

#### **INFORME FINAL**

Convenio de desempeño 2021: Monitoreo Y Modelación de la Variabilidad Espacial y Temporal de Procesos Oceanográficos en Canales y Fiordos Australes, 2021-2022. SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / diciembre 2022



INFORME FINAL Convenio de desempeño 2021: Monitoreo Y Modelación de la Variabilidad Espacial y Temporal de Procesos Oceanográficos en Canales y Fiordos Australes, 2021-2022 SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT /diciembre 2022

#### REQUIRENTE SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO

Subsecretaria 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 Gabriel Soto

#### AUTORES

Gabriel Soto Elías Pinilla Pablo Reche Camila Soto Javier Cortés Javiera San Martin Pedro Valdebenito

#### **COLABORADORES**

Patricio Salas Miguel Vergara Luis Avello Oliver Venegas Marcela Arriagada

# **RESUMEN EJECUTIVO**

Como parte del convenio de desempeño entre el Ministerio de Economía mediante la Subsecretaría de Economía y Empresas de Menor Tamaño e IFOP, se encuentra en ejecución el proyecto: "Monitoreo Y Modelación de la Variabilidad Espacial y Temporal de Procesos Oceanográficos en Canales y Fiordos Australes, 2021-2022".

Este estudio tuvo como objetivo fundamental, determinar mediante observaciones y modelación numérica, procesos oceanográficos en fiordos y canales Australes.

En el objetivo específico 1. Se realizaron 3 campañas oceanográficas en periodos diferentes, donde se realizaron mediciones de CTDO y muestras en la columna de agua para determinar nutrientes (nitrato, fosfato y silicato). También se instalaron 3 líneas de anclajes, con diferentes sensores para medir salinidad, temperatura y oxigeno disuelto, en distinto niveles de profundidad en la columna de agua.

Para el objetivo número 2, se implementó una modelo semi-empirico que permitió realizar el primer balance de nutrientes en la zona de estudio, para determinar las principales fuentes que aportan nutrientes de manera natural al sistema, junto con determinar el peso específico de cada fuente de nutriente, dentro del balance total. Para realizar las estimaciones numéricas, se utilizó el modelo biogeoquímico LOICZ (Land Ocean Interactions in the Coastal Zone). LOICZ es uno de los modelos más sencillos de implementar, esencialmente por los requerimientos de una acotada cantidad de información que, permiten resolver de una manera adecuada y con robustez los cálculos, relacionados al flujo de nutrientes dentro del ecosistema, como algunos de los procesos más relevantes que ingresan y/o remueven nutrientes dentro del sistema.

Para realizar el objetivo específico 3, se efectuaron mediciones de corrientes mediante anclajes de equipos ADCP (perfiladores acústicos de efecto Doppler), en 3 puntos específicos, los cuales permitieron caracterizar la circulación de las corrientes marinas. La determinación de los principales forzantes atmosféricos, se realizó con la instalación de estaciones meteorológicas equipadas con sensores de presión atmosférica, precipitación, dirección y velocidad del viento. Para estimar el nivel del mar, se instalaron una serie de sensores de presión sumergidos dentro de la columna de agua y ubicados en diferentes posiciones estratégicas. En su conjunto toda la información generada de las diferentes observaciones instrumentadas, permitió ampliar la información derivada de las observaciones, mediante la implementación del modelo hidrodinámico, MIKE 3 FM. El desarrollo de la modelación numérica, estuvo enfocado en estimar la variabilidad interanual del sistema, comparando estos resultados con los resultados del estudio anterior (para la zona de Seno Skyring). Además, Los resultados del modelo numérico, permitieron estimar una medida cuantitativa de la capacidad de transporte del sistema, donde se estimaron diferentes esquemas de conectividad, relacionado al transporte de partículas pasivas, además de algunas partículas con propiedades biológicas como *caligus* (piojo de mar).

El objetivo número 4 de este estudio, correspondió a la ejecución del crucero oceanográfico denominado Patagonia norte, el cual realizó mediciones de las diferentes propiedades físicas (temperatura, salinidad), químicas (concentración de oxígeno disuelto y nutrientes) y biológicas (clorofila total) en la columna de agua, considerando 3 periodos estacionales diferentes, abarcando el mar interior de Chiloé y mar interior de Aysén.

El quinto objetivo, correspondió a caracterizar oceanográficamente, las agrupaciones de concesiones (ACS), tomando como delimitación los polígonos de cada área específica y

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

georreferenciada. La información corresponde a datos de salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, nitrato, nitrito, fosfatos silicato, clorofila total. Las variables pueden ser visualizada en portal web de IFOP de manera interactiva, por cualquier usuario que ingrese a la plataforma chonos.

El seno Skyring, antes de la ejecución de estos estudios, contaba con una limitada cantidad de información oceanográfica respecto de otras zonas dentro de la región y aún más respecto a la X y XI región. Por ejemplo, el programa CIMAR Fiordos, organizado por Comité Oceanográfico Nacional (CONA) ha nutrido e impulsado las investigaciones en ciencias marinas en las aguas interiores del sur de Chile, no ha incluido al seno Skyring como sitio de estudio, esto a pesar de ser una zona con actividad acuícola importante dentro de la región de Magallanes. Estudios anteriores dentro del sistema y financiado por la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura permitieron mejorar de forma acotada la información hidrográfica para caracterizar este sistema marino, a los que se suma este estudio aportando información relevante que permitirá generar mejor información oceanográfica para la toma de decisiones.

La batimetría permitió distinguir 2 zonas claramente definidas y con particularidades diferentes, la zona Este (canal Fitz-Roy – isla Escarpada) con una batimetría más somera de 30 m a 150 m, mayormente homogénea, y otra zona localizada al oeste de la isla Escarpada con una batimetría de mayor profundidad 500-600 m. El seno Skyring constó de 2 conexiones con el océano costero: el canal Gajardo en su salida Norte-Oeste con el golfo Xaltegua y el canal Fitz-Roy en su salida Sur-Este con el seno Otway. Ambos canales, Gajardo y Fitz-Roy, limitan la conexión y ventilación del seno Skyring con los demás sistemas exteriores debido a las constricciones batimétricas y geomorfológicas (con profundidades en torno a tan solo 5 y 10 metros respectivamente). Estas limitadas conexiones dan lugar a la diferenciación del seno Skyring por sobre su entorno, como una cuenca de características oceanográficas propias, conformada por aguas estuarinas producto de los procesos de mezcla del agua oceánica con el agua dulce.

Por otro lado, uno de los aspectos más relevantes dentro de este estudio fue contar con información de nutrientes que, junto a las mediciones de salinidad, temperatura y oxígeno disuelto, permitieron constituir las principales propiedades físico-químicas básicas de la columna de agua. Los patrones de distribución vertical hidrográfica, revelaron una columna de agua separada en 2 estratos, siguiendo una estructura característica observada en otras zonas estuarinas de canales y fiordos de la región sur Austral de Chile. Pero con la particularidad de presentar rangos de variación menor en comparación a otras zonas del mar interior en la región de Magallanes.

Las estructuras térmicas verticales presentaron diferencias estacionales con períodos cálidos y periodos fríos, en ambos periodos se observaron perfiles verticales levemente estratificados, registrando máximos superficiales en verano y otoño, mientras que en invierno se presentaron inversiones térmicas (típicas de estuarios de altas latitudes) con temperaturas mínimas superficiales y máximas sub superficiales. El oxígeno disuelto, presentó la mayor concentración en superficie en todo el periodo y área de estudio, y un gradiente negativo que exhibió las mínimas concentraciones en profundidad. Los valores mínimos de oxígeno se observaron en el estrato profundo dentro del estero Navarro. Las series de tiempo, indicaron que la dinámica del oxígeno disuelto, sobre todo más hacia la superficie, registraron una variabilidad estacional, los mayores valores de oxígeno disuelto, estuvieron relacionados a una mayor descarga de agua dulce, menor salinidad y menor temperatura. Como es previsible para una zona de estas particularidades.

