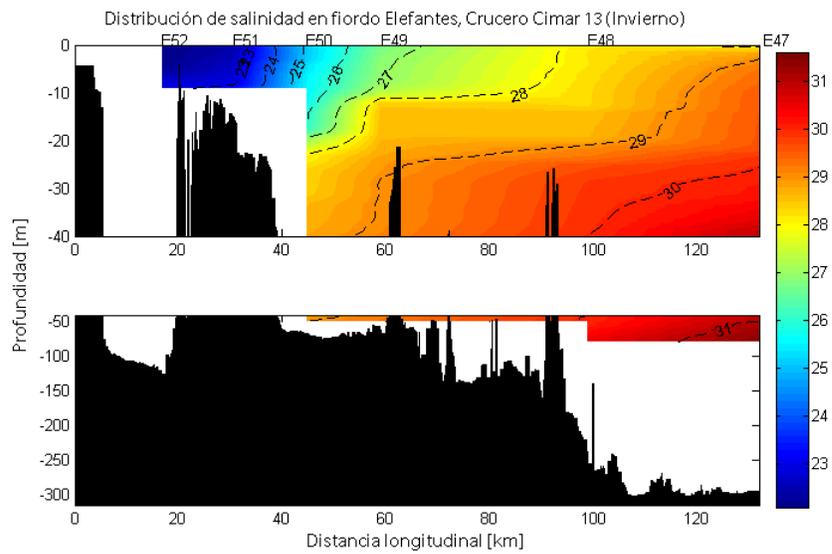


Figura 4.12: Salinidad estero Elefantes Invierno

4.1.5 Crucero CIMAR-Fiordos 13, Primavera

Estero Elefantes

En el periodo de primavera (Noviembre 2007), el estero Elefantes muestra una estratificación vertical de la temperatura, localizando los registros más bajos ($< 9.2^{\circ}\text{C}$), aumentando en dirección al canal Costa. Cabe señalar que en el intervalo de las estaciones E49 y E48 la temperatura es bastante homogénea.

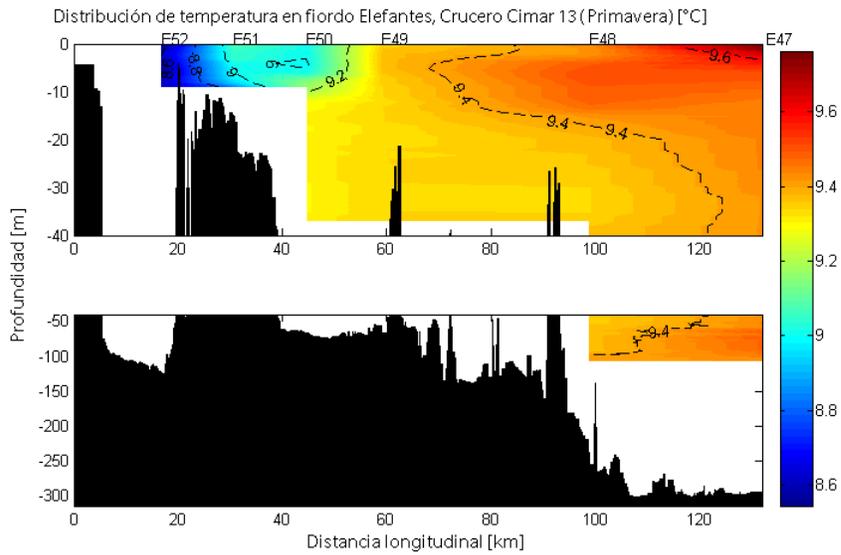


Figura 4.13: Temperatura estero Elefantes Primavera

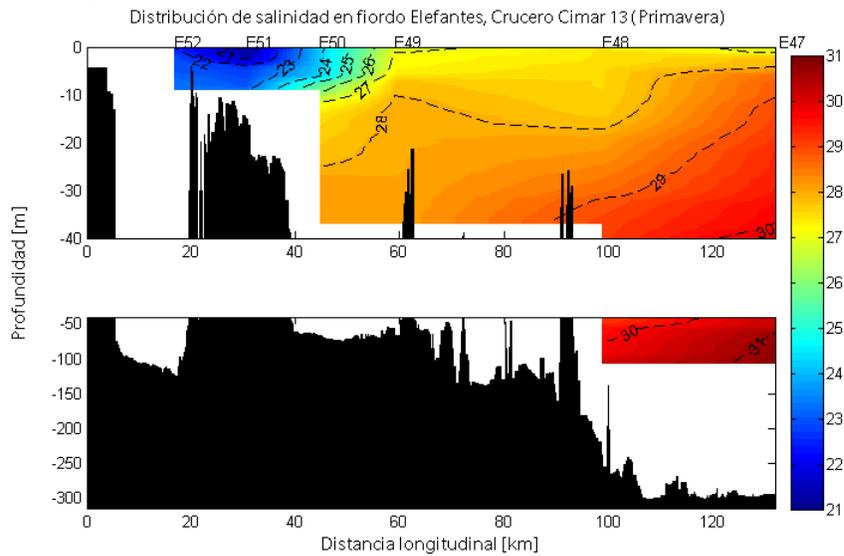


Figura 4.14: Salinidad estero Elefantes Primavera

En tanto, el estero muestra una concentración de bajas salinidades en la zona sur, presumiblemente debido a las descargas provenientes de la Laguna San Rafael, río Témpanos y río Gualas. Esta concentración cercana a los últimos 20 kilómetros , cuyos valores se encuentran entre los 22.33y 24.36. La salinidad aumenta hacia el

norte, incrementando hasta valores de 30.43 en las profundidades mayores.

4.1.6 Campaña OFC, Invierno

Fiordo Aysén

En la época de invierno (Julio 2010) el fiordo Aysén muestra un aumento gradual de temperatura conforme al aumento de profundidad. En los primeros 5 metros de profundidad la temperatura varía entre los 7.92°C y 9.02°C, posterior a esta capa las temperaturas alcanzan los 10.24°C. De acuerdo a Sievers [[Sievers, 1994](#)], las temperaturas más bajas se encuentran en la cabeza del fiordo, y aumenta en dirección a la boca.

