



INFORME FINAL

Convenio de desempeño 2022:

Determinación de las escalas de intercambio de agua en
fiordos y canales de la Patagonia chilena, 2022-2023

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / agosto 2023

I N S T I T U T O D E F O M E N T O P E S Q U E R O

INFORME FINAL

Convenio de desempeño 2022:

Determinación de las escalas de intercambio de
agua en fiordos y canales de la Patagonia chilena, 2022-2023
SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT /agosto 2023

REQUIRENTE

**SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y
EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO**

Subsecretaría de Economía y
Empresas de Menor Tamaño
Javiera Petersen Muga

EJECUTOR

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Director Ejecutivo
Gonzalo Pereira Puchy

Jefe División Investigación en Acuicultura
Leonardo Guzmán Méndez

JEFE PROYECTO

Pablo Reche García

AUTORES

Elías Pinilla Matamala
Camila Soto Riquelme
Gabriel Soto Soto
Javiera San Martín Parra
Pedro Valdebenito Muñoz
Pablo Reche García

COLABORADORES

Oliver Venegas Mella
Patricio Salas Salas
Javier Cortés Puebla
Miguel Vergara Barria
Marcela Arriagada Ortega

RESUMEN EJECUTIVO

Los tiempos de renovación de aguas y su relación con variables como el oxígeno disuelto en zonas marinas utilizadas por la acuicultura es relevante pues, de acuerdo con amplia literatura, este tipo de parámetros, son útiles para la toma de decisiones pues facilitan la estimación de la capacidad de asimilación de estos ecosistemas para soportar actividades acuícolas. El siguiente documento conforma el informe final del proyecto: Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la Patagonia chilena, 2022-2023. Aquí se describe principalmente la circulación marina y la estimación del intercambio de agua en Golfo Almirante Montt, región de Magallanes y de la Antártica Chilena, a través de una robusta cantidad de observaciones y el uso de múltiples modelos numéricos. La información aquí generada por medio de modelos numéricos es desplegada en la plataforma de información ambiental CHONOS (chonos.ifop.cl), bajo la herramienta ATLAS.

El Golfo Almirante Montt (GAM) se encuentra en la región de Magallanes y representa un sistema estuarino semi cerrado con conexiones limitadas al océano costero. Esta área es una importante zona para la acuicultura de salmones, con 39 concesiones otorgadas y alrededor de 10 solicitudes en proceso. Sin embargo, el GAM es también un escenario de interacciones complejas entre la atmósfera, glaciares y el océano, especialmente en el contexto actual de cambio climático. Esta complejidad resalta la urgencia de entender profundamente sus procesos oceanográficos para una gestión y toma de decisiones informada.

Se implementó un sistema de modelación que incluyó: un modelo hidrológico (FLOW-IFOP) para estimar los caudales diarios agua dulce y un modelo meteorológico (WRF-IFOP) que suministró el forzamiento atmosférico, cada uno de estos componentes fue evaluado mediante diversas métricas con datos observacionales. Estos modelos proporcionaron la información de entrada para la inicialización del modelo hidrodinámico, que fue implementado para los años 2016, 2017 y 2018.

Para análisis de procesos oceanográficos y validación del modelo hidrodinámico se llevaron a cabo mediciones de correntometría euleriana en la columna de agua. Estas mediciones se basaron en 3 ADCP y 6 mareógrafos. Los ADCP, específicamente los modelos RDI 300kHz y ROWE 300kHz, se anclaron a media agua y registraron datos con una frecuencia de 1 hora. Además, se realizaron cruceros oceanográficos que incluyeron estaciones de CTD.

Golfo Almirante Montt se caracteriza por una conformación geológica intrincada que reduce el intercambio de agua con el océano exterior, limitando la propagación de la onda de marea, y el transporte de masas de agua de origen oceánico. En ausencia de la energía de las mareas, la flotabilidad otorgada por abundante descarga de agua dulce principalmente originada deshielo de Campos de Hielo Sur y los patrones de viento en la región de Magallanes, reconocidos por su alta energía, emergen como los principales forzantes en circulación de Golfo Almirante Montt.

Tanto las observaciones como las simulaciones del modelo coinciden en que la onda de marea sufre una notable atenuación al pasar por los canales de conexión Kirke y Santa María, debido a las constricciones con profundidades inferiores a 20m. Esta atenuación tiene repercusiones significativas en la cantidad de energía mareal que ingresa al Golfo Almirante Montt (GAM) y en el intercambio de

agua entre el océano costero y el GAM. Después de superar las constricciones de Kirke y Santa María, la onda de marea se atenúa en un 88% (0.7 m a 0.2 m). Esto implica que, dentro del GAM, la influencia de la marea no es el principal factor determinante. No obstante, en los canales de conexión, su impacto es considerable y juega un papel crucial en la dinámica del sistema.

La simulación de descargas de agua dulce calculadas por el modelo FLOW-IFOP, muestra un adecuado ajuste con las observaciones fluviométricas de la DGA ($r > 0.7$). De acuerdo con este modelo el promedio anual de todas las descargas de agua dulce que ingresan al Golfo Almirante Montt es de $\sim 762 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, lo que representa valores relativamente altos comparados con otras cuencas, tales como: río Puelo ($\sim 645 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), Palena ($\sim 812 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), Aysén ($\sim 612 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$). Los aportes de agua dulce en Golfo Almirante Montt muestran un marcado ciclo anual con máximos que se prolongan desde noviembre hasta marzo, y mínimos durante la época de otoño. La variabilidad interanual de las descargas de agua dulce al interior del seno muestra una tendencia positiva, es decir, los ríos estarían incrementando su descarga de agua dulce al sistema marino de Golfo Almirante Montt. Este incremento se cuantificó en $\sim 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en los últimos 40 años ($2.32 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} / \text{año}$).

Las mediciones de corriente en zonas del GAM como Vattuone o Canal Valdés revelan que entre el 25% y el 60% de la variabilidad es debido a fluctuaciones sinópticas. Además, se identificaron ondas internas en las lecturas del Canal Valdés con energía de baja frecuencia (aproximadamente 5 días). Es habitual encontrar velocidades altas en los primeros 30 metros de la columna de agua. Pero en profundidades mayores, la velocidad disminuye significativamente, indicando una notable disipación de energía.

El Golfo Almirante Montt es un sistema altamente estratificado así lo determinan los valores de Anomalía de Energía Potencial (PEA), lo que resulta en valores en promedio superiores a los encontrados en Patagonia Norte. Desde una perspectiva dinámica, tal estratificación en el GAM limita la mezcla turbulenta y la transferencia de momentum, pudiendo generar áreas en zona más profunda o bajo la pycnoclina de retención o incluso de cuasi-estancamiento del agua, debido también a la ausencia de otros forzantes como la marea.

El modelo hidrodinámico, al proporcionar información detallada en un amplio espacio geográfico, revela al igual que las observaciones en algunos puntos, que en las regiones más profundas del GAM, la reducción abrupta de la velocidad conduce a estas zonas a un estado de aislamiento o cuasi-estancamiento. Zonas profundas en el seno de Última Esperanza, Fiordo Worsley y Fiordo Poca Esperanza son ejemplos de estas áreas con circulación limitada.

Las escalas de tiempo del intercambio de agua al interior de Golfo Almirante Montt muestran valores relativamente altos (~ 1000 días) si los comparamos a los encontrados en Patagonia norte. Por otra parte, en la mayor parte de los lugares son las cabezas de los fiordos los que presentan las edades de agua más alta, esto es habitual tanto en Patagonia norte como en GAM. En GAM los lugares con mayor tiempo de intercambio son el Seno de Última Esperanza, Fiordo Worsley, Fiordo Poca Esperanza y el Golfo Almirante Montt mismo, estos dos últimos sitios albergan una mayor cantidad de cultivos de salmón.

La hipoxia en cuerpos acuáticos, caracterizada por bajos niveles de oxígeno disuelto, tiene el potencial de afectar adversamente a la biodiversidad y la salud de los ecosistemas. El GAM ya ha mostrado signos de hipoxia en ciertas zonas, pero los nuevos datos sugieren que este fenómeno puede ser más generalizado de lo que se pensaba anteriormente.

El modelo de edad del agua aporta una nueva dimensión a esta problemática. Si las áreas con aguas más antiguas son consistentemente bajas en oxígeno, esto sugiere un problema con la circulación o renovación de agua en esas áreas. La falta de circulación puede reducir el intercambio de agua rica en oxígeno desde la superficie, llevando a condiciones de hipoxia. La evidencia recopilada de zonas como el Fiordo Poca Esperanza, Fiordo Worsley y el Seno de Última Esperanza reafirma este hecho. La relación fuerte entre los valores de oxígeno y la edad del agua ($r = 0.71$) implica que la antigüedad del agua puede ser un buen predictor de hipoxia en el GAM. Estos nuevos hallazgos enfatizan la necesidad de abordar la gestión costera tomando en cuenta esta información.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO	i
ÍNDICE GENERAL	v
1. ANTECEDENTES	1
2. OBJETIVOS	4
2.1 Objetivo general	4
2.2 Objetivos específicos.....	4
3. METODOLOGÍA	5
3.1 Objetivo específico 2.2.1.....	5
3.2 Objetivo específico 2.2.2.....	18
3.3 Objetivo específico 2.2.3.	19
3.4 Objetivo específico 2.2.4.....	19
4. RESULTADOS	22
4.1 Objetivo específico 2.2.1	22
4.2 Objetivo específico 2.2.2	47
4.3 Objetivo específico 2.2.3	50
4.3 Objetivo específico 2.2.4	51
5. DISCUSIÓN	52
6. CONCLUSIONES	60
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
8. ANEXOS	67
8.1 ANEXO I: Base de datos.....	67

1. ANTECEDENTES

1.1 Escalas de transporte temporal

Los océanos exhiben ecosistemas altamente diversos y variables que son gobernados por complicados conjuntos de interacciones físico-biogeoquímicas entre la atmósfera, la superficie del océano y su interior, en una variedad de escalas espaciales y temporales (Gregoire y Oguz, 2003). Las escalas temporales de transporte, en general, proporcionan una visión de los procesos de transporte advectivo y difusivo pudiendo ser usado para estimar la variabilidad en la distribución de importantes propiedades que son críticas para los ecosistemas marinos y el clima tales como temperatura, salinidad, clorofila, macro y micronutrientes, O₂ y CO₂ disueltos (Sandery y Kampf, 2007). Por ejemplo, la producción biológica marina es modificada mediante procesos físicos como la mezcla y arrastre de nutrientes desde capas inferiores de la columna de agua, penetración de luz, confinamiento de fitoplancton en la zona eufótica por estratificación y aporte de nutrientes por descargas de ríos (Gregoire y Oguz, 2003). De hecho, se ha sugerido que el tiempo de retención es un parámetro clave en el control del balance de nutrientes en los ecosistemas marinos (Boynton et al., 1995).

Las características de los procesos de transporte de una sustancia disuelta dependen principalmente del flujo residual de baja frecuencia que depende de las interacciones entre el campo de densidad, el flujo del río, el viento y la rectificación no lineal de las mareas periódicas en un estuario dado (Shen y Wan, 2007). Por lo tanto, es difícil separar y cuantificar las influencias de diferentes mecanismos en el transporte a largo plazo. Para entender la dinámica subyacente que contribuye en las propiedades de transporte de un estuario, se han utilizado escalas de tiempo de transporte, tales como "flushing time", tiempo de residencia o la edad del agua para cuantificar las condiciones dinámicas generales de un sistema marino. Existen muchos estudios en que se han utilizado estas escalas temporales de transporte para trazar la masa de agua y estimar ventilación en el océano (England, 1995; Karstensen y Tomczak, 1998; Hirst, 1999; Deleersnijder et al., 2002) o para investigar la circulación en sistemas marinos semi-cerrados, estuarios o fiordos (Oliviera y Baptista, 1997; Walker, 1999; Delhez y Deleersnijder, 2002; Monsen et al., 2002; Sandery y Kampf, 2007; Gustafsson y Bendtsen, 2007; Zhang et al 2010; Kawase y Bang, 2013; Hong y Shen, 2013; Bendtsen et al., 2014; Viero y Defina, 2016).

En estricto rigor, sólo dos escalas de tiempo son suficientes para trazar el movimiento del agua, estos son, la edad del agua y el tiempo de residencia. Zimmerman (1976) introdujo el concepto de "tiempo de residencia" como el tiempo que tarda una parcela de agua en abandonar el dominio de interés, mientras que la edad del agua es un complemento del tiempo de residencia y es definido como el tiempo transcurrido desde que la parcela de agua en consideración salió de la región en la que su edad se define como cero, o bien, el tiempo requerido para que una parcela viaje desde un límite o borde del sistema a un lugar determinado dentro del cuerpo de agua. (Bolin y Rodhe, 1973; Delhez et

al., 1999; Monsen et al., 2002). La colocación de los límites para definir una región de interés es una elección arbitraria, e influirá en los valores absolutos de las escalas de tiempo. Hasta cierto punto, las distribuciones de escala temporal en el sistema son relativas por naturaleza, por consecuencia los patrones similares serán vistos sin importar la localización del límite (Sandery y Kampf, 2007).

En la mayoría de los casos, no es posible estimar estas escalas de tiempo de manera exhaustiva mediante promedios de datos de campo. La ausencia de mediciones intensivas de temperatura y salinidad hacen dificultoso el cálculo de la mezcla vertical vía estos parámetros. Por otra parte, la evaluación del tiempo de descarga o “flushing time” como la razón entre el volumen del dominio de interés y un flujo saliente es una aproximación gruesa que es válida sólo para un flujo en estado estacionario en un dominio infinitamente bien mezclado (Deleersnijder, 2007). Así el enfoque de un sistema en estado estacionario no toma en cuenta las variaciones espaciales y temporales en un gran estuario, por tanto, es deseable conocer el patrón de distribución espacial del tiempo de residencia y su variación temporal (Shen y Wan, 2007). Por otra parte, las técnicas que implican modelos numéricos tienen la ventaja de proporcionar una visión cuantitativa directa de la dinámica y funcionamiento del sistema marino (Delhez et al., 2004). Esto resulta muy valioso en un medio ambiente interdisciplinario o en una perspectiva de gestión (Deleersnijder, 2007).

Los métodos mediante los cuales es posible calcular las escalas de tiempo en un modelo numérico pueden estar centrados desde una óptica lagrangiana o bien euleriana. Los modelos de transporte eulerianos son usualmente preferidos a sus homólogos lagrangianos (Deleersnijder, 2001). La necesidad de un gran número de partículas lagrangianas para producir mapas sinópticos y su consecuente alta demanda de tiempo de cómputo, como también, los problemas asociados con la modelación de la turbulencia en condiciones no homogéneas (Hunter et al., 1993; Visser, 1997; Deleersnijder et al., 2001). En cambio, un enfoque euleriano permite que las masas de agua que interactúan sean modificadas por procesos advectivos y difusivos, (Delhez et al., 1999). Esto a su vez permite que la estimación del tiempo de transporte se presente como una variable espacial y revele información detallada del tiempo de tránsito en un estuario complejo (Shen y Wan 2007).

1.2 Oceanografía en la Patagonia de Chile

La geografía patagónica es producto de la acción glacial acontecida principalmente en el cuaternario, estos eventos formaron una línea de costa desmembrada, caracterizada por fiordos profundos y canales que comunican numerosos cuerpos de agua (Araya-Vergara 1997, 1999 y 2006), particularmente la topografía submarina, se exhibe como irregular alternando conformaciones tipo cuencas explanadas de represamiento y cuencas explanadas tipo cubeta (Rodrigo, 2004).

Debido a que no existía un gran desarrollo de la información sobre estudios ambientales en los canales y fiordos australes, el comité oceanográfico nacional CONA, elaboró el año 1994 un programa denominado crucero CIMAR, para efectuar una serie de cruceros oceanográficos, con la finalidad de cubrir esta extensa área, siendo los 3 primeros de carácter exploratorio. Posteriormente sobre la base de estos cruceros, se realizó un número significativo de cruceros, con la finalidad de determinar y

documentar procesos oceanográficos relevantes, considerando que en muchas de estas áreas existe un fuerte desarrollo productivo acuícola (Silva y Palma, 2006). Esto permitió generar una base de datos y un conjunto de publicaciones científicas, además de generar líneas base de investigación para estas zonas (CONA, 2021). Dentro de los resultados destacables, se logró establecer patrones y procesos oceanográficos, identificándose y caracterizando las principales masas de agua presentes, no solo en la zona oceánica, sino que también los cuerpos de agua que se forman dentro de la zona de canales y fiordos, diseñando algunos esquemas de circulación (Silva et al., 1995). Las propiedades físicas (e.g), de los cuerpos de agua localizados dentro de estos sistemas está en gran medida determinada por las tipologías de las masas de agua del océano costero adyacentes (aguas oceánicas) y la mezcla que experimenta esta masa de agua con el agua dulce (aporte fluvial, nival, glacial y pluvial) (Silva et al., 1998), siendo esta mezcla proporcional a la distancia de la fuente de agua dulce (Carrasco y Silva, 2006). De esta forma las condiciones oceanográficas, producto de la interacción de agua oceánica y agua dulce, revela la presencia de una columna de agua estratificada, constituida en 2 capas: una superficial de profundidad variada, determinada por menor salinidad, menor densidad y mayor concentración de oxígeno disuelto, siendo esta capa superficial la que presenta mayor variabilidad espacial y temporal. Mientras que la segunda capa, es de mayor salinidad y densidad, menor concentración de oxígeno. Entre ambas capas se observa un intenso gradiente conformando una marcada haloclina, pycnoclina, oxiclina y nutriclina, esta estructura ha sido utilizada como trazador para realizar modelos esquemáticos de circulación horizontal, donde el agua dulce sale de los fiordos y canales (capa superficial), mezclándose con el agua oceánica que ingresa en dirección opuesta (capa profunda), Silva *et al.*, (1997 1998); Sievers *et al.*, 2002; Valdenegro y Silva, 2003).

En estas condiciones geográficas y oceanográficas se ha desarrollado la acuicultura en la zona sur Austral de Chile, centrada básicamente en Salmónidos, llevando a Chile a ser uno de los principales productores a nivel mundial, por lo que esta actividad ha sido considerada de gran importancia en la dinámica económica del país (Buschman *et al.*, 2009). No obstante, el desarrollo de la acuicultura no ha estado exento de problemas, a partir del 2007, la industria salmoniculora experimentó una fuerte crisis producto de problemas sanitarios relacionados con el virus ISA (Godoy *et. al.*, 2008), lo que también trajo como consecuencia grandes pérdidas económicas, bajo estos antecedentes, la gestión de la acuicultura y su regulación por parte del estado de Chile se proyectaron como una actividad de alta complejidad (Bustos, 2012), por una parte, se debe promover el máximo nivel posible de crecimiento económico en el tiempo, pero en un marco de sustentabilidad ambiental. Si bien a partir del año 1991 se elaboran cambios en la Ley General de Pesca y Acuicultura (LGPA) enfocados en acuicultura, sólo en 2003 se comienza a incluir los conceptos de sustentabilidad ambiental, mediante la Política Nacional de la Acuicultura (PNA) estableciendo un marco regulatorio para esta actividad. Sin embargo, debido a la insuficiencia de este marco regulatorio, evidenciado tras la crisis del salmón producto del Virus ISA, es que actualmente, La LGPA establece un marco de obtención de información científica en los cuales se debe sostener las decisiones de carácter público y sobre la base de esta información deberán ser desarrolladas los instrumentos de ordenamiento territorial, donde no solo estaría contenida la salmonicultura, sino todo los usuarios que ejerzan alguna actividad dentro del borde costero (Fuentes, 2014).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar la variabilidad interanual de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la Patagonia.

2.2. Objetivos específicos

2.2.1 Modelar hidrodinámicamente la variabilidad estacional del sistema marino de golfo Almirante Montt, Región de Magallanes y Antártica Chilena.

2.2.2 Calcular el intercambio de agua interanual mediante un modelo de trazador acoplado al modelo hidrodinámico en golfo Almirante Montt.

2.2.3 Generar mapas de tiempos de intercambio de agua y de variables oceanográficas modeladas para el golfo Almirante Montt a la plataforma de información oceanográfica Chonos.

2.2.4 Actualizar periodo modelación en los modelos hidrodinámicos ya implementados en la región de Los Lagos y de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, para visualización en plataforma Chonos.

3. METODOLOGÍA

3.1 Objetivo específico 2.2.1: Modelar hidrodinámicamente la variabilidad estacional del sistema marino de golfo Almirante Montt, Región de Magallanes y Antártica Chilena.

Este objetivo incluye una caracterización en base a datos in situ, para posteriormente integrar la información asociada a los modelos numéricos desarrollados.

3.1.1 Mediciones in situ

Se realizaron mediciones de correntometría euleriana en la columna de agua dentro del sistema golfo Almirante Montt, se analizó la corriente y marea de la zona en base a 3 ADCP y 6 mareógrafos. Los ADCP anclados a media agua con una frecuencia de medición de 1 hora, se utilizaron ADCP RDI 300kHz y ADCP ROWE 300kHz, la información detallada de los anclajes se encuentra en la **tabla 1**.

Se realizó un análisis preliminar entre los cuatro transductores del ADCP, sólo se trabajó con los datos que obtuvieron 90% de correlación y se eliminó el nivel más cercano a la superficie, para eliminar el efecto de variación de nivel del mar. Posteriormente, se realizó la corrección magnética correspondiente a cada punto, de esta manera los datos fueron orientados al norte geográfico. Luego se calculó las componentes ortogonales de la corriente; U (este) y V (norte).

Se realizó un análisis espectral, en el dominio de la frecuencia, utilizando la técnica de autoespectro (Bendat y Piersol, 1986) para las componentes vectoriales (Mooers, 1973) para las componentes de la corriente del Golfo Almirante Montt, se efectuó el siguiente procedimiento; para una mayor significancia estadística, las series se dividieron en segmentos de igual tamaño, con cada segmento se calculó un espectro, el cual se promedió para cada frecuencia (Emery y Thomson, 1998). Puesto que cada estimación espectral posee una distribución X^2 con dos grados de libertad, los grados de libertad del espectro promedio son dos veces el número de trozos (Bendat & Piersol, 1986). Se calculó el flujo residual de la corriente, aplicando un filtro de pasa-baja, coseno de Lanczos de 121 pesos y periodo de corte de 40 horas y se realizó un análisis EOF vertical de la corriente residual.

Se utilizaron 5 mareógrafos que midieron los años 2012 y 2022-2023, en el canal Unión, Paso Morla Vicuña, Salustio (post constricción Santa María), canal Valdés (Post constricción Kirke) y canal Obstrucción. Se realizó un análisis armónico (Pawlowicz et al., 2002) del nivel del mar y se comparó la amplitud de los principales componentes de marea, se calculó el coeficiente de Courtier "F" (Boon, 2004), para caracterizar el régimen de marea presente en Golfo Almirante Montt y se realizó un análisis espectral del nivel del mar.

$$F = \frac{K_1 + O_1}{S_2 + M_2} \quad (1)$$

Si $0 < F < 0,25$, el régimen de mareas se clasifica como semi-diurno; si $0,25 < F < 1,50$, el régimen de marea se clasifica como semi-diurno mixto con una marcada desigualdad diaria en las alturas de las pleamareas y bajamareas, si $1,50 < F < 3,00$, el régimen de mareas se clasifica como diurno mixto y si $F > 3,0$, el régimen de mareas se clasifica como diurno.

Se analizó una estación meteorológica HOBO (**tabla 1**) ubicada frente a Puerto Natales ($51^{\circ}44'10.7''S - 72^{\circ}31'36.9''W$), la estación registró desde noviembre 2022 a julio 2023, variables como; magnitud de la velocidad del viento, dirección del viento, PAR, presión atmosférica y temperatura del aire. Se utilizó la serie de tiempo de magnitud y dirección del viento, para calcular las componentes ortogonales del viento; U (este) y V (norte).

Tabla 1. Información de instrumentación Oceanográfica instalada y analizada en GAM.

Instrumento	Lat. (°)	Long (°)	Referencia	fecha inicio	fecha final	z (m)
ADCP (RDI)	-2.09642	-73.14279	Entrada sur Santa María	13-11-2022	13-05-2023	9.6 - 77.6 (Z:142 m)
ADCP (RDI)	-52.02561	-72.95567	Canal Valdés	13-11-2022	14-05-2023	9.1 - 77.1 (Z: 170 m)
ADCP (Rowe)	-51.82079	-72.88965	Paso Vattuone	14-11-2022	13-05-2023	8.2 -72.2 (Z: 150 m)
ADCP (RDI)	-52.1048	-73.2100	Morla Vicuña	12-05-2012	19-10-2012	5.6 - 50.6
ADCP (RDI)	-52.0784	-73.0629	Kirke	05-03-2016	05-05-2016	2.4 - 22.9
Mareógrafo (Hobo)	-52.06757	-73.46998	Canal Unión	13-11-2022	14-05-2023	1.8 m
Mareógrafo (Hobo)	-52.05102	-72.9991	Salida Kirke Valdés	13-11-2022	14-05-2023	1.9 m
Mareógrafo (RBR)	-51.86468	-72.88065	Salida Sta. María (Salustio)	12-02-2013	22-03-2013	1.5 m
Mareógrafo	-52.09922	-73.21923	Morla Vicuña	29-02-2012	26-03-2012	5.69 m

(RBR)						
Mareógrafo (RBR)	-51.98748	-72.69571	Obstrucción	06-03-2012	26-03-2012	3.67 m
Meteorológica (Hobo)	-51.73633	-72.52693	Frente Natales	15-11-2022	a la fecha	

Tabla 2. Información de instrumentación Oceanográfica instalada y analizada en GAM.

Instrumento	lat (°)	lon (°)	Referencia	fecha inicio	fecha final	z (m)
S,T,P (Winsens)	-52.09642	-73.14279	Entrada sur Santa María	13-11-2022	13-05-2023	18.9 m 89 m
Oxígeno (MiniDoT)	-52.09642	-73.14279	Entrada sur Santa María	13-11-2022	13-05-2023	18.9 m 89 m 130m
S,T,P (Winsens)	-52.02561	-72.95567	Canal Valdés	13-11-2022	14-05-2023	18.4m 88.6m 158.6m
Oxígeno (MiniDoT)	-52.02561	-72.95567	Canal Valdés	13-11-2022	14-05-2023	18.4m 88.6m 158.6m
S,T,P (Winsens)	-51.82079	-72.88965	Paso Vattuone	14-11-2022	13-05-2023	86.2m
Oxígeno (MiniDoT)	-51.82079	-72.88965	Paso Vattuone	14-11-2022	13-05-2023	19m 86.2

Tabla 3. Información de instrumentación Oceanográfica instalada y analizada en GAM.

Anclaje Oxígeno	lat. (°)	Lon (°)	Referencia	fecha inicio	fecha final	z (m)
OD1 (MiniDoT)	-52.18547	-72.86085	Poca Esperanza	13-11-20-22	15-05-2023	10m 68m 240m
OD2 (MiniDoT)	-51.78211	-72.86453	seno Vattuone	15-11-2022	13-05-2023	6.3m 42m 160m
OD3 (MiniDoT)	-51.70095	-73.06803	Fiordo Worsley	14-11-2022	16-05-2023	16m 180m

3.1.2 Modelos numéricos

Simular la hidrodinámica del Golfo Almirante Montt requirió de información de aquellos forzantes que forman parte del balance dinámico de este lugar, tales como; las descargas de agua dulce, el viento, las mareas (**Fig. 3**), y la geometría del reservorio dada por la batimetría.