Es de suma importancia señalar que si bien, se pretendió estimar la variabilidad estacional y determinar la diferencia entre un periodo anual y otro (variación interanual), las diferentes

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

restricciones que se produjeron en los periodos específicos de medición pudieron efectuar las mediciones, no permitieron estimar adecuadamente dicha variabilidad, considerando sí, que las variables medidas registraron una marcada variabilidad estacional.

Un aspecto que fue relevante de señalar, correspondió a los valores de nutrientes dentro del seno Skyring, las concentraciones del nitrato y fosfato, registraron valores inferiores en comparación a los valores de las zonas adyacentes (seno Otway y paso del Mar) lo que evidenció un flujo de intercambio limitado dentro del seno Skyring. Una condición opuesta se registró para el silicato, dentro del seno Skyring, ya que se observaron valores más elevados en comparación a las zonas aledañas (propiedades físico-químicas de la columna de agua). Esta condición, permitió configurar el modelo Biogeoquímico LOICZ, con una con una zona de intercambio y conexión entre el seno Otway y el seno Skyring, tal como intercambio de salinidad y transporte de elementos no conservativos: nutrientes, bajo la forma de DIN (nitrógeno inorgánico disuelto, por sus siglas en ingles) y DIP (fósforo inorgánico disuelto, por sus siglas en ingles). Debido a que este estudio no incluyó mediciones en seno Otway, se utilizaron los datos del crucero CIMAR FIORDO 16 (octubre 2010). Los resultados de estas observaciones (conexión y flujo limitado) fueron consistente con los resultados del modelo biogeoquímico LOICZ, ya que, dentro del sistema, el balance de fósforo para un ciclo anual promedio (estado estacionario), reveló que la principal fuente que ingresa DIP al interior del Seno, correspondió al flujo advectivo de la zona advacente (seno Otway). El flujo de DIP por aporte fluvial fue menos significativo (<1%), por otra parte, la principal salida de nutrientes, se produce por la capa superficial. Esto genera un desbalance final, donde una parte importante de fósforo es retenido dentro del sistema. Este mismo esquema se registró para las modelaciones de nitrógeno, donde el modelo reveló que se produjo un desbalance de DIN, ya que el sistema se comporta como un exportador neto de nitrógeno (valores del flujo negativo), reteniendo cargas de nitrógeno al interior del sistema, el proceso que predomina dentro del sistema es la fijación. De esta forma el modelo reprodujo el flujo de nutrientes para un estado estacionario y se puede considerar una herramienta adecuada, para comprender el flujo de nutrientes dentro de un sistema altamente complejo. No obstante, se requiere seguir avanzando en obtener información referente a otras fuentes de nutrientes, como los aportes de nitrógeno (pluvial), debido a que los aportes de agua dulce (por la superficie del sistema), son significativamente mayor a la superficie de los fiordos modelados para el mar Interior de Chiloé y de Aysén.

Los forzantes de circulación relevantes en este sistema son: el ingreso de agua dulce y el viento. Ambos, presentan un régimen estival, en donde, las mayores descargas de agua dulce son por deshielo glaciar en primavera/verano en el mismo periodo dominan viento de alta magnitud (del oeste) mientras que en invierno el ingreso de agua dulce disminuye o es totalmente limitada por las bajas temperaturas, donde se congelan ríos y cascadas. En este periodo domina; baja radiación, bajas temperaturas y baja magnitud del viento con algunos eventos de alta magnitud (viento del oeste). En eventos prolongados de bajas temperaturas (Menores a 0° C), se ha registrado hielo marino (durante el crucero oceanográfico desplegado en invierno de 2022). Presenta una componente estacional relevante y alta energía espectral en la banda sinóptica, entre 2 y 8 días, esto se evidenció en diferentes variables, tales como: corrientes, nivel del mar, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en toda la columna de agua. Las características hidrográficas están controladas por el aporte de agua dulce y las limitaciones batimétricas, mientras que los resultados sugieren que el viento es el mayor responsable de la circulación en Seno Skyring, sin embargo, hay oscilaciones en la corriente que responden a frecuencias distintas a las que oscila el viento, lo que

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

se podría relacionar a las interacciones del viento con la geometría de seno Skyring generando oscilaciones internas.

Bajo las condiciones antes detalladas, se implementó un sistema de modelación que incluyó: un modelo barotrópico de mareas, un modelo hidrológico para estimar los caudales de las descargas de agua dulce y un modelo meteorológico que proveyera no solamente el viento sino también, la presión atmosférica y los flujos de calor desde la atmósfera. Estos modelos suministraron la información de entrada para la inicialización del modelo hidrodinámico y que fue implementado para los años 2016 al 2018. La importancia de la implementación de un modelo hidrodinámico, no solo radica en la información física que puede obtenerse a través de este, sino que es el modelo base para acoplar otro tipo de modelos, como aquellos para estimar el intercambio de agua a través de métricas como la edad de agua, utilizada en este estudio, pero también de modelos biogeoquímicos más complejos o de conectividad basados en dispersiones de partículas.

La variabilidad interanual de las descargas de agua dulce en seno Skyring muestra una tendencia positiva en los caudales de 0.52 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. La señal interanual muestra una variabilidad con una desviación estándar de 14 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, con un máximo de descarga durante el año 2014 con un caudal por sobre los 160 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y mínimos ocurridos durante los años 1992, 2002 y 2016 por debajo de los 120 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Cabe señalar que el modelo hidrodinámico simuló el año 2016 al 2018 que coincide con un periodo de mínimos caudales (periodo 1980-2018), esto sugiere un impacto, tanto en las características hidrográficas del seno durante estos años y también en su capacidad renovación, este punto es retomado más adelante.

Otro aspecto importante de dilucidar fue si la propagación de la onda de marea fue importante al interior del seno Skyring y si el modelo barotrópico logró reproducir las principales características de esta. La marea ingresó al sistema Skyring por el norte a través del canal Gajardo y por el sur, por el canal Jerónimo, seno Otway y finalmente canal Fitzroy. Dentro del seno Skyring se evidenció una disipación de la marea, lo cual se observó en la disminución de la amplitud de los constituyentes mareales.

El modelo hidrodinámico en el seno Skyring logró reproducir los principales atributos de este sistema marino. Por una parte, la hidrografía representada por los campos de temperatura y salinidad estuvo bien definida, tanto espacial como temporalmente. Esto considerando que las observaciones de estaciones de CTD se realizaron en un período distinto de modelación y que la simulación fue realizada para años con un déficit importante en descarga de agua dulce (2016-2017). Por otra parte, los principales modos de variabilidad de la corriente, fueron coincidentes entre el modelo y un perfilador de corrientes desplegado en el año 2022 (años distintos), pero de similar estructura vertical. El análisis mediante EOF reveló que el modo 1 explico la mayor parte de la variabilidad, es coincidente con la señal del viento zonal, esto revela al viento como principal agente en la circulación en seno Skyring. La circulación superficial siguió un patrón de corrientes a lo largo del año en dirección oeste-este, de la misma forma en que se presentó la estructura espacial del viento, así durante la primavera, se registró la mayor energía del viento, también se produjo la respuesta de las corrientes a incrementar su intensidad.

La conectividad entre las 4 ACS del seno Skyring durante el periodo 2016-2018 fue bastante homogénea, donde las diferencias, correspondientes a las consideraciones metodológicas entre cada escenario, registró una variabilidad interanual para los 3 años de simulación muy limitada y menor al 1% en todas las posibles conectividades entre ACS.

Las características hidrográficas y las masas de agua en la nueva etapa de los cruceros Patagonia norte, arrojó la presencia de las aguas saladas y densas en el fiordo Puyuhuapi, destacando la

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

presencia de la masa de agua ESSW. Su posición coincidió con las aguas de menor contenido de oxígeno disuelto con valores menores a 2 ml/L, entrando en la categoría de hipoxia, como ha sido reportado en trabajos anteriores. Las aguas con menor contenido de oxígeno se registraron en la zona profunda y de la cabeza del fiordo Quitralco, con registros muy cerca de la anoxia. Sin embargo, durante agosto 2022 se observó la ventilación casi total de fiordo, reduciéndose la hipoxia y las aguas de bajo oxígeno. Este evento estuvo asociado a la llegada de aguas más frías y densas por la capa sub-superficial. A pesar de los lugares con hipoxia registrada y descrita anteriormente, se observaron zonas donde el oxígeno disuelto fue bajo, entre el umbral de los 2-3.5 ml/L o 30 60% de saturación, respectivamente. Estas regiones fueron: la cabecera del fiordo Comau, el fiordo y seno Reloncaví.