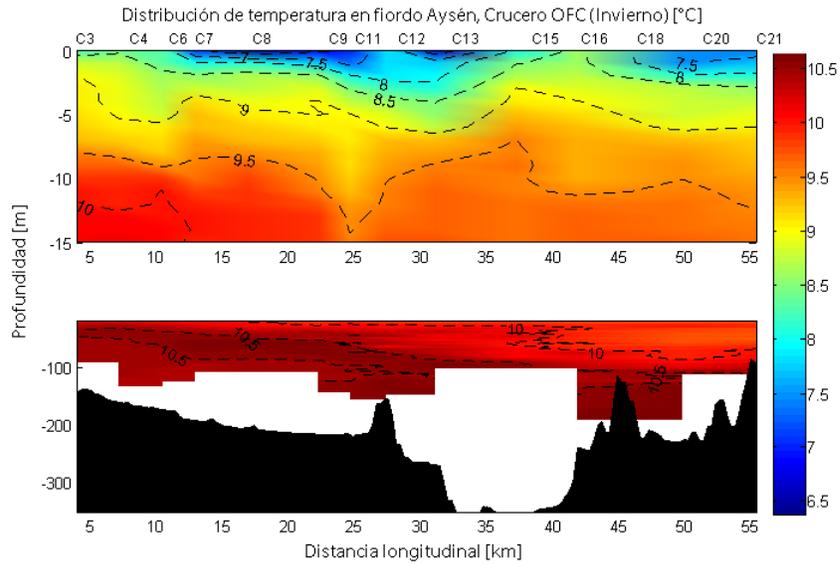


Figura 4.15: Temperatura Aysén Invierno

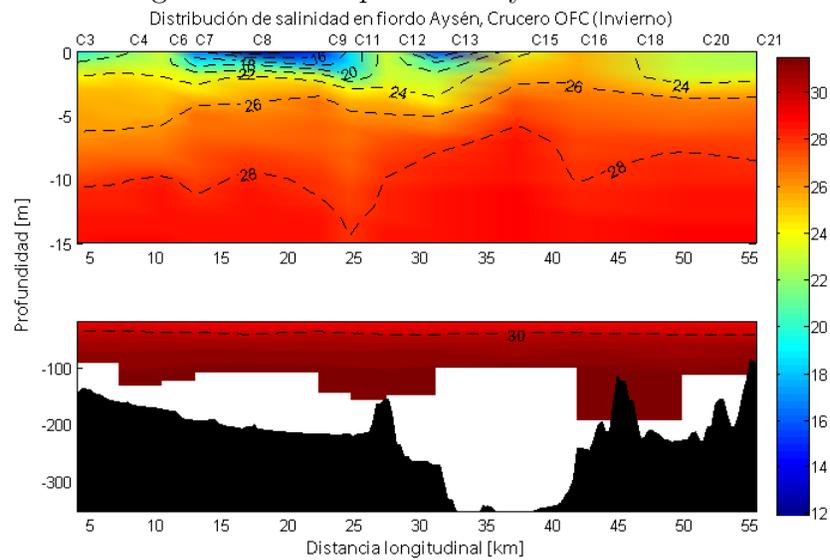


Figura 4.16: Salinidad Aysén Invierno

La salinidad en los primeros 4 metros de profundidad tiene una estructura poco homogénea, concentrando bajas salinidades en torno a las estaciones C6 y C13. Bajo los cinco metros de profundidad, la salinidad aumenta gradualmente alcanzando valores superiores a 26.30.

4.1.7 Campaña OFC, Primavera

Fiordo Aysén

Producto al alto aporte de agua dulce proveniente del río Aysén, surge un gradiente de temperatura en torno a las estaciones ubicadas en la cabeza del fiordo. Se puede distinguir una estructura de dos capas, bajo los 20 metros la temperatura aumenta horizontalmente adquiriendo valores de 9.33 y 10.45°C. A diferencia con la época de invierno, las temperaturas aumentan en dirección hacia la cabeza del fiordo.

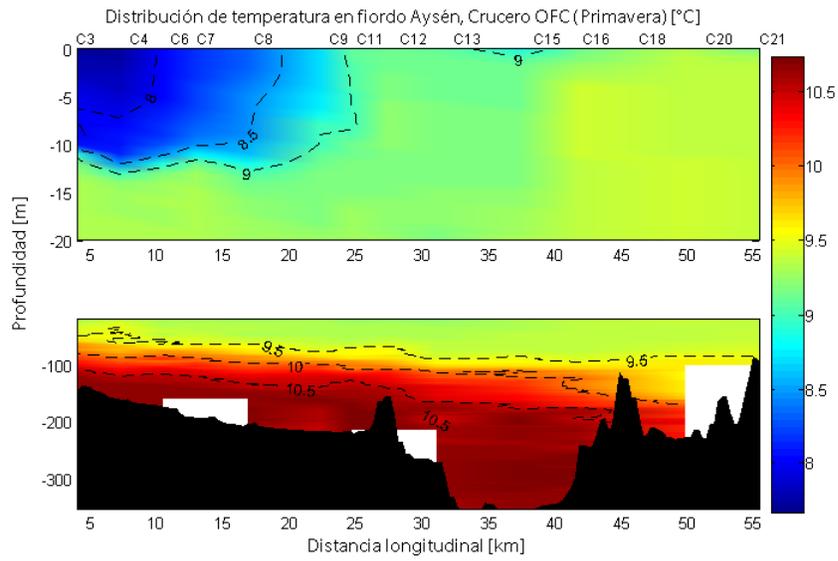


Figura 4.17: Temperatura Aysén Primavera

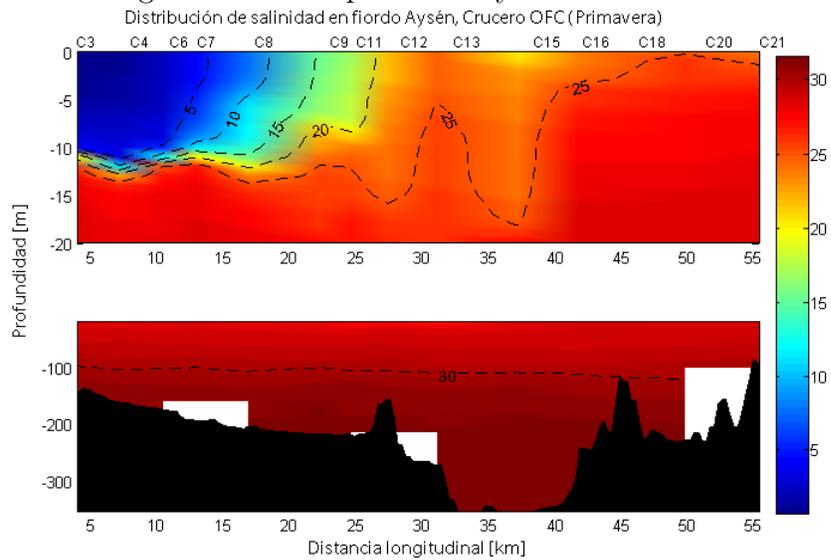


Figura 4.18: Salinidad Aysén Primavera

De manera similar, la salinidad replica la estructura de temperatura mostrando un fuerte gradiente salino, una estructura de dos capas y la gran influencia de la descarga del río Aysén, con valores menores a 5.

4.2 Balances de masa y sal

En esta sección se exponen los resultados obtenidos de los balances de masa y salinidad entregados por las relaciones de Knudsen. Las estaciones están ordenadas desde la cabeza hacia la boca del fiordo. Los tiempos de recambio del agua dulce se estimaron a partir del flujo de salida y el volúmen de agua dulce presente en la capa superior.

4.2.1 Canal Jacaf

Periodo Invierno

Caudal medio del río Aldunate mes de julio 2001: sin registro ¹

Caudal medio del río Rauco mes de julio 2001: $14.5[\frac{m^3}{s}]$

Caudal medio del río Ventisquero mes de julio 2001: $31.3[\frac{m^3}{s}]$

$Q_R = 45.8[\frac{m^3}{s}]$

Estación	Ancho [m]	h_1 [m]	$\langle S_1 \rangle$	$\langle S_2 \rangle$	Q_1 [$m^3 s^{-1}$]	Q_2 [$m^3 s^{-1}$]	v_1 [cms^{-1}]	v_2 [cms^{-1}]
E40	4252	7	31.73	33.79	752.86	737.93	2.38	2.53
E39	7645	9	31.71	33.81	737.93	692.13	1.07	1.01
E38	3176	11	31.60	33.76	718.13	672.32	2.06	1.92

Tabla 4.1: Balance de volúmen y salinidad en canal Jacaf en invierno

Utilizando la ecuación 3.3 descrita en la metodología, el tiempo de recambio de agua dulce en el fiordo Jacaf durante el periodo de invierno fue de

$$\tau_F \approx 3 \text{ días}$$

y el tiempo de recambio del agua salobre, de acuerdo a la ecuación 3.9, es de

¹No hay registro del caudal durante el periodo de invierno

$$\tau_F \approx 38 \text{ días}$$

Periodo Primavera

Caudal medio del río Aldunate mes de noviembre 2001: $50[\frac{m^3}{s}]$

Caudal medio del río Rauco mes de noviembre 2001: $21.9[\frac{m^3}{s}]$

Caudal medio del río Ventisquero mes de noviembre 2001: $14.5[\frac{m^3}{s}]$

$$Q_R = 86.4[\frac{m^3}{s}]$$

Estación	Ancho [m]	h_1 [m]	$\langle S_1 \rangle$	$\langle S_2 \rangle$	Q_1 [$m^3 s^{-1}$]	Q_2 [$m^3 s^{-1}$]	v_1 [cms^{-1}]	v_2 [cms^{-1}]
E40	4252	18	30.80	33.71	1000.05	913.65	1.31	1.19
E39	7645	22	24.90	33.72	330.37	243.97	0.20	0.15
E38	3176	31	28.92	33.19	672.34	585.94	0.68	0.60