Para otorgar una mejor descripción de la fluctuación de estos forzantes, se implementaron una serie de modelos (con sus respectivas validaciones) con el fin de obtener la variabilidad espacial y temporal de estos forzantes. A continuación, se hace una descripción de cada uno de estos elementos que pueden sintetizarse en la **Fig. 3**. Este esquema, además de los modelos que otorgaron los forzantes, incluyó la modelación de los tiempos de intercambio de agua, mediante el método de la edad del agua y la publicación de esta información en un portal WEB (chonos.ifop.cl).

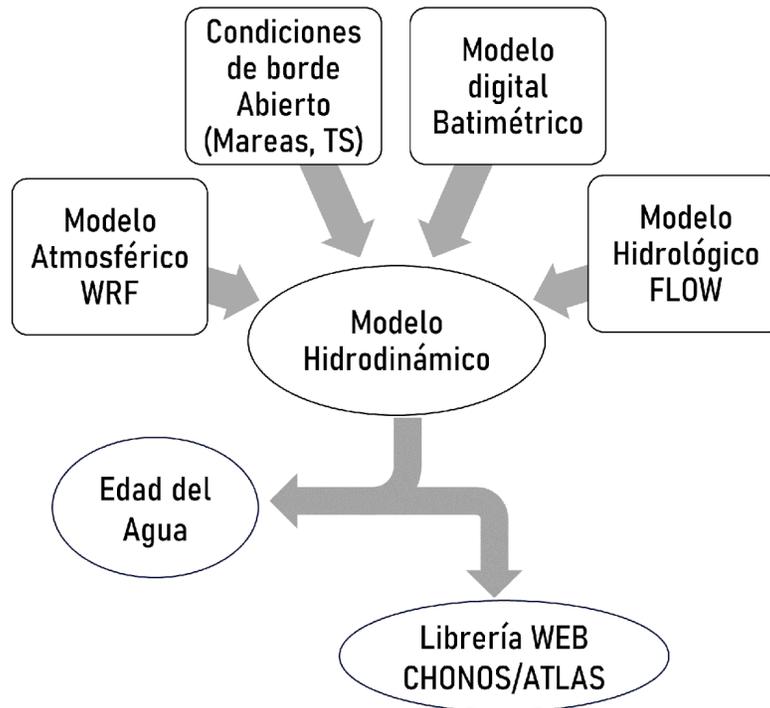


Figura 3: Esquema del sistema de modelación y distribución de información del estudio.

3.1.2.1 Modelo Atmosférico WRF

La circulación marina dentro de fiordos rodeados de montañas es altamente afectada por los patrones de viento locales. Para entender y predecir adecuadamente estos patrones, es imprescindible aplicar modelos atmosféricos de alta resolución que puedan capturar las interacciones entre la topografía y el flujo de aire (Myksovoll et al., 2012).

Se ha empleado el modelo no hidrostático WRF (versión 3.5.1) (Skamarock et al., 2008) para simular las condiciones atmosféricas de la zona. Este modelo fue insertado dentro del sistema operacional NCEP, que tiene una resolución espacial de 25 km (National Centers for Environmental Prediction, 2000). El WRF se ejecutó con una resolución espacial detallada de 1 km, cubriendo una región definida entre aproximadamente 51.2°S - 52.5°S y 72°W - 74°W (**Fig. 4**).

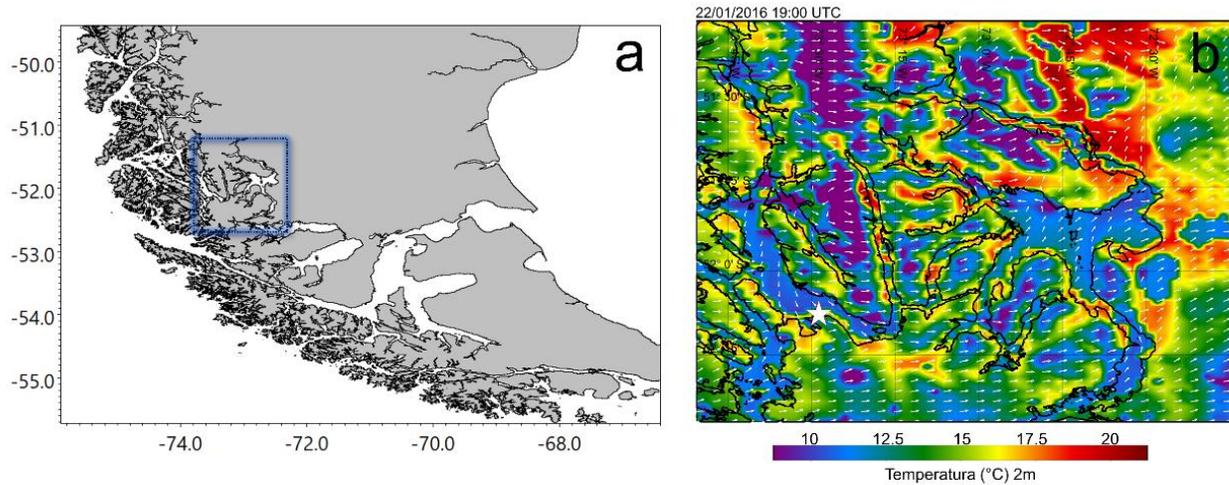


Figura 4: a) Dominio establecido para la simulación atmosférica (WRF), con resolución espacial de 1km y b) un ejemplo de campo de temperatura y vectores de viento para el verano de 2016. La estrella de color blanca muestra la posición de la estación meteorológica para evaluar el modelo WRF.

Dentro de los parámetros modelados por WRF durante el período 2016-2018 se encuentran: velocidad del viento a 10m, temperatura a 2m, radiación, presión atmosférica y humedad relativa, entre otros. A fin de evaluar la eficacia del modelo atmosférico en reflejar las tendencias temporales de presión, temperatura y componentes del viento, los datos de WRF se compararon con los datos recopilados por una estación meteorológica ubicada en el canal Unión (**Fig. 4**). Se emplearon métricas estadísticas como la correlación y la raíz del error cuadrático medio (RMSE) para esta comparativa.

La correlación, determinada a través del coeficiente de correlación de Pearson (r_{yx}), evalúa la relación lineal entre los datos modelados y observados. Matemáticamente, r_{yx} se define mediante la covarianza de los conjuntos de datos modelados y observados, normalizada por sus desviaciones estándar. Sus valores varían entre -1 y 1, donde 1 indica un ajuste lineal perfecto, 0 ninguna relación, y -1 una relación inversa.

$$r_{yx} = \frac{cov_{yx}}{S_y S_x} = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y})(X_i - \bar{X})}{\sum_{i=1}^N (Y_i - \bar{Y}) \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})}$$

Por otro lado, el RMSE proporciona un indicador de la diferencia promedio entre las observaciones y las predicciones del modelo. Los menores valores de RMSE implican un modelo con predicciones más precisas en términos de desviación respecto a los datos reales.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - X_i)^2}{N}}$$

3.1.2.2 Modelo hidrológico VIC

Los aportes de agua dulce hacia el Golfo Almirante Montt provienen de una extensa red de ríos que desembocan en su interior. Entre estos cursos fluviales, destaca el río Serrano situado en el sector norte del dominio. Junto a esta contribución fluvial la superficie experimenta un aporte sustancial de precipitación, que se presenta tanto en forma de lluvia como nieve que se distribuye de manera heterogénea dentro del dominio.

La relevancia de estas fuentes de agua dulce incide directamente en la dinámica y condiciones oceánicas del sistema. Para caracterizar este forzante, se empleó un modelo hidrológico que brinda una estimación de la escorrentía en el sistema, complementado con un producto de datos georreferenciados de alta resolución para estimar la distribución de las precipitaciones.

Los caudales de ríos que desembocan en el sistema marino han sido simulados con el modelo hidrológico VIC (Liang et al., 1994) que es alimentado con series de precipitaciones y temperatura del producto grillado CR2MET (<http://www.cr2.cl/datos-productos-grillados/>) de una resolución 0.05° (5 km aproximadamente) para un periodo comprendido entre 1980-2021. A partir de esta información, el modelo VIC simula la escorrentía en intervalos horarios, lo que permite calcular series diarias de caudales en una red hidrográfica sintética (obtenida a partir de información satelital) correspondiente al área de análisis.

Posteriormente, se lleva a cabo un proceso de calibración utilizando observaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA). Durante este proceso, se ajustan ciertos parámetros del modelo VIC para optimizar su desempeño en función de los datos observados. Una vez calibrado, el modelo se ejecuta para estimar el caudal diario en el periodo comprendido entre 1980 y 2021 en todas las cuencas costeras del dominio espacial de la simulación. La **Figura 5** muestra según las estimaciones las 50 cuencas hidrográficas más relevantes, las cuales son utilizadas para caracterizar el forzante. El análisis se complementa junto a tres estaciones de la DGA que tienen información de ríos que desembocan en GAM (**Fig. 5**). Las observaciones diarias comprenden los ríos Serrano, con mediciones entre 1995 y 2020; el río Prat, cuyos datos abarcan el periodo de 2005 a 2018; y finalmente, el río Hollemberg, del cual se dispone de información entre los años 2007 y 2020.

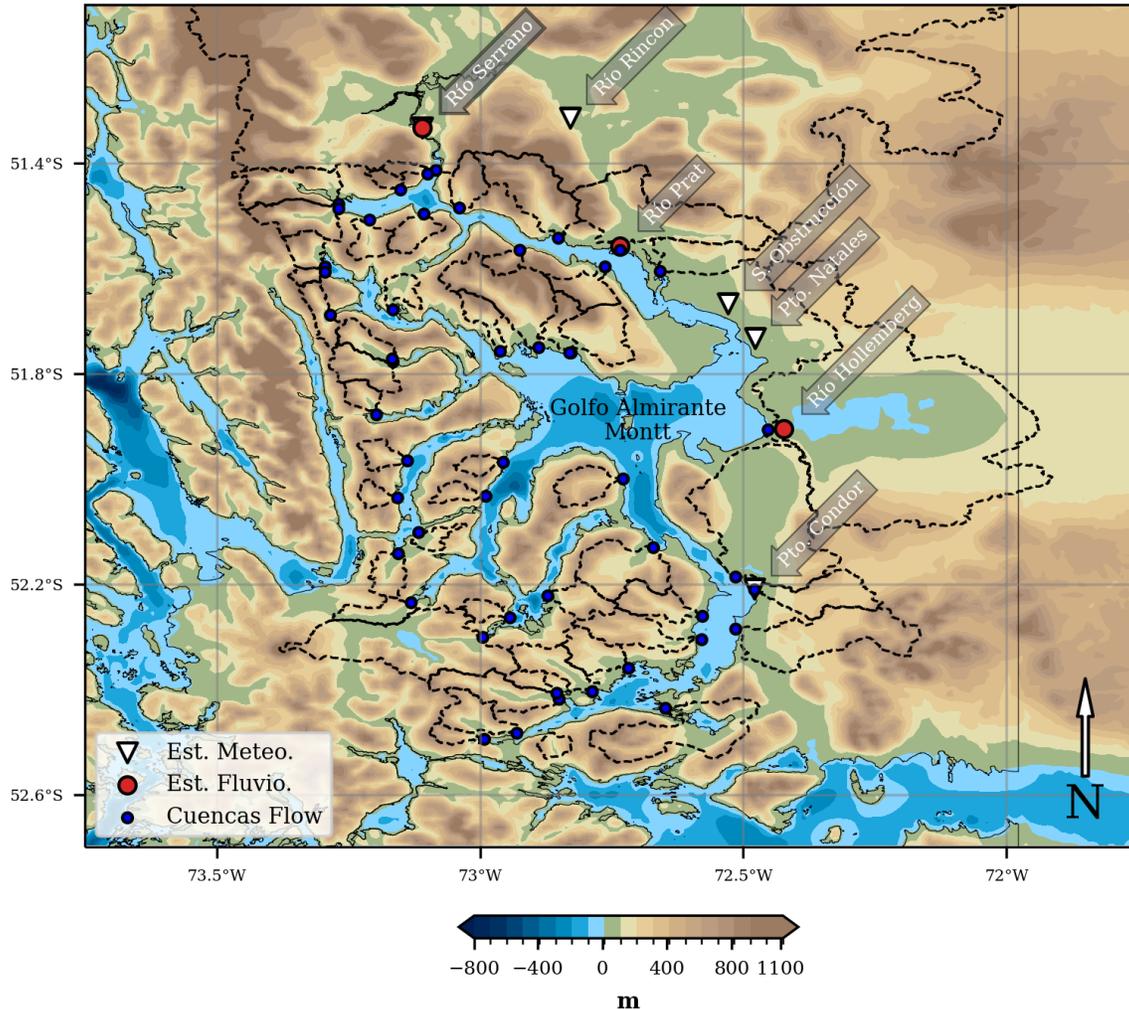


Figura 5. Estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA), pluviométricas de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC) y principales cuencas estimadas por el modelo hidrológico VIC en el dominio Golfo Almirante Montt.

Las observaciones fueron utilizadas para evaluar la capacidad del modelo en replicar la variabilidad de los caudales característica de la región. Las series temporales se compararon con las simulaciones correspondientes a cada cuenca utilizando estadísticas de validación. Se identificaron las fuentes con mayor aporte de agua dulce en GAM y se utilizaron los caudales estimados por el modelo VIC para caracterizar el forzante hidrológico de manera espacio-temporal. También se exploraron las tendencias presentes en aproximadamente los 40 años de información simulada. Para analizar las tendencias se aplicó el test de Mann-Kendall (Mann 1945; Kendall 1975), método no paramétrico utilizado ampliamente para evaluar tendencias estadísticamente significativas en series de tiempo hidrológicas y climatológicas. Algunos ejemplos de trabajos en Chile donde se aplique el método son Pellicciotti, F. et al. (2007), Aguayo, R. et al. (2019), Medina & Muñoz (2020), Pérez, T. et al. (2018) y Sarricolea, P (2017). En este informe se consideran tendencias significativas aquellas que alcancen

el nivel de confianza, 95% ($p < 0.05$). Para estimar la magnitud de la tendencia se utilizó el método de la pendiente de Sen (Sen 1968). La pendiente de Sen es un método no paramétrico robusto que evalúa tendencias, con la ventaja de permitir la existencia de lagunas de datos y es altamente tolerable para valores escapados en la señal.

Adicionalmente, se utilizó el producto CR2MET para caracterizar de manera complementaria los patrones espacio-temporal de precipitación que afectan la superficie del sistema. Se estimó la precipitación media considerando el periodo 1980-2019 y se analizó la variabilidad interanual de la precipitación acumulada anualmente.

Toda la información de las simulaciones de caudales para cada cuenca marina es desplegada en la plataforma Chonos de IFOP en <https://chonos.ifop.cl/flow/>. Cabe destacar que el modelo VIC fue desarrollado para IFOP por la empresa consultora Meteodata Limitada. El sistema de modelación de agua dulce abarca varios componentes, los cuales se detallan en la **Figura 6** y la **tabla 4**.

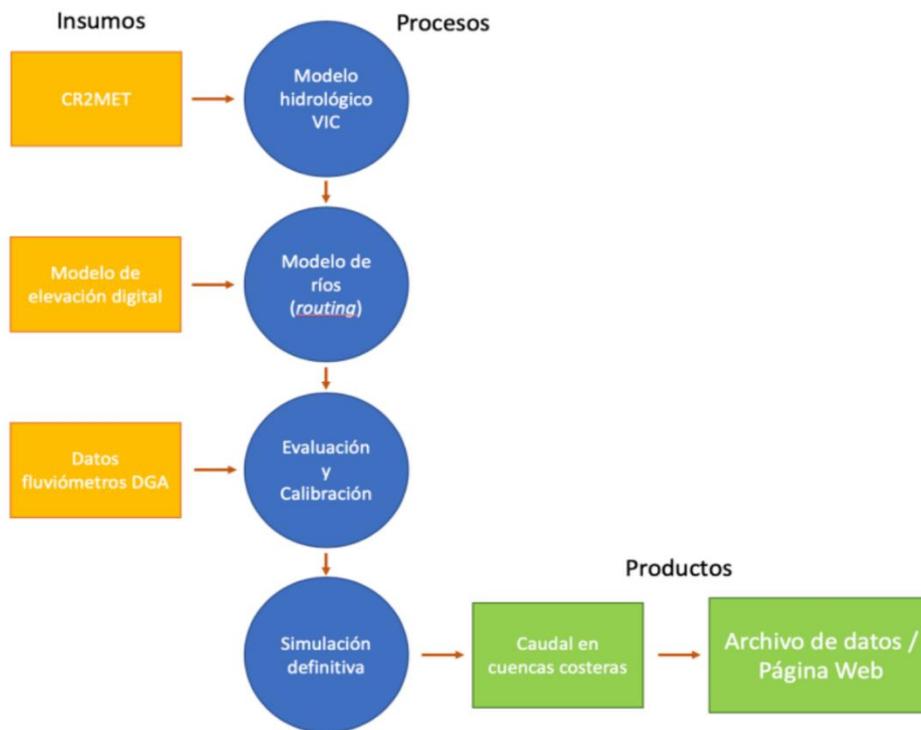


Figura 6. Esquema general del proceso de modelación y construcción de los productos del proyecto.

Tabla 4: Características sistema de modelación hidrológico

Parámetros	Variable Infiltration Capacity (VIC)
Resolución espacial	0.05° (aproximadamente 5 km)
Área de la simulación	Territorio Chileno entre 41°S y 56°S
Resolución temporal	Diario
Periodo de simulación	1980-2021
Datos de entrada	Base de datos CR2MET
Modelo terreno digital	SRTM (90 metros de resolución)
Modelo para red hidrográfica	TauDEM
Calibración y evaluación	Datos fluviométricos de la DGA (~50 estaciones)

3.1.2.4 Modelo hidrodinámico 3D (MIKE 3)

Se utilizó el modelo hidrodinámico 3D MIKE 3 FM (DHI, 2019) para el Golfo Almirante Montt en la región de Magallanes. Este es un sistema de modelamiento en 3 dimensiones que considera la solución numérica de las ecuaciones tridimensionales incompresibles de Navier-Stokes utilizando el enfoque de Reynolds, los supuestos de Boussinesq y de presión hidrostática, por lo que el modelo consiste en las ecuaciones de conservación de masa y momentum, transporte de calor y de sal. Como algoritmo de solución de las ecuaciones indicadas, el modelo utiliza el método de volúmenes finitos centrados en cada celda. La estructura de discretización, triángulos de distintos tamaños (**Fig. 7**), permite un ajuste flexible de la resolución horizontal del modelo, por ejemplo, una alta definición del borde costero. Por esta razón, se considera que este tipo de solución es la adecuada para zonas de topografía compleja. En el plano vertical utiliza coordenadas sigma combinadas con rectangulares (denominadas Z), que permiten una mejor solución de la estratificación en las zonas con altos gradientes verticales de densidad (DHI, 2019).

El dominio del modelo está ubicado en un seno semicerrado de la región de Magallanes (**Fig. 7**), tiene 19927 elementos en la horizontal y se extiende desde el oeste por el canal Unión, incluyendo los canales Morla Vicuña, Santa María y Kirke, estos últimos conectan al sistema semicerrado Golfo Almirante Montt, sus fiordos interiores. La información batimétrica fue obtenida de las cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), reprocesadas e interpoladas linealmente mediante el método del vecino natural (Sibson, 1981). Se utilizan distintos tamaños de elementos de acuerdo con la geometría de la cuenca dejando aquellos lugares someros y estrechos con mayor resolución. Los sectores de menor resolución corresponden a las zonas más profundas del

Golfo Almirante Montt con una resolución aproximada de 1000 m, mientras que la mayor resolución se encuentra en los canales de intercambio más estrechos (**Fig. 7**). En la dimensión vertical el modelo está dividido en 45 capas combinadas sigma-cuadrangular, con mayor resolución en las capas superficiales, esto y algunos otros parámetros se pueden ver en la **tabla 5**.

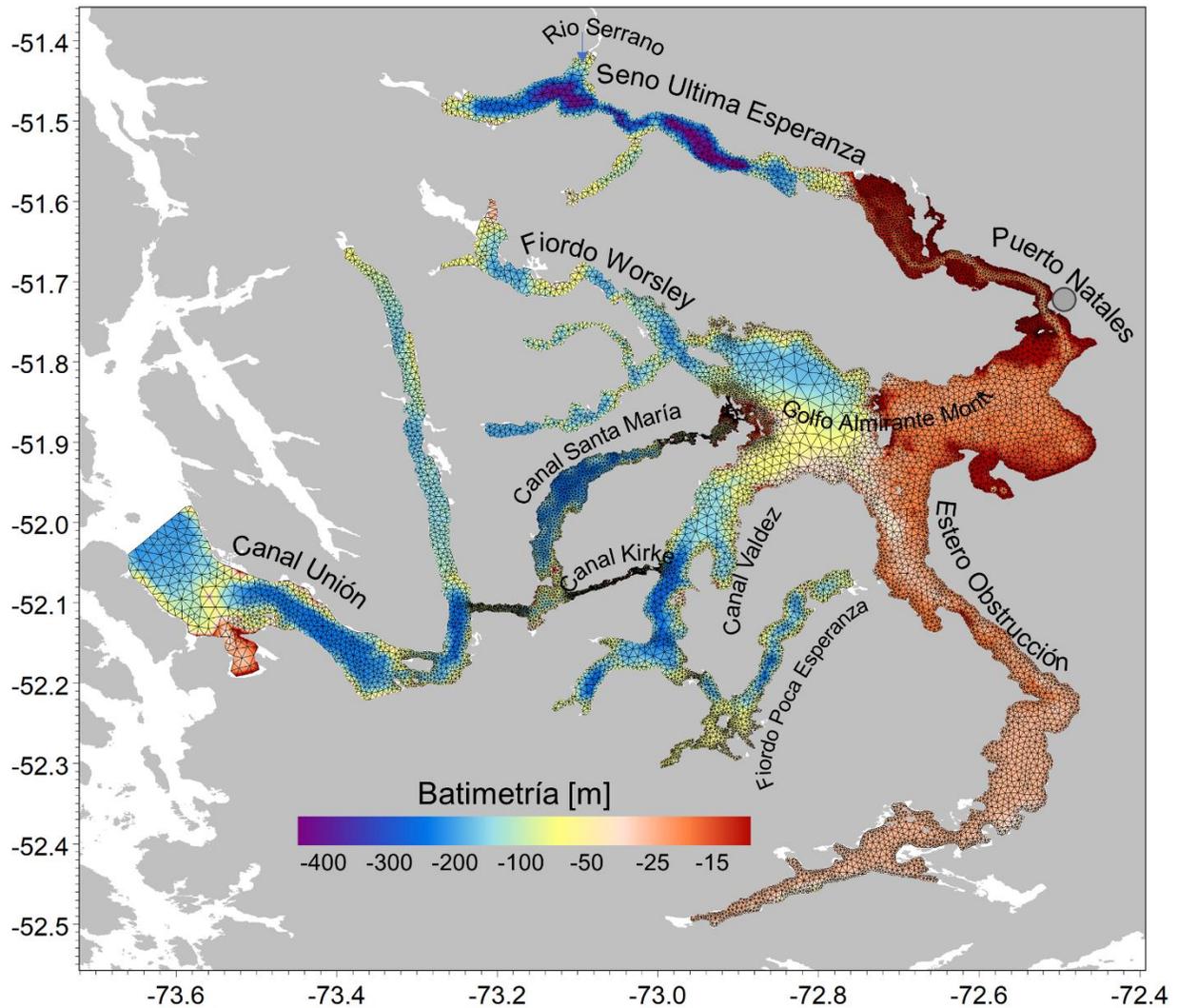


Figura 7: Golfo Almirante Montt en la región de Magallanes, modelo digital de elevación basado en cartas náuticas SHOA y malla de modelo hidrodinámico con resolución variable.

Tabla 5: Características de implementación del modelo hidrodinámico en Golfo Almirante Montt

Parámetros MIKE 3 FM	Golfo Almirante Montt
<i>Resolución espacial</i>	<i>Variable ~100 a 1000 m</i>
<i>Resolución vertical</i>	<i>43 capas sigma-Z / superficie ~1 m / fondo ~25 m</i>
<i>Resolución temporal</i>	<i>300 s / (almacena datos horarios)</i>
<i>Periodo de simulación</i>	<i>01-01-2016: 31-12-2018 (3 años)</i>
<i>Condiciones de borde</i>	<i>Climatología CTD -IFOP</i>
<i>Forzante atmosférico</i>	<i>WRF-IFOP 1 Km</i>
<i>Ríos</i>	<i>FLOW-IFOP</i>
<i>Modelo de turbulencia</i>	<i>Esquema k-epsilon</i>
<i>Tiempo de cómputo para simular 1 año (servidor Intel-56 núcleos)</i>	<i>~28 días</i>
<i>Periodo de estabilización (spin up)</i>	<i>5 años</i>

Los bordes abiertos del nivel del mar se establecieron mediante análisis armónico (Pawlowicz et al., 2002), con base en información de nivel del mar obtenidos como parte de proyectos anteriores de IFOP (Soto et al., 2016). Para las condiciones iniciales referidas a temperatura y salinidad fueron utilizadas el paso de tiempo final del periodo de estabilización del modelo (spin-up), este periodo de estabilización tomó un tiempo de 5 años.

En este estudio, se abordó un período temporal de 2016 a 2018. Esta elección metodológica se fundamenta en que todos los modelos elaborados por el IFOP, correspondientes a los proyectos en las regiones de Los Lagos, Aysén y el seno Skyring en Magallanes, coinciden en este intervalo. Además, estos modelos se han ido actualizando hasta la fecha actual y se integran en el sistema de información operacional CHONOS. Esta coherencia temporal facilita la comparación de datos a lo largo del tiempo en diversas áreas de la Patagonia

3.1.2.5 Evaluación modelo hidrodinámico:

Para la evaluación de las propiedades físicas (salinidad y temperatura) del modelo se utilizaron mediciones de CTD realizadas por IFOP, considerando 3 periodos estacionales diferentes: noviembre 2022 (primavera), febrero 2023 (verano) y mayo 2023 (otoño). Estas mediciones, permitieron

caracterizar la hidrografía del sistema golfo Almirante Montt. Además, se extrajo información específica de estaciones oceanográficas (**Fig. 8**) para realizar una comparación con los datos extraídos del modelo, a través de diagramas TS, los cuales fueron elaborados mediante el software ODV (Schlitzer 2017). Es importante mencionar que las observaciones, fueron realizadas en años diferentes a la modelación (2018).