La caracterización oceanográfica (propiedades físico-químicas) en la columna de agua, de las ACS (agrupaciones de concesiones de salmónidos), tomando como delimitación los polígonos de cada área específica y georreferenciada. Puede ser visualizada por cualquier usuario que ingrese a la plataforma chonos (https://chonos.ifop.cl/subpesca/index/), desarrollada por el grupo de oceanografía en el centro tecnológico de IFOP en Castro. La visualización se realiza de manera interactiva, ingresando a la interfaz gráfica, donde se accede a cada ACS mediante un mapa georreferenciando, así en cada ACS aparecen las estaciones medidas, representadas mediante puntos amarillos. Un aparte de la información, aparece en forma de tabla de resumen, con alore estadísticos básicos (mínimo, máximo y promedio), la tabla resumen indica 2 estratos diferentes, uno superior que corresponde a la capa más próxima a la superficial, la cual es determinada por el cursor del mouse posicionándose en un perfil individual o varios perfiles de una variable determinada. La segunda capa, indica valores promedio, considerando los generados por debajo de la capa superior y hasta la profundidad de fondo. Actualmente la interfaz, se encuentra en su primera versión, donde se pueden visualizar mediciones de CTDO (salinidad, temperatura, oxígeno disuelto); nutrientes (nitrato, fosfato, silicato) y clorofila total. Es importante señalar que, en esta etapa del estudio, se incluyó la información generada en los diferentes estudios ejecutados por IFOP en 2012, 2013, 2021, y 2022, pero sólo para la zona de seno Skyring y alrededores, polígonos de las ACS, 49b, 50a, 50b, 51, 52 y 53. Si bien la información, durante esta etapa, estuvo focalizada en la zona de seno Skyring, conforme avance el desarrollo de esta herramienta en el tiempo, se irá incluyendo información hidrográfica histórica generada precedentemente, con la finalidad de cubrir todas las ACS incluyendo las correspondientes al mar interior de Chiloé y Mar interior de Aysén. Uno de los aspectos más importantes de la interfaz, es que, si bien se encuentra en la primera versión, El diseño permite una navegación intuitiva.

# INDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO i				
ÍNDICE GENERAL v				
1.	ANTECEDENTES			
2.	OBJETIVOS	6		
2.1	Objetivo general	6		
2.2	Objetivos específicos	6		
3.	METODOLOGÍA	7		
3.1	<b>Objetivo específico 2.2.1</b> Caracterizar la variabilidad interanual de las condiciones químico-biológicas (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, biomasa fitoplanctónica) en seno Skyring.	7		
3.2	<b>Objetivo específico 2.2.2</b> Realizar un balance de nutrientes a través de un modelo semi-empírico, identificando las principales fuentes naturales que aportan nutrientes dentro del sistema.	10		
3.3	<b>Objetivo específico 2.2.3</b> Estimar la circulación y conectividad hidrodinámica en una escala interanual a través de modelación numérica en seno Skyring.	14		
3.4	<b>Objetivo específico 2.2.4</b> Monitorear las condiciones oceanográficas en la columna de agua dentro del Mar interior de Chiloé y Aysén	36		
3.5	<b>Objetivo específico 2.2.5</b> Caracterizar oceanográficamente las Agrupaciones de 3 Concesiones de Salmónidos (ACS) mediante mapas temáticos montados en una plataforma de información geográfica.			
4.	GESTIÓN DEL PROYECTO	39		
4.1	Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA: 25/03/2021	39		
4.2	Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA: 12/05/2021	39		
4.3	complicación en Contratación de la embarcación para realización de mediciones.	40		

4.4	Realización de campañas oceanográficas.		
4.5	Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA grupo de Estación Patagonia, - Instituto de Geografía Pontificia Universidad Católica UC. Presentación estudio: "PRINCIPALES FUENTES DE AGUA DULCE QUE APORTAN AL SISTEMA DE MICRO CUENCAS DE LA REGIÓN DE MAGALLANES Y ANTÁRTICA CHILENA (ETAPA 1). LICITACIÓN ID 4728-29-LQ20," 15/09/2021		
5.	RESULTADOS	41	
5.1	Objetivo específico 2.2.1		
5.2	Objetivo específico 2.2.2		
5.3	Objetivo específico 2.2.3		
5.4	Objetivo específico 2.2.4		
5.5	Objetivo específico 2.2.5		
6.	DISCUSIÓN		
7.	CONCLUSIÓNES		
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		
9.	ANEXOS		
9.1	ANEXO I. Base de datos		
9.2	9.2 ANEXO II. Resultados ADCP remolcado.		
9.3	ANEXO III Matrices de conectividad entre centros de cultivos		

# 1. ANTECEDENTES

#### 1.1 Condiciones oceanográficas de la zona Sur Austral Chilena

La geografía patagónica es producto de la acción glaciar 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 seria 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 & 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. 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. 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 adyacentes (aguas oceánicas) y la mezcla que experimenta esta masa de agua con el agua dulce (aporte fluvial, nival, glacial y pluvial), siendo esta mezcla proporcional a la distancia de la fuente de agua dulce (Carrasco & 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, menos concentración de oxígeno. Entre ambas capas se observa un intenso gradiente conformando una marcada haloclina, picnoclina, 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 en diferentes grados con el agua oceánica que ingresa en dirección opuesta (capa profunda), Silva et al., (1997 1998); Sievers et al., (2002); Valdenegro & Silva, (2003). De esta forma, desde la hidrodinámica, este transporte de agua dulce genera la llamada circulación gravitacional, o comúnmente denominada circulación estuarina y sus principales rasgos estarán definidos por la combinación entre la circulación y el gradiente salino, definiéndose básicamente con un flujo medio por diferencias de densidad.

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 salmonicultora experimentó una fuerte

1

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

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), ya que 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, solo 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).

### 1.2 Consideración de la hidrodinámica en la acuicultura costera

FAO en 2010, elaboró un extenso documento donde indicó casos de estudios y una serie de directrices, que deben ser considerados para el desarrollo de la acuicultura en términos sostenibles. Valle-Levinson (2010) describió lo forzantes principales en los sistemas sujetos a circulación gravitacional y como estos deben ser identificados, medidos y considerados, dentro de la actividad acuícola, ya que estos forzantes y los procesos que los gobiernan, deben ser considerados para un ordenamiento en la gestión territorial y para el ordenamiento de la acuicultura, considerando que esta actividad debe ser desarrollada como una actividad económica y ambientalmente sostenible.

Si bien la estructura básica del esquema de circulación gravitacional, es un rasgo distintivo dentro del sistema de fiordo y canales, como es el caso de la Patagonia Chilena, la dinámica de estos flujos, no está solo determinado por los gradientes de densidad, producto del intercambio de aguadulce y agua salada. Sino que también, está determinada y modificada por otros forzantes, que pueden actuar de manera unitaria o en conjunto, generando complejos patrones de circulación. A continuación, se señalan los principales alcances detallados por el autor anteriormente señalado:

Influencia de la marea, este forzante puede modificar la circulación de acuerdo con las diferentes fases del ciclo mareal, generando por ejemplo flujos de mayor intensidad, debido a los cambios en el grado de mezcla vertical (diferencias entre sicigia y cuadratura), modificando de esta manera los campos de masa (temperatura, salinidad, densidad).

Efecto de batimetría, la geomorfología submarina del lugar puede tener un marcado efecto en los diferentes flujos, que se producen por la circulación gravitacional, así una conformación tipo V, generará diferentes tipos de cizalles laterales generando flujos laterales, mientras que conformaciones más explanadas a lo largo del canal en forma de "U" facilitan la circulación gravitacional, ya que los flujos tienden a darse de manera horizontal.