Tabla 4.2: Balance de volúmen y salinidad en canal Jacaf en primavera

El tiempo de recambio de agua dulce durante el periodo de primavera del canal Jacaf es

$$\tau_F \approx 14 \text{ días}$$

El tiempo de recambio de la capa salobre fue de

$$\tau_F \approx 108 \text{ días}$$

4.2.2 Canal Puyuhuapi

Periodo Invierno

Caudal medio del río Cisnes mes de julio 2001: $220[\frac{m^3}{s}]$

Caudal medio del río Ventisquero mes de julio 2001: $31.3[\frac{m^3}{s}]$

$$Q_R = 251.3[\frac{m^3}{s}]$$

Estación	Ancho [m]	h_1 [m]	$\langle S_1 \rangle$	$\langle S_2 \rangle$	Q_1 [m^3s^{-1}]	Q_2 [m^3s^{-1}]	v_1 [cms^{-1}]	v_2 [cms^{-1}]
E41	1110	6	29.29	30.48	6215.50	6466.801	97.10	93.33
E42	4701	11	26.14	33.02	953.65	1204.957	2.33	1.84
E43	3732	13	27.72	33.09	1297.60	1548.908	3.19	2.67
E44	14922	34	30.71	33.34	2933.25	3184.556	0.63	0.58
E45	14922	26	31.15	33.08	4061.82	4313.129	1.11	1.05
E46	7529	7	29.60	33.16	2088.082	2339.38	4.44	3.96
E47	4676	11	29.67	32.92	2296.715	2548.01	4.95	4.47
E48	4517	6	29.37	33.29	2135.348	1884.04	7.88	6.95

Tabla 4.3: Balance de volúmen y salinidad en canal Puyuhuapi en invierno

El tiempo de recambio de agua dulce durante el invierno del canal Puyuhuapi es

$$\tau_F \approx 4.1 \text{ días}$$

y el tiempo de recambio de la capa salobre es

$$\tau_F \approx 35 \text{ días}$$

Periodo Primavera

Caudal medio del río Cisnes mes de noviembre 2001: $311[\frac{m^3}{s}]$

Caudal medio del río Ventisquero mes de noviembre 2001: $14.5[\frac{m^3}{s}]$

$$Q_R = 325.5[\frac{m^3}{s}]$$

Estación	Ancho [m]	h_1 [m]	$\langle S_1 \rangle$	$\langle S_2 \rangle$	Q_1 [$m^3 s^{-1}$]	Q_2 [$m^3 s^{-1}$]	v_1 [cms^{-1}]	v_2 [cms^{-1}]
E41	1110	5	22.34	30.29	1240.17	914.67	22.35	16.48
E42	4701	11	21.67	32.85	956.41	630.91	1.85	1.22
E43	3732	13	25.97	33.17	1499.56	1174.06	3.09	2.42
E44	14922	34	23.07	33.32	1058.11	732.61	0.21	0.14
E45	14922	26	25.61	32.78	1488.13	1162.63	0.38	0.30
E46	7529	7	23.44	33.27	1101.66	776.16	2.09	1.47
E47	4676	11	28.55	33.14	2350.12	2024.62	4.57	3.94
E48	4517	6	29.10	33.40	2528.30	2202.80	9.33	8.13

Tabla 4.4: Balance de volúmen y salinidad en canal Puyuhuapi en primavera

El tiempo de recambio de agua dulce en el periodo de primavera en el fiordo Puyuhuapi es

$$\tau_F \approx 3.7 \text{ días}$$

y el tiempo de recambio de la capa superficial fue de

$$\tau_F \approx 29 \text{ días}$$

4.2.3 Fiordo Aysén

Periodo Invierno

Caudal medio del río Aysén en mes de Julio 2009: $465[\frac{m^3}{s}]$

Estación	Ancho [m]	h_1 [m]	$\langle S_1 \rangle$	$\langle S_2 \rangle$	Q_1 [$m^3 s^{-1}$]	Q_2 [$m^3 s^{-1}$]	v_1 [cms^{-1}]	v_2 [cms^{-1}]
C3	2885	12	25.32	30.20	2874.60	2409.60	8.30	6.96
C4	2070	17	26.50	30.63	3448.00	2983.00	9.80	8.48
C6	3563	14	26.15	30.61	3191.95	2726.95	6.40	5.47
C7	4171	14	25.51	30.49	2847.15	2382.15	4.88	4.08
C8	4142	13	25.25	30.35	2768.31	2303.31	5.14	4.28
C9	4076	14	25.41	30.63	2726.38	2261.38	4.78	3.96
C11	5334	20	26.08	30.77	3050.78	2585.78	2.86	2.42
C12	6856	23	27.26	30.97	3888.18	3423.18	2.47	2.17
C13	4608	11	24.61	30.60	2376.16	1911.16	4.69	3.77
C15	2743	11	27.04	30.23	4399.94	3934.94	14.58	13.04
C16	2325	31	28.16	31.09	4945.90	4480.90	6.86	6.22
C18	2678	14	26.57	30.79	3391.83	2926.83	9.05	7.81
C20	3062	10	25.75	30.35	3069.98	2604.98	10.03	8.51
C21	3526	31	27.84	31.06	4482.30	4017.30	4.10	3.68

Tabla 4.5: Balance de volúmen y salinidad en fiordo Aysén en invierno

El tiempo de recambio de agua dulce durante el periodo de invierno del fiordo Aysén es

$$\tau_F \approx 1.4 \text{ días}$$

y el tiempo de recambio durante invierno fue de

$$\tau_F \approx 14 \text{ días}$$

Periodo Primavera

Caudal medio del río Aysén mes de noviembre 2009: $528[\frac{m^3}{s}]$

Estación	Ancho [m]	h_1 [m]	$\langle S_1 \rangle$	$\langle S_2 \rangle$	Q_1 [$m^3 s^{-1}$]	Q_2 [$m^3 s^{-1}$]	v_1 [cms^{-1}]	v_2 [cms^{-1}]
C3	2885	10.5	1.10	14.50	571.34	43.34	1.89	0.14
C4	2070	10	1.87	14.80	604.36	76.36	2.92	0.37
C6	3563	10.5	2.50	14.50	638.00	110.00	1.71	0.29
C7	4171	10.5	5.15	16.20	774.08	246.08	1.77	0.56
C8	4142	11	10.30	19.40	1125.62	597.62	2.47	1.31
C9	4076	13.5	10.80	19.50	1183.44	655.44	2.15	1.19
C11	5334	10.5	10.80	19.50	1183.44	655.44	2.11	1.17
C12	6856	11	13.40	21.80	1370.28	842.28	1.82	1.12
C13	4608	31	15.70	24.50	1470.00	942.00	1.03	0.66
C15	2743	13	14.80	24.90	1301.70	773.70	3.65	2.17
C16	2325	18	15.10	22.60	1591.04	1063.04	3.80	2.54
C18	2678	10	17.30	22.70	2219.55	1691.55	8.29	6.32
C20	3062	4.5	15.90	25.40	1411.70	883.70	10.25	6.41
C21	3526	11	13.30	22.60	1283.09	755.09	3.31	1.95

Tabla 4.6: Balance de volúmen y salinidad en fiordo Aysén en primavera

El tiempo de recambio del agua dulce durante el periodo de primavera del fiordo Aysén es

$$\tau_F \approx 14.5 \text{ días}$$

mientras que el tiempo de recambio de la capa salobre fue de

$$\tau_F \approx 35 \text{ días}$$

4.3 Estimación de los flujos de volúmen, método de control hidráulico

Los tiempos de recambio de la capa salobre suponiendo control hidráulico de un flujo de agua dulce crítico y el volúmen de la capa superficial fueron los siguientes