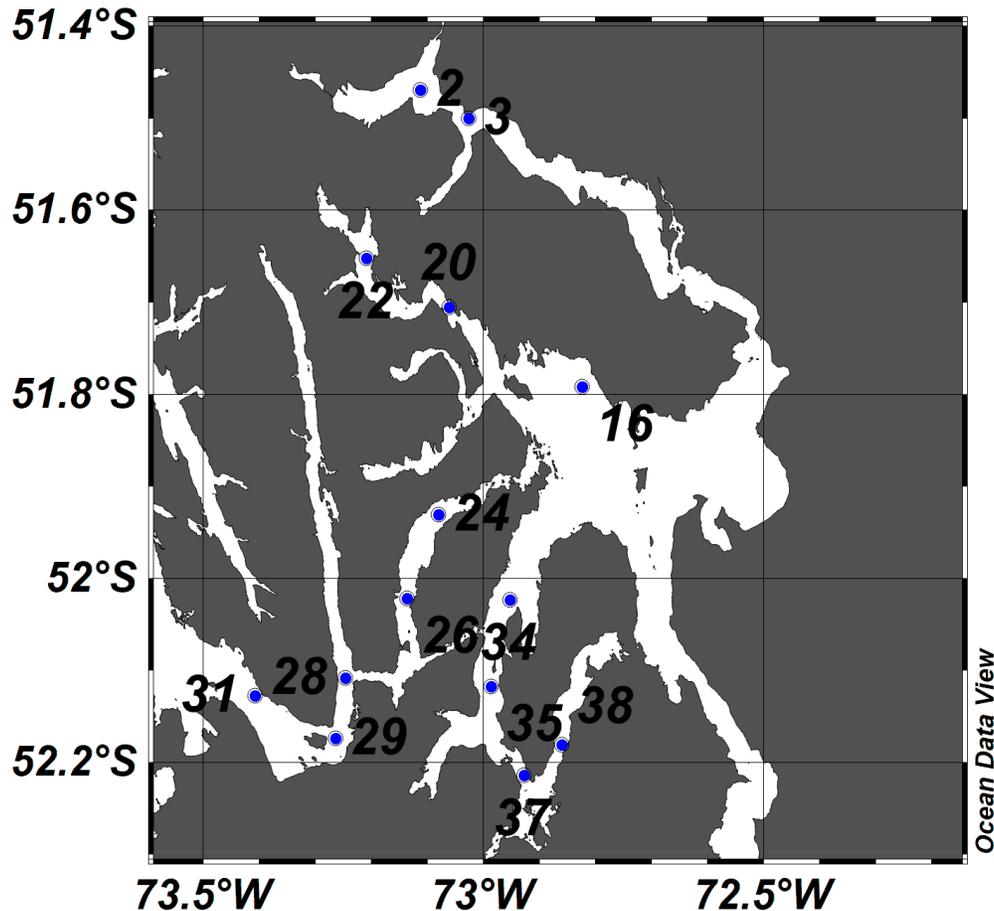


Figura 8: Puntos de estaciones oceanográficas realizadas en los años 2013 y 2021.

La capacidad del modelo hidrodinámico de reproducir los principales procesos que modulan la estructura temporal y espacial de las corrientes al interior del Golfo Almirante Montt fue evaluada mediante un análisis de Función Ortogonal Empírica (EOF) (Thomson y Emery, 2014), contrastando las corrientes submareales modeladas y las provistas por un perfilador de corrientes (ADCP) instalado durante el año 2016, por un periodo ~ 2 meses, en el canal Kirke (-52.07°S - 73.06°W) (**tabla 1**). El periodo de medición coincide con el de modelación, el análisis de EOF permitió comparar la estructura vertical y temporal de las corrientes en ese sector. Se obtuvieron las corrientes submareales aplicando un filtro coseno de Lanczos con una potencia media de 40 h. Finalmente la capacidad del modelo de

reproducir la propagación de la onda de marea en el sistema GAM fue evaluado mediante una comparación entre modelo/observado (mareógrafos **tabla 1**) de la amplitud de los principales constituyentes mareales (M_2+K_1) en base a un análisis armónico (Pawlowicz et al., 2002) del nivel del mar y se calculó el porcentaje de atenuación de la onda de marea entre el punto exterior a GAM (canal Unión) y el punto post constricción (Valdés).

3.2 Objetivo específico 2.2.2: Calcular el intercambio de agua interanual mediante un modelo de trazador acoplado al modelo hidrodinámico en golfo Almirante Montt

Para calcular el intercambio de agua se utilizó la metodología de la edad de agua, que es el más actualizado marco conceptual para estimar las escalas de tiempo del intercambio de agua.

El método de la edad del agua utilizado en este estudio forma parte de una completa teoría que ha sido desarrollada en los últimos 20 años a través de teoría de la edad y tiempo de residencia orientada a los constituyentes, CART (Delhez et al., 1999, Deleersnijder et al., 2001). Para calcular la distribución de la edad del agua, se resuelven las ecuaciones de transporte para un trazador conservativo y para la concentración de la edad de acuerdo con la ecuación 1 y 2 (Delhez et al., 1999).

La edad del agua se define como el tiempo requerido para que una parcela viaje desde un límite o borde del sistema a un lugar determinado dentro del cuerpo de agua, aquí el límite se refiere al borde abierto del modelo hidrodinámico, pero también a las entradas de agua dulce, entonces las cuencas interiores son renovadas por aguas de origen oceánico que penetran a través de los canales de conexión Kirke y Santa María y por los ríos. Como resultado, se deduce que las áreas con valores más altos de edad (tiempo) del agua son aquellas donde las parcelas de agua han estado dentro del sistema durante más tiempo. Este método ya ha sido utilizado en otros fiordos patagónicos (Pinilla et al., 2020a).

$$\frac{\partial c(t, \vec{x})}{\partial t} + \nabla(u c(t, \vec{x}) - K \nabla c(t, \vec{x})) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \alpha(t, \vec{x})}{\partial t} + \nabla(u \alpha(t, \vec{x}) - K \nabla \alpha(t, \vec{x})) = c(t, \vec{x}) \quad (2)$$

Donde, c es la concentración del trazador, α es la concentración de la edad, u es el campo de velocidad, K es el tensor de difusividad, t es el tiempo y x la posición. La edad media “ a ” entonces puede calculada como:

$$a(t, \vec{x}) = \frac{\alpha(t, \vec{x})}{c(t, \vec{x})} \quad (3)$$

En este estudio, la edad del agua está implementada en el módulo Ecolab, este es un sistema de modelación numérico que se acopla al modelo hidrodinámico MIKE 3 FM ya implementado. El trazador pasivo que ingresa por los ríos y por los bordes abiertos, o sea el agua nueva, tiene una concentración de 1 y una edad de 0 y va aumentando a medida que esa parcela de agua permanece al interior del sistema. Las condiciones iniciales para c se igualan a cero.

3.3 Objetivo específico 2.2.3: Generar mapas de tiempos de intercambio de agua y de variables oceanográficas modeladas para el golfo Almirante Montt a la plataforma de información oceanográfica Chonos.

Para montar la información generada por este estudio a una plataforma de información geográfica, se utilizó el sistema de información oceanográfica CHONOS (www.ifop.cl/chonos), creada como parte de un sistema de distribución de información derivada de estudios oceanográficos llevados a cabo por el grupo de Oceanografía y Clima de la División de Investigación en Acuicultura de IFOP con asiento en Castro, Chiloé. Este sistema, de acceso libre, integra diferentes productos, especialmente aquellos derivados de modelos numéricos. La plataforma está dividida en distintas herramientas con resultados directos de modelos de pronósticos oceanográficos (MOSA-ROMS), visualizador interactivo de dispersión de partículas (Parti-MOSA) y una herramienta para calcular conectividad hidrodinámica entre diferentes regiones en base escenarios de riesgo (CLIC).

Para el caso de los resultados de este proyecto, se diseñó la herramienta ATLAS específicamente para distribuir la información de este tipo.

3.4 Objetivo específico 2.2.4: Actualizar periodo modelación en los modelos hidrodinámicos ya implementados en la región de Los Lagos y de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, para visualización en plataforma Chonos.

La herramienta ATLAS dentro la plataforma Chonos cuenta con información de modelos hidrodinámicos generados para los mares interiores de la X y XI regiones (**Fig. 9**). Estos se encuentran disponibles para el periodo 2015-2021 y su configuración puede verse en detalle en la Tabla 5. Resultados y análisis pueden verse en Pinilla et al. 2020b.

Se realizó una actualización del periodo de modelación hasta diciembre 2022, manteniendo la misma configuración detallada en la Tabla 6. Para esto fue necesario actualizar toda la base datos de forzantes que utiliza el modelo hidrodinámico, principalmente sobre el modelo hidrológico FLOW-IFOP y sobre el modelo atmosférico WRF-IFOP. Este objetivo no buscó realizar análisis oceanográfico alguno sobre el nuevo periodo de modelación, sino más bien, poner a disposición de distintos usuarios la base de datos actualizada como una herramienta operacional. Cabe resaltar que el uso de esta información se ha ido incrementando en el tiempo tanto por investigadores, estudiantes y tomadores de decisiones.

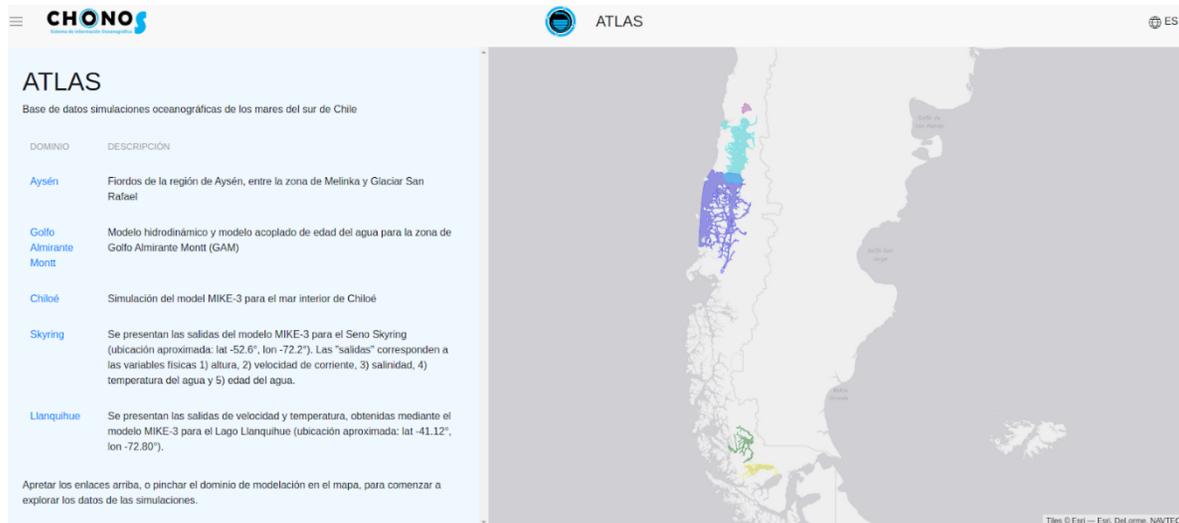


Figura 9. Vista general de la interfaz de ATLAS dentro de la plataforma Chonos. Las zonas achuradas representan la cobertura con modelos hidrodinámicos disponibles.

Tabla 6: Características de implementación de modelos hidrodinámicos para la X y XI regiones.

<i>Parámetros MIKE 3 FM</i>	<i>R1-Chiloé</i>	<i>R2-Aysén</i>
<i>Resolución espacial</i>	<i>Variable ~200 a 1300 m</i>	<i>Variable ~200 a 1000 m</i>
<i>Resolución vertical</i>	<i>55 capas sigma-Z superficie ~1 m, fondo ~20 m</i>	<i>40 capas sigma-Z superficie ~1 m, fondo ~25 m</i>
<i>Resolución temporal</i>	<i>600 s (almacena datos horarios)</i>	<i>300 s (almacena datos horarios)</i>
<i>Periodo de simulación</i>	<i>01-10-2015: 31-12-2018 (3 años)</i>	<i>01-01-2017: 31-12-2018 (2 años)</i>
<i>Condiciones de borde</i>	<i>Climatología CTD -Cimar</i>	<i>Climatología CTD -Cimar</i>
<i>Forzante atmosférico</i>	<i>WRF-IFOP 3 Km</i>	<i>WRF-IFOP 3 Km</i>
<i>Ríos</i>	<i>VIC-IFOP</i>	<i>VIC-IFOP</i>
<i>Modelo de turbulencia</i>	<i>Esquema k-epsilon</i>	<i>Esquema k-epsilon</i>
<i>Tiempo de cómputo para simular 1 año (servidor Intel-32 núcleos)</i>	<i>~12 días</i>	<i>~22 días</i>
<i>Periodo de estabilización (spin up)</i>	<i>3 años</i>	<i>4 años</i>

4. RESULTADOS

4.1 Objetivo 2.2.1: *Modelar hidrodinámicamente la variabilidad interanual del sistema marino de Golfo Almirante Montt, Región de Magallanes y de la Antártica.*

4.1.1 Mediciones

Marea

La onda mareal que penetra en el sistema del Golfo Almirante Montt desde el océano adyacente se canaliza a través del Canal Unión, Paso Morla Vicuña y posteriormente se dirige hacia los canales conectores, Santa María y Kirke. En estos últimos, la onda experimenta una atenuación debido a las constricciones que presentan, con profundidades menores a 20 m. Esta onda mareal atenuada se extiende al Golfo Almirante Montt y se distribuye entre los cuatro fiordos: Poca Esperanza, Worsley, Obstrucción y Última Esperanza.

Se llevaron a cabo análisis en cinco mareógrafos, dos situados antes de las constricciones (Canal Unión y Morla Vicuña) y tres después de ellas (Salustio, Canal Valdés y Obstrucción). A través de un análisis armónico y utilizando el coeficiente de Courtier "F" (**Fig. 10**), se determinó que el régimen mareal en el Canal Unión es semidiurno mixto con un valor de $F = 0.54$ y una amplitud de 0.49 m para el constituyente M2. En el Paso Morla Vicuña, con un $F = 0.43$, la amplitud de M2 es de 0.45 m. Después de las constricciones, en Isla Salustio ($F = 1.15$) y Canal Valdés ($F = 1.34$), el régimen es también semidiurno mixto, pero con amplitudes M2 de 0.054 m y 0.062 m, respectivamente. En el Seno Obstrucción, con un $F = 0.80$, la amplitud de M2 alcanza los 0.074 m. Es notable la atenuación de la onda mareal, evidenciada por una disminución del 89% en la amplitud del constituyente M2 después de la constricción en Santa María (Isla Salustio) y del 87% tras la constricción en Kirke (Canal Valdés).

4.1.1.2 Condiciones Meteorológicas

La estación meteorológica, situada cerca de Puerto Natales ($51^{\circ}44'10.7''S - 72^{\circ}31'36.9''W$), registró datos atmosféricos desde noviembre de 2022 hasta agosto de 2023. Estos datos coinciden con las series temporales de ADCP y otros sensores dispuestos en GAM durante las campañas de 2022-2023. Según la rosa de los vientos por estación (Fig. 11), se identifica una predominancia del viento del oeste durante todo el año, siendo este un rasgo distintivo de la región de Magallanes. Las velocidades más altas del viento se presentan en primavera y verano, especialmente en diciembre y enero, con direcciones predominantes desde el oeste y suroeste. En contraste, durante el otoño e invierno, las velocidades del viento disminuyen, predominando los vientos del oeste y noroeste. La Figura 12 muestra que, en verano, las velocidades del viento del oeste pueden alcanzar hasta 10 m/s, mientras que las componentes norte-sur llegan a 5 m/s. La energía mecánica del viento (Fig. 12c)

revela que la máxima concentración energética se da en primavera y verano, asociada a eventos de alta magnitud, y disminuye hacia el otoño, siendo mínima en invierno.

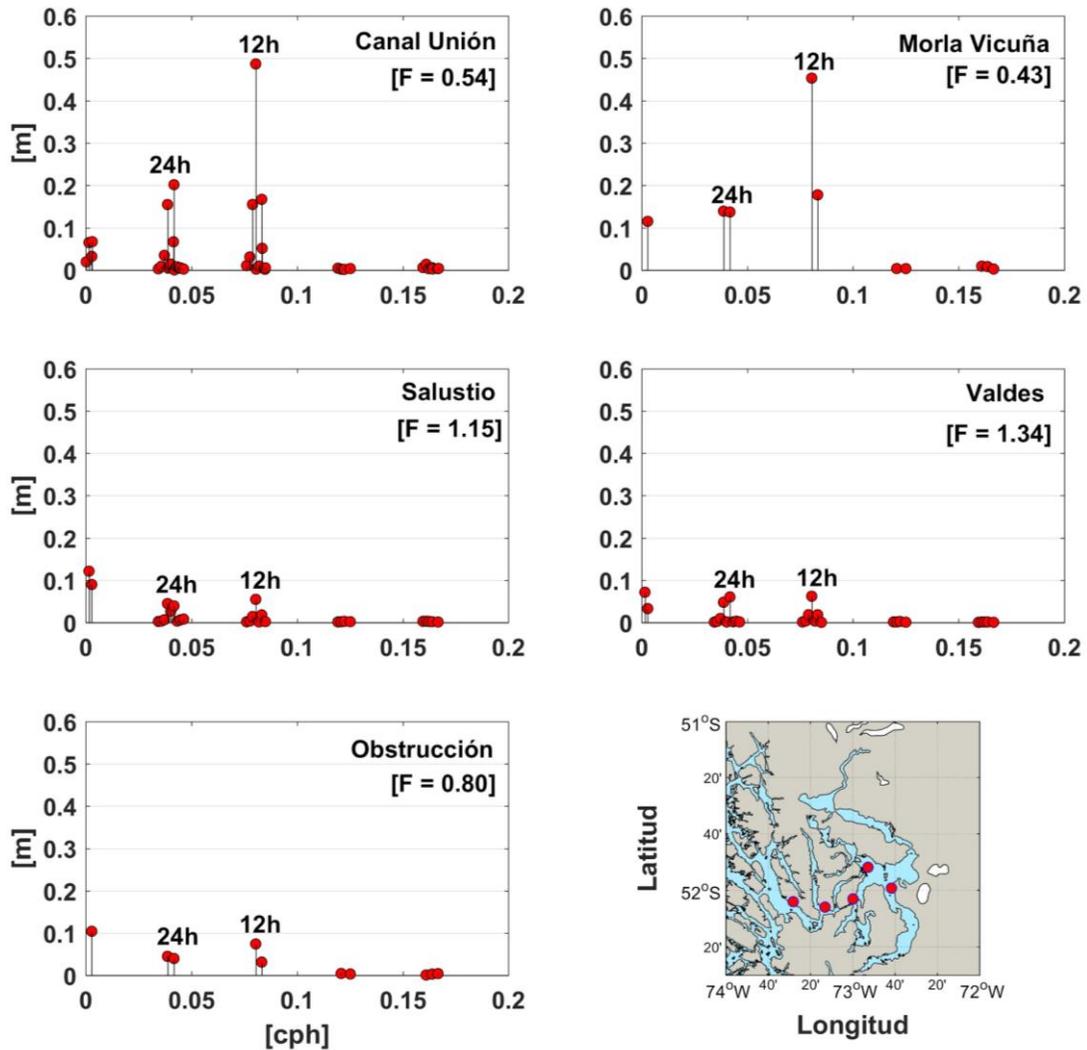


Figura 10: Mareógrafos Golfo Almirante Montt: Espectro de Amplitud y coeficiente de Courtier “F”. a) canal Unión, b) paso Morla Vicuña, c) Isla Salustio (salida canal Santa María), d) Canal Valdés (salida canal Kirke), e) Seno Obstrucción, f) mapa de la ubicación de mareógrafos.

La Figura 13 ilustra las series temporales de radiación, presión y temperatura atmosférica, factores cruciales en latitudes elevadas debido a su influencia directa en las precipitaciones, ya sean líquidas o sólidas, y su relación con el flujo e ingreso de agua dulce al sistema. En el Golfo Almirante Montt, el principal aporte de agua dulce es glaciar, mientras que en GAM proviene mayormente del río Serrano, alimentado por tres glaciares y directamente influenciado por la radiación y temperatura atmosférica. Estas variables muestran una variabilidad estacional: en primavera y verano, la radiación alcanza picos de hasta 2500 uE, descendiendo en otoño e invierno, con mínimos en junio de 100 uE. Las fluctuaciones más significativas en la presión atmosférica ocurren en invierno, oscilando entre 920 mbar y 1020 mbar. En cuanto a la temperatura, se observa una variabilidad estacional pronunciada: las temperaturas más altas se registran en primavera y verano, con un pico en enero de 25°C. A partir de marzo, las temperaturas comienzan a descender, alcanzando mínimas de -9°C en invierno, con máximas de 10°C durante esta estación.

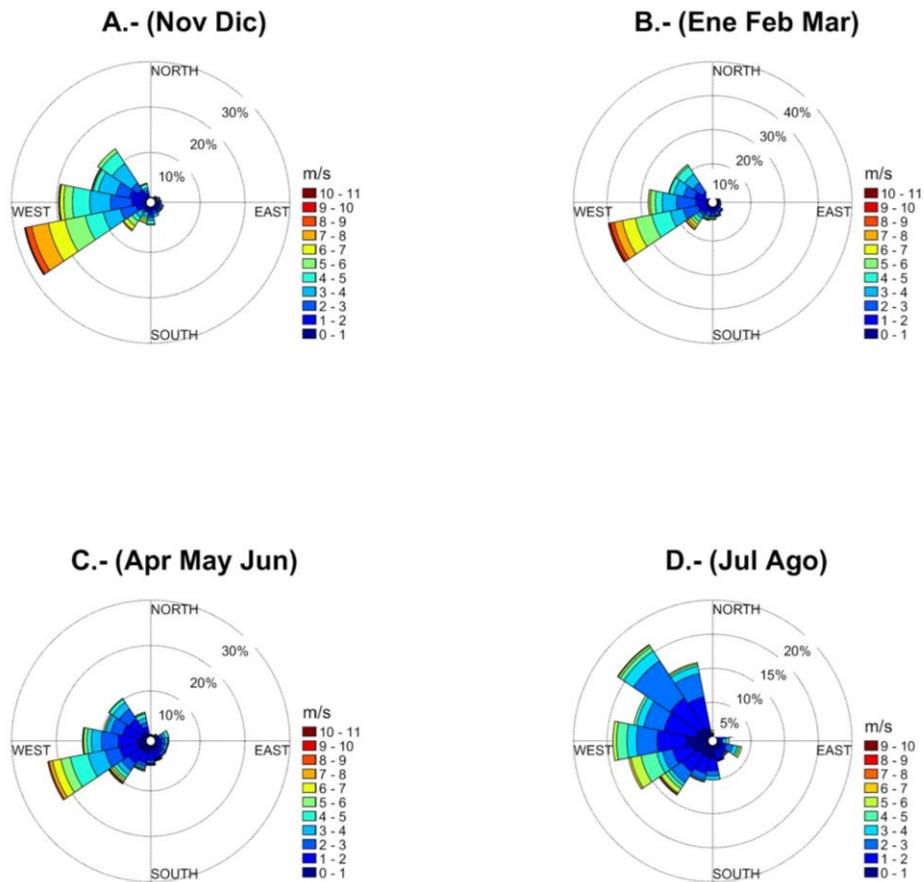


Figura 11: Dirección y velocidad del viento. Rosa de vientos; primavera (noviembre, diciembre), verano (enero, febrero, marzo), otoño (abril, mayo, junio) e invierno (julio, agosto)

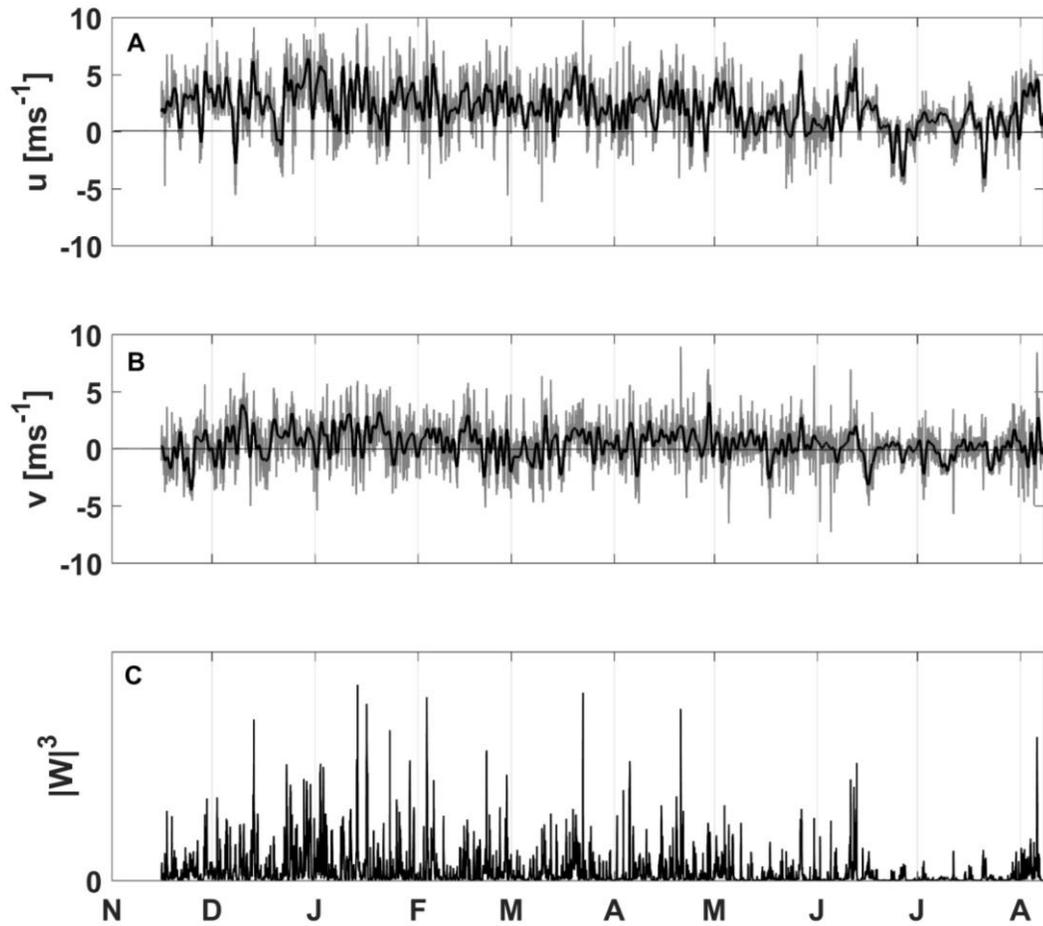


Figura 12: Estación Meteorológica Golfo Almirante Montt (noviembre 2022 - agosto 2023). a) serie velocidad del viento componente u, b) serie velocidad del viento componente v, c) viento mecánico.