Patrones de viento, la dirección e intensidad del viento, puede tener un rol significativo en la circulación, ya que por ejemplo un viento en contra de la circulación superficial (flujo de agua

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

dulce/salobre), disminuirá la velocidad de éste (aumentando el tiempo de residencia del agua), ejerciendo una mezcla más intensa cambiando la profundidad de la estratificación.

Balance de agua, el forzante principal en la circulación gravitacional es el agua dulce, dado que los aportes de agua dulce mantienen el balance de masas en sistemas estuarinos y de fiordos, como es la zona austral de Chile, tienen una marcada influencia en la estabilidad de la columna de agua por gradientes de densidad.

Debido a las brechas de conocimiento que aún existen en estos sistemas, la identificación de los diferentes forzantes y sus grados de influencia sobre los patrones de circulación, se ha vuelto un proceso clave, para desarrollar y focalizar estudios que permitan formular una línea base suficientemente robusta sobre la cual establecer los marcos regulatorios ambientales (e.g) zonificar, ordenar la instalación y/o selección de sitios aptos para la acuicultura.

#### 1.3 Implementación de medidas en la gestión de la acuicultura

Actualmente se lleva a cabo el desarrollo e implementación de múltiples medidas y normativas, las cuales están dirigidas a resolver los principales temas sanitarios y ambientales que afectan a la acuicultura. Entre estas medidas una de las de más amplio impacto es el establecimiento de macrozonas, concepto que conlleva un nivel de organización y control de cobertura y nivel superior a los barrios o agrupaciones de concesiones establecidas en versiones anteriores de la Lev de Pesca y Acuicultura. Uno de los efectos principales de este nuevo concepto de organización es la necesidad de establecer sectores en los cuales no deberá desarrollarse actividad de cultivos. especialmente salmónidos. Junto a esta situación se observa una constante evolución del conocimiento de la oceanografía en la zona sur austral, motivada por la necesidad de gestionar en forma sustentable el desarrollo de la industria acuícola. Este desarrollo ha mostrado la gran cantidad de complejidades de este ambiente, así como la dificultad de aplicar directamente herramientas complejas, tales como los modelos numéricos, a la solución de problemas ambientales, sanitarios y productivos. Es así como se torna clara la necesidad de mejorar dichas herramientas, así como también potenciar el uso de los productos generados por ellas, proveyendo a la autoridad de utilidades que permitan dicha gestión. Las posibilidades de aumentar el conocimiento en estos sectores y mejorar la administración por parte del estado hacen imprescindible la ejecución de esfuerzos mayores en la mejora de las herramientas disponibles, en la diversificación de sus usos y en la obtención de información de línea base de dichas áreas. La investigación para proveer esta información debe comenzar por la descripción del medioambiente físico, especialmente su dinámica y variabilidad espacial y temporal como base para la comprensión y manejo sustentable del medio ambiente.

El desarrollo de la investigación enfocado a determinar la dinámica estuarina, ha permitido la implementación de modelos numéricos para el estudio de amplias zonas geográficas. Este tipo de estudios tiene como una de sus ventajas la capacidad de extender los resultados de la medición y monitoreo puntual a un área geográfica mayor, con la capacidad de predecir su comportamiento en diferentes escenarios.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Una de las formas de entender y poder predecir el comportamiento de un sistema marino es a través de modelos numéricos, estos son abstracciones de la realidad, por ello tienen errores al intentar simularla. Cualquier modelo de predicción intenta simular los múltiples procesos que producen cambios en un sistema, por lo tanto, su objetivo es comprender estos procesos y predecir los efectos en los cambios e interacciones (Kamga *et al*, 2000). La simulación se realiza mediante la descripción de un sistema en términos de leyes físicas, por consiguiente, un modelo numérico está compuesto por una serie de ecuaciones que expresan estas leyes (Kalnay *et al*, 1998). Siempre existen desviaciones entre lo simulado y lo real, que se corrigen a medida que las simulaciones avanzan y se contrastan contra lo real, ajustando a posteriori los datos, y volviendo a ejecutar las simulaciones. Es un proceso de retroalimentación, sin el cual, sería muy imprudente tomar como certeras las predicciones realizadas (Jolliffe *et al*, 2003).

Existen múltiples experiencias de modelamiento hidrodinámico en sistemas similares a la Patagonia Chilena como los fiordos escandinavos o canadienses. De especial interés es el experimento NorKyst-800 (Albretse *et al*, 2011) el cual, es un sistema de modelamiento hidrodinámico basado en ROMS para las zonas costeras de Noruega. El dominio de este modelo cubre toda la costa de Noruega con una resolución de 800 m. Funciona como un dominio madre para ejecuciones de alta resolución en zonas particulares.

En proyectos anteriores ASIPA en el ámbito de oceanografía y modelación, se han implementado y validado modelos a diferentes escalas y en distintas regiones de la zona sur austral de Chile, pero aún se hace necesario ampliar la cobertura de información oceanográfica detallada en zonas donde esta es aún insuficiente, como lo es el sector del estero Elefantes y sus fiordos adyacentes, lo que permitirá implementar y desarrollar modelos hidrodinámicos en estas zonas, ya que esta ha presentado brotes de virus ISA. Además el área seleccionada para este estudio se encuentra afectada por derramamiento del Campo de Hielo Norte (46.3° S - 47.5° S), ya que sus principales cuencas vierten directamente a través de la laguna San Rafael, fiordo Cupquelan y golfo Elefantes, influenciando directamente a los canales y fiordos localizados dentro el mar interior de la región de Aysén, debido a que el agua dulce es el principal forzante de la circulación estuarina, para realizar un adecuada caracterización oceanográfica de este sistema, en este estudio se dará especial énfasis en abordar metodologías que permitan efectuar una mejor aproximación sobre los volúmenes de agua dulce que ingresan al sistema, junto con integrar información químico-biológica para determinar el comportamiento de estos parámetros asociado a la hidrodinámica.

Es de suma importancia señalar, que el desarrollo de este proyecto se encuentra dentro del marco de "Asesoría integral para pesca y acuicultura" (ASIPA) que es un convenio entre SubSecretaría de Pesca y Acuicultura – Ministerio de Economía e IFOP, el cual, está encaminado en una perspectiva de desarrollo de mediano y largo plazo en temáticas de gestión costera asociada al conocimiento oceanográfico y desarrollo de herramientas cuantitativas como son los modelos numéricos.

El estudio de la conectividad de un sistema a partir de la variabilidad climatológica ambiental, entendiendo por tal la variabilidad estacional e interanual de dicho sistema, permite establecer cuál es la zonificación y compartimentación más adecuada en función de la hidrodinámica local, para en última instancia determinar cuál sería el emplazamiento de los centros de cultivo salmonícolas que minimizara las probabilidades de arribo y dispersión de partículas entre dichos centros. La conectividad es determinada a partir de los campos de corrientes que transportan masas de agua y las partículas contenidas en ella en suspensión, dilución o flotación. Dado que la conectividad

4

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

implica el desplazamiento de masas de agua entre dos puntos (o parcelas de agua), cuanto más reducida sea el área sobre el cual se calculará la conectividad más pérdida de información tendremos, pues el intercambio de masas y partículas está confinado a los límites de dicha área. Por ello si bien se puede estimar la conectividad en áreas pequeñas a partir de mediciones de los campos de corrientes, para la estimación de la conectividad en grandes superficies (miles de km<sup>2</sup>) la medición en terreno de tales campos de corrientes es una tarea que demandaría de enormes recursos económicos y humanos que harían que esta tarea fuera prácticamente irrealizable. La modelación numérica, partiendo del principio de que proporciona una línea base bien definida contra la cual comparar las observaciones empíricas, y así los modelos apropiados pueden proporcionar hipótesis comprobables y dar una idea de los aspectos específicos de los procesos biológicos o hidrodinámicas en el mundo real (Adams *et al.*, 2012), son la solución a la limitación antes planteada. Además, a través de la modelación numérica podemos modular *ad hoc* las condiciones ambientales a fin de dar representación a la variabilidad climatológica ambiental, lo cual no puede ser garantizado cuando se realizan mediciones en terreno

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

#### 2. OBJETIVOS

#### 2.1 Objetivo general

Caracterizar mediante observaciones y modelación numérica, procesos oceanográficos en fiordos y canales Australes.