4.3.1 Canal Jacaf

Periodo Invierno

El flujo de agua superficial tiene un caudal medio (de agua salobre) de $13981[m^3s^{-1}]$ y una velocidad de $49[cms^{-1}]$. Evaluando estos valores además de las variables descritas en las ecuaciones 3.7 y 3.8 se estima un tiempo de recambio de las aguas superficiales de

$$\tau_F \approx 2 \text{ días}$$

Periodo Primavera

El flujo de agua superficial tiene un caudal medio de $61805[m^3s^{-1}]$ y una velocidad de $84[cms^{-1}]$. Usando estos valores se estima un tiempo de recambio de las aguas superficiales de

$$\tau_F \approx 1.5 \text{ días}$$

4.3.2 Canal Puyuhuapi

Periodo Invierno

El flujo saliente fue estimado en $40964[m^3s^{-1}]$ y posee una velocidad de $64.7[cm s^{-1}]$

$$t_F \approx 2.4 \text{ días}$$

Periodo Primavera

En este periodo, el flujo de salida fue estimado en $21159[m^3s^{-1}]$ con una velocidad $59[cm s^{-1}]$

$$\tau_F \approx 2.2 \text{ días}$$

4.3.3 Fiordo Aysén

Periodo Invierno

En este periodo, el flujo de salida fue estimado en $41765[m^3s^{-1}]$ con una velocidad $70[cm s^{-1}]$

$$\tau_F \approx 1.7 \text{ días}$$

Periodo Primavera

En este periodo, el flujo de salida fue estimado en $26871.86[m^3s^{-1}]$ con una velocidad $58.62[cm s^{-1}]$

$$\tau_F \approx 1.8 \text{ días}$$

4.3.4 Fiordo Cupquelán

Periodo Primavera

En este periodo, el flujo de salida fue estimado en $15355[m^3s^{-1}]$ con una velocidad $51[cms^{-1}]$

$$\tau_F \approx 0.6 \text{ día}$$

4.3.5 Estero Elefantes

Periodo Invierno

En este periodo, el flujo de salida fue estimado en $33227[m^3s^{-1}]$ con una velocidad $50[cms^{-1}]$

$$\tau_F \approx 1.2 \text{ días}$$

Periodo Primavera

En este periodo, el flujo de salida fue estimado en $55776[m^3s^{-1}]$ con una velocidad $63[cms^{-1}]$

$$t_F \approx 0.9 \text{ día}$$

Capítulo 5

Discusión

5.1 Aspectos hidrográficos

Producto de las variaciones anuales de la radiación solar en las latitudes intermedias y la variabilidad en los aportes de aguas dulce, como la precipitación y la descarga de los ríos, la temperatura y salinidad superficial varía significativamente a lo largo de los periodos de invierno y primavera. Sin embargo, los fiordos analizados presentaron una alta estratificación en densidad durante todo el año. Esta se caracteriza por una región superficial donde la densidad varía rápidamente con respecto a la profundidad. El espesor de la capa salobre en el fiordo Jacaf presentó una significativa variación entre la época de invierno y primavera, durante invierno fue de aproximadamente 9 metros y en primavera aumentó hasta los 24 metros de profundidad. En el canal Puyuhuapi el espesor fue aproximadamente constante durante los dos periodos (~ 14 metros). En los restantes fiordos la variación de la profundidad de esta capa no fue muy notoria, sin embargo las capas salobres presentaron su máximo espesor durante la época de invierno.

5.2 Tiempos de recambio de la capa superior

5.2.1 Método de Knudsen

De acuerdo a las técnicas y metodología mencionadas, se estimaron los balances de agua y sal para las épocas de invierno y primavera de los fiordos Jacaf, Puyuhuapi y Aysén, en donde se obtuvieron los caudales de entrada (Q_2) y salida del sistema (Q_1) (ver tablas 4.1, 4.2, 4.3, 4.2, 4.5 y 4.6) de acuerdo a las ecuaciones 3.3 y 3.4. Con esos resultados, se determinó el tiempo de recambio de las aguas superficiales. En tanto los tiempos de recambio del agua dulce en estos fiordos estimados a partir del método de Knudsen fueron menores a una semana, a excepción de Jacaf y Aysén en los cuales el recambio de las aguas en la capa superior tarda aproximadamente dos semanas, durante los periodos de primavera. No hay una relación directa entre el espesor de la capa salobre y los tiempos de recambio, con excepción del fiordo Jacaf, el cual presenta una relación directa del aumento de la capa salobre y el aumento del tiempo de recambio. Sin embargo el fiordo Puyuhuapi muestra una altura de capa uniforme a lo largo del año el tiempo de recambio disminuye durante el periodo de primavera

.

El balance de Knudsen permitió estimar el flujo saliente superficial de los tres primeros fiordos, Jacaf, Puyuhuapi y Aysén. Durante invierno el flujo estimado en Jacaf varió desde 718 y 753 [$m^3 s^{-1}$], en Puyuhuapi fue de 954 [$m^3 s^{-1}$] y 4062 [$m^3 s^{-1}$] y finalmente en Aysén 2376 y 4936 [$m^3 s^{-1}$].

En primavera, los flujos de salida en Jacaf variaron entre 330 y 1000 [$m^3 s^{-1}$]; en Puyuhuapi entre 956 y 2528 [$m^3 s^{-1}$] y en Aysén 571 y 2220 [$m^3 s^{-1}$].

Podemos deducir que los mayores caudales de salida corresponden al fiordo Puyuhuapi durante la época de primavera, mientras que en Jacaf y Aysén los caudales máximos

se encontraron en la temporada de invierno.

La variabilidad del caudal de los ríos utilizados en los balances de Knudsen (Ventisquero y Aysén en particular) están fuertemente influenciados por el derretimiento de los hielos. En el caso de los fiordos Jacaf y Puyuhuapi el río Ventisquero presenta un régimen glacial dado su proximidad a los glaciares, mientras que el río Aysén cuenta con las descargas de agua dulce más grandes de los fiordos estudiados [Calvete, 2010].

Conforme a los tiempos de recambio obtenidos, puede inferirse que los tiempos de recambio son menores en la temporada de invierno que en la época de primavera. Esto podría explicarse ya que el aporte de agua dulce proveniente de la precipitación es menos relevante que el aporte de agua dulce de los ríos. Además, los registros de caudales de los ríos involucrados fue muy limitado, por lo que se pudiera estar subestimando el flujo de volumen real del aporte de agua dulce.

Fiordo	u_1 [cms ⁻¹]	Q_R [m ³ s ⁻¹]	Q_{salida} [m ³ s ⁻¹]	Volúmen [m ³]	τ_F agua dulce [días]	τ_F agua salobre [días]
Jacaf-Invierno	0.7	45.8	718	2.53×10^8	3	38
Jacaf-Primavera	2	86.4	672	8.31×10^8	14	108
Puyuhuapi-Invierno	9.3	251.3	2135	3.19×10^8	4.1	35
Puyuhuapi-Primavera	7.8	325.5	2528	4.91×10^8	3.7	29
Aysén-Invierno	3.3	465	4482	5.40×10^8	1.4	14
Aysén-Primavera	4.1	528	1283	7.71×10^8	15	35

Tabla 5.1: Resumen del intercambio de flujos y tiempos de recambio de agua dulce, método de Knudsen

5.2.2 Método de control hidráulico

Para los fiordos más australes los tiempos de recambio de agua salobre calculados con el método de control hidráulico fueron considerablemente menores. Durante la primavera Jacaf tiene un tiempo de recambio de 1.03 días, mientras que Cupquelán es de 0.7 día, y estero Elefantes de 1.5 días. En invierno las capas superiores de agua salobre de los fiordos Jacaf y Elefantes se recambian cada 3.3 y 1.4 días respectivamente.

Fiordo	$u_1 [cms^{-1}]$	$Q_{salida} [m^3s^{-1}]$	τ_F [días]
Jacaf-Invierno	48.9	13980.5	1.8
Jacaf-Primavera	84.6	61805.1	1.5
Puyuhuapi-Invierno	64.7	40963.7	2.4
Puyuhuapi-Primavera	58.5	21159.3	2.2
Aysén-Invierno	69.6	41765.2	1.7
Aysén-Primavera	58.6	26871.8	1.8
Elefantes-Invierno	50.2	33226.7	1.2
Elefantes-Primavera	63.2	55776.4	0.9
Cupquelán-Primavera	51.1	15354.9	0.6

Tabla 5.2: Resumen del intercambio de flujos y tiempos de recambio, método de control hidráulico

De los resultados obtenidos descritos en las tablas anteriores, podemos distinguir que los tiempos de recambio del agua dulce estimados usando el método de Knudsen son levemente mayores a los tiempos de recambio con el método de control hidráulico. La forma que se utilizó para corroborar estos valores fue calculando la distancia que recorre la onda superficial con la velocidad del flujo y el tiempo estimado con cada técnica. Se pudo comprobar que las distancias fueron muy similares a la extensión real comprendida entre la primera y última estación de CTD¹.