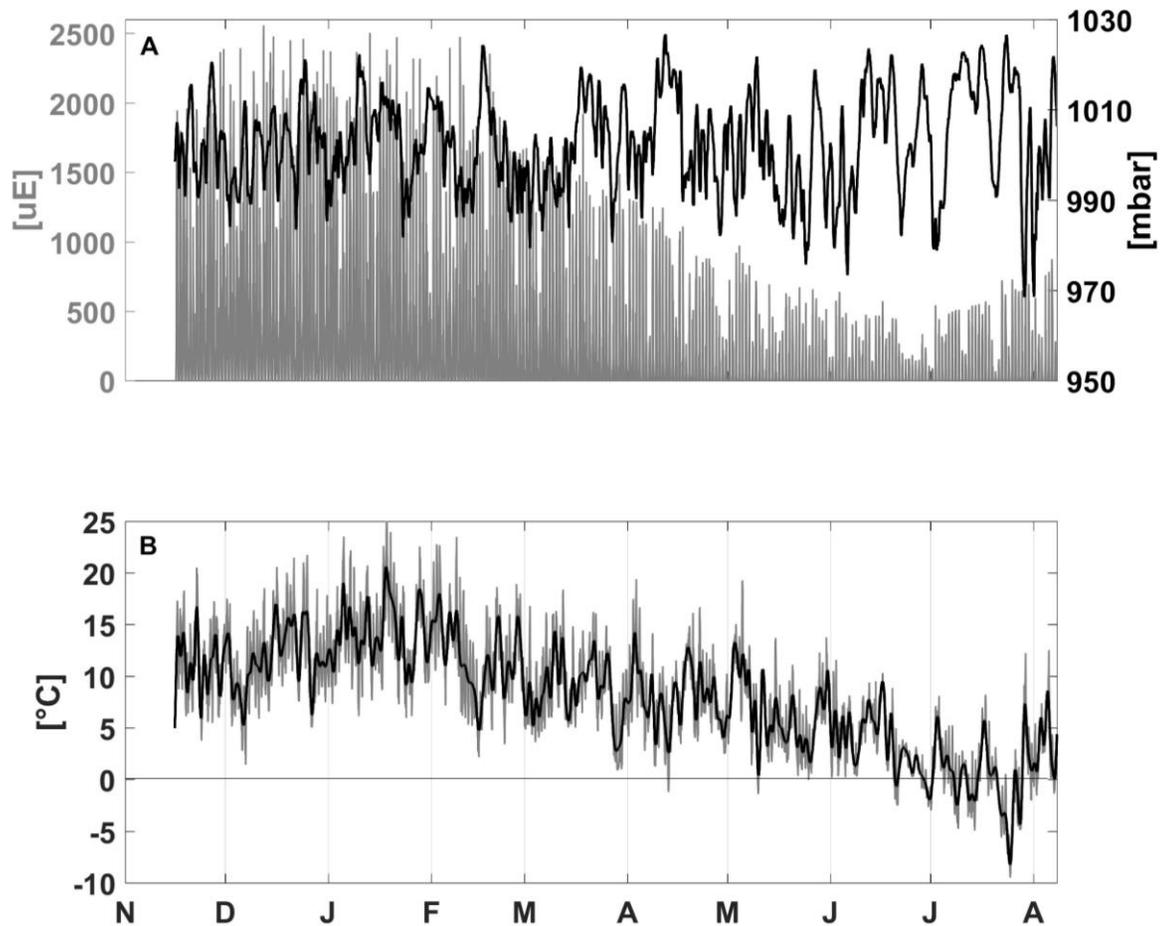


Figura 13: Estaci3n Meteorol3gica, series de tiempo entre noviembre 2022 hasta agosto 2023. a) Izquierda; Radiaci3n solar, derecha; presi3n atmosf3rica, b) serie de tiempo de temperatura.

4.1.1.3 Corrientes

Se llevaron a cabo an3lisis de seis ADCP desplegados en diferentes ubicaciones y periodos: tres anclajes de noviembre 2022 a mayo 2023 en Santa Mar3a, Vattuone y Canal Vald3s (tabla 1); dos anclajes en los canales de conexi3n, espec3ficamente en 3reas de constricci3n, durante marzo-abril de 2016 en Kirke y Santa Mar3a; y un ADCP en Paso Morla Vicu3a entre agosto y octubre de 2012.

En el Paso Morla Vicu3a (Fig. 14), previo a la constricci3n, se identific3 que la principal fluctuaci3n de la corriente residual es en direcci3n oeste-este, alineada con la orientaci3n del canal. Esta corriente residual mostr3 una estructura estuarina dominante de dos capas: entre 0 y 25 m, la corriente se dirige

hacia el oeste, mientras que, por debajo de los 25 m, fluye hacia el este. Las velocidades oscilaron entre 10 y 40 cm s⁻¹. La densidad espectral de la velocidad de la corriente reveló picos significativos en la variabilidad de alta frecuencia, asociados a señales mareales diurnas y semidiurnas, y en la baja frecuencia, máximos cada 3 días.

En el Canal Santa María Sur durante 2022-2023 (Fig.15), la corriente residual osciló principalmente en dirección norte-sur. Por debajo de los 20 m, la corriente fluyó hacia el norte durante todo el año con una velocidad promedio de 2 cm s⁻¹. Por encima de los 20 m, la corriente osciló entre norte y sur con velocidades entre 5 y 2 cm s⁻¹. El perfil mensual (Fig.15 g) mostró que, de diciembre a febrero, la corriente por encima de los 20 m se dirigía hacia el sur, mientras que, de marzo a mayo, esta capa reducía su velocidad y se dirigía hacia el norte. El análisis espectral evidenció una alta energía espectral en alta frecuencia, correspondiente a señales mareales diurnas y semidiurnas.

En el Canal Valdés, dentro de GAM y post-constricción (Fig.16), la corriente residual osciló principalmente en dirección norte-sur con velocidades de hasta 20 cm s⁻¹. La estructura de la corriente mostró un flujo hacia el sur hasta los 10 m, y una corriente subsuperficial (12 m - 40 m) hacia el norte. El perfil medio presentó una estructura de tres capas con máximos de 5 cm s⁻¹. El análisis espectral indicó una disminución de la energía en la componente semidiurna y la ausencia general de energía en alta frecuencia, excepto en la señal de 5 días en la componente norte-sur.

Finalmente, en Vattuone (Fig.17), dentro de GAM, la corriente residual osciló principalmente en dirección oeste-este, con velocidades de hasta 20 cm s⁻¹ que disminuyeron drásticamente con la profundidad. El perfil promedio mostró una capa superficial hasta los 25 m con dirección al este y velocidades de hasta 5 cm s⁻¹. Por debajo de los 25 m, la velocidad fue casi nula. El análisis espectral reveló la ausencia de energía en alta frecuencia, excepto en la componente semidiurna.

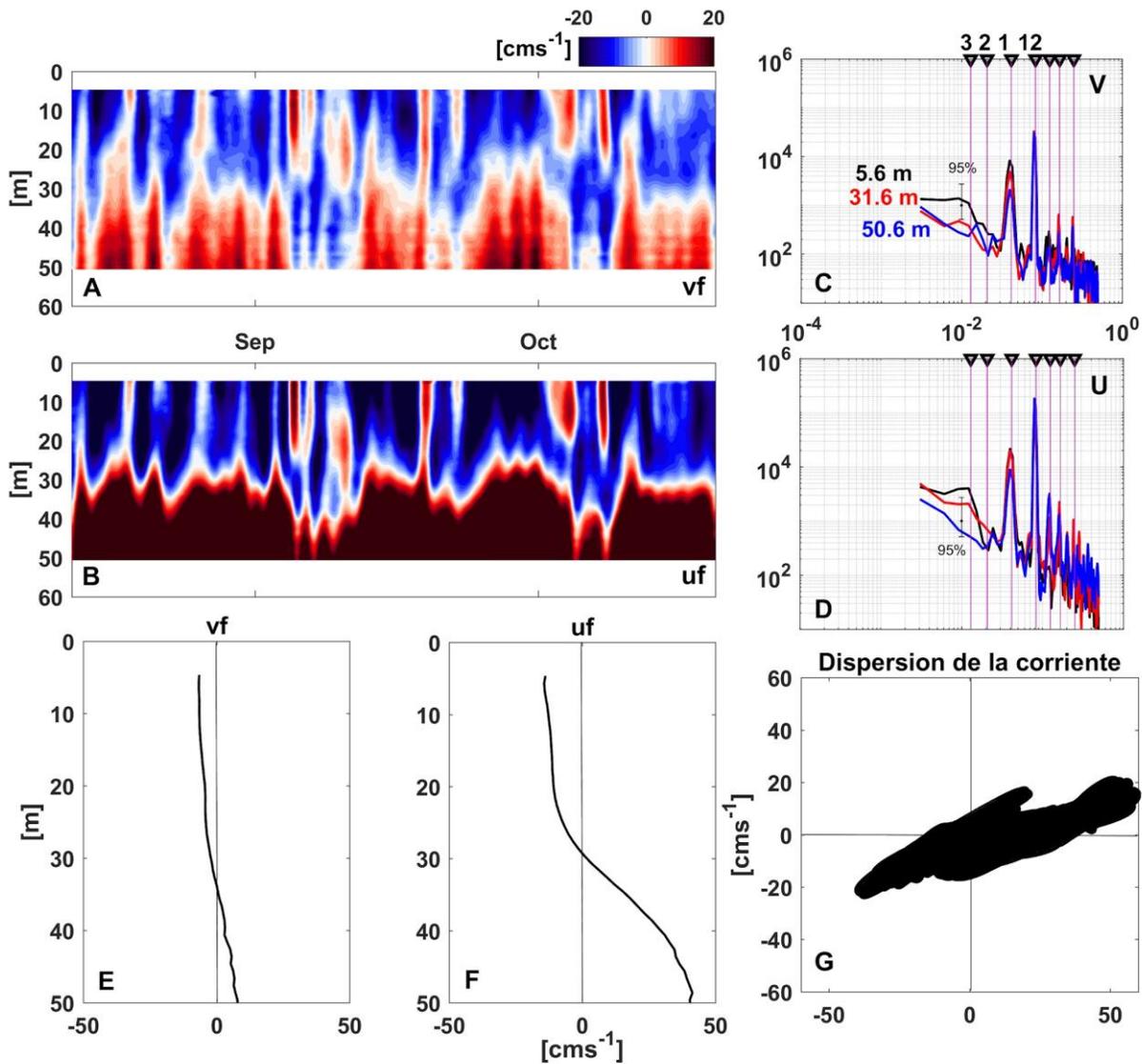


Figura 14: Corriente residual Paso Morla Vicuña (agosto 2012 a octubre 2012), a) corriente residual componente v, b) corriente residual componente u, c) espectro de la componente v de la corriente, d) espectro de la componente u, e) perfil promedio de la corriente residual de la componente v, f) perfil promedio de la corriente residual de la componente u. g) diagrama de dispersión corriente residual.

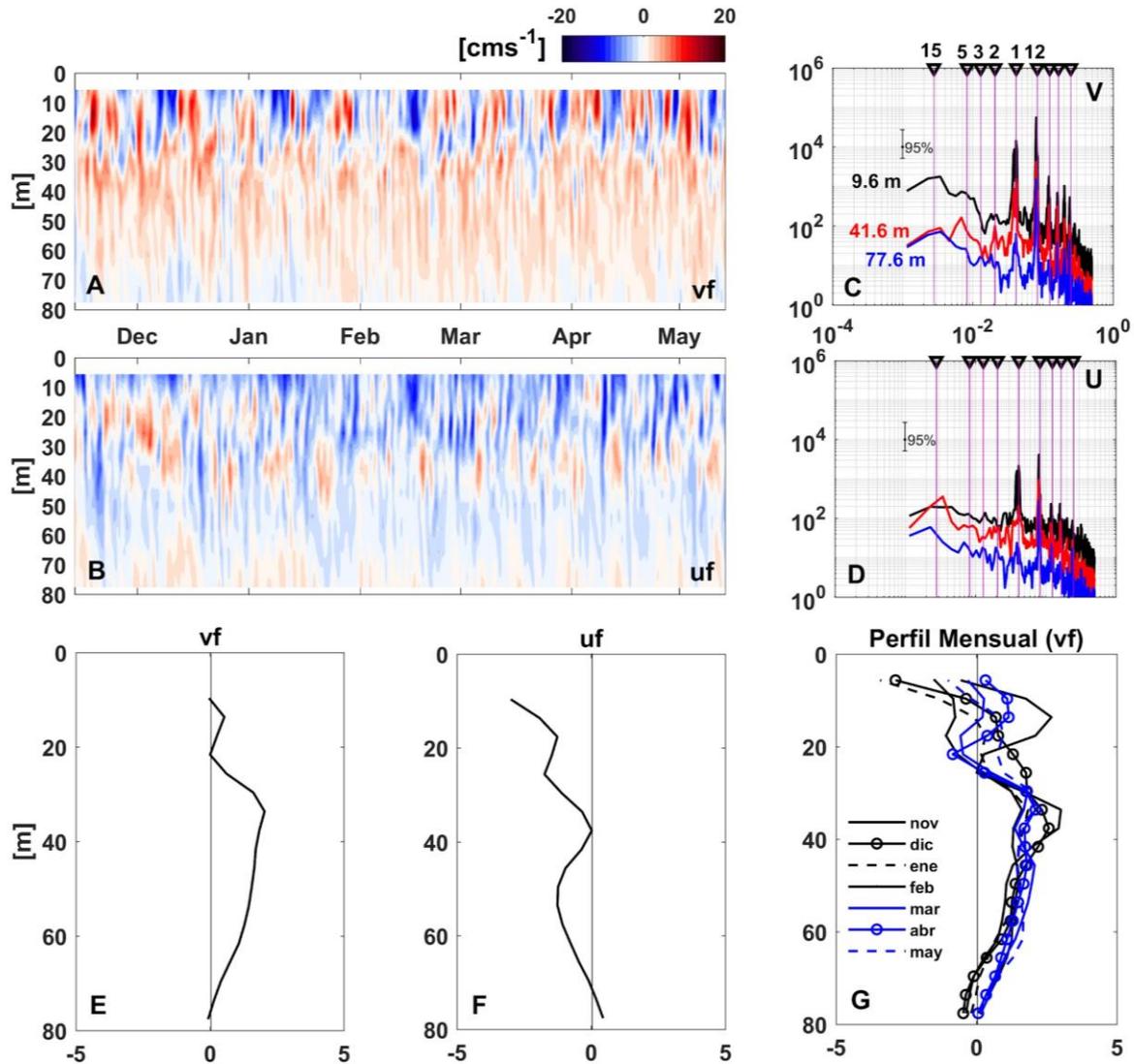


Figura 15: Corriente residual Canal Santa María sur (noviembre 2022 a mayo 2023), a) corriente residual componente v, b) corriente residual componente u, c) espectro de la componente v de la corriente, d) espectro de la componente u, e) perfil promedio de la corriente residual de la componente v, f) perfil promedio de la corriente residual de la componente u. g) perfil promedio mensual de la componente v de la corriente.

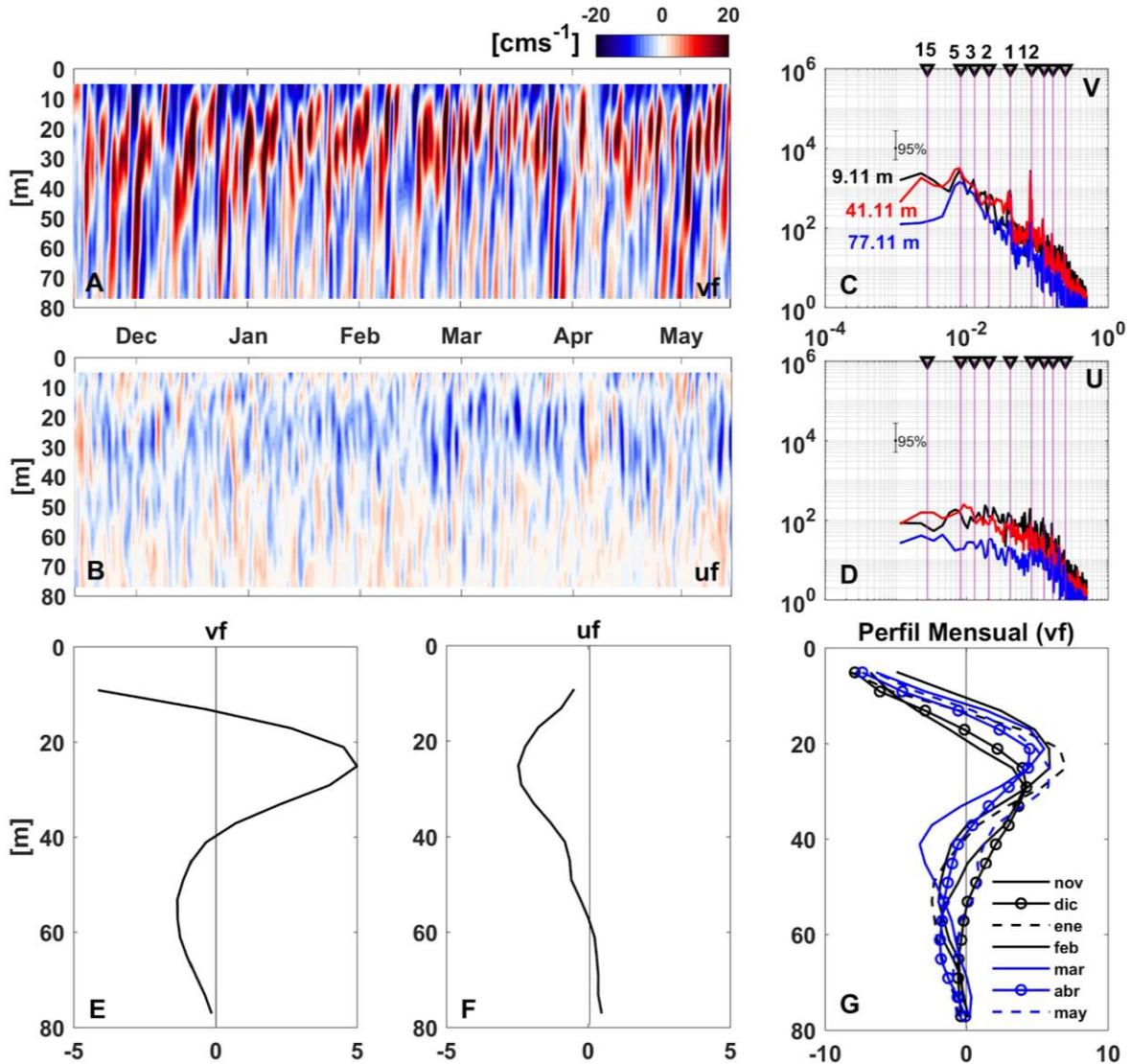


Figura 16: Corriente residual Canal Valdés (noviembre 2022 a mayo 2023), a) corriente residual componente v, b) corriente residual componente u, c) espectro de la componente v de la corriente, d) espectro de la componente u, e) perfil promedio de la corriente residual de la componente v, f) perfil promedio de la corriente residual de la componente u. g) perfil promedio mensual de la componente v de la corriente.

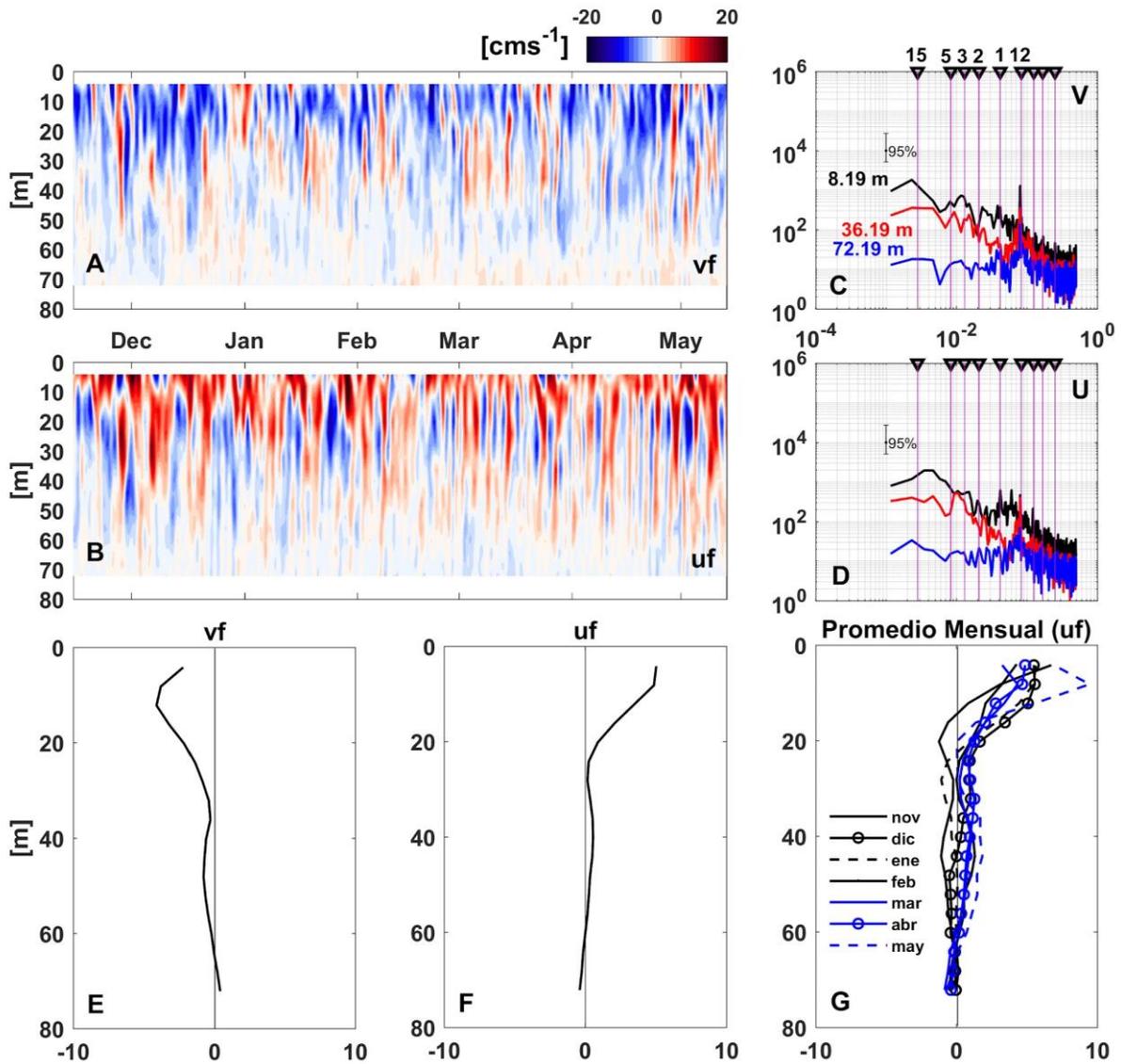


Figura 17: Corriente residual Seno Vattuone (noviembre 2022 a mayo 2023), a) corriente residual componente v, b) corriente residual componente u, c) espectro de la componente v de la corriente, d) espectro de la componente u, e) perfil promedio de la corriente residual de la componente v, f) perfil promedio de la corriente residual de la componente u. g) perfil promedio mensual de la componente v de la corriente.

4.1.2 Modelos numéricos

Los resultados de este objetivo referidos a la obtención de un modelo hidrodinámico en Golfo Almirante Montt se encuentran descritos para cada uno de los componentes que interactúan dentro del sistema de modelación (Fig. 1). Por tanto, los resultados seguirán el mismo orden presentado en la metodología.

4.1.2.1 Validación y patrones atmosféricos: modelo WRF

Entre 2016 y 2018, el modelo WRF muestra un comportamiento estacional del viento, predominando una dirección constante desde el oeste a lo largo del año. Específicamente, en la región occidental del Golfo Almirante Montt (GAM), la topografía empinada da lugar a un núcleo donde la intensidad del viento alcanza valores de entre 15 y 20 m s⁻¹, tal como se refleja en la Figura 18. Durante el verano, se evidencia la mayor intensidad del viento, la cual decrece paulatinamente al acercarse el otoño. Aunque en zonas más interiores del Golfo Almirante Montt (GAM) hay una tendencia a menores velocidades de viento, se destaca que los promedios pueden superar los 10 m s⁻¹ en primavera, pero sobre todo en verano.

Para la validación de las simulaciones del modelo WRF, se contrastaron los datos generados con observaciones de una estación meteorológica ubicada cerca del canal Unión (Fig. 2), correspondientes al verano y otoño de 2016. Con relación a la presión atmosférica, se obtuvo una notable correlación de 0.97, mientras que el Error Cuadrático Medio Raíz (RMSE) para este parámetro fue de 2.3 hPa. La temperatura exhibió una correlación de 0.84 con las mediciones reales y un RMSE de 2.2° C. Al evaluar las componentes del viento, la componente U (este-oeste) mostró una correlación de 0.84 y un RMSE de 2.1 m s⁻¹, mientras que la componente V tuvo una correlación ligeramente superior de 0.87 y un RMSE de 2.2 m s⁻¹ (Fig. 19). Estos resultados muestran que el modelo WRF es capaz de simular las condiciones meteorológicas de estas áreas con características complejas. Esta habilidad brinda confianza en la utilización del WRF como forzamiento atmosférico en modelos hidrodinámicos.

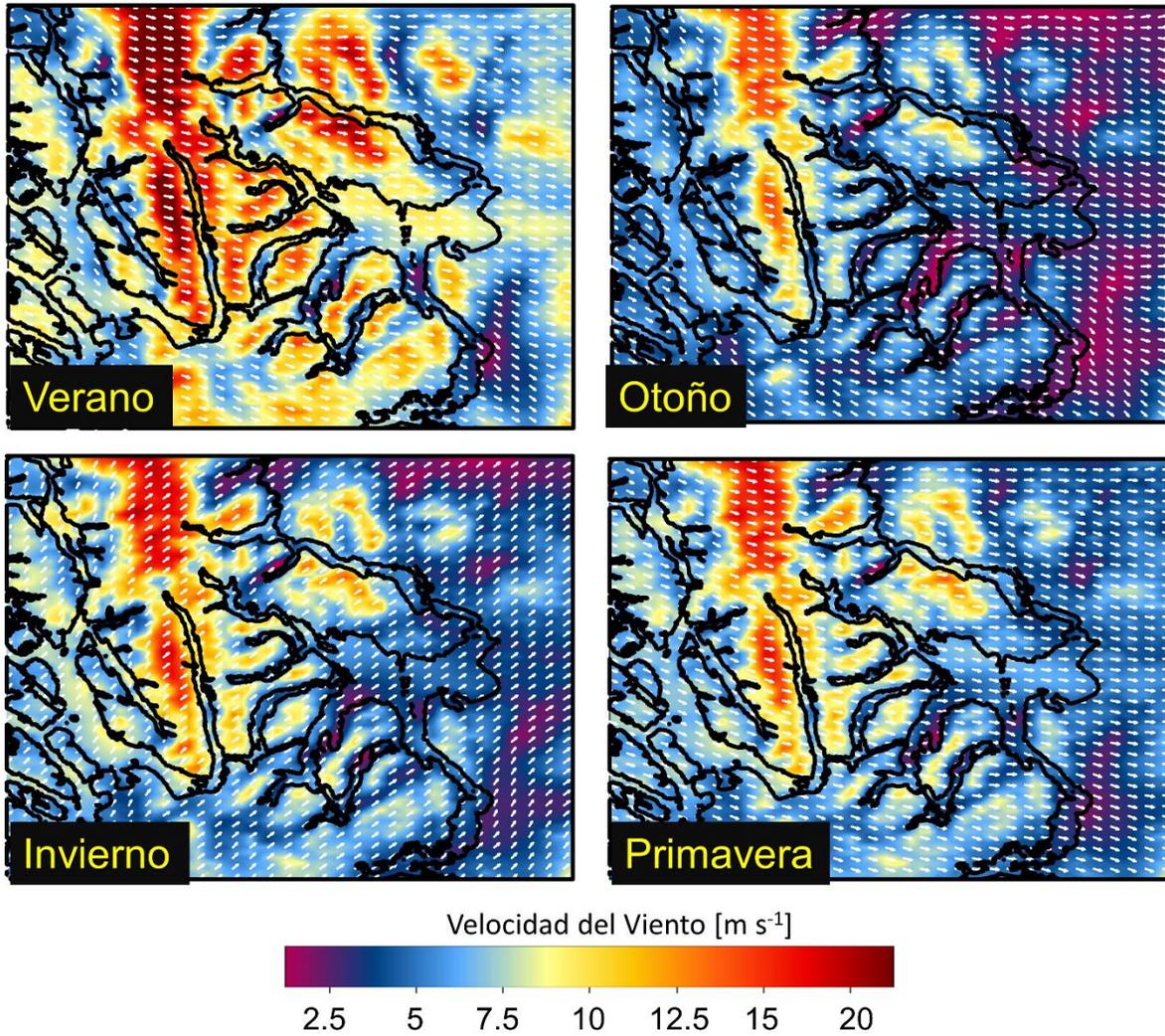


Figura 18. Campos de magnitud (colores) y dirección (flechas) del viento estacional en Golfo Almirante Montt modelados por WRF entre 2016-2018.