#### 2.2. Objetivos específicos

- **2.2.1**. Caracterizar la variabilidad interanual de las condiciones químico-biológicas (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, biomasa fitoplanctónica) en seno Skyring.
- **2.2.2.** Realizar un balance de nutrientes a través de un modelo semi-empírico, identificando las principales fuentes naturales que aportan nutrientes dentro del sistema.
- **2.2.3**. Estimar la circulación y conectividad hidrodinámica en una escala interanual a través de modelación numérica en seno Skyring.
- **2.2.4**. Monitorear las condiciones oceanográficas en la columna de agua dentro del Mar interior de Chiloé y Aysén.
- **2.2.5** Caracterizar oceanográficamente las Agrupaciones de Concesiones de Salmónidos (ACS) mediante mapas temáticos montados en una plataforma de información geográfica.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

# 3. METODOLOGÍA

**3.1 Objetivo específico 2.2.1** Caracterizar la variabilidad interanual de las condiciones químicobiológicas (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, biomasa fitoplanctónica) en seno Skyring.

# 3.1.1 Campañas oceanográficas: mediciones CTDO, muestras de agua, instalación sensores de conductividad, temperatura y oxígeno disuelto.

Se realizaron tres cruceros oceanográficos en Seno Skyring, Región de Magallanes y la Antártica Chilena durante los meses de marzo, mayo y julio del 2022 (figura 1), con el objetivo de cubrir la estacionalidad de las diferentes variables ambientales. En cada crucero oceanográfico se realizaron estaciones de CTDO mediante un SBE 19 plusv2 y se tomaron muestras de agua mediante botellas Niskin a profundidades estándar de 0, 5, 10, 25, 50, 100, 200 y 300 metros para caracterizar la hidrografía de la zona de estudio, considerando las variables; salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, nutrientes y biomasa fitoplanctónica. Las muestras de agua fueron utilizadas para determinar la concentración de los nutrientes (nitrato, nitrito, fosfato y silicato) y la biomasa pigmentaria (clorofila total, clorofila activa y feopigmentos). Para cada muestra de agua se utilizó un volumen de 1000 ml y fueron filtradas mediante un filtro de microfibra whatmann GFS de 0.7 µM. El filtro fue almacenado en papel aluminio y congelado hasta su análisis, para determinar la biomasa pigmentaria, mientras que el agua filtrada fue utilizada para el análisis de nutrientes. las muestras fueron almacenadas en contenderos plásticos y congelados hasta su análisis en laboratorio externo. Los análisis químicos para las variables anteriormente mencionadas, se analizaron a través del laboratorio externo del Centro de Investigación en Ecosistemas de la Patagonia (CIEP) utilizando la metodología descrita por nitritos (EPA, 2000: Method 353.2, Revision 2.0; APHA/AWWA/WEF, 2000: method 4500-NO3--F), nitratos (USEPA, 1993: Method 353.2, Revision 2.0; APHA/AWWA/WEF, 2000: method 4500-NO3--F), fosfatos (USEPA, 1993: Method 365.1, Rev. 2.0; APHA/AWWA/WEF, 1999: method 4500-P-F (1999 forward), y silicatos (USEPA, 1983: Method 370.1; APHA/AWWA/WEF, 2000: method 4500 SiO2- D (2000 forward). Con la información obtenida mediante el equipo CTDO, más los resultados de nutrientes, se realizaron las representaciones gráficas y estadísticos básicos de los parámetros, utilizando mínimos, máximos y promedios, éstas fueron realizadas mediante el software ODV (Schlitzer 2017). Además, con este software se construyeron las diferentes gráficas para describir el comportamiento y la distribución de cada una de estas variables. También se compararon las secciones temporales y espaciales para determinar si existan diferencias en los patrones y/o la distribución.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 1.** Área de estudio de los cruceros oceanográficos realizados en marzo, mayo y julio del 2022. En azul, se muestran las ubicaciones de las estaciones oceanográficas.

Con la finalidad de caracterizar la variabilidad temporal, de la temperatura y oxígeno disuelto, se instalaron una serie de sensores de medición de conductividad, temperatura y oxígeno disuelto. los detalles con la posición geográfica se detallan en la figura 2 junto al esquema de distribución de sensores en la columna de agua. En el caso de las series de tiempo fueron filtrados utilizando un filtro pasa-baja (coseno de Lanczos) con un inérvalo de 40 horas.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 2. Posición de las estaciones de CTDO, muestras de agua e instalación de los sensores.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

**3.2 Objetivo específico 2.2.2** Realizar un balance de nutrientes a través de un modelo semiempírico, identificando las principales fuentes naturales que aportan nutrientes dentro del sistema.

#### Balance de nutrientes

Para determinar el balance de nutrientes se utilizará el modelo Biogeoquímico LOICZ (Land Ocean Interactions in the Coatal Zone), siguiendo los procedimientos detallados en Gordon *et al.*, 1996. La modelación de los balances, se realiza mediante 3 etapas diferentes, las cuales se describen a continuación:

#### Etapa 1 - Balance de agua:

En esta etapa se determinará el balance de agua, mediante los diferentes flujos (volumen de agua por unidad de tiempo m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>) que ingresan en dentro de la zona estuarina, tal como la descarga directa de agua dulce (ríos), aportes de lluvia, aguas subterráneas y que salen como evaporación y flujos residual, mediante la ecuación general:

$$\frac{dV}{dt} = Vq + Vp + Vg + Vo - Ve + Vr \qquad (1)$$

Donde los términos son:

Vq: flujos de agua que ingresa al sistema por descarga fluvial.

Vp: flujo agua que ingresa al sistema por precipitación.

Vg: flujo de agua que ingresa al sistema de manera subterránea

Ve: flujo de agua que sale del sistema por evaporación

Vo: flujos de agua de fuentes no determinadas.

Vr: flujo de agua residual que sale del sistema (capa superficial).

Sí alguna de estas fuentes de información, es desconocida o por antecedentes previos es poco relevante, dentro del sistema se puede asumir su valor = 0.

#### Etapa 2 - Balance de sal:

Está constituido básicamente por el intercambio de sal en el sistema, producto del transporte hidrodinámico, no solo por los flujos residuales (Vr) sino que también, por los diferentes flujos (Vx) que remueven sal del sistema estuarino, hacia las zonas aledañas de condiciones más oceánicas., estos se encuentran determinados por la ecuación general:

$$\frac{d(VS)}{dt} = VpSp - VeSe + VrSr + Vx(Sm - Sfd)$$
(2)

Donde los términos son:

Sp: salinidad de precipitación

Se: Salinidad evaporación

Sr: salinidad promedio del flujo residual entre dos fronteras (estuario/fiordo zona oceánica adyacente)

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Sm: salinidad promedio de la zona marina adyacente Sfd: salinidad promedio de la zona estuarina o fiordo. Vp: flujo de la precipitación Ve: flujo de la evaporación

#### Etapa 3 - balance de elementos no conservativos:

Para esto se utiliza el principio de balance de masa simple, entre los elementos que se intercambia entre un sistema estuarino y un sistema oceánico, se representa mediante la ecuación general:

$$\frac{dV}{dt} = VrYr + Vx(YM - YF) + \Delta Y \quad (3)$$

Donde los términos son:

Yr: concentración de nutriente DIN y DIP en el flujo residual, entre dos bordes (estuario/fiordo zona marina adyacente).

YM: concentración promedio de nutrientes en la zona marina adyacente al fiordo.

YF: concentración promedio de nutrientes en zona estuarina o en fiordo.

 $\Delta$ Y: flujos del material no conservativo, en este caso la concentración de nutrientes corresponderá a nitrógeno inorgánico disuelto denominado DIN (nitrito + nitrato + amonio) y fósforo inorgánico disuelto DIP, bajo la forma de PRS (fósforo reactivo soluble, comúnmente denominado fosfato).