En particular, de acuerdo con el trabajo de [Guzmán, 2002] el fiordo Aysén se caracteriza por una circulación lenta, con una capa superficial menor a los 10 metros y velocidades del orden de los 0.03 y 0.05 ms^{-1} . Estas características generan tiempos de residencia de las aguas más profundas mayores a 500 días [Guzmán, 2002]. Más

¹Esta verificación también se efectuó para la metodología de Knudsen con resultados similares

aun, otros autores [Salinas, 2004] sugieren que los tiempos de residencia del orden de 10 meses a la entrada del fiordo Aysén.

5.2.3 Comparación entre los métodos y otros resultados de investigaciones efectuadas en otros puntos geográficos.

Ambas metodologías tienen en común que requieren mediciones de salinidad de los fiordos y que la estratificación sea muy marcada para entregar resultados razonables. De ello depende de la calidad de las mediciones realizadas en los fiordos. Puede verse de las figuras 4.15 y 4.16 que para el fiordo Aysén contó con mayor información que para el resto de los fiordos, por ende posee una mayor claridad en manifestar una fuerte estratificación, en particular en el periodo de primavera.

El primer método utilizado fue el balance de agua y sal definido mediante las ecuaciones de Knudsen. Este método resulta conveniente para los casos de estuarios y fiordos altamente estratificados. Sin embargo, este método suele subestimar el tiempo de recambio al asumir que las aguas proviente de los ríos y las aguas oceánicas se mezclan completamente, lo que no necesariamente sucede. Esta metodología, a diferencia del control hidráulico en la zona de contricción, puede aplicarse en diferentes secciones del fiordo, como también a lo largo del fiordo en su totalidad. Una ventaja de esta metodología es que utiliza los caudales medios reales de los ríos que desembocan en los fiordos, por una parte, esto implicaría que los resultados son más confiables. Sin embargo, como se vió en este trabajo, la información de los caudales de los ríos en esta zona es muy limitada, lo cual limita el uso del método.

En tanto, el método de control hidráulico supone que existe un flujo crítico .

Esto podría sobreestimar el flujo de salida, por lo que entrega velocidades críticas muy grandes ($\geq 50 \text{ cm s}^{-1}$, en promedio), lo que no es común de acuerdo con observaciones directas de corrientes. De esta forma el cálculo de Q_1 resulta en un flujo sobrevalorado.

Otro inconveniente es que no siempre se cuenta con mediciones de CTD en la zona de la contricción, por lo que las mediciones de salinidad y estratificación pudieran no ser representativas, tomando en cuenta que la capa salobre es muy delgada. A pesar de ello, la metodología de control hidráulico proporciona una alternativa para la estimar de manera preliminar de tiempos de recambio en situaciones en las que no se cuente con información de caudales de ríos y sabiendo que es un límite inferior.

La comparación directa entre los tiempos de recambio de los fiordos y canales chilenos con otros fiordos de latitudes intermedias-altas no es directa, principalmente porque presentan estructuras geomorfológicas distintas, algunos muy someros y otros extremadamente profundos como lo son los fiordos noruegos, cuyas profundidades pueden superar fácilmente los mil metros ([Farmer y Freeland, 1983] y [Stigebrandt, 1996]). Es también importante señalar que no hay clara unanimidad con respecto a las mismas definiciones de los términos que expresan las escalas de tiempo de los procesos de recambio o renovación de los estuarios ([Monsen, 2002] y [Sheldon, 2006]). En Chile se han realizado estimaciones de los tiempos de residencia y de los flujos de agua y de nutrientes en el fiordo Reloncaví y Aysén, con metodologías de modelos de cajas. En el fiordo Reloncaví se determinó que posee un tiempo de recambio en la capa superficial de 1.3 días (Castro), mientras que en Aysén los estudios de Guzmán [Guzmán, 2002] y de Calvete [Calvete, 2010] han estimado tiempos de renovación de 18 meses para la renovación del sistema completo en invierno y 22 meses en primavera, contrastando el resultado de [Salinas, 2004] que definió un tiempo de 12 meses. Cabe mencionar que el tiempo de residencia calculado por Salinas corresponde al sector sur del seno Aysén, que incluye otros dos fiordos,

Cupquellán y Quitralco, y los canales Costa, Elefantes y Errázuriz [Guzmán, 2002]. En tanto, Calvete estimó mediante la técnica de Knudsen un tiempo de recambio de agua dulce presente en la capa salobre de 3.5 días. En el reciente trabajo de Henríquez [Henríquez, 2011] estima que durante la época de primavera los tiempos de renovación tardan entre 6 y 8 días y en invierno 14 y 23 días, producto a las variaciones de los caudales de los ríos utilizados.

Se encontraron resultados de estimaciones de tiempos de residencia en otros fiordos en Europa y Asia. Arneborg calculó el tiempo de rotación en el fiordo de Gullmar para las aguas que están por sobre la haloclina, cuyo resultado fue de entre 16 y 26 días. En el estuario de Scheldt en Bélgica se estimó un tiempo de residencia de 15 días mediante un modelo de alta resolución de transporte de trazadores. En el estuario de Westerschelde se evaluó un modelo de caja con coeficientes fijos de dispersión, en donde los autores encontraron tiempos de residencia de la capa superior de 50 días en invierno y 70 días en verano. Finalmente en el estuario de Danshuei (Taiwán) estimaron un tiempo de residencia de entre 1 y 2 días mediante experimentos numéricos.

Capítulo 6

Conclusiones

Se estimaron los tiempos de recambio de la capa salobre y en los casos en que fue posible de agua dulce en los fiordos al norte de la undécima región de Chile utilizando dos metodologías. La primera se basa en las relaciones de Knudsen y la segunda asume control hidráulico en el umbral.

1. Es necesario enfatizar que las cifras obtenidas en este trabajo corresponden a estimaciones gruesas, representativas de las condiciones imperantes del entorno y que en ningún caso se propone ofrecer estos resultados como valores definitivos, sino más bien como un intento por evaluar estos parámetros en un área altamente impactada por la industria acuícola y de la cual se dispone de poca información. No obstante aquello, estos números pueden resultar un criterio de utilidad para quienes diseñan y establecen regulaciones medioambientales en los estuarios y fiordos.
2. Los resultados entregados por ambos métodos fueron diferentes, en donde se constata que el método de control hidráulico entregan valores más altos de velocidad del flujo en la capa superficial. Estos valores involucran velocidades

más altas en la boca del fiordo que las típicamente observadas. Mientras que el método de Knudsen podría subestimar el verdadero tiempo de recambio, ya que asume la completa mezcla de agua dulce y el agua oceánica.

3. Los tiempos de recambio de agua salobre mediante el método de Knudsen varió entre los 14 días (Aysén, invierno) y 108 días (Puyuhuapi, primavera), y los tiempos de recambio de agua dulce fueron de entre 1.4 (Aysén, invierno) y 15 días (Aysén, primavera).
4. Los tiempos de recambio utilizando control hidráulico en el umbral fueron menores a una semana en todos los fiordos. En particular el tiempo de recambio del fiordo Cupquelán fue de 14.4 horas (0.6 día) y 2.2 días (Puyuhuapi, invierno).
5. El método de estimación del tiempo de recambio de aguas superficiales a través de la suposición de control hidráulico en la boca provee una alternativa operacional cuando sólo se dispone de algunas mediciones de salinidad y de información batimétrica. Nuestros análisis muestran que los fiordos estudiados no presentan control hidráulico en sus umbrales.
6. Resultaría conveniente realizar un análisis de sensibilidad para los métodos, y decidir si se plantea elaborar un estudio más exhaustivo, cual método es más aceptable dada las condiciones particulares de cada fiordo.
7. Es imperativo mejorar la calidad y cantidad de mediciones de los caudales de los ríos y sus afluentes para mejorar las estimaciones realizadas en este trabajo.