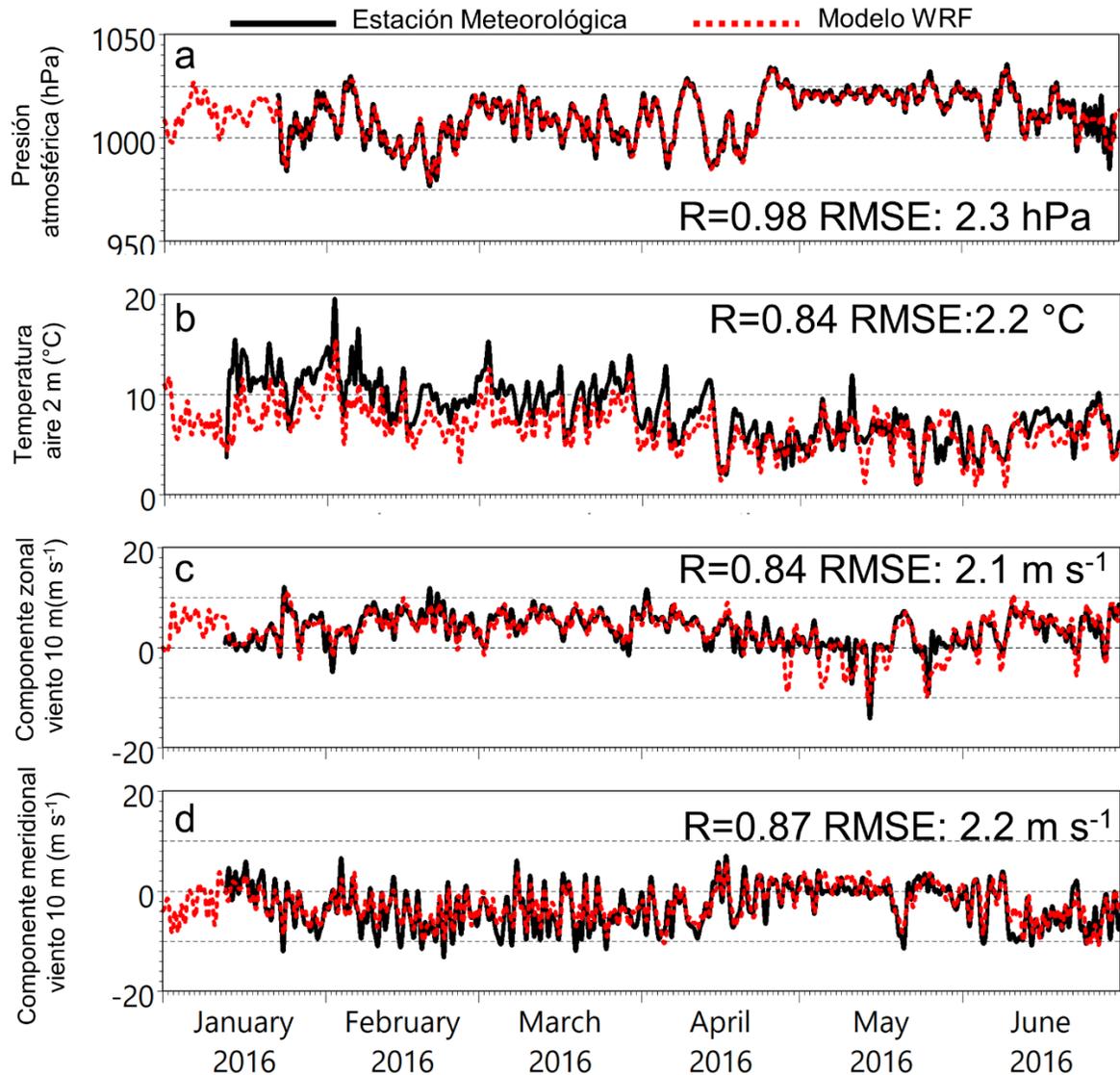


Figura 19. Evaluación de la simulación del modelo WRF en comparación con las observaciones de la estación meteorológica en el Canal Unión durante el verano y otoño de 2016. Se muestran indicadores de correlación (R) y RMSE para la presión atmosférica, temperatura y componentes del viento zonal U y meridional V.

4.1.2.2 Caracterización hidrológica: modelo VIC

Debido a la gran cantidad de fuentes de agua dulce que desembocan en GAM resulta bastante complejo de estimar cada uno de los caudales, sin embargo, el modelo hidrológico VIC muestra que las estimaciones se ajustan de buena manera a las observaciones con correlaciones significativas por sobre 0.5, a excepción de río Hollemberg. En este caso el modelo suele sobreestimar el caudal observado, posiblemente debido a que por definición la cuenca sintética estimada representa una mayor superficie que abarca un gran número de fuentes de agua dulce, en lugar de considerar únicamente el caudal específico del río Hollemberg. Por otro lado, es importante destacar la buena habilidad del modelo en representar la magnitud del río Serrano, ya que su caudal representa la mayor parte del caudal total que ingresa a todo el Golfo Almirante Montt, en este caso las correlaciones alcanzan valores significativos por sobre 0.7, con una desviación estándar que representa aproximadamente un 70% a la de las observaciones y un sesgo que no supera los $7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Tabla 7). Los caudales medidos por las tres estaciones de monitoreo muestran un marcado ciclo anual, con una estacionalidad que revela máximos en verano (DEF) y primavera (SON), y mínimos en invierno (JJA) (Fig. 20a). Si bien el modelo hidrológico suele sobrestimar la magnitud de los caudales en algunas cuencas pequeñas, la variabilidad del ciclo anual suele estar bien representada (Fig. 20b).

Tabla 7. Estadísticos de validación entre las estaciones de la DGA y las estimaciones del modelo hidrológico VIC. o: observado (estaciones DGA), y: Estimado (VIC), r: Correlación, S: Desviación estándar.

Fuente	o	y	r	Sy/So	y -o
Río Serrano	421	428	0.75	0.761	6.36
Río Prat	2.6	9.4	0.56	3.87	6.8
Río Hollemberg	4.2	26	0.22	5.31	21.8

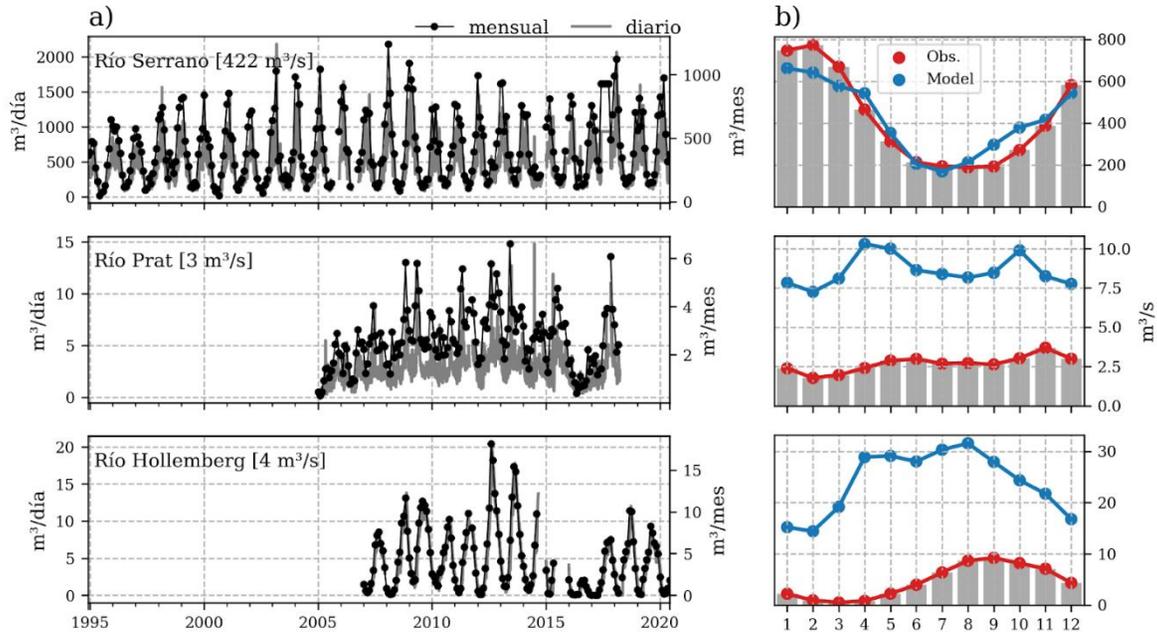


Figura 20. a) Caudal diario y mensual (estaciones DGA). b) Ciclo anual de caudales estaciones DGA y simulaciones VIC (producto FLOW-CHONOS).

Los resultados de las simulaciones en Golfo Almirante Montt muestran que el sistema recibe un importante aporte fluvial en la zona norte del dominio donde destaca la cuenca del río Serrano con un caudal medio estimado de $428 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$. Con un caudal bastante menor le siguen la cuenca que integran al río Hollelberg y la cuenca al sur de Estero Poca Esperanza con un caudal estimado de $24 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ (Fig. 21a). Por otro lado, la distribución espacial de precipitación revela un gradiente longitudinal, con máximos entre 4 a 6 mm dia^{-1} hacia el oeste del dominio y menores a 2 mm dia^{-1} hacia el este de Puerto Natales (Fig. 21b).

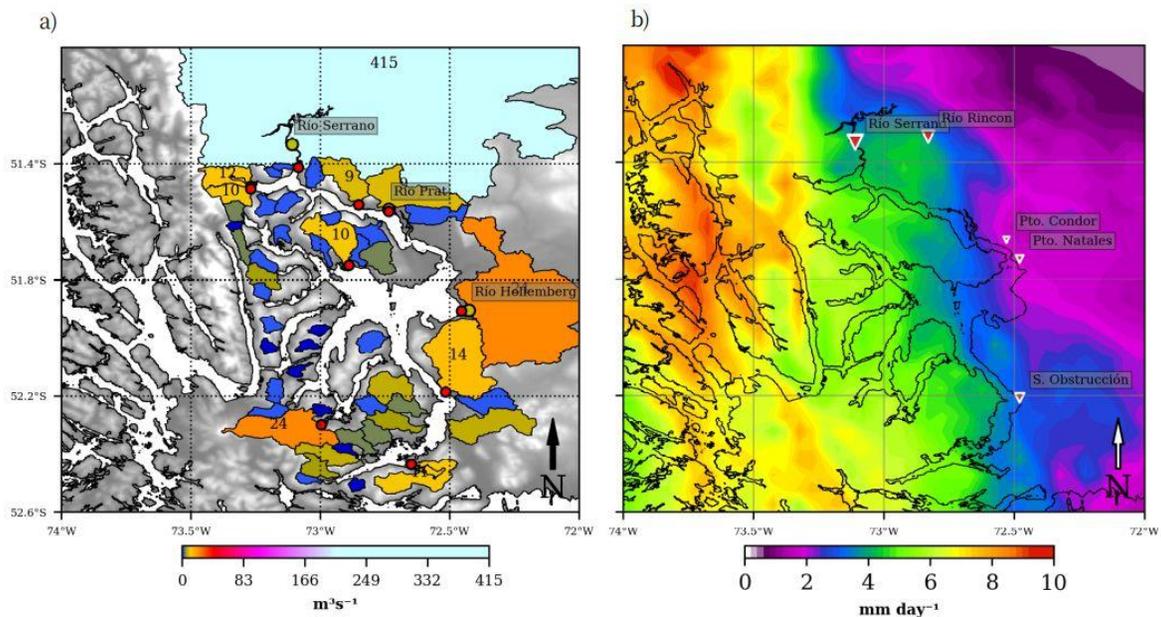


Figura 21. a) Caudal medio de las 50 principales cuencas que desembocan en GAM (FLOW). b) Precipitación media diaria (producto CR2MET).

La variabilidad interanual de los aportes de agua dulce y temperatura en todo el dominio GAM se puede observar en la Fig. 5. Al considerar todas las cuencas que contribuyen con agua dulce al sistema se estima un caudal medio de $762 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ donde aproximadamente el 55% corresponde exclusivamente al río Serrano. La precipitación acumulada anual promedio de todo el dominio es de 1534 mm, mientras que la temperatura media se sitúa alrededor de $5 \text{ }^\circ\text{C}$. En líneas generales, el dominio GAM exhibe un marcado ciclo anual, caracterizado por máximos que se extienden desde noviembre hasta abril, superando los $1000 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en términos de caudal. En contraste, durante la temporada de invierno, se registran mínimos que alcanzan aproximadamente los $400 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ en julio (Fig. 22). Este patrón estacional está vinculado a las variaciones de precipitación y temperatura, variables utilizadas directamente para la simulación de los flujos.

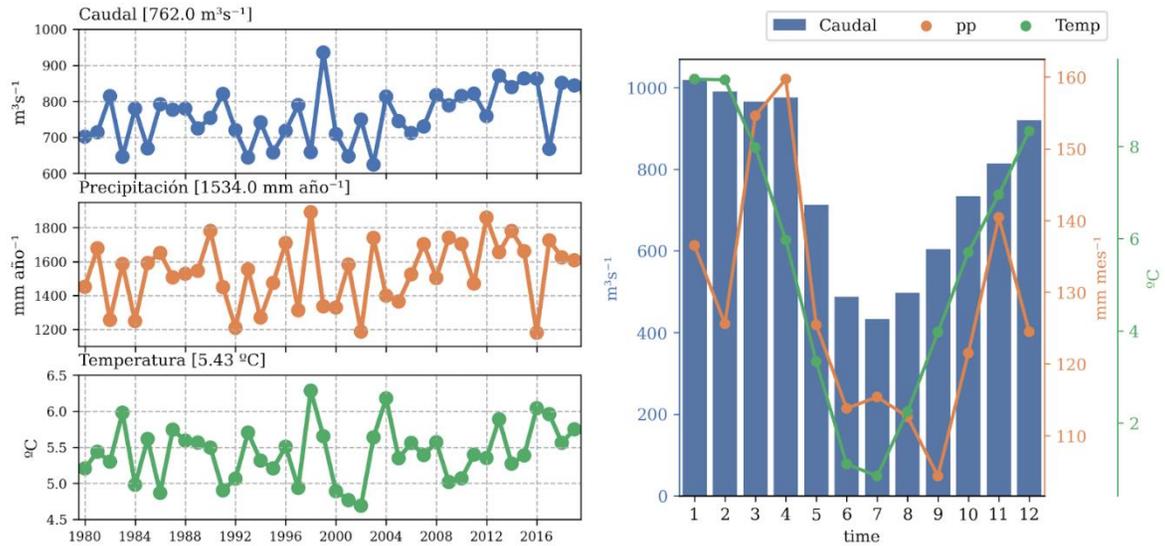


Figura 22. Variabilidad interanual (izquierda) y ciclo anual (derecha), del caudal (FLOW-CHONOS), precipitación (CR2MET) y temperatura (CR2MET) en Golfo Almirante Montt.

Además, es importante destacar que la señal de los caudales presenta una tendencia positiva de $2.32 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ por año, la cual resulta ser significativa con una confianza del 95% según un test de Mann-Kendall. Es posible que esta tendencia esté relacionada con el observado aumento de las temperaturas y las precipitaciones durante las últimas décadas (Fig. 22). Es posible que estas tendencias se mantengan en el futuro, como lo sugieren los resultados de estudios sobre las proyecciones del cambio climático en diversos escenarios (Araya-Osses, D. et al. 2020).

Es importante destacar que estas tendencias son particularmente significativas en el sector norte del dominio (Fig. 23). Este sector coincide con la zona que presenta una mayor cobertura glacial, lo que podría sugerir una mayor influencia de la temperatura sobre la tendencia de los caudales en el dominio GAM.

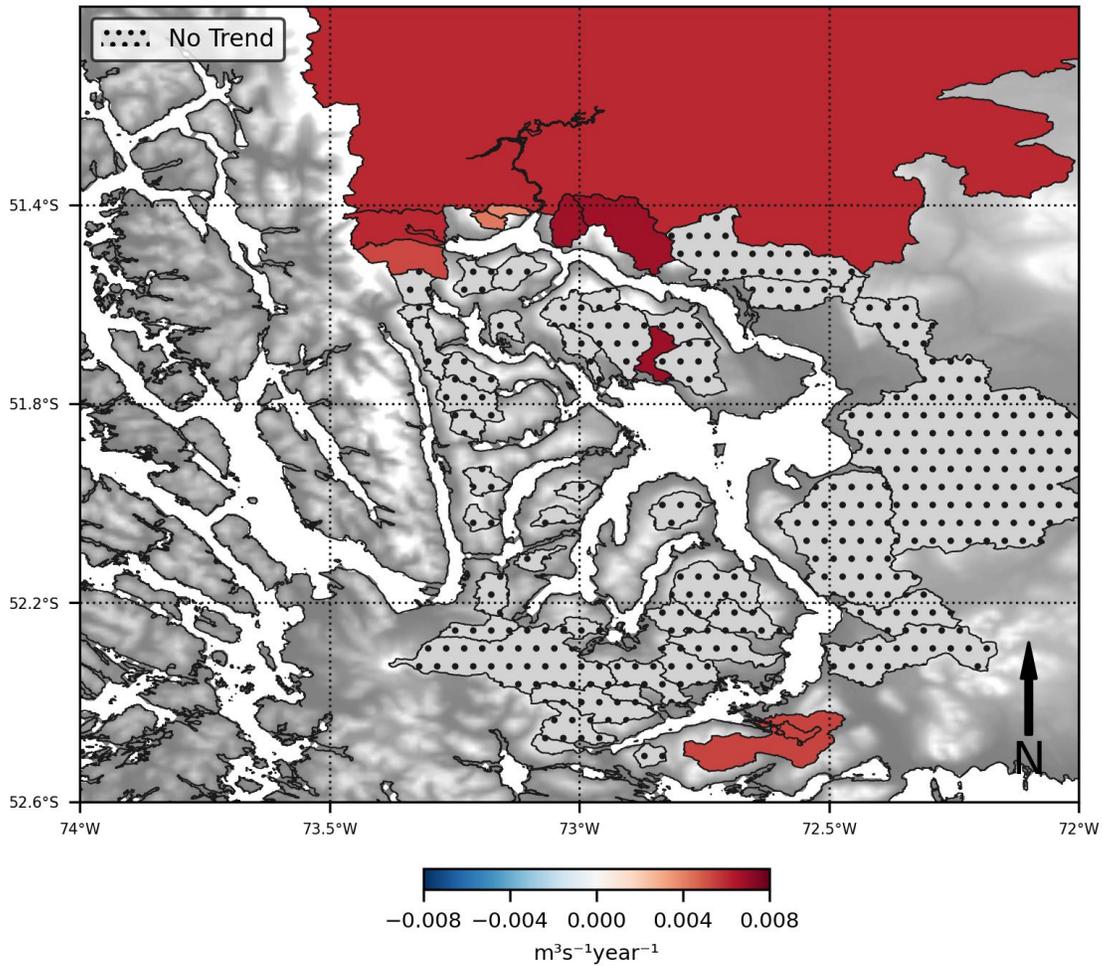


Figura 23. Magnitud de la tendencia estandarizada en las principales 50 cuencas que aportan agua dulce sobre el sistema de Golfo Almirante Montt. Los puntos señalan las cuencas que no son estadísticamente significativas ($p > 0.05$). Caudales simulados entre 1980-2021 por el modelo hidrológico VIC.

4.1.2.4 Evaluación de características hidrográficas en modelo hidrodinámico

El Golfo Almirante Montt (GAM) es una cuenca semicerrada en la región de Magallanes (**Fig. 5**) limitada por los umbrales batimétricos, principalmente canal Kirke y Santa María, presenta profundidades menores a 20 m al lado oeste de GAM, cercanías de Puerto Natales, también en los canales antes mencionados, mientras que la máxima profundidad supera los 500 m en la cabeza del seno Ultima Esperanza. Esta complejidad batimétrica genera una compleja distribución de la hidrografía. En esta sección se analizó el desempeño del modelo para reproducir las estructuras hidrográficas en diferentes sitios de GAM.

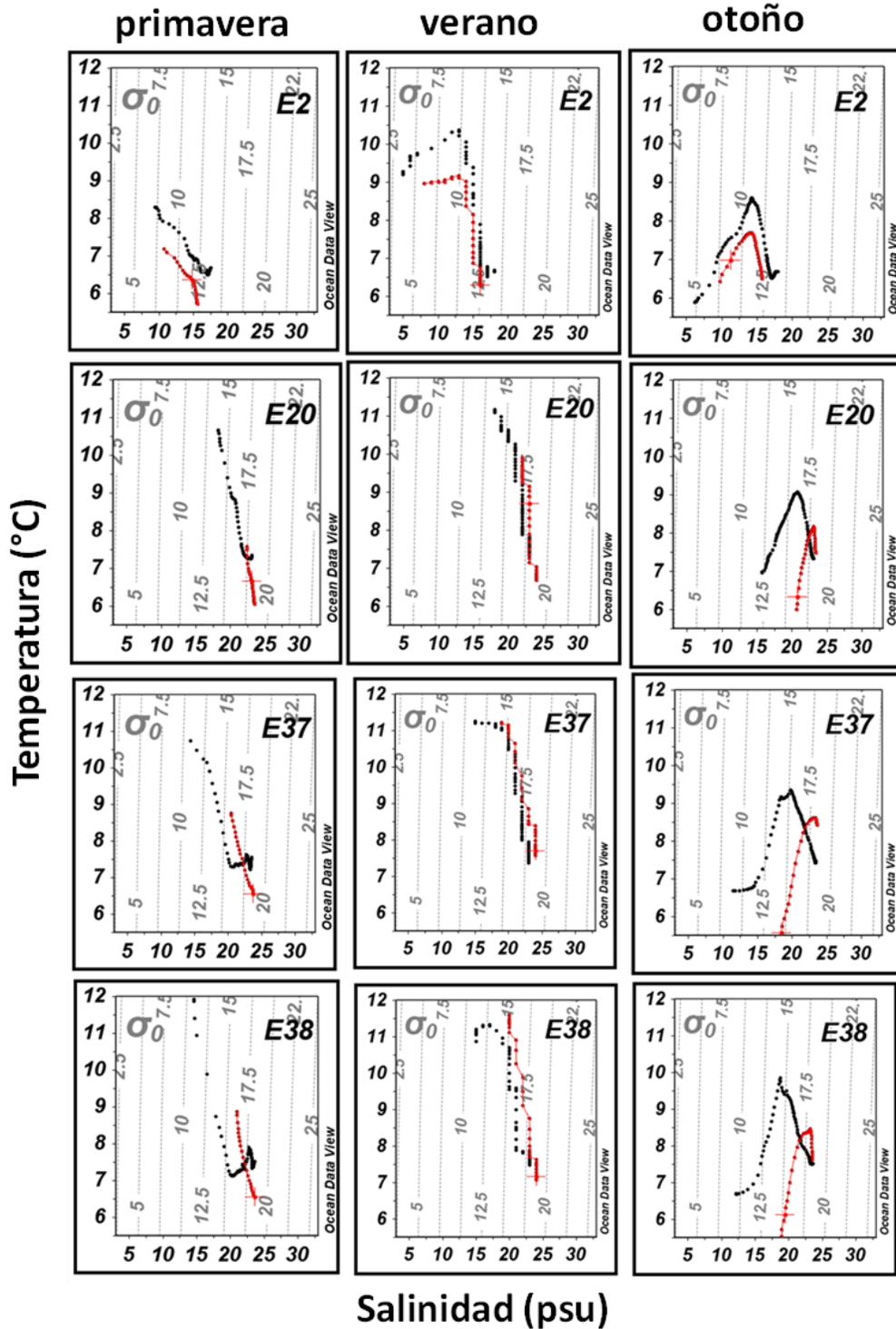


Figura 24. Diagramas TS para representar una comparación entre las observaciones realizadas con CTD ● y el modelo ●. Correspondiente a estaciones dentro del Golfo Almirante Montt

Evaluando la habilidad del modelo hidrodinámico para simular las estructuras verticales de las propiedades físicas de la columna de agua, específicamente temperatura y salinidad, es fundamental para validar su precisión y aplicabilidad. Para analizar de manera integral estas estructuras, se elaboraron gráficos de relación temperatura-salinidad, basados en datos recogidos de estaciones específicas. Estos datos se compararon con las predicciones del modelo a través de diagramas de temperatura y salinidad. Es crucial destacar que esta comparación se llevó a cabo usando datos de diferentes años, lo que podría introducir una potencial fuente de error. Este error podría deberse no solo al rendimiento del modelo, sino también a las fluctuaciones naturales que ocurren con el tiempo en este sistema.

En la Figura 24, se muestran gráficos de estaciones situadas dentro del Golfo Almirante Montt (GAM). Aunque el modelo reproduce adecuadamente la estructura en la mayoría de las estaciones, hay notables diferencias. Por ejemplo, en la estación E2, el modelo tiende a subestimar tanto la temperatura como la salinidad. Sin embargo, en las estaciones E20, E37 y E18, el modelo sobreestima la salinidad, aunque no necesariamente la temperatura. Es relevante mencionar que en otoño se observan las mayores discrepancias entre el modelo y las mediciones reales.

Para las estaciones fuera del GAM, se encontró un ajuste superior en comparación con las estaciones internas. De manera general, las estaciones E24 y E26 muestran una tendencia del modelo a subestimar la temperatura, pero no la salinidad. Las estaciones E28 y E29, durante la primavera y el verano, presentan el mejor ajuste entre los valores observados y modelados para ambas variables como se puede ver en la Figura 25.

Para una comprensión detallada de la temperatura y la salinidad, se comparó un transecto vertical promedio en el tiempo (primavera, verano y otoño). En relación con la salinidad, el modelo representa de manera adecuada la estratificación y las distintas masas de agua en el sistema GAM, particularmente en los fiordos más profundos (estaciones 2, 20 y 22). Sin embargo, se observa una sobreestimación de la salinidad, siendo más notorio en las estaciones 16, 8, 35 y 34. A pesar de estas variaciones temporales entre mediciones y observaciones, el modelo simula correctamente las diferencias espaciales observadas en el transecto (Figura 26b y 26c). En cuanto a la temperatura promedio, el modelo muestra una concordancia adecuada en las zonas más oceánicas (estaciones 26-31) hacia la región interior del GAM. No obstante, subestima la temperatura superficial promedio, desplazando la isoterma de 8°C a un estrato más superficial que las observaciones (Figura 26d y 26e).