Debido a que lo nutrientes ( $\Delta$ Y) no tienen un comportamiento conservativo dentro del sistema, es decir la dinámica de estos está sujeta a una serie de interacciones biológicas, que hacen fluctuar sus valores en diversas escalas espacio/temporales, para el modelo LOICZ es fundamental resolver algunos procesos biológicos básicos del sistema, como aproximaciones basadas en el carbono, mediante el principio de la respiración y producción (*r-p*), que en este caso el modelo denomina NEM (Metabolismo Neto del Ecosistema), debido a que el carbono en la práctica, es difícil de medir se realizan aproximaciones basados en la relaciones estequiométricas del (C:N:P), cuando no existen datos disponibles (Gordon et al., 1996) recomiendan utilizar las relaciones estequiométricas de Redfield (106:16:1), en este estudio se utilizaron se utilizaron las relaciones estequiométricas de las mediciones (solo para el nitrógeno y el fósforo), las cuales difieren de las relaciones de Redfield.

De esta manera El modelo efectúa el cálculo del NEM mediante la ecuación:

# NEM $[p-r] = -[\Delta DIP * (C:P)*(12:31)]$ (4)

Donde la expresión C:P corresponde radio estequiométrico entre la relación de carbono inorgánico disuelto y fósforo inorgánico disuelto. Los términos 12 y 31, corresponden a las unidades de masa molar del carbono y el fosforo respectivamente. En este estudio dado que no se contó con información disponible de Carbono en columna de agua, se utilizó el radio teórico de Redfield (C:P=106).

Si NEM > 0 el sistema está predominado por los autótrofos (productores de materia orgánica). Si NEM < 0 el sistema está dominado por los heterótrofos (consumidores de materia orgánica).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Otro de los términos importantes que LOICZ resuelve, corresponde al ΔDIP este término es el flujo de fosforo inorgánico disuelto (fosfato) dentro del sistema y de cada compartimento, así:

# $\Delta DIP = \Sigma \text{ ingresos } -\Sigma \text{ egresos} \qquad (5)$

Si  $\Delta$ DIP > 0 el sistema se comporta como exportador de fósforo Si  $\Delta$ DIP < 0 el sistema se comporta como sumidero de fósforo

Para el caso del nitrógeno LOICZ asume consideraciones similares a las del fosforo, de esta forma identifica los flujos de nitrógeno como  $\Delta$ DIN, término que corresponde a todas las fracciones de nitrógeno inorgánico disponibles, en este caso DIN (Nitrógeno Inorgánico Disuelto) correspondió a la sumatoria de nitrato, nitrito y amonio. Particularmente en este estudio el DIN consideró la información disponible y se detalla en cada una de las fuentes de los diferentes balances descritos más adelante. El  $\Delta$ DIN se estima con la formula simplificada:

# $\Delta DIN = \Sigma$ ingresos - $\Sigma$ egresos $\approx \Delta DIN$ (observado) (6)

Otro de los términos importante que LOICZ considera desde la perspectiva del nitrógeno corresponde al termino EΔDIN este representa al flujo de nitrógeno esperado y se obtiene mediante la expresión:

# $E\Delta DIN = \Delta DIP^{*}(N:P)^{*}(16:31)$ (7)

Donde la expresión N:P corresponde radio estequiométrico entre la relación de nitrógeno inorgánica disuelto y fosforo inorgánico disuelto. Los términos 16 y 31 corresponden a las unidades de masa molar del nitrógeno y el fosforo respectivamente, para hacer las transformaciones de unidad.

Otro termino importante para LOICZ corresponde a Nfix - Dnit, expresión que representa una aproximación de la transferencia de nitrógeno fijado y el nitrógeno gaseoso (Smith *et al.*, 2000). Se obtiene mediante:

# $[Nfix - Dnit] \approx \Delta DIN-E\Delta DIN \quad (8)$

Si Nfix – Dnit < 0, dentro del sistema predominaría la desnitrificación y se infiere que puede existir un sumidero adicional de nitrógeno.

Si Nfix – Dnit > 0, dentro del sistema predominaría la fijación, dado que esto es una aproximación, se puede inferir que debería existir una fuente adicional de nitrógeno.

El balance de nutrientes mediante el modelo LOICZ, se realizó en fiordo Comau, considerando la misma área de las mediciones de la columna de agua descritas en la actividad 1.

<sup>12</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

#### Configuración del modelo (modelo conceptual).

Los sistemas estuarinos suelen tener una serie de clasificaciones, basados principalmente en sus propiedades físico químicas, el modelo LOICZ contiene diferentes configuraciones (espaciales y temporales), lo que permite realizar estimaciones en sistemas estuarinos, de esta forma LOICZ también permite efectuar estimaciones en sistemas altamente estratificados (Figura 3 panel izquierdo), como son los estuarios tipo fiordo, este tipo de configuración se aplicará dentro del seno Skyring.

El modelo LOIZC aplica bajo el principio de "cajas", para la estimación del volumen de estas cajas, se utilizó la información de batimetría de las diferentes cartas náuticas SHOA, con esta información se construyó una representación de la batimetría mediante un modelo de elevación batimétrica (DEM), se ejecutó una estimación del volumen utilizando el software QGIS (figura 3 panel derecho).



**Figura 3**. Panel izquierdo: esquema conceptual del modelo LOICZ, para un sistema estratificado tipo fiordo panel inferior. Representación de la batimetría (DEM) del seno Skyring (panel superior derecho). Representación esquema de caja con las dimensiones obtenidas de la batimetría, panel inferior derecho.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

# **3.1 Objetivo específico 2.2.3:** *Estimar la circulación y conectividad hidrodinámica en una escala interanual a través de modelación numérica en seno Skyring.*

Para abordar este objetivo se comenzará con una caracterización en base a los datos in situ, para posterior presentación de la circulación a una escala interanual en base al modelo hidrodinámico.

#### 3.1.1 Mediciones in situ

Se realizaron mediciones de correntometría euleriana en la columna de agua dentro de Skyring, se analizó la corriente y marea de la zona en base a 2 ADCP y 4 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 mar interior de Skyring, 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<sup>2</sup> 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 4 mareógrafos que midieron entre el año 2021 y 2022, en canal Gajardo, Ventisquero y 2 en canal Fitzroy. 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 Skyring 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 pleamares y bajamares, 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 mixto.

Se analizó una estación meteorológica HOBO ubicada en Punta verde (52°39'7.48''S – 71°29'26.7''W), la estación registro desde febrero 2021 a agosto 2022, variables como; magnitud de

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

la velocidad del viento, dirección del viento, PAR, presión atmosférica y temperatura atmosférica. Se utilizó la serie de tiempo de magnitud y dirección del viento, para calcular las componentes ortogonales del viento; U (este) y V (norte).

Instrumento	Latitud (Sur)	Longitud (oeste)	Fecha inicio	Fecha final	Z (m)
Mareógrafo Canal Gajardo	52°50'59.38"	72°54'0''	27/11/2021	10/07/2022	8.3
Mareógrafo Ventisquero	52°37'39.43"	72°51'55.29''	27/11/2021	10/07/2022	3.4
Mareógrafo Canal Fitzroy norte	52°40'15.56"	71°27'28.54''	27/11/2021	10/07/2022	8.5
Mareógrafo Canal Fitzroy sur	52°47'30.80"	71º24'4.17"	27/11/2021	10/07/2022	3.8
ADCP RDI Canal Gajardo	52°44'34.58"	72°44'23.20''	27/11/2021	10/07/2022	6.9 - 82.9
ADCP ROWE Isla Escarpada	52°35'3.84"	72°19'9.11"	27/11/2021	10/07/2022	13.4 - 101.4

Tabla 1: Información de instrumentación utilizada en mediciones seno Skyring 2021 - 2022.

Simular la hidrodinámica de un sitio como seno Skyring 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 y la geometría del reservorio dada por la información batimétrica.

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 **Figura 4.** 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), estos se detallan respectivamente en los objetivos 2 y 3 de este informe.