Finalmente se propone extender el estudio para estimar el tiempo de recambio de las aguas más profundas, como también validar los resultados mediante modelación numérica de algunos fiordos estudiados en este trabajo.

Referencias Bibliográficas

- [Armi,1986] Armi L., *The hydraulics of two flowing layers with different densities*, Journal of Fluid Mechanics 1986, Vol. 163 (1986), 27-58
- [Armi,1986] Armi L., *Maximal two layer exchange through contraction with barotropic net flow*, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 164 (1986), 27-51
- [Bell,1996] Bell C.M, De la Cruz R., Suárez M., Townsend M., *The Evolution of the Aysén Basin: An early Cretaceous Epicontinental interior seaway in Southernmost South America* (ISAG 1996, 289-292)
- [Borgel] Borgel R., *Geomorfología de las regiones australes de Chile*, Revista Geográfica, Terra Australis Vol.20, 135-140
- [Calvete, 2010] Calvete C., Sobarzo M., *Quantification of the surface brackish water layer and frontal zones in southern Chilean fjords between Boca del Guafo (43°60') and estero Elefantas (46°30'S)*, Continental Shelf Research, Vol . 31 (2010), 162-171
- [Dolgopolova, 2001] Dolgopolova E.N, Isupova M.V., *Classification of estuaries by hydrodynamic processes*, Water Resources Vol. 37 (2001), No. 3, 268-284
- [Dyer,1999] Dyer K.R., *Estuaries: A Physical Introduction*, 2nd Edition Wiley, New York, 1999, 140pp

- [Farmer y Freeland, 1983] Farmer D.M., Freeland H.J., *The Physical Oceanography of Fjords*, Progress in Oceanography Vol. 12 (1983), 147-220
- [Farreras] Farreras S., *Hidrodinámica de lagunas costeras*, Primera edición electrónica, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior en Ensenada, México
- [Gillibrand] Gillibrand P.A., Inall M.E., *Improving Assimilative Capacity Modelling for Scottish Coastal Waters: I. A Model of Physical Exchange in Scottish Sea Lochs*, Marine Physics Report No. 167, 147-220
- [Glasser, 2006] Glasser N., Jansson K., Mitchell W., Harrison S. *The geomorphology and sedimentology of the Témpanos moraine at Laguna San Rafael, Chile*, Journal of Quaternary Science Vol.21 (2006) No. 6, 629-643
- [Guzmán, 2002] Guzmán D., *Caracterización física y química y masas de agua en los canales australes de Chile entre boca del Guafo y golfo Elefantes (Crucero CIMAR 4 Fiordos)* (2002, 147-220)
- [Guzmán, 2000] Guzmán D., *Caracterización física y química de los canales australes y estimación del tiempo de residencia y balance de sal, agua y nutrientes en el seno Aysén*, Ciencia y Tecnología Marina Vol. 25 (2000) No.2, 45-76
- [Henríquez, 2011] Henríquez J., *Hidrografía y tiempos de renovación de las aguas sobre el nivel del sill del fiordo Aysén*, Tesis de pregrado, Universidad de Concepción
- [Krammerer, 2010] Kammerer W., *Salmon Farming in Chile*(2010, http://oceanservice.noaa.gov/education/kits/estuaries/estuaries02_economy.html)

- [MacDonald, 2003] MacDonald D.G., *Mixing Processes and Hydraulic Control in a Highly Stratified Estuary*(Tesis de Doctorado, MIT-WHOI 2003)
- [Marín, 2008] Marín V.H., Tironi A., Paredes M.A., Campuzano F., *The estuarine system of Aysén fjord*, Perspectives on Integrated Coastal Zone Management in South America (2008)
- [Miller, 1991] Miller R.L., McPherson B.F., *Estimating estuarine flushing and residence times in Charlotte Harbor, Florida, via salt balance and a box model*, Limnology and Oceanography Vol.36 (1991), No.3, 602-612
- [Monsen, 2002] Monsen N.E., Cloern J.E. *A Comment on the Use of Flushing Time, Residence Time, and Age as Transport Time Scales*, Limnology and Oceanography, Vol. 47 (2002), No. 5, 1545-1553
- [NOAA, 2008] NOAA *Why are estuaries important? The economy and environment* (2008 http://oceanservice.noaa.gov/education/kits/estuaries/estuaries02_economy.html)
- [Oberrecht, 2008] Oberrecht K., Estuaries as Nurseries <http://www.oregon.gov/DSL/SSNERR/docs/EFS/EFS08estnurse.pdf?ga=t>
- [Officer, 1976] Officer C.B., *Physical Oceanography of Estuaries (and Associated Coastal Waters)*, John Wiley & Sons (1976) pp 465
- [Palma, 2004] Palma S, Silva N. *Distribution of siphonophores, chaetognaths, euphausiids and oceanographic conditions in the fjords and channels of southern Chile*, Deep Sea Research Vol.II (2004), No.51, 513-535
- [Pizarro et al.] Pizarro O., Rojas W., Ramírez N., Cifuentes U., *Data Report Fiordo Aysén CTD-O* (Universidad de Concepción 2010)

- [Prado, 2008] Prado-Fiedler R., Salcedo J., *Aporte fluvial y pluvial de nitrógeno y fósforo al fiordo Aysén y canales Jacaf-Ventisquero-Puyuhuapi*, Ciencia y Tecnología Marina (2008), 75-95
- [Pritchard, 1967] Pritchard D.W., *What is an estuary, physical viewpoint*, G.H. Lauf (editor): Estuaries. American Association for the Advancement of Science, Washington D.C., Publ. No. 83
- [Rodrigo, 2006] Rodrigo C., *Topografía submarina en canales de la Patagonia Norte*(Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt hasta Cabo de Hornos, Comité Oceanográfico Nacional (2006), Valparaíso, 19-23)
- [Salinas, 2004] Salinas S., Hormazábal S., *Capacidad de transporte de la constricción de Meninea para un flujo de dos capas y el efecto de la corriente de marea*, Ciencia y Tecnología Marina Vol.27 (2004), No.1, 5-15
- [Sepúlveda, 2005] Sepúlveda J., Pantoja S., Hughen K., Lange C., González F., Muñoz P., Rebolledo L., Castro R., Contreras S., Ávila A., Rossel P., Lorca G., Salamanca M., Silva N., *Fluctuations in export productivity over the last century from sediments of a southern Chilean Fjord (44S)*
- [Sheldon, 2006] Sheldon J.E., Alber M., *The Calculation of Estuarine Turnover Times Using Freshwater Fraction and Tidal Prism Models: A Critical Evaluation*, Estuaries and Coasts Vol. 29 (2006) No.1, 133-146
- [Sievers, 1994] Sievers H., Prado R., *Contraste de las características oceanográficas del seno de Aysén Chile, entre invierno y verano (Latitud 45° 20'S)*, Revista de Biología Marina, Vol.22 (1994) No.2, 167-209

- [Silva et al.] N. Silva, D. Guzmán, A. Valdenegro *Balance de agua y sal para el seno de Aysén, Chile*, Escuela de Ciencias del Mar, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso
- [Silva, 1981] N. Silva, H. Sievers and R. Prado *Características oceanográficas y una proposición de circulación para algunos canales australes de Chile entre 41 20'S y 46 40'S*, Revista de Biología Marina, 1995: 207-254
- [Stigebrandt, 1981] Stigebrandt A., *A Mechanism Governing the Estuarine Circulation in Deep, Strongly Stratified Fjords*, Estuarine, Shelf and Coastal Science, 1981: 197-211
- [Stigebrandt, 1996] Stigebrandt A., Molvaer J., *Evidence for Hydraulically Controlled Outflow of Brackish Water from Hølandsfjord, Norway*, American Meteorological Society, 1996: 257-266
- [Stommel] Stommel H., Farmer H., *On the Nature of Estuarine Circulation, Part I (Chapters 3 and 4)* (1957, WHOI Library)
- [Tomczak, 1998] Tomczak M., *Salt Balance Techniques*(1998 <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/ShelfCoast/chapter14.html>)
- [Tomczak, 2000] Tomczak M., *The Flushing Time*(2000 <http://www.es.flinders.edu.au/~mattom/ShelfCoast/chapter15.html>)
- [Turner, 1973] Buoyancy effects in fluids, Cambridge University Press.
- [Valle-Levinson, 2010] Valle-Levinson A., *Contemporary Issues in Estuarine Physics*, Primera edición (2010) Cambridge University Press, 326 pp
- [Vieira, 2002] Vieira R., *Morfogénesis y dinámica de las vertientes submarinas en la costa de los fiordos de la Norpatagonia, Chile*, Universidad de Chile 2002