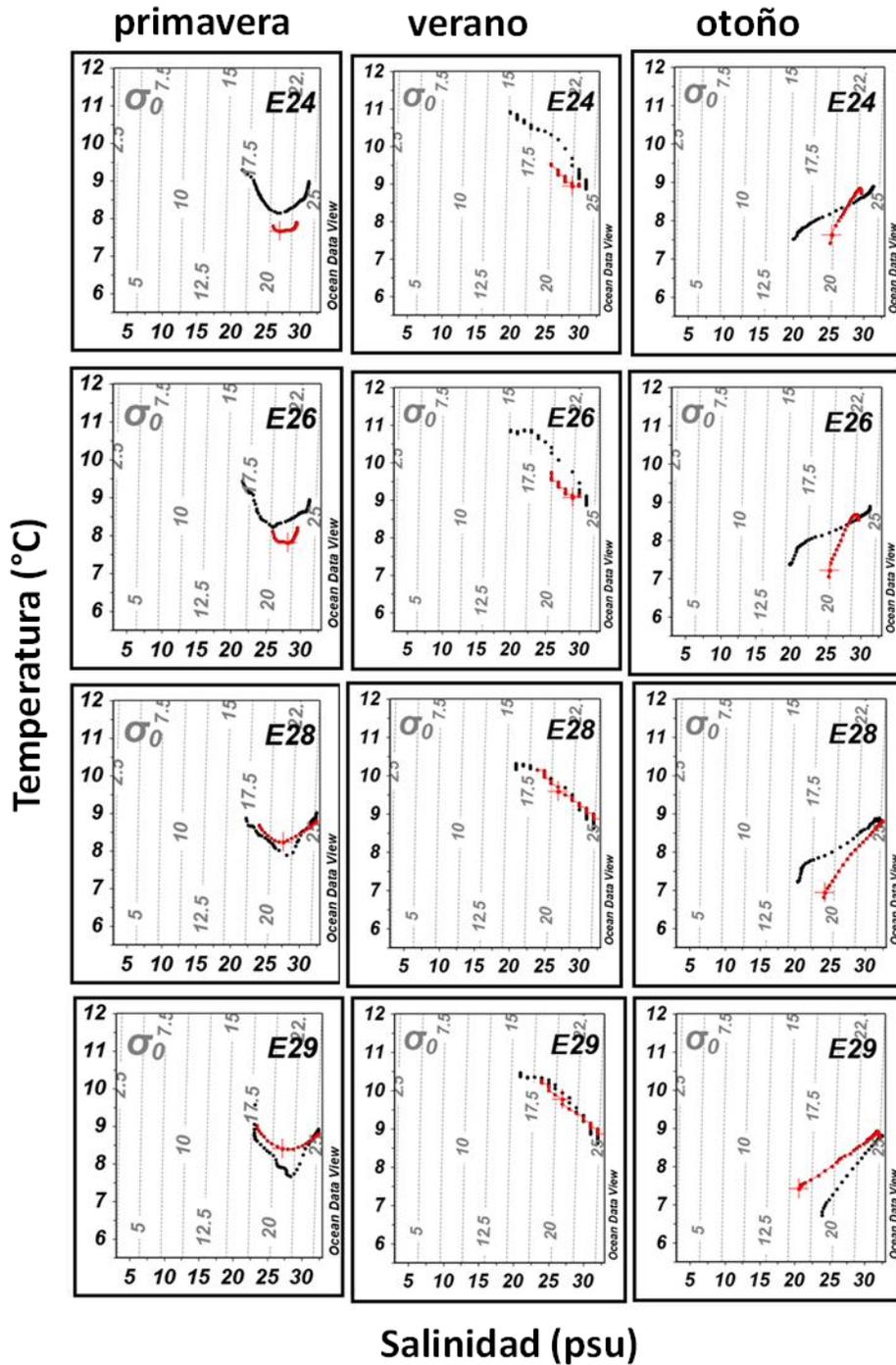


Figura 25. Diagramas TS para representar una comparaci3n entre las observaciones realizadas con CTD ● y el modelo ●. Correspondiente a estaciones fuera del Golfo Almirante Montt (conexi3n oceánica).

4.1.2.5 Temperatura, salinidad circulación modelada

En el Golfo Almirante Montt (Fig. 27), se observan valores medios estacionales que presentan máximos en verano y mínimos en invierno. En la temporada estival, la temperatura en esta capa es más alta hacia el lado sur, promediando más de 12°C. En contraposición, hacia el lado norte, especialmente cerca de las descargas de agua dulce glacial en el seno Última Esperanza, la temperatura es más baja, aproximadamente 10°C. Al considerar mayores profundidades (20 m-fondo), se identifica un patrón espacial análogo, aunque con temperaturas alrededor de 2°C inferiores. Durante el invierno, las temperaturas más bajas rondan los 5°C, siendo menores en la región sur. Un hallazgo notorio es que, en ciertas áreas, como los canales de conexión (Unión, Kirke, Santa María), las temperaturas de fondo superan en aproximadamente 1°C a las superficiales. Esta anomalía podría deberse a una inversión térmica invernal, fenómeno común en fiordos.

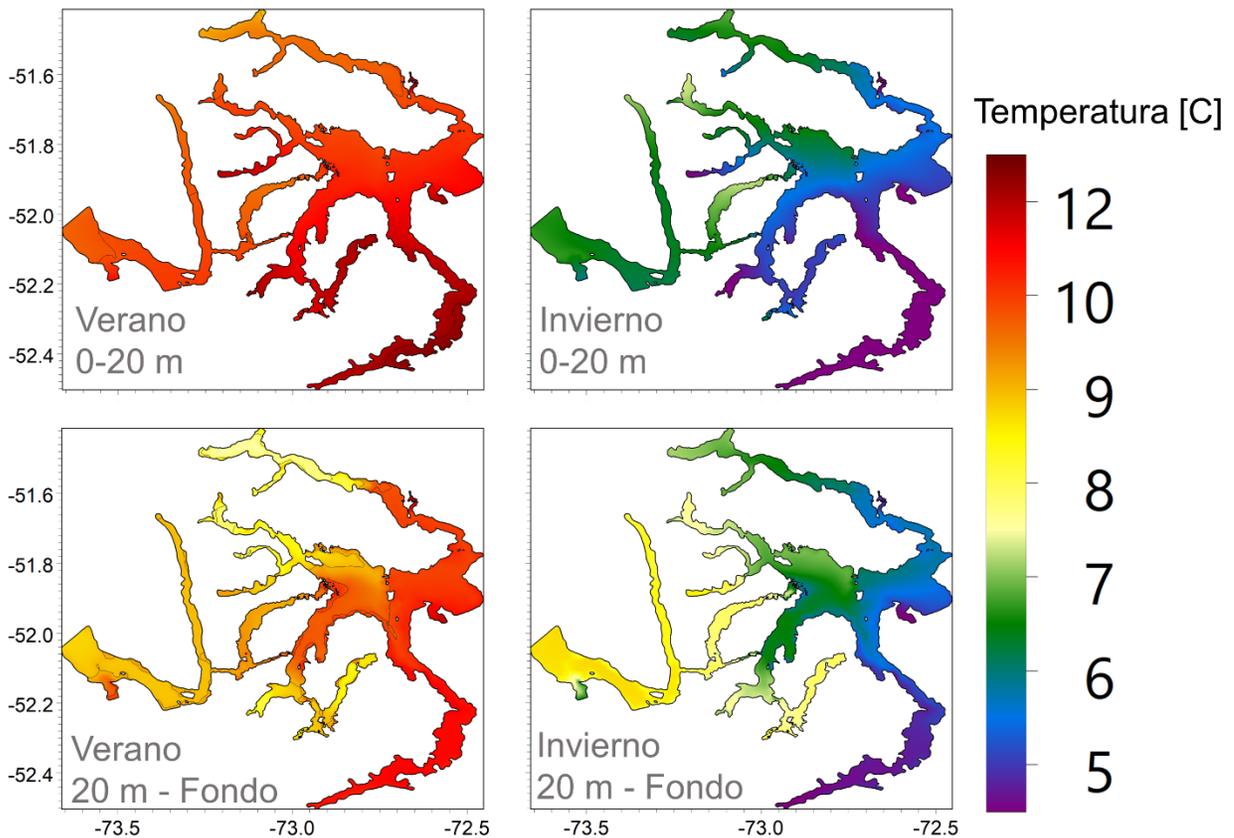


Figura 27: Temperatura superficial modelada (0-20 m) (panel superior) y 20 m- fondo (panel inferior) para la estación de verano (panel izquierdo) e invierno (panel derecho) entre 2016-2018.

En el verano, la salinidad media superficial (0-20 m) (Fig. 28) tiende a ser inferior en comparación con el invierno, probablemente debido a una mayor descarga de agua dulce en esta estación, siendo notablemente evidente en el seno de Última Esperanza, donde se registran salinidades inferiores a 15 psu. En cuanto a las capas más profundas, la salinidad se mantiene relativamente constante entre verano e invierno, oscilando desde ~33 psu en las zonas periféricas del canal Unión hasta cerca de 20 psu en Última Esperanza. Cabe destacar una salinidad elevada en el Canal Valdez, indicando una principal vía de conexión entre el exterior y el Golfo Almirante Montt a través del canal Kirke. La validación de este modelo reveló, en general, una sobrestimación tanto en salinidad como en nivel del mar dentro del Golfo Almirante Montt. Este hallazgo apunta a que el intercambio en el canal Kirke podría estar excesivamente valorado, posiblemente debido a una representación imprecisa de la batimetría en dicho canal. Estas observaciones se abordarán con más detalle en el capítulo de Discusión.

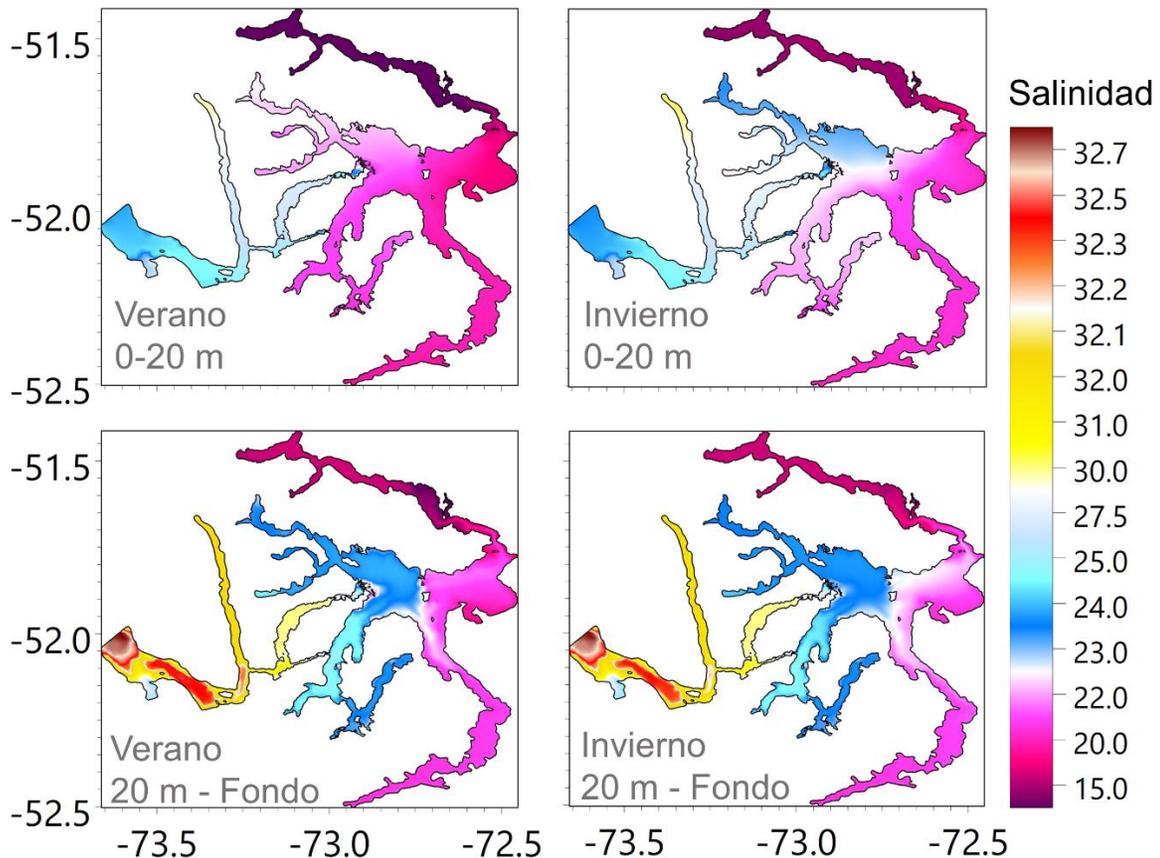


Figura 28: Salinidad superficial modelada (0-20 m) (panel superior) y 20-fondo (panel inferior) para la estación de verano (panel izquierdo) e invierno (panel derecho) entre 2016-2018.

La variabilidad en la circulación de las corrientes, influenciada por factores como la descarga de ríos y viento, muestran la máxima variabilidad durante las estaciones de verano y otoño. El patrón de circulación superficial, representado en la Fig. 29, muestra una dirección predominante del flujo desde el interior hacia el exterior. Esta tendencia es especialmente pronunciada y parece estar fuertemente asociada al gradiente de presión baroclínico. Durante el verano, este flujo es más intenso que en otoño, llegando en algunas áreas a exceder los $\sim 15 \text{ cm s}^{-1}$.

En contraste, las cabezas de los fiordos, específicamente en los fiordos Worsley y Poca Esperanza, exhiben una significativa reducción en la velocidad, a menudo descendiendo a menos de 5 cm s^{-1} . Al explorar más profundamente, en las capas profundas, es evidente la presencia de vastas áreas con velocidades bajas, particularmente en sitios como el seno Última Esperanza, Fiordo Worsley y su conexión al Golfo, y el Fiordo Poca Esperanza, donde las velocidades son menores a 1 cm s^{-1} .

Se destaca una posible interrelación entre estas zonas de baja velocidad en las capas profundas y ciertas variables químicas. Específicamente, en el capítulo de Discusión, se aborda en profundidad la posible correlación entre estas áreas y los valores de oxígeno disuelto y nutrientes, sugiriendo implicaciones biogeoquímicas y ecológicas para el ecosistema marino en la región.

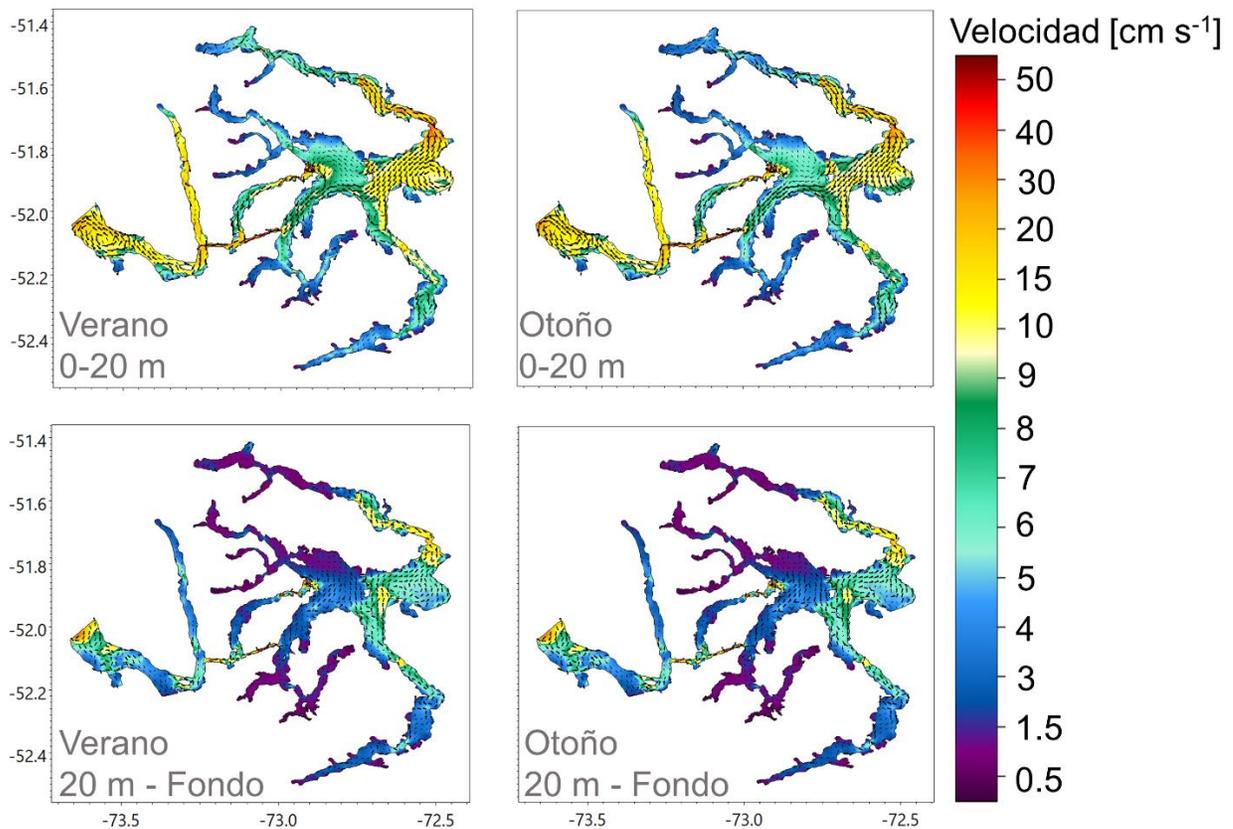


Figura 29. Circulación superficial modelada (0-20 m) (panel superior) y 20-fondo (panel inferior) para la estación de verano (panel izquierdo) e Otoño (panel derecho) entre 2016-2018.

4.2 Objetivo 2.2.2. Calcular el intercambio de agua interanual mediante un modelo de trazador acoplado al modelo hidrodinámico en Golfo Almirante Montt

El intercambio de agua fue calculada a través del concepto de edad del agua, que está definida como el tiempo que ha pasado desde que una partícula de agua (o cualquier otro trazador) entró en un sistema (Borde canal Unión y ríos) hasta el momento en que se considera o se mide. De esta manera puede ayudar a entender cuánto tiempo ha pasado desde que una parcela de agua entró en ese sistema y cuánto tiempo ha estado circulando dentro. Esta métrica puede ser crucial para entender procesos como la mezcla, la difusión, la circulación y otros fenómenos relacionados con el movimiento y la calidad del agua.

Los valores estacionales de edad del agua, promediadas para el periodo 2016-2018 y también verticalmente, muestran que el Golfo Almirante Montt tiene valores máximos cercano a los 3 años (>1000 días), con una clara estructuración espacial, dejando valores bajo los 300 días, desde los canales Kirke y Santa María hacia el oeste y sobre 400 días desde estos canales hacia el interior (**Fig. 30**). Los mayores valores se encuentran en general en las cabezas de los fiordos, siendo aquellos más profundos como el seno Ultima Esperanza el que destaca por sus valores más elevados (mayores a 1000 días), también destacan los altos valores de fiordo Worsley y Poca Esperanza, con números entre 700 y 800 días.

En tanto, la variabilidad temporal si bien presenta una estructuración espacial similar a lo largo del año, algunos detalles son interesantes de comentar, de acuerdo con resultados aquí presentados, el canal Kirke emerge como la conexión más importante entre las zonas externas e internas, así, aguas más renovadas desde exterior penetran por este canal hacia el canal Valdés, manteniendo relativamente renovadas las aguas en este sector. Se aprecia que hacia el otoño (**Fig. 30b**) una renovación de aguas se hace evidente, extendiéndose durante el invierno hasta el golfo Almirante Montt decreciendo la edad del agua durante esta estación (**Fig. 30c**). Luego en primavera este intercambio se vuelve a reducir (**Fig. 30d**).

La conexión entre canales Kirke y Valdés es desde el punto de vista de intercambio de agua y el tiempo de residencia interno muy importante. La **Figura 31** muestra series de tiempo (filtradas a 7-días) a lo largo de 2017 a 2018 que combina la descarga del río Serrano, y perfiles verticales de la edad del agua, salinidad y corrientes, en la intersección entre los canales antes mencionados, a este punto le llamaremos en adelante 'Kirke-Valdés'. La razón de la selección de estas variables y en esta posición, es apreciar la interacción entre variables que determinan el intercambio.

La **Figura 31b** muestra la variabilidad temporal y en profundidad de la edad del agua, en ella es posible apreciar que los valores más altos se encuentran más cercanos en superficie, la razón de esto es que estas aguas son el fruto de la combinación de aguas que han estado al interior del sistema por alrededor de 700 días. Por el contrario, en la parte mas profunda de la sección, se aprecian aguas de relativa menor edad, estas provienen desde el exterior y son más salinas (**Fig. 31c**), razón por la cual ocupan la zona mas profunda de la cuenca. Los pulsos de renovación profundo comienzan a mitad

del verano y se extienden hasta el otoño de cada año (Fig. 31b), estos pulsos de renovación están en sincronía con descensos en salinidad de superficie, pero son asincrónicos con el aumento de salinidad en profundidad. El descenso de la salinidad en superficie está influenciado por el aumento del caudal de los ríos durante el deshielo de la época de verano, y principalmente del río Serrano, dada la distancia entre Serrano y Kirke-Valdés, es esperable un cierto desfase temporal.

Finalmente, las corrientes en Kirke-Valdés (Fig. 37d), no muestran una estacionalidad evidente, un leve aumento en la velocidad en la capa de profundidad de 50-80 m en invierno no aparece acoplada a la estructura de salinidad, ni tampoco a pulsos de renovación de aguas.

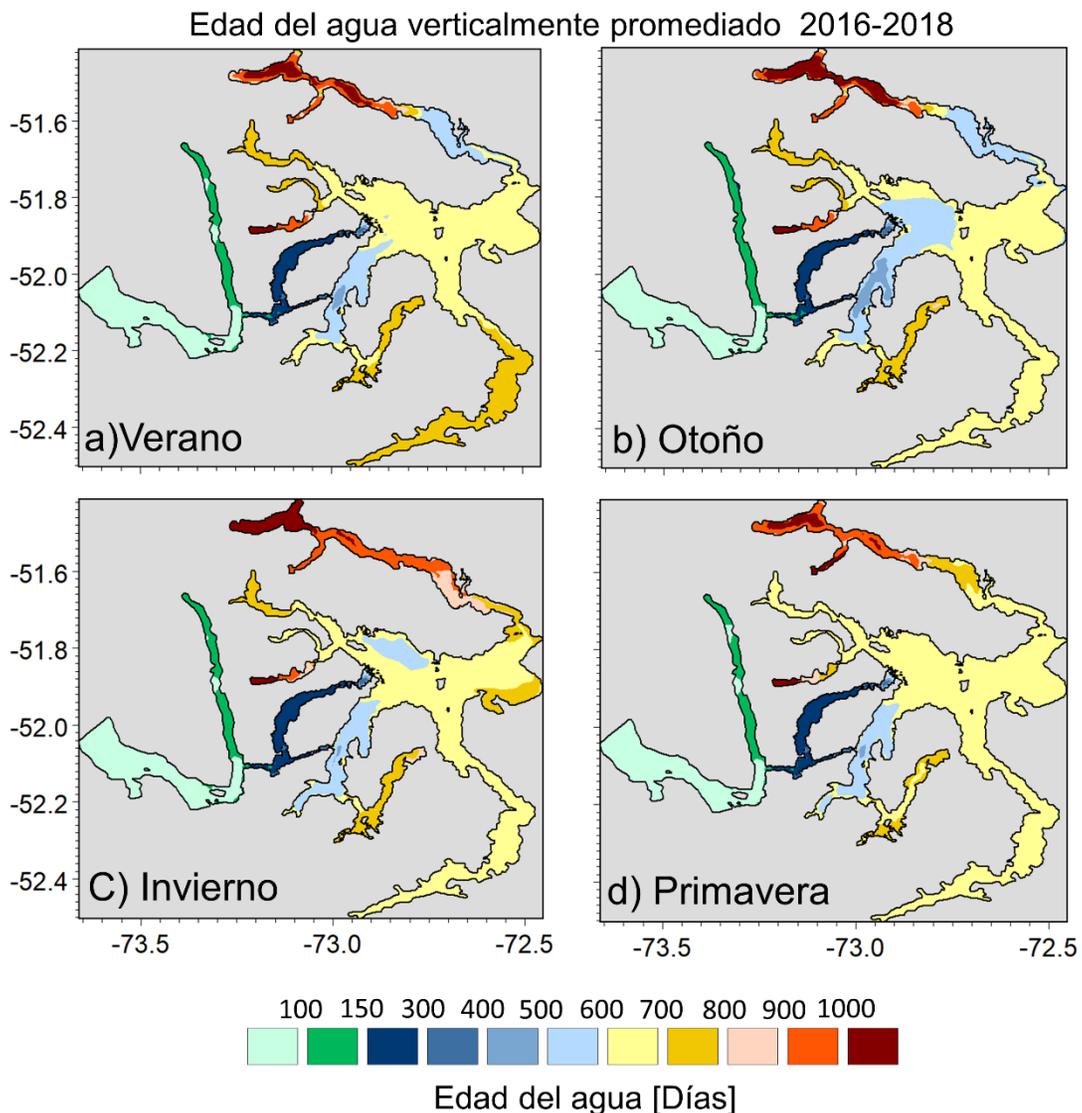


Figura 30: Mapa integrado verticalmente (arriba) y sección vertical de la edad del agua promedio 2016-2017 en Golfo Almirante Montt.

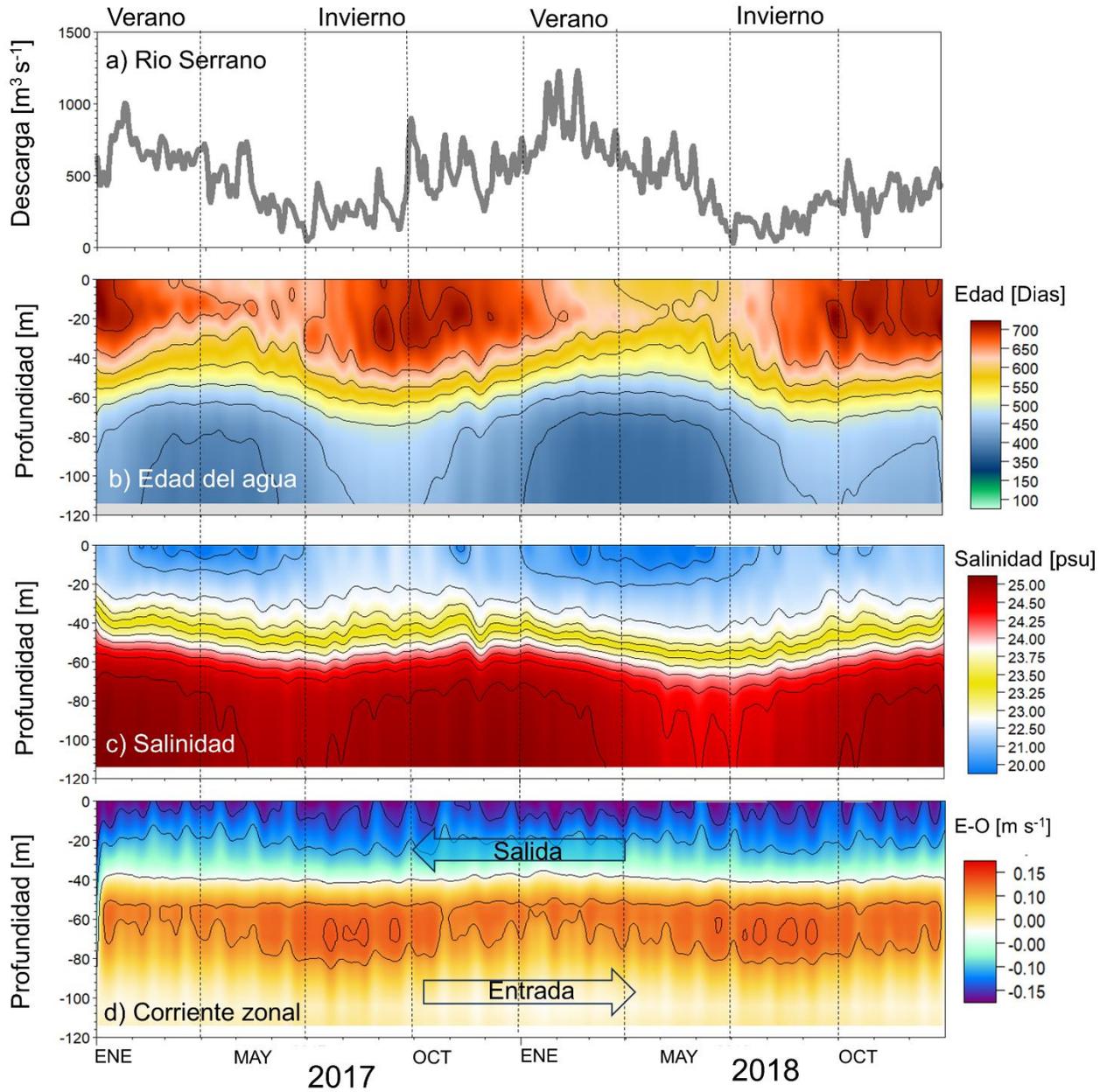


Figura 31: Series temporales del a) rio Serrano, b) edad del agua, c) salinidad y corriente zonal para la intersección Kirke-Valdés.