<sup>15</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 4: Esquema del sistema de modelación y distribución de información del estudio.

# 3.1.2 Modelo Atmosférico WRF:

La circulación marina en fiordos con entornos montañosos está fuertemente influenciada por el patrón de viento local, esto requiere de modelos atmosféricos con resolución suficientemente alta para resolver los impactos de la topografía en la circulación atmosférica (Myksvoll et al., 2012). Se modelaron las condiciones atmosféricas locales utilizando el modelo no hidrostático (WRF v. 3.5.1) (Skamarock et al., 2008), anidado dentro del sistema operacional NCEP con resolución espacial de 25 km (National Centers for Environmental Prediction, 2000). Para este caso se establecieron dos dominios (**Figura 5**), siguiendo una relación de 1:3. El primero corresponde al padre y comprendió un área entre ~46 - 56.5°S y ~65 - 81°W, con resolución espacial de 9km. Y el segundo corresponde al dominio hijo, alcanzando una resolución horizontal de 3 km y abarcando un área entre ~52.3 -  $53^{\circ}$ S y ~71 –  $73^{\circ}$ W.

Se han estimado los patrones de viento entre 2015-2017 con una resolución espacial de 3 km en el dominio seno Skyring. Por las características de la zona resultó complejo tener información observacional, lo cual, limita la validación del modelo, sin embargo, se cuenta con una estación meteorológica instalada por IFOP e información satelital que, aunque presenta un grado de incertidumbre, nos entrega información significativa de la variabilidad atmosférica en la región. La estación meteorológica, la cual se encuentra operando desde febrero de 2021, se encuentra ubicada en la localidad de río Verde al sur de seno Skyring (-52.64 °S -71.49 °O) y registra información de

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

parámetros atmosféricos como presión, vientos, temperatura, entre otros cada 10 minutos (Figura 2). La base de datos se encuentra disponible en la herramienta "Tiempo Real" dentro de la plataforma de información oceanográfica CHONOS (www.ifop.cl/chonos). De forma complementaria CCMP Wind Vector se ha utilizado la base de datos Analysis Product (https://www.remss.com/measurements/ccmp/) el cual, es un producto grillado de vientos superficiales producido mediante una combinación satelital, boyas ancladas y viento modelado. Con una resolución espacial de 0.25° x 0.25° y una resolución temporal diaria para 2021 y campos de viento mensual para el periodo 2015-2017.

Para determinar la habilidad del forzante atmosférico en reproducir las componentes de los vientos se compararon las series de tiempo horarias de la estación meteorológica y CCMP con las estimaciones de WRF mediante gráficas de rosas de viento. El análisis se efectúa de manera estacional y de forma exploratoria debido a la escasa disponibilidad de los datos observacionales. Por otro lado, la magnitud del viento se evalúa mediante una comparación espacial entre la modelación atmosférica WRF y el producto CCMP. Para aquello se interpola linealmente la grilla del producto CCMP al dominio WRF y se determinaron los campos estadísticos de correlación y raíz del error cuadrático medio. El primero nos permite determinar la relación lineal entre las bases de datos, mediante el coeficiente de correlación de Pearson ( $r_{yx}$ ) el cual se define como el cociente entre la covarianza de lo modelado y observado y el producto de las desviaciones estándar, es decir:

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

donde YY corresponde a la base de datos modelada y XX a la observada. El valor del coeficiente va desde -1 a 1, mientras más cercano a 1 la relación se ajusta linealmente, a 0 no existe relación y a - 1 la relación se vuelve indirecta. El segundo estadístico nos da medida de la diferencia en promedio entre ambas bases de datos, matemáticamente se define como:

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

Donde YY y XX corresponden a cada una de las series de tiempo modelada y observada respectivamente y *N* al largo de las series. Cuanto menor es el valor RMSE, mejor es la capacidad predictiva de un modelo en términos de su desviación absoluta.

<sup>17</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 5**: Dominios establecidos para la simulación atmosférica (WRF), con resolución espacial de 9km (D01) y 3 km (D02). Se muestran 3 posiciones (Pto. este, centro y oeste) para la descripción de los vientos a lo largo del seno Skyring. El triángulo blanco indica la posición de la estación meteorológica operada por IFOP.

#### 3.1.3 Modelo hidrológico VIC:

La información de la Dirección General de Aguas (DGA) en esta zona es muy escasa, por lo cual, fue necesario utilizar información que permitiera una cobertura espacial y temporal sobre la descarga de agua dulce al sistema marino de seno Skyring.

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

<sup>18</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

espacial de 5 x 5 km. Con esa información, VIC simula la escorrentía en intervalos horarios mediante la cual se calculan series diarias de caudales en una red hidrográfica sintética (obtenida a partir de información satelital) para el dominio de análisis. Luego de un proceso de calibración realizada con observaciones fluviométrica de la DGA, en la cual algunos parámetros del modelo VIC se ajustan para optimizar el desempeño del modelo determinado, el modelo es ejecutado para obtener estimaciones del caudal diario para el periodo 1980 a 2018, en todas las cuencas costeras del dominio espacial de la simulación. Toda la información de descargas en las cuencas marinas es desplegada en la plataforma Chonos de IFOP en http://chonos.ifop.cl/aguadulce/visor. El modelo VIC fue desarrollado para IFOP por la empresa consultora MeteoData Limitada. El sistema de modelación de agua dulce tiene varios componentes que se muestran en la **Figura 6** y la **Tabla 2**.



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

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

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	1980-2018
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)

 Tabla 2: Características del sistema de modelación

La Figura 7 muestra la red de cuencas hidrográficas sintéticas estimada para el modelo VIC y las principales estaciones fluviométricas de la DGA en la región de Magallanes. Se utilizaron aquellas observaciones para determinar la habilidad del modelo en reproducir la variabilidad de los caudales en la región de Magallanes. Las series de tiempo fueron promediadas de manera mensual y comparadas con las simulaciones correspondientes a cada cuenca. Como forzante del modelo hidrodinámico se seleccionaron las 39 fuentes con mayor aporte de agua dulce en seno Skyring, las cuales representan según las estimaciones la mayor parte de la variabilidad en el sistema. De esta manera se utilizan los caudales estimados por el modelo VIC para caracterizar el forzante hidrológico de manera espacio-temporal y 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.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 7.** Estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) y cuencas hidrográficas sintéticas estimadas para la región de Magallanes.

#### 3.1.4 Modelo 2D de mareas:

Para proveer condiciones de borde de nivel del mar, se implementó un modelo barotrópico (2D) con el fin de propagar la onda de marea desde el Estrecho de Magallanes, hacia la zona interior de seno Skyring, específicamente hasta los canales Gajardo y Fitz-Roy, sectores en donde están ubicados los bordes abiertos del modelo de alta resolución 3D hidrodinámico. El modelo barotrópico utiliza como condición de borde los constituyentes armónicos de los mareógrafos ubicados en Punta Arenas y caleta Meteoro (Figura 9), bordes este y oeste respectivamente, cuya fuente pertenece al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 8: Dominio y batimetría del modelo barotrópico, junto a puntos de observación del nivel del mar.

Para analizar y evaluar desempeño del modelo barotrópico se utilizan mediciones realizadas por IFOP durante el año 2012, en la bahía Beaufort y canales Gajardo (interior de seno Skyring) y Fitz-Roy (Tabla 3). Se realizó un análisis armónico (Pawlowicz et al., 2002) del nivel del mar en base a datos de estos mareógrafos (Tabla 3) y el modelo 2D. Los constituyentes obtenidos fueron utilizados para caracterizar el régimen de marea presente en el sistema Skyring mediante el coeficiente de Courtier (ecuación 1) "F" (Boon, 2004), el cual se obtiene por la suma de las principales amplitudes diurnas dividido la suma de las principales amplitudes semidiurna.