[Virta, 1977] Virta J., *Estimating the Water and Salt Budgets of a Stratified Estuary*,
Nordic Hydrology 1977

[Wang, 2004] Wang C., Hsu M.H, Kuo A. *Residence time of the Dashwei river estuary*,
Estuarine, Coastal and Shelf Science Vol.60 (2004) 381-393

Apéndice A

Perfiles de CTD de las estaciones ancladas a los fiordos

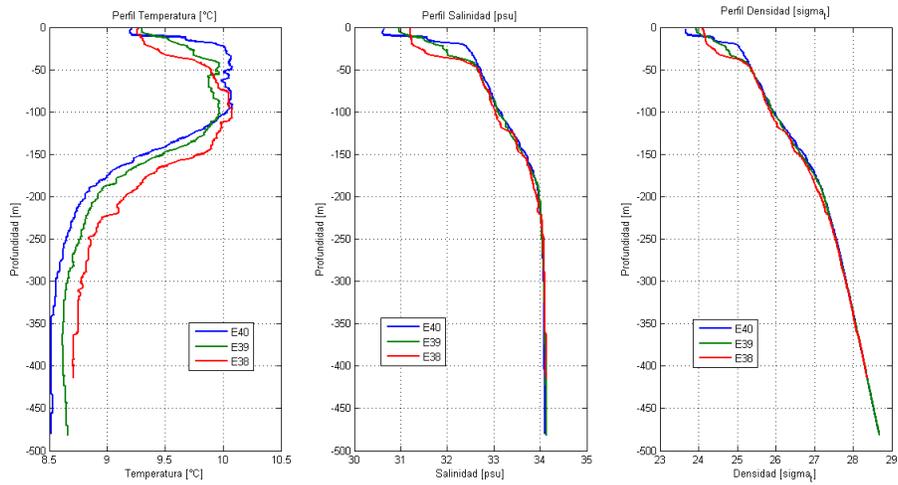


Figura A.1: Perfiles de CTD Jacaf Invierno

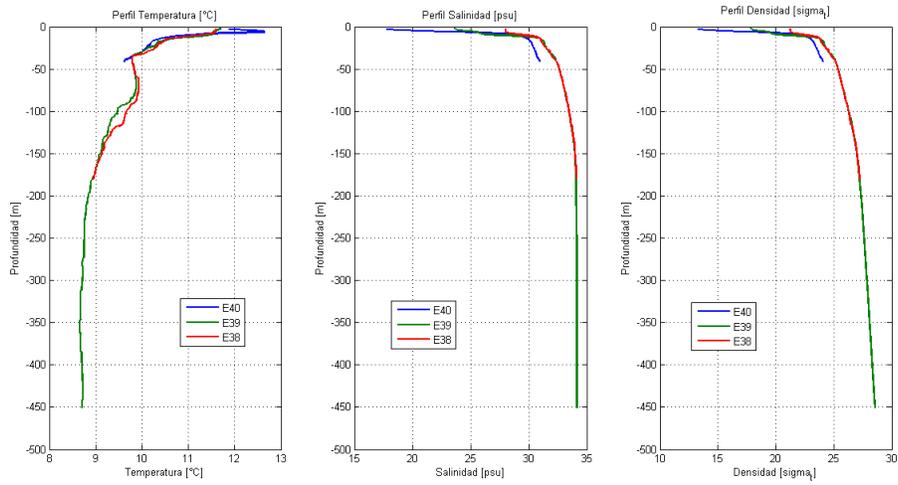


Figura A.2: Perfiles de CTD Jacaf Primavera

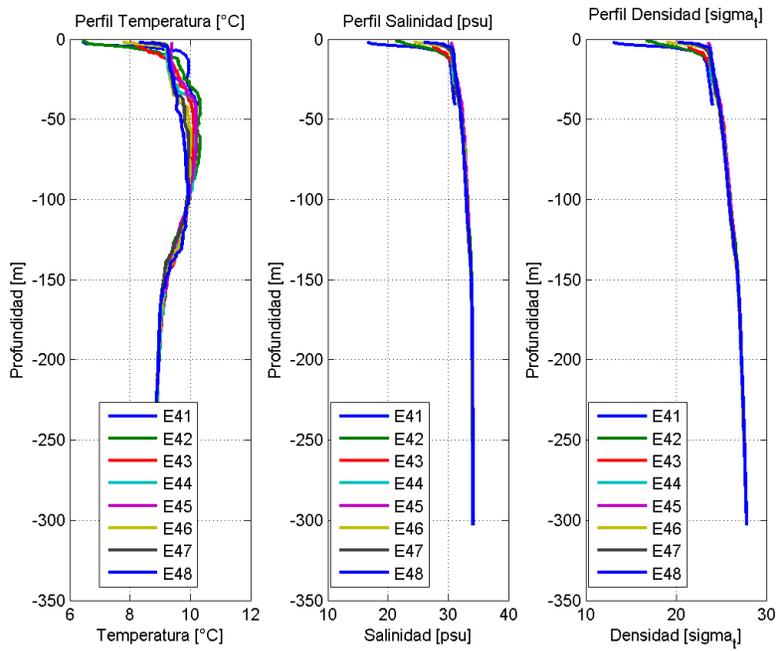


Figura A.3: Perfiles de CTD Puyuhuapi Invierno

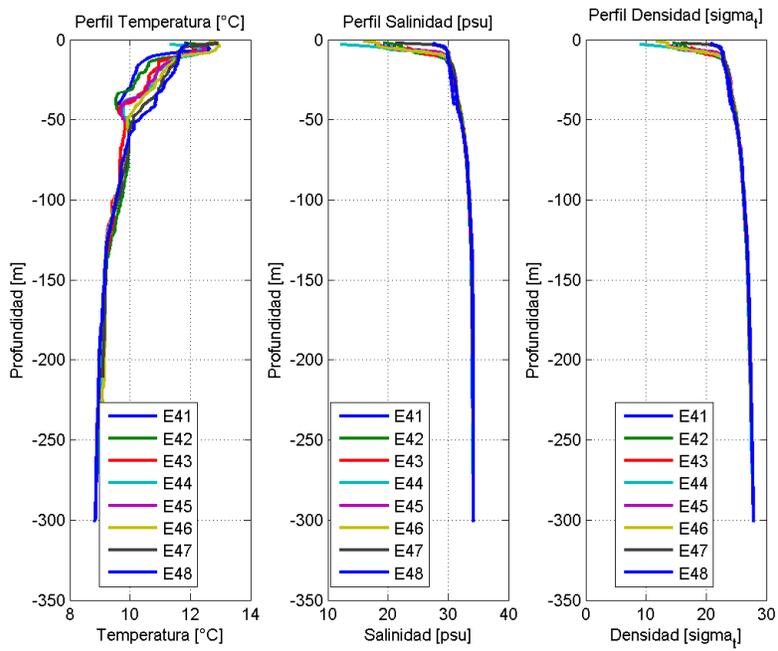


Figura A.4: Perfiles de CTD Puyuhuapi Primavera

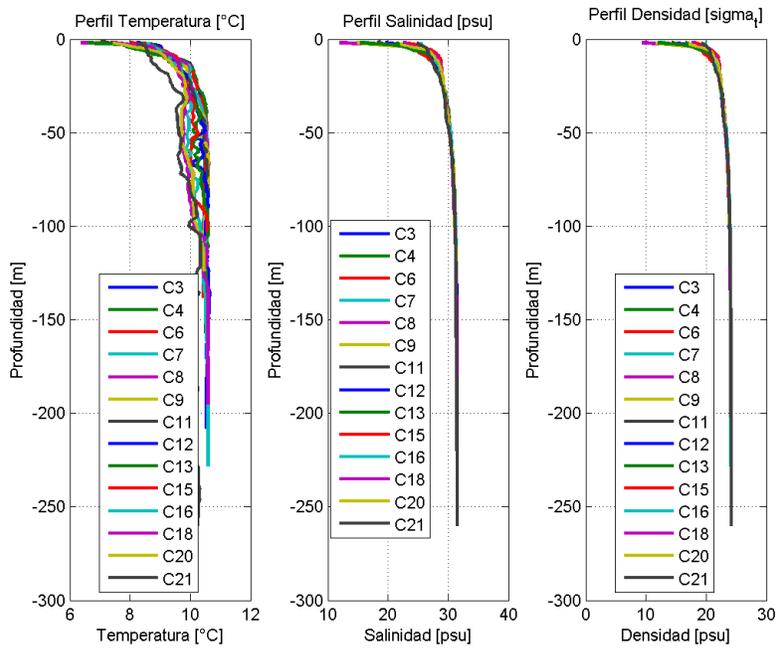


Figura A.5: Perfiles de CTD Aysén Invierno

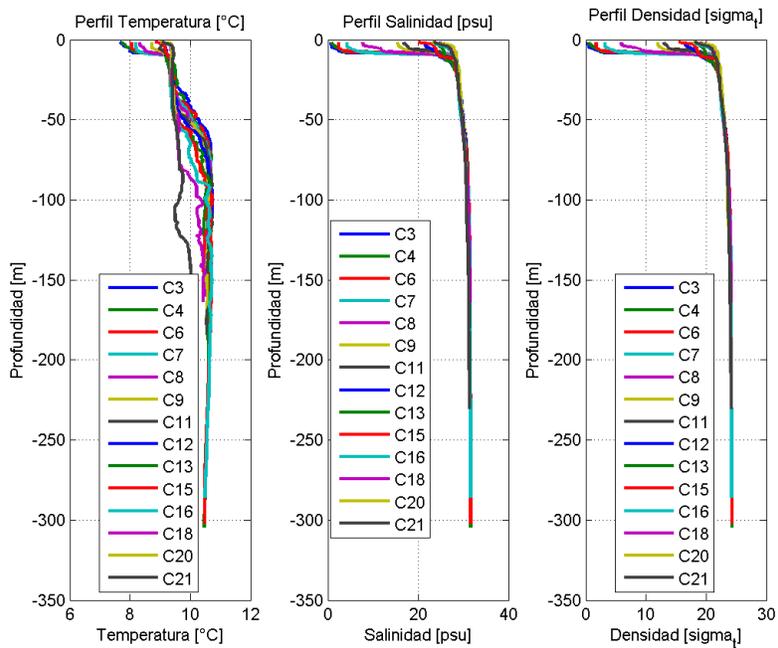


Figura A.6: Perfiles de CTD Aysén Primavera

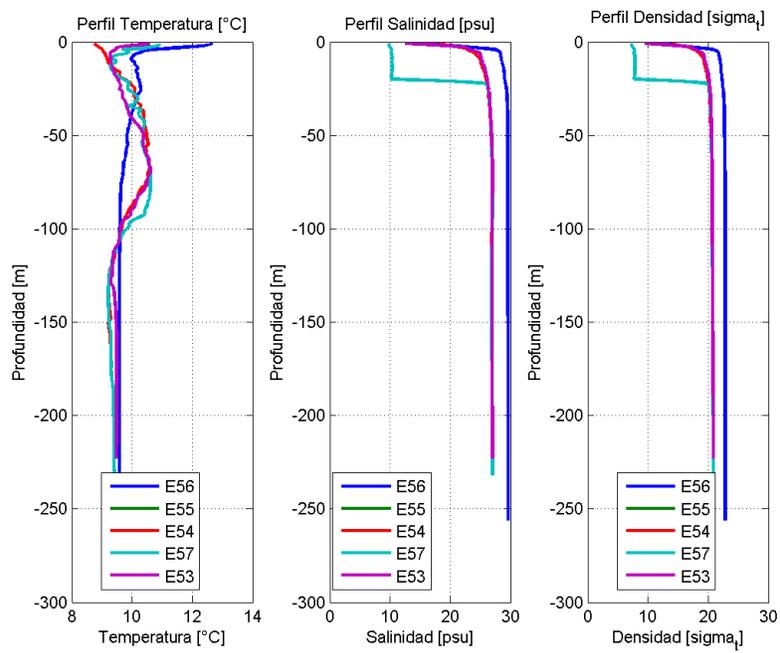


Figura A.7: Perfiles de CTD Cupquelán Primavera

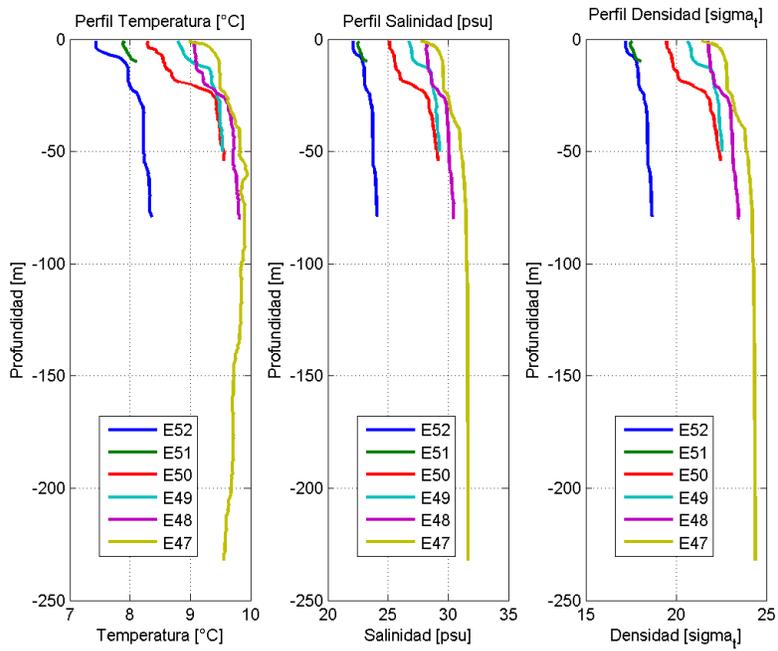


Figura A.8: Perfiles de CTD Elefantes invierno

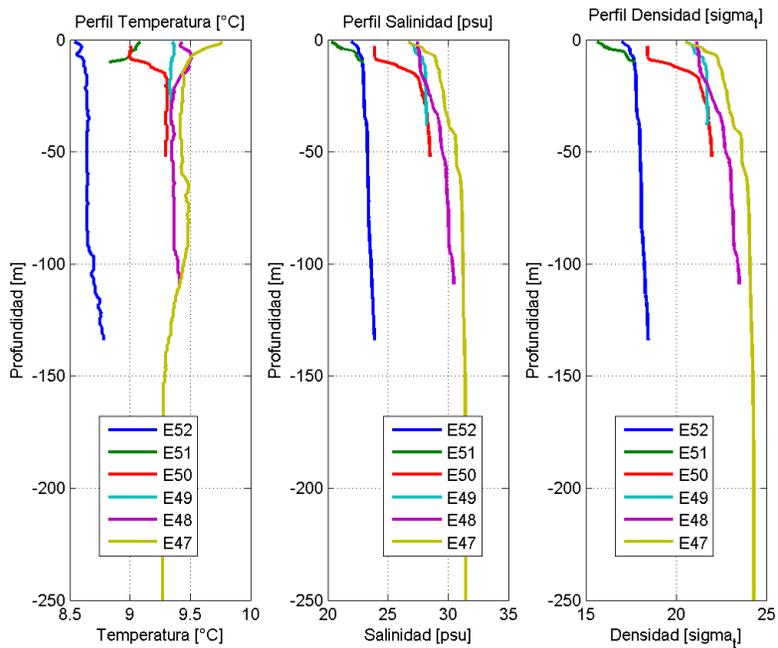


Figura A.9: Perfiles de CTD Elefantes primavera