4.4 Objetivo 2.2.4. Generar mapas de tiempos de intercambio de agua y de variables oceanográficas modeladas para el Golfo Almirante Montt acoplados a la plataforma de información oceanográfica Chonos.

La herramienta web ATLAS, de la plataforma Chonos (**Fig. 32**) fue utilizada para visualizar interactivamente los resultados derivados de este estudio, no tan solo a través de la generación de mapas de intercambio de agua, sino también, de todas las variables que derivan del modelo hidrodinámico, esto es, corrientes, temperatura, salinidad. El acceso es público, y puede ser visualizado entrando a la portada de sistema de Información Chonos (chonos.ifop.cl) o bien directamente a la aplicación ATLAS en <http://chonos.ifop.cl/atlas/>.

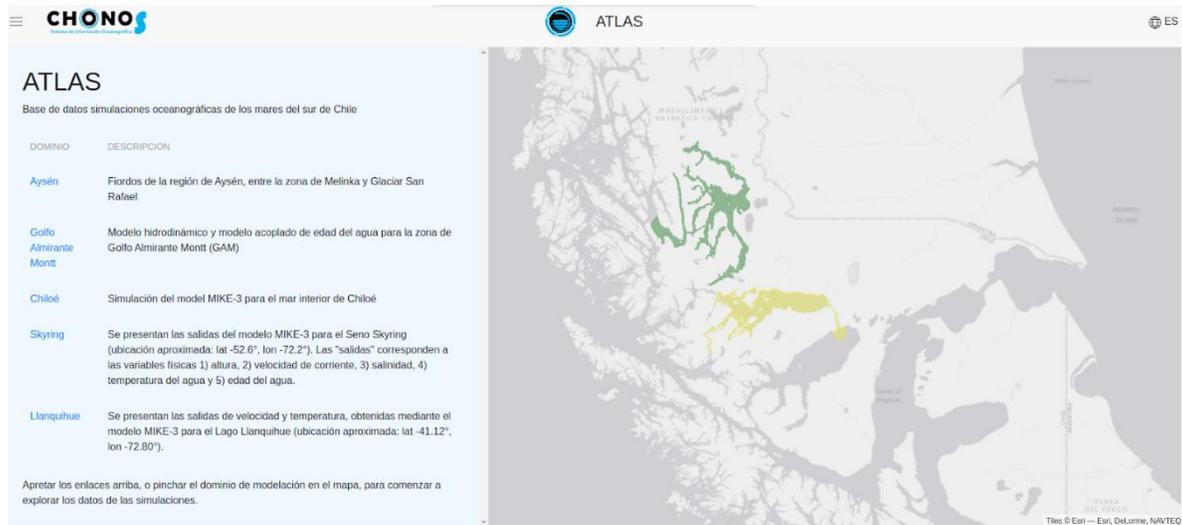


Figura 32: Interfaz de la plataforma de información geográfica ATLAS, perteneciente al sistema de información oceanográfica CHONOS.

Este sistema cuenta con una serie de herramientas para facilitar la apropiación de la información por parte de los usuarios, tales como: generación de mapas para distintas profundidades, perfiles verticales, series de tiempo y secciones verticales espaciales y temporales. Además, cuenta con un botón que permite navegar en el tiempo, de esta forma el usuario puede apreciar las variaciones temporales de todas variables antes detalladas. Finalmente, cada una de estas herramientas cuenta con un botón de descarga de datos en formato .CSV o XLS, así como también de figuras en distintos formatos (.jpg, .png, etc.). La plataforma cuenta con un tutorial para facilitar el uso de cada una de las herramientas por parte de los usuarios.

4.5 Objetivo 2.2.5. Actualizar periodo modelación en los modelos hidrodinámicos ya implementados en la región de Los Lagos y de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo, para visualización en plataforma Chonos.

Los modelos hidrodinámicos para los mares interiores de la región de los Lagos y Aysén fueron actualizados para el periodo 2022, sumándose a los ya existente en el periodo 2015-2021. Los resultados pueden verse directamente en la plataforma CHONOS (**Fig. 33**) (Reche et al. 2021), bajo la herramienta ATLAS <http://chonos.ifop.cl/atlas/>.

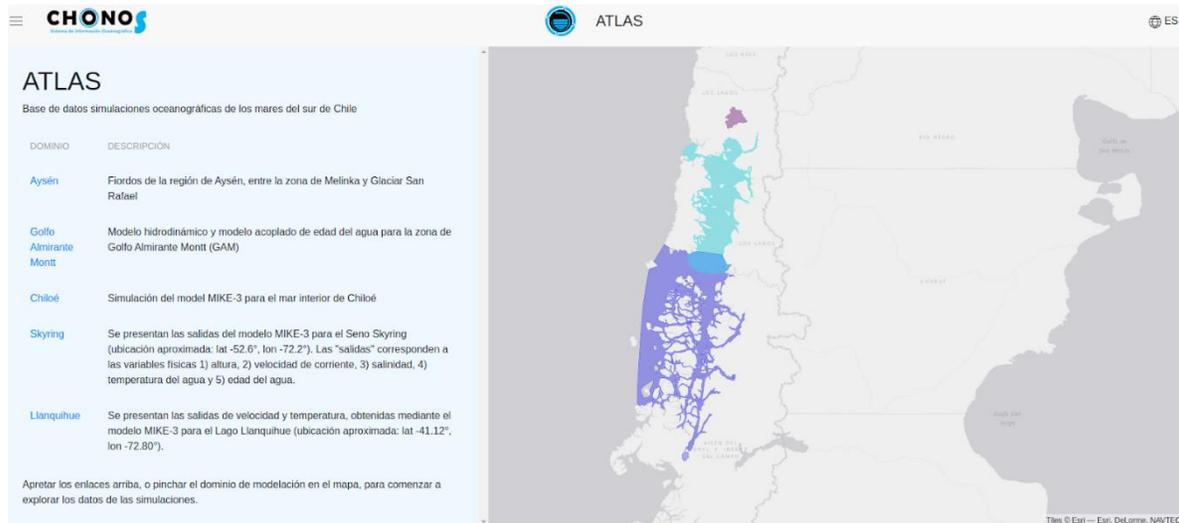


Figura 33: Interfaz de ATLAS, con la disponibilidad en información en la región de Aysén para el periodo 2016-2022.

5. DISCUSIÓN

Golfo Almirante Montt es un sistema estuarino semi cerrado en la región de Magallanes que tiene una conexión limitada con el océano costero. La acuicultura de cultivos de salmones es intensiva en esta área. Actualmente, hay 39 concesiones otorgadas y cerca de 10 solicitudes en trámite. Además, existe un gran número de concesiones para otros tipos de cultivo, como moluscos o algas. [<https://mapas.subpesca.cl/ideviewer/>]. Por otro lado, este golfo presenta un complejo entramado de fenómenos físicos que impactan su dinámica. Estos fenómenos involucran la atmósfera, glaciares y océano, todo estos en un contexto de cambio climático. Esta combinación de fenómenos crea un ambiente de gran complejidad que subraya la necesidad de comprender mejor los procesos oceanográficos como medida esencial para tomar decisiones informadas relativas a la gestión costera.

La interacción entre el océano y el Golfo Almirante Montt se caracteriza por una geomorfología única, marcada principalmente por las constricciones presentes en los canales Kirke y Santa María. Estas constricciones dan lugar a zonas con distintas características oceanográficas.

Tanto las observaciones como las simulaciones del modelo coinciden en que la onda de marea sufre una notable atenuación al pasar por estos canales de conexión, debido a las constricciones con profundidades inferiores a 20m. Esta atenuación tiene repercusiones significativas en la cantidad de energía mareal que ingresa al Golfo Almirante Montt (GAM) y en el intercambio de agua entre el océano costero y el GAM. Después de superar las constricciones de Kirke y Santa María, la onda de marea se atenúa en un 88% (0.7 m a 0.2 m). Esto implica que, dentro del GAM, la influencia de la marea no es el principal factor determinante. No obstante, en los canales de conexión, su impacto es considerable y juega un papel crucial en la dinámica del sistema.

Esta dinámica contrasta con las características de las mareas en la Patagonia norte, donde, por ejemplo, en Puerto Montt la amplitud puede llegar a 2.1 m. La **Figura 34** ilustra cómo la amplitud de la marea en extensas áreas de la Patagonia tiene una magnitud aproximadamente siete veces menor en el sistema GAM en comparación con la Patagonia Norte. Esta reducción en la amplitud genera patrones de circulación e intercambio de agua distintivos, los cuales requieren un análisis más profundo debido a la limitada investigación en la dinámica de este tipo de sistemas.

La dinámica interna del Golfo Almirante Montt (GAM) está fuertemente influenciada por la variabilidad estacional, lo que es crucial para entender su comportamiento oceanográfico. Los principales agentes moduladores, como la flotabilidad y el esfuerzo del viento, están intrínsecamente vinculados a patrones estacionales. Por ejemplo, la descarga de los principales ríos, con origen glaciar, alcanza su pico durante la primavera y el verano, coincidiendo con el aumento de las temperaturas atmosféricas y el consecuente derretimiento glaciar. Paralelamente, las velocidades máximas del viento también se registran en estos períodos. Esto implica que ambos forzantes, esenciales para la dinámica del GAM, operan en un patrón temporal energético similar.

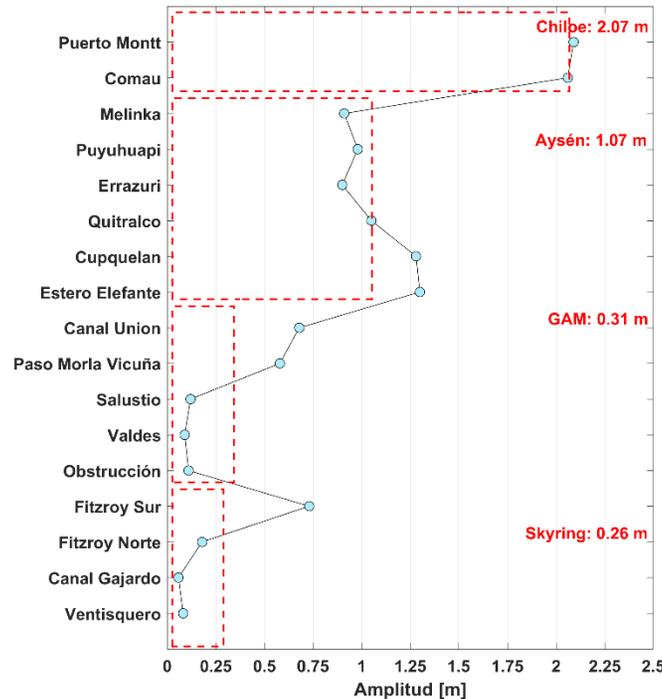


Figura 34: Amplitud de marea a lo largo de distintitos sitios en Patagonia (lugares precisos en Fig. 35).

El río Serrano es uno de los ríos más importantes de la Patagonia con un promedio anual de $420 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, pero con promedios durante el verano de alrededor de $\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$ y máximos que pueden llegar hasta los $2000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Este río representa alrededor del 55 % del total del agua dulce que descarga al sistema GAM, cuyo valor total es de $762 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Esta cantidad de agua dulce le brinda al sistema energía para hacer circular el agua, en el bien conocido proceso denominado circulación estuarina o gravitacional. En este proceso, el gradiente horizontal de densidad genera una capa superficial que es relativamente delgada y rápida, con una tendencia a moverse hacia el océano. Simultáneamente, hay una capa inferior, más gruesa y lenta, que se mueve en dirección opuesta, hacia el interior del sistema.

Comparativamente el sistema GAM contiene una gran cantidad de energía derivada de las diferencias entre montos significativos de agua dulce y el agua de mar, esta energía puede ser estimada a través de la Anomalía de Energía Potencial (PEA) (Simpson et al., 1981), lo que resulta en valores en promedio superiores a los encontrados en Patagonia Norte (Fig. 35). Un índice PEA alto en el GAM es un reflejo de una estratificación más pronunciada. Esta, a su vez, da lugar a gradientes de densidad robustos, propiciando una disipación energética y restringiendo la mezcla turbulenta en el sistema, como aquella inducida en la superficie por el viento. Desde una perspectiva dinámica, tal estratificación en el GAM limita la mezcla turbulenta y la transferencia de momentum, pudiendo generar áreas en zona más profunda o bajo la picnoclina de retención o incluso de cuasi-estancamiento del agua, debido también a la ausencia de otros forzantes como la marea.

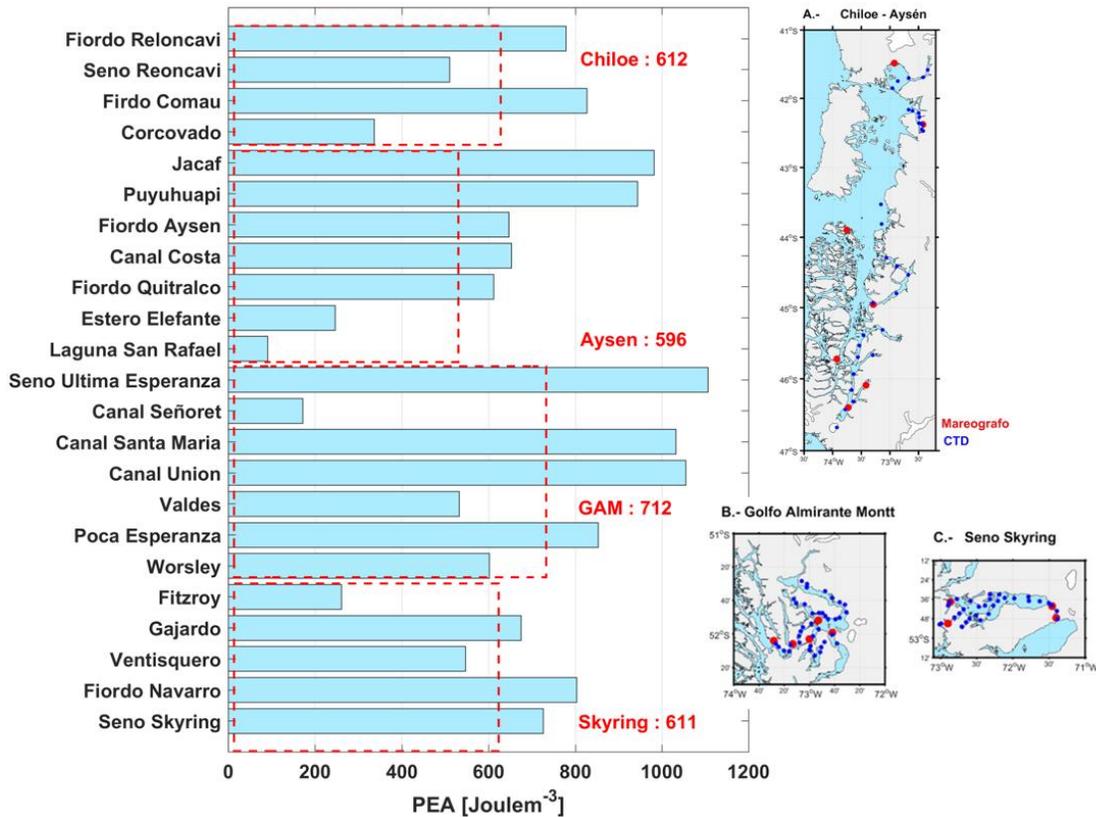


Figura 35: Anomalía de Energía Potencial (PEA) en distintos lugares de la Patagonia.

El viento en Magallanes es altamente energético debido a procesos a gran escala. En el Golfo Almirante Montt, este viento es más intenso en primavera y verano, predominando de oeste a este. Esto compite con el gradiente de presión creado por la descarga de agua dulce. Aunque su interacción varía, los modelos sugieren que el gradiente de presión baroclínico domina la circulación del golfo, lo que se ve en una circulación superficial de este a oeste, opuesta al viento. Sin embargo, aún se necesita investigar más este equilibrio dinámico. En contraste, el Seno Skyring, otro sistema semicerrado en la región de Magallanes, muestra una circulación influenciada principalmente por el viento (Pinilla et al., 2022), posiblemente debido a menores descargas fluviales en comparación con el GAM. No obstante, el viento sigue afectando significativamente al GAM, causando fluctuaciones superficiales, especialmente en primavera y verano.

Las mediciones de corriente en zonas del GAM como Vattuone o Canal Valdés revelan que entre el 25% y el 60% de la variabilidad es debido a fluctuaciones sinópticas. Además, se identificaron ondas internas en las lecturas del Canal Valdés con energía de baja frecuencia (aproximadamente 5 días). Es habitual encontrar velocidades altas en los primeros 20 a 40 metros de la columna de agua. Pero en profundidades mayores, la velocidad disminuye significativamente, indicando una notable

disipación de energía. Aunque el proceso físico exacto de cómo se disipa esta energía proveniente del viento aún está bajo estudio, postulamos que el viento podría estar proporcionando una gran cantidad de energía que se transfiere en una columna de agua altamente estratificada, generando estas ondas internas.

El modelo hidrodinámico, al proporcionar información detallada en un amplio espacio geográfico, revela al igual que las observaciones en algunos puntos, que en las regiones más profundas del GAM, la reducción abrupta de la velocidad conduce a estas zonas a un estado de aislamiento y estancamiento. Zonas como el seno de Última Esperanza, Fiordo Worsley y Fiordo Poca Esperanza son ejemplos de estas áreas con circulación limitada. Esta dinámica no solo tiene relevancia desde un punto de vista oceanográfico, sino también ambiental. Las áreas estancadas pueden presentar condiciones de baja oxigenación y acumulación de sustancias, lo que podría afectar la calidad del agua.

Intercambio de agua

El concepto de edad del agua es una herramienta valiosa para comprender la dinámica de los sistemas acuáticos, en particular en regiones complejas como los fiordos de la Patagonia. La variabilidad en la edad del agua en el Golfo Almirante Montt y sus alrededores revela patrones de transporte y mezcla que son esenciales para entender los procesos físicos y biogeoquímicos en la región.

Las escalas de tiempo del intercambio de agua al interior de Golfo Almirante Montt muestran valores altos (~ 1000 días) comparados con otros lugares de la Patagonia, solo superado por el seno Skyring un sistema contiguo a GAM, cuyos valores exceden los 5000 días (Pinilla et al. 2022), mientras que en la Patagonia norte se encontraron valores máximos de 300 días, estos últimos son valores obtenidos como parte de etapas anteriores de este mismo proyecto (Pinilla et al. 2020), en la mayor parte de los lugares son las cabezas de los fiordos los que presentan las edades de agua más alta, esto es habitual tanto en Patagonia norte como en GAM. En GAM los lugares con mayor tiempo de intercambio son el Seno de Última Esperanza, Fiordo Worsley, Fiordo Poca Esperanza y el Golfo Almirante Montt mismo, estos dos últimos sitios albergan una mayor cantidad de cultivos de salmón (<https://mapas.subpesca.cl/ideviewer/>).

La comprensión de los procesos que controlan el intercambio de agua entre el océano y GAM es relevante, pues es posible que, ante el hecho de la tendencia del incremento de la descarga de agua dulce, estimada en este estudio en $\sim 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en los últimos 40 años, el balance del intercambio puede estar modificándose y las condiciones de calidad de agua podrían estar moviéndose, esto es especialmente importante de conocer y tomar en cuenta para la gestión costera.

Según el modelo de edad del agua, el canal Kirke emerge como el principal conducto de intercambio entre el exterior y el interior. Si bien este intercambio parece estar influenciado por la descarga de agua dulce durante el verano, los procesos involucrados parecen ser más intrincados. En fiordos con

umbrales topográficos, es habitual que la renovación de aguas profundas procedentes del exterior ocurra cuando aguas con mayor salinidad fluyen como corrientes gravitacionales en el lecho del fiordo. Así, esta renovación está estrechamente vinculada a periodos donde se incrementa la salinidad (según Diaz et al., 2022; Pinilla et al., 2020; Stigebrandt y Aure, 1989; Gade y Edwards, 1980). Sin embargo, en la confluencia Kirke-Valdés, parece existir un desfase entre la renovación de aguas profundas y el aumento de salinidad. Además, la renovación de estas aguas profundas parece estar ligada a una disminución de la salinidad superficial y a las descargas fluviales, pero no necesariamente a cambios en el patrón de las corrientes. Para entender si los cambios de densidad en el GAM debido al aporte de agua dulce pueden alterar el intercambio y calidad del agua, se requiere una investigación más exhaustiva.

Según numerosos estudios, periodos prolongados de renovación de agua pueden afectar negativamente la calidad del agua (Lucas y Deleersnijder 2021; Sharpley et al., 2013; Cloern 2001). Por lo tanto, no es sorprendente que un sistema con una alta edad del agua y presencia de materia orgánica tanto autóctona como alóctona (Silva y Vargas, 2014) presente bajos niveles de oxígeno disuelto. Esta situación es precisamente la que describen Silva y Vargas (2014) para la depresión batimétrica del Golfo Almirante Montt y que es coincidente con elevada edad del agua. Sin embargo, el modelo de edad del agua sugiere que no solo estas zonas podrían enfrentar problemas críticos de oxígeno disuelto, sino también otras áreas del GAM. Recientes mediciones (2022-2023) han identificado zonas de hipoxia ($< 2 \text{ m L L}^{-1}$) en lugares como el Fiordo Poca Esperanza, Fiordo Worsley, y el Seno de Ultima Esperanza (**Fig. 36**). Al correlacionar los valores de oxígeno y la edad del agua, se observa una relación fuerte ($r = 0.71$) (**Fig. 37**). Estos hallazgos sugieren que el sistema GAM podría representar el cuerpo de agua hipóxico más extenso de la Patagonia, aunque es necesario profundizar en estudios para confirmar esta afirmación.

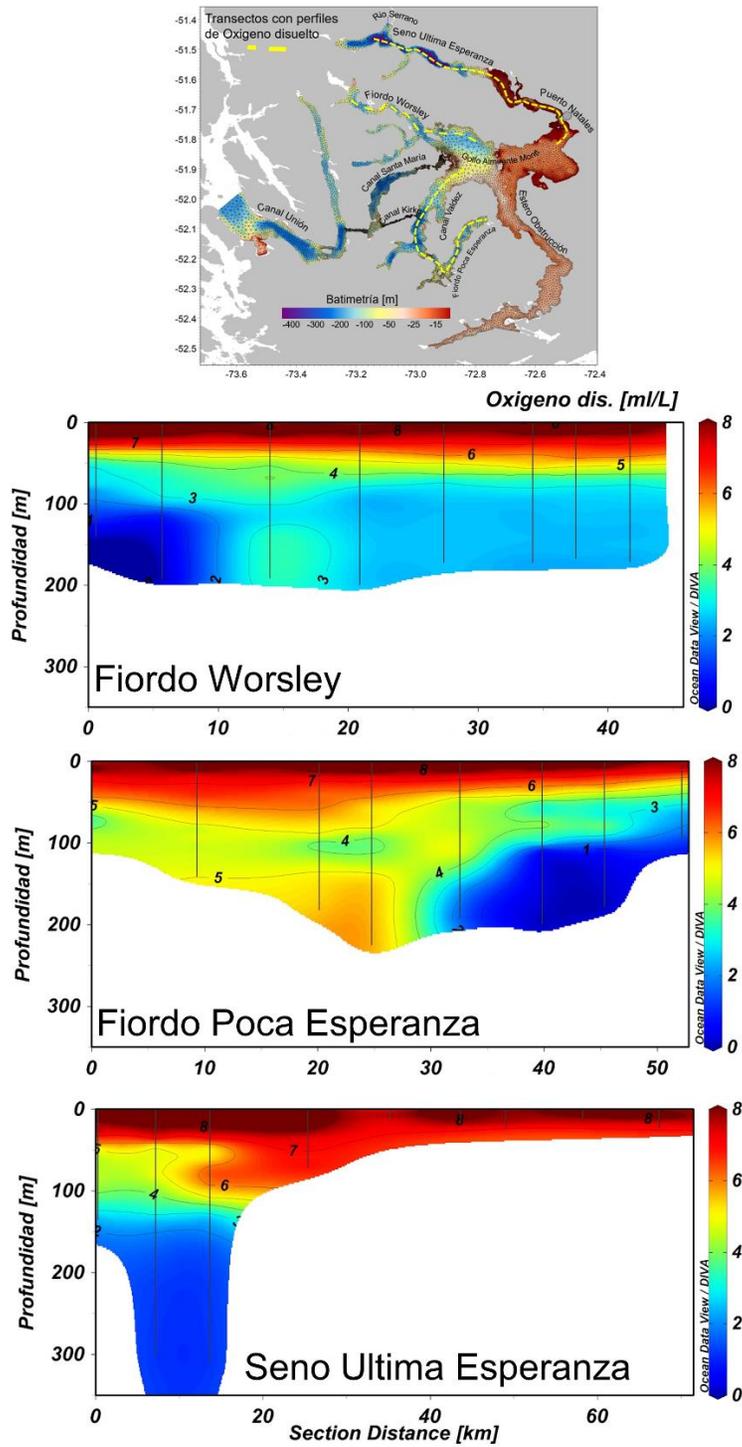


Figura 36: Secciones verticales de oxígeno disuelto en distintos fiordos del Golfo Almirante Montt

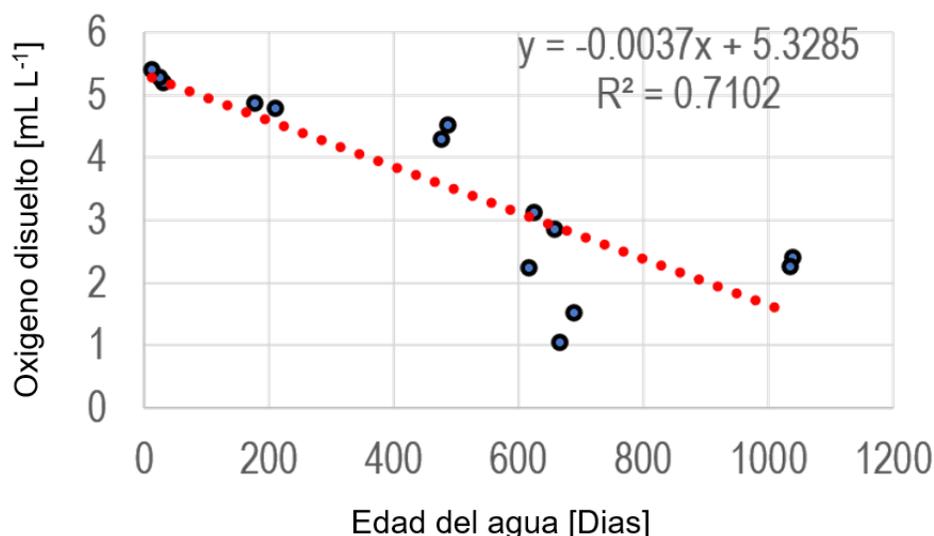


Figura 37. Correlación entre los promedios verticales de perfiles de Oxígeno disuelto vs el promedio vertical de la edad del agua. Los puntos seleccionados son los mismos que se utilizaron en la validación de la temperatura y salinidad (ver Figura 26a).