Mareógrafo	Latitud	Longitud	Intervalo de medición	Fecha (inicio - final)
Bahía Beaufort	52°47'22,5''S	73°37'40,0''W	10 min	20/10/2012 - 12/12/2012
Canal Gajardo	52°49'30,4"S	72°54'47,7''W	10 min	27/10/2012 - 05/12/2012
Canal FitzRoy	52°48'2,0"S	71°23'37,3"W	10 min	29/04/2013 - 26/05/2013

 Tabla 3. Información de Mareógrafos instalados en la región

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

### 3.1.5 Modelo hidrodinámico 3D (MIKE 3)

Se utilizó el modelo hidrodinámico 3D MIKE 3 FM (DHI, 2017) para el seno Skyring 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 considerando un esquema turbulento de cierre. Como algoritmo de solución discreta de las ecuaciones indicadas, el modelo utiliza el método de volúmenes finitos centrados en cada celda. La estructura de discretización en una malla irregular permite un buen ajuste al borde costero, por lo que se considera que este tipo de solución es la adecuada para zonas de topografía compleja. En la vertical utiliza coordenadas sigma combinadas con rectangulares (denominadas Z), que permiten una mejor solución de la estratificación en las zonas con gradientes verticales de densidad. Para la integración temporal, se utiliza un enfoque semi-implícito donde los términos horizontales son tratados explícitamente y los verticales de manera implícita (DHI, 2017).

El dominio del modelo está ubicado en un seno semicerrado de la región de Magallanes (Figura 9a), tiene 9927 elementos en la horizontal y se extiende desde el oeste por el canal Gajardo, incluyendo íntegramente el seno Skyring hasta el borde este que se encuentra a la salida del canal Fitz-Roy y el seno Otway (Figura 9b). 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 a 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 (~500 m) del seno Skyring con una resolución aproximada de 1000 m, mientras que la mayor resolución (~100 m) se encuentra en los canales de conexión Skyring (Figura 9c). 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 4.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 9**. a) Ubicación del seno Skyring en la región de Magallaneş, b) modelo digital de elevación basado en cartas náuticas SHOA y malla triangular con resolución variable. c) ADCP en isla Escarpada.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Parámetros MIKE 3 FM	Seno Skyring
Resolución espacial	Variable ~100 a 1000 m
Resolución vertical	45 capas sigma-Z / superficie ~1 m / fondo ~25 m
Resolución temporal	300 s / (almacena datos horarios)
Periodo de simulación	01-07-2015: 31-12-2018 (3.5 años)
Condiciones de borde	Climatología CTD -IFOP
Forzante atmosférico	WRF-IFOP 1 Km
Ríos	VIC-IFOP
Modelo de turbulencia	Esquema k-epsilon
Tiempo de cómputo para simular 1 año (servidor Intel-32 núcleos)	~22 días
Periodo de estabilización (spin up)	8 años

 Tabla 4: Características de implementación del modelo hidrodinámico en seno Skyring

Las condiciones de borde de nivel del mar, en los canales de conexión fueron extraídas de modelo barotrópico, detallado en el punto 3.1.3. En cuanto a los bordes de temperatura y salinidad fueron utilizados observaciones provenientes de perfiles de CTD realizados en campaña oceanográfica por IFOP, durante el año 2012 (Pinilla et al., 2013) en aquella zona, esta condición de borde es variable en el tiempo. Para las condiciones iniciales referidas a temperatura y salinidad fueron utilizadas el paso de tiempo final del periodo de estabilización del modelo, este periodo de estabilización tomó un tiempo de 8 años, para el periodo 2016-2017 se realizó una simulación en bucle hasta alcanzar el periodo de equilibrio.

# 3.1.6 Hidrografía:

Para la evaluación de las propiedades físicas (salinidad y temperatura) del modelo se utilizaron diferentes mediciones de CTD realizadas por IFOP en años anteriores (Pinilla, 2015), las cuales, permitieron caracterizar la hidrografía del sistema marino de Skyring y su entorno. Además, se extrajo información específica de estaciones oceanográficas (Figura 10) 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).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 10. Puntos de estaciones oceanográficas realizadas en los años 2013 y 2021.

Para cuantificar los grados de mezcla o estratificación vertical, basados en la salinidad, se utilizó el parámetro de estratificación  $\eta_s$ , siguiendo los procedimientos detallados en (Haralambidou *et al.*, 2010), posteriormente se seleccionaron estaciones determinadas, con mediciones de CTD en las diferentes campañas IFOP y se compararon con estaciones extraídas del modelo. El parámetro se obtiene de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$\eta s = - \frac{(Sf - Ss)}{(Sf + Ss) * 0.5} \quad (1)$$

Donde Sf: salinidad de fondo, Ss: salinidad superficial. El valor del parámetro considera que cuando  $\eta$ s<0.1 la columna de agua se encuentra completamente mezclada,  $\eta$ s >0.1 indica que en la columna de agua se produce una mezcla parcial,  $\eta$ s>1 la columna de agua está bien estratificada.

#### 3.1.7 Corrientes en seno Skyring

Para saber si el modelo hidrodinámico reproduce los principales procesos que modulan la estructura temporal y espacial de las corrientes al interior del seno Skyring se comparó la información de un perfilador de corrientes (ADCP) instalado durante el año 2021, por un periodo ~ 7 meses, ubicado en el sector de isla Escarpada (-Lat. -52,60°, Long. -72,35°). Lamentablemente el periodo de medición no coincide con el de modelación, sin embargo, realizando un análisis que permita 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. Además, se realizó un análisis de Función Ortogonal Empírica (EOF) (Thomson y Emery, 2014) sobre las

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.
corrientes submareales (observadas y modeladas) para determinar la capacidad del modelo en replicar los principales modos de variabilidad.

### 3.1.8 Conectividad hidrodinámica en seno Skyring

La conectividad estudia la comunicación entre 2 o más entidades o áreas espaciales, que en el caso de la de la oceanografía, se puede lograr (entre otros métodos) mediante el análisis de los transportes por las corrientes marinas de diferentes tipos de partículas (Adams et al., 2015).

Si bien la conectividad se puede calcular a partir de mediciones empíricas, es más eficiente e integral su estudio mediante modelos numéricos, pues permiten utilizar un número mucho mayor de partículas, simular diferentes tipos de partículas biológicos/abióticos y diferentes tipos de escenarios ambientales (Andrello et al., 2013, Paris et al., 2013). De esta manera, a partir de los campos tridimensionales de flujo y propiedades físico-químicas (corrientes, temperatura, etc.) resultantes del modelo hidrodinámico del seno Skyring, se han acoplado modelos de dispersión de partículas, sobre cuyos resultados se han aplicado estadísticas de conectividad para, finalmente producir matrices de conectividad que relacionan cuantitativamente el transporte de un determinado tipo de partículas entre distintas entidades espaciales (Condie et al., 2004).

Las características metodológicas y de los resultados de la conectividad para el presente caso de estudio del seno Skyring se enmarcan bajo un enfoque bio-sanitario en relación con la actividad salmonicultora, pues en los últimos años en la XII región de Magallanes ha habido un crecimiento en problemáticas sanitarias por brotes de caligidosis entre los actuales centros de cultivo y agrupaciones de concesiones de salmonicultura (Arriagada et al., 2019), así como la preocupación por las consecuencias que las perspectivas futuras de crecimiento de la industria salmonicultora enfrente ante un escenario en el cual se diagnostica que las condiciones ambientales favorecerán este tipo de eventos en el medio plazo (Lepe-López et al., 2021).

Mientras que en la anterior etapa del presente proyecto "Modelación de alta resolución aplicado al transporte hidrodinámico y su relación con procesos químico-biológicos en seno Skyring y canales aledaños, región de Magallanes y Antártica chilena" (Soto et al., 2022), la conectividad se abordó dentro de una escala intra-anual, en la actual etapa la conectividad se enfoca desde una escala de variabilidad interanual con el objetivo de aportar información relevante bajo un enfoque bio-sanitario de la salmonicultura acerca del comportamiento de la circulación y el transporte de partículas del seno Skyring

A continuación, se detallan la metodología y configuración de la modelación de dispersión de partículas y estadísticas de conectividad.

## 3.1.8.1 Modelos de dispersión de partículas

Se implementaron 3 modelos