Limitaciones modelos numéricos y trabajo futuro.

En el desarrollo de nuestro modelo hidrodinámico, aunque hemos conseguido reproducir los procesos principales, reconocemos que hay detalles y sutilezas que se deben mejorar. No obstante, ya estamos en proceso de elaborar una nueva versión que se centra en mejorar el modelo batimétrico, particularmente en lo que respecta al intercambio del canal Kirke. A partir de nuestras observaciones, sospechamos que el modelo actual puede estar sobreestimando este intercambio, dado que internamente el modelo muestra aguas con una salinidad más alta en comparación con los datos reales que poseemos.

De cara al futuro, nuestro objetivo es profundizar en una serie de interrogantes: nos interesa determinar cómo las fluctuaciones interanuales de los ríos afectan la renovación del sistema y comprender qué procesos dominan este escenario. En un horizonte más amplio, y en términos de calidad del agua, estamos elaborando un marco conceptual que integra la elaboración de un modelo de calidad del agua más sofisticado. Dicho modelo no sólo incorporará mediciones de oxígeno y nutrientes, sino que también conjugará variables provenientes del modelo hidrodinámico, como la temperatura, edad del agua, velocidad, estratificación, entre otros. Creemos firmemente que este esfuerzo culminará en un instrumento más acabado y preciso que será crucial para la gestión costera de la Patagonia, permitiendo abordar y gestionar los desafíos ambientales de esta región con un mayor nivel de detalle y precisión.

Información basada en modelos numéricos como herramienta operacional.

Para abordar con eficiencia los retos medioambientales que implican la interacción de la acuicultura con su entorno, y enfrentar desafíos emergentes como el cambio climático y la proliferación de algas perjudiciales, es vital contar con datos marinos precisos para una óptima toma de decisiones. En esta dirección, el grupo de Oceanografía y Clima del Instituto de Fomento Pesquero ha creado "Chonos", un sistema integrado de información oceanográfica que se fundamenta en modelos numéricos atmosféricos, hidrológicos y oceánicos (Reche et al., 2021). Chonos ofrece múltiples aplicaciones diseñadas para satisfacer distintas necesidades, brindando a los usuarios la flexibilidad de explorar datos a través de formatos variados: mapas, registros temporales, perfiles verticales, entre otros. Cada función incluye opciones para descargar la información relevante.

Una de las herramientas destacadas dentro de Chonos es ATLAS. Se trata de una base de datos que recopila información histórica generada a partir de simulaciones del modelo hidrodinámico MIKE 3 FM de malla no estructurada (DHI, 2019). Este modelo considera información de descargas fluviales a través del modelo FLOW-IFOP y factores atmosféricos mediante el modelo WRF-IFOP. ATLAS reúne tanto variables directamente simuladas (como corrientes, temperatura y salinidad) como variables derivadas (por ejemplo, la edad del agua). Esta información se presenta con estadísticas en intervalos horarios y mensuales.

ATLAS no solo almacena datos, sino que facilita una interacción dinámica con el ambiente marino simulado. Los usuarios pueden crear mapas, registros temporales y perfiles verticales basados en datos por hora o mes. Para una comprensión más profunda sobre estos modelos, se puede consultar Pinilla et al. (2020b).

Además, Chonos ha inaugurado recientemente un espacio WIKI en <https://chonos.ifop.cl/wiki/>. Este recurso digital conecta y simplifica el contenido de Chonos. En él, se pueden encontrar guías detalladas, vídeos enlazados a YouTube, informes técnicos y publicaciones académicas. Por ejemplo, una guía detallada de ATLAS está disponible en <https://chonos.ifop.cl/wiki/atlas-simulaciones-historicas/guia-de-uso/>.

Es relevante destacar que todos los análisis y gráficas presentados en este informe pueden ser replicados utilizando la información contenida en ATLAS de Chonos, reflejando así un compromiso con la transparencia y la accesibilidad de información de interés público.

6. CONCLUSIONES

La conexión entre el océano y el Golfo Almirante Montt, es limitada por una serie de umbrales ubicados en los canales Santa María y Kirke, estas limitan el ingreso de aguas oceánicas y generan la formación de 2 cuencas con características oceanográficas distintivas.

Las constricciones en los canales Kirke y Santa María atenúan la onda de marea en un 88%, reduciendo la influencia mareal dentro del GAM, pero siendo crucial en los canales de conexión.

La marea en el GAM tiene una amplitud de hasta 7 veces menor comparada con la Patagonia norte.

La variabilidad estacional modula la dinámica del GAM, con influencia de la descarga glaciar y el viento, especialmente en primavera y verano.

Las descargas totales de agua dulce que desembocan en Golfo Almirante Montt alcanzan un valor superior anual a $700 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, promoviendo una vigorosa circulación estuarina de baja frecuencia, que compite con el viento.

Las descargas totales presentan una tendencia a aumentar sus caudales, este aumento se ha estimado en $\sim 100 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en los últimos 40 años.

El patrón estacional del viento tiene un marcado componente del oeste y que se mantiene durante todo el año, mientras que su intensidad es mayor durante la primavera y verano, y se debilita hacia los meses de otoño.

Las regiones más profundas del GAM, que varían entre 50 y 400 m de profundidad carecen de un forzamiento que le otorgue dinamismo y tienden a quedar aisladas, provocando el estancamiento de esta agua.

Grandes volúmenes de agua dentro de GAM experimentan poco o casi nulo movimiento de agua. Entre estas: seno de Última Esperanza, Fiordo Worsley y Fiordo Poca Esperanza.

La edad del agua en el GAM es alta comparada con otros lugares de la Patagonia, y pueden afectar la calidad del agua, generando zonas de hipoxia en el GAM.

La información proveniente del modelo hidrodinámico en Golfo Almirante Montt fue desplegada en la herramienta ATLAS en la plataforma CHONOS, con variables disponibles como: corrientes, temperatura, salinidad y edad de agua.

Fueron actualizados los modelos regionales de la región de los Lagos y de la región Aysén, también en ATLAS, actualmente el periodo de información cubre los años 2021-2022.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguayo, R., León-Muñoz, J., Vargas-Baecheler, J., Montecinos, A., Garreaud, R., Urbina, M., & Iriarte, J. L. (2019). The glass half-empty: climate change drives lower freshwater input in the coastal system of the Chilean Northern Patagonia. *Climatic Change*, 155(3), 417-435.
- Aiken, C. M. (2008). Barotropic tides of the Chilean Inland Sea and their sensitivity to basin geometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C8).
- Araya-Vergara, J. (1997). Geomorfología comparada de los fiordos de Chiloé y Aysén. Resultados del Crucero CIMAR 1 – Fiordos. Comité Oceanográfico Nacional, Valparaíso. Libro de Resúmenes: 15-17. Disponible en: http://aysen.udec.cl/wp-content/uploads/Araya_Vergara_1996.pdf.
- Araya-Vergara, J. F. (1999). Perfiles longitudinales de fiordos de Patagonia Central. *Cienc. Tecnol. Mar.* 22: 3-29.
- Araya-Vergara, J. (2006). Geomorfología submarina de fiordos y piedmonts patagónicos. Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. N. Silva and S. Palma (Eds.). Valparaíso, Comité Oceanográfico Nacional Pontificia Universidad Católica de Valparaíso: 25-27 pp.
- Bendat, J. y Piersol, A. (1986). *Random Data: Analysis and Measurement Procedures*. John Wiley: pp. 566.
- Bendtsen, J., Mortensen, J., Rysgaard, S. (2014). Seasonal surface layer dynamics and sensitivity to runoff in a high Arctic, *J. Geophys. Res.Oceans*, 119, 6461–6478.
- Boghen, A.D. (1995). *Cold-Water Aquaculture in Atlantic Canada. Second Edition.* (Moncton): The Canadian Institute for Research on Regional Development.
- Bolin, B., Rodhe, H., (1973). A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. *Tellus* 25, 58–62.
- Boon, J.D. (2004). *Secrets of the Tide: Tide and Tidal Current Analysis and Applications, Storm Surges and Sea Level Trends*. Ellis Horwood, Chichester.
- Boynton, W. R., Ceballos, M. A. C., Bailey, E. M., Hodgkins, C. L. S., Humphrey, J. L., Testa, J. M. (2018). Oxygen and Nutrient Exchanges at the Sediment-Water Interface: a Global Synthesis and Critique of Estuarine and Coastal Data. *Estuaries and Coasts*, 41(2), 301–333. <http://www.jstor.org/stable/44857931>
- Buschmann AH, Cabello, F., Young, K., Carvajal, J., Varela, DA. (2009). Salmon aquaculture and coastal ecosystem health in Chile: analysis of regulations, environmental impacts and bioremediation systems. *Ocean Coast Manage* 52: 243–249.

Bustos B. (2012). Brote del virus ISA: crisis ambiental y capacidad de la institucionalidad ambiental para manejar el conflicto. *Eure*. 38 (115) 219-245 pp. Disponible en http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=S0250-71612012000300010&script=sci_arttext

Calvete, C., Sobarzo, M. (2011). Quantification of the surface brackish water layer and frontal zones in southern Chilean fjords between Boca del Guafo and Estero Elefantes. *Continental Shelf Research* 31 (3–4), 162–171.

Carrasco, C., Silva, N. (2006). Comparación de las características oceanográficas físicas y químicas presentes en la zona de Puerto Montt a la boca del Guafo entre el invierno y la primavera de 2004 y entre las primaveras de 1995 y 2004. *Ciencia y Tecnología del Mar* 33(2): 17-44.

Comité Oceanográfico Nacional. (2021). CIMAR 25 años, Cruceros de Investigación Marina en Áreas Remotas. 542 p. ISBN: 978-956-235-032-7. Disponible en: http://www.cona.cl/pub/libros_RS_CIMAR/LRP_cimar_025.pdf.

Deleersnijder, E., Campin, J.M., Delhez, E.J.M. (2001). The concept of age in marine modelling: I. Theory and preliminary model results. *J. Mar. Syst.* 28, 229–267

Deleersnijder, E., Mouchet, A., Delhez, E.J.M., Beckers, J.M. (2002). Transient behaviour of water ages in the world ocean. *Math. Comput. Model.* 36, 121–127.

Deleersnijder, E., (2007). Timescale- and tracer-based methods for understanding the results of complex marine models. Editorial, *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74.

Delhez, E.J.M., Campin, J.M., Hirst, A.C., Deleersnijder, E. (1999). Toward a general theory of the age in ocean modelling. *Ocean Model.* 1, 17–27.

Delhez, E.J.M., Deleersnijder, E. (2002). The concept of age in marine modelling II. Concentration distribution function in the English Channel and the North Sea. *Journal of Marine Systems* 31, 279-297.

Delhez, E.J.M., Heemink, A.W., Deleersnijder, E. (2004). Residence time in a semi-enclosed domain from the solution of an adjoint problem. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 61, 691-702.

DHI, (2019). Mike 3, User guide and reference manual. Danish Hydraulic Institute, Denmark

England, M.H. (1995). The age of water and ventilation timescales in a global ocean model. *J. Phys. Oceanogr.* 25, 2756–2777.

Emery, W. J., Thomson, R. E. (1998). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. Pergamon Press: pp. 634.

Fuentes J. (2014). Evolución del régimen ambiental de la acuicultura en Chile. *Revista de Derecho de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso* no.42 Valparaíso. http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-68512014000100013#footnote-33032-2.

Godoy, M.G., Aedo, A., Kibenge, M.J., Groman, D.B. (2008) First detection, isolation and molecular characterization of infectious salmon anaemia virus associated with clinical disease in farmed Atlantic salmon (*Salmo salar*) in Chile. *BMC Vet Res* 4:28

Gregoire, M., Oguz, T. (2003). *Modeling Biogeochemical Processes in Marine Ecosystems*. UNESCO – EOLSS. Sample Chapters. Oceanography – Vol.III.

Guzmán, D., Silva, N., (2013). Caracterización físico-química de los canales australes. Modelo geoquímico del Fiordo Aysén. Editorial Académica Española, p. 106.

Gustafsson, K.E., Bendtsen, J. (2007). Elucidating the dynamics and mixing agents of a shallow fjord through age tracer modeling. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 74 (4), 641–654.

Haralambidou, K., Sylaios, G., Tsihrintzis, V.A. (2010). Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 90 (4), 174–184. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2010.08.010>.

Hirst, A.C. (1999). Determination of water component age in ocean models: application to the fate of North Atlantic Deep Water. *Ocean Modelling* 1, 81–94.

Hong, B., Shen, J. (2013). Linking dynamics of transport timescale and variations of hypoxia in the Chesapeake Bay. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, 6017–6029.

Hunter, J.R., Craig, P.D., Phillips, H.E. (1993). On the use of random walks models with spatially variable diffusivity. *Journal of Computational Physics* 106, 366–376.

Karstensen, J., Tomczak, M. (1998). Age determination of mixed water masses using CFC and oxygen data. *Journal of Geophysical Research* 103 C9, 18599–18609.

Kawase, M., Bang, S. (2013). Seasonal variability of salinity and circulation in a silled estuarine fjord: a numerical model study. *Coni. Shelf Res.* 71:109-126.

Kendall, M.G., (1975). *Rank correlation methods*. London: Griffin.

Liang, X., Lettenmaier, D., Wood, E., Burges, S. (1994), A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, *J. Geophys. Res.*, 99(D7), 14415–14428, doi:10.1029/94JD00483.

Oliveira, A., Baptista, A.M. (1997). Diagnostic modeling of residence times in estuaries. *Water Resour. Res.* 33 (8), 1935–1946.

Mann, H.B. (1945). Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13, 245–259. doi:10.2307/1907187

Medina, Y., Muñoz, E. (2020). Estimation of Annual Maximum and Minimum Flow Trends in a Data-Scarce Basin. Case Study of the Allipen river Watershed, Chile. *Water*, 12(1), 162.

Mooers, C. (1973). A technique for cross spectrum analysis of pairs of complex-valued time series, with emphasis on properties of polarized components and rotational invariant. *Deep Sea Res.*, 20:1129 – 1141.

Monsen, N.E., Cloem, J.E., Lucas, L.V., Monismith, S.G. (2002). A comment on the use of flushing time, residence time, and age as transport timescales. *Limnology and Oceanography* 47 (5), 1545-1553.

Myksovoll, M.S., Sandvik, A.D., Skarðhamar J, Sundby S. (2012). Importance of high resolution wind forcing on eddy activity and particle dispersion in a Norwegian fjord. *Estuar Coast Shelf Sci* 113: 293–304. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.08.019>.

National Center for Environmental Prediction. (2000). NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, Continuing from July 1999. National Weather Service, U.S. Department of Commerce, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO.

Pawlowicz, R., Beardsley, B., Lentz, S. (2002). Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using `t_tide`. *Computers and Geosciences*, 28: 929 -937.

Pellicciotti, F., Burlando, P., & Vliet, K. V. (2007). Recent trends in precipitation and streamflow in the Aconcagua River Basin, central Chile. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports*, 318, 17-38.

Pérez, T., Mattar, C., Fuster, R. (2018). Decrease in snow cover over the Aysén river catchment in Patagonia, Chile. *Water*, 10(5), 619.

Pérez-Santos, I., Garcés-Vargas, J., Schneider, W., Ross, L., Parra, S., Valle-Levinson, A. (2014). Double-diffusive layering and mixing in Patagonia Fjords, *Progr. Oceanogr.*, 129: 35-49.

Pinilla, E., Arriagada, M., Soto, G., Ruiz, C., Reche, P. (2013). Informe final. Caracterización y modelación de patrones de circulación marina en la región de Magallanes. Proyecto ASIPA – MINECOM. 108 p+Anexos. http://190.151.20.106/exlibris/aleph/a23_1/apache_media/C8FMDIJG422MVHPXB7HKJ9RSLIF334.pdf

Pinilla, E., Arriagada, M., Soto, G., Ruiz, C., Reche, P. (2015). Informe final. Determinación de los patrones de circulación en los mares interiores de la región de Magallanes. Proyecto ASIPA – MINECOM. 183 p+Anexos.

Pinilla, E., Castillo, M., Pérez-Santos, I., Venegas, O., Valle-Levinson, A. (2020a). "Water Age Variability in a Patagonian Fjord." *Journal of Marine Systems*, Volume 210 103376. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103376>.

Pinilla, E., Soto, G., Soto-Riquelme, C., Venegas, O., Salas, P., Reche, P. (2020b) . Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la región de Los Lagos y región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. Instituto de Fomento Pesquero - Subsecretaría de Economía 2020, pp. 66. http://190.151.20.106/exlibris/aleph/a23_1/apache_media/GRTMPRA128Q17133LA11RY68VVXJ6H.pdf

Rodrigo, C. (2006). Topografía submarina en canales de la Patagonia Norte. Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. N. Silva & S. Palma (eds.) Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 19-23, disponible en: <http://www.cona.cl/revista/spanish/2-1%20Topograf%C3%ADa%20submarina.pdf>.

- Salinas, S., Fierro, J., Castillo, M., Letelier, J. 2002. Tiempo de residencia y proceso de mezcla en la cuenca sur de la constricción de Meninea. Libro de Resúmenes pág. 33-43. Taller sobre los resultados del Crucero Cimar 7 Fiordos. Valparaíso.
- Sandery, P.A., Kämpf, J. (2007). Transport timescales for identifying seasonal variation in Bass Strait, south-eastern Australia. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 74, 684–696.
- Sarricolea, P., Meseguer Ruiz, O., Romero-Aravena, H. (2017). Tendencias de la precipitación en el norte grande de Chile y su relación con las proyecciones de cambio climático. *Diálogo andino*, (54), 41-50.
- Schlitzer, R. (2017). Ocean Data View. <http://odv.awi.de>
- Schneider, W., Pérez-Santos, I., Ross, L., Bravo, L., Seguel, R., Hernández, F. (2014). On the hydrography of Puyuhuapi Channel, Chilean Patagonia, *Prog. Oceanogr.*, 129, 8–18
- Shen, J., Wang, H.V., (2007). Determining the age of water and long-term transport timescale of the Chesapeake Bay. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 74, 585–598.
- Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbor interpolation *Interpreting Multivariate Data* (pp. 21-36). Chichester: John Wiley.
- Sievers, H. A., Calvete, C., Silva, N. (2002). Distribución de características físicas, masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero CIMAR Fiordo 2), Chile. *Cienc. Tecnol. Mar*, 25(2): 17-43.
- Sievers, A.H., Silva, N. (2008). Water masses and circulation in austral Chilean channels and fjords. In: N. Silva y S. Palma (eds.). *Progress in the oceanographic knowledge of Chilean inner waters, from Puerto Montt to Cape Horn*. Comité Oceanográfico Nacional, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 53-58.
- Silva, N., Sievers, H., Prado, R. (1995). Descripción oceanográfica de los canales australes de Chile. Zona Puerto Montt-Laguna San Rafael (Crucero Cimar-Fiordo 1). *Revista de Biología Marina*. Valparaíso 30, 2, 207–254.
- Silva, N., Calvete C., Sievers, H.A. (1997). Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero Cimar Fiordo 1). *Ciencia y Tecnología del Mar*, 20: 23 - 106.
- Silva, N., Calvete, C., Sievers, H. (1998). Masas de agua y circulación para algunos canales australes entre Puerto Montt y Laguna San Rafael, Chile (Crucero Cimar- Fiordo 1). *Ciencia y Tecnología del Mar* 21, 17–48.
- Silva, N., Palma, S. (2006). Producción científica del Programa CIMAR en los canales y fiordos Australes. Cruceros CIMAR 1 a 4 Fiordos, pp. 145-162. En: N. Silva & S. Palma (eds.). *Avances en el Conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos*. Comité Oceanográfico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 162 pp.

- Silva, N., Rojas, N., Fedele, A. (2009). Water masses in the Humboldt Current System: properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile. *Deep-Sea Research, Part II* 56, 1004–1020.
- Silva N, Vargas CA. (2014). Hypoxia in Chilean Patagonian fjords. *Prog Oceanogr.*;129:62–74.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G. (2008). A description of the advanced research WRF version 3. In: NCAR Technical Note (475). p. 125.
- Thomson, R. E, Emery, W. J. (2014). *Data Analysis Methods in Physical Oceanography*. New York: Elsevier, 638 pp.
- Valdenegro, A., Silva, N. (2003). Caracterización oceanográfica física y química de la zona de canales y fiordos australes de Chile entre el estrecho de Magallanes y cabo de Hornos (CIMAR 3 fiordo). *Ciencia y Tecnología del Mar* 26(2): 19-60.
- Valle-Levinson, A., Sarkar, N., Sanay, R., Soto, D., León, J. (2007). Spatial structure of hydrography and flow in a Chilean Fjord, Estuario Reloncaví. *Estuaries and Coasts* 30 (1), 113–126.
- Viero, DP., Defina, A. (2016). Water age, exposure time, and local flushing time in semi-enclosed, tidal basins with negligible freshwater inflow. *Journal of Marine Systems*, Volume 156, p. 16-29.
- Visser, A.W., (1997). Using random walk models to simulate the vertical distribution of particles in a turbulent water column. *Marine Ecology Progress Series* 158, 275–281.
- Walker, S.J., (1999). Coupled hydrodynamic and transport models of Port Phillip Bay, a semi-enclosed bay in south-eastern Australia. *Australian Journal of Marine and Freshwater Research* 50, 469e481
- Wilson, R. E., Swanson, R., Crowley, H. (2008), Perspectives on long-term variations in hypoxic conditions in western Long Island Sound, *J. Geophys. Res.*, 113, C12011, doi:10.1029/2007JC004693.
- Zhang, W.G., Wilkin, J.L., Schofield, O. (2010). Simulation of water age and residence time in New York Bight. *J. Phys. Oceanogr.* 40, 965–982.
- Zimmerman, J.T.F. (1976). Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea. Part I: Distribution of salinity and calculation of mixing time scales. *Neth. J. Sea Res.*

ANEXO I: Base de datos

BASE DE DATOS

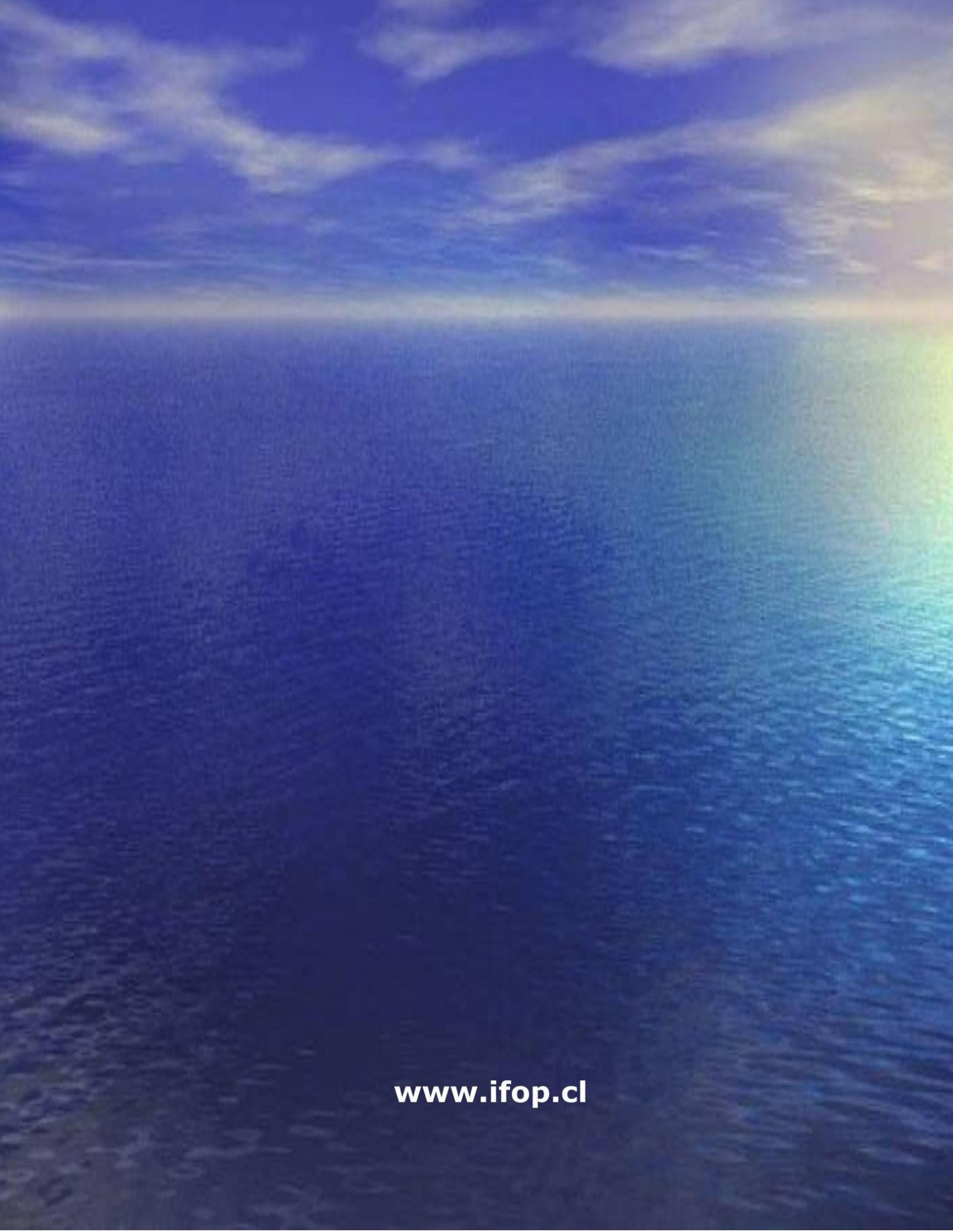
Los datos utilizados en este estudio se encuentran en una carpeta digital, adjuntado a la entrega de este informe. En esta carpeta los datos están ordenados por tipo de variables, así se puede ver los siguientes grupos:

1. ADCP: Datos de perfiladores acústicos de corrientes
2. CTD-OD: Datos de estaciones con perfiles de profundidad, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y fluorescencia.
3. Marea: Datos con las series de nivel del mar de cada punto.
4. Meteorología: Datos de estación meteorológica utilizada para variables de dirección y velocidad del viento, temperatura, humedad, radiación y precipitación.

- Para cada caso, existe un archivo de metatada, donde se detallan las características de la medición como: tipo de equipo, lugar, periodo de medición, etc.
- También se adjuntan datos del año 2012, con la respectiva metatada.



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO
Almte. Manuel Blanco Encalada 839
Fono 56-32-2151500
Valparaíso, Chile
www.ifop.cl



www.ifop.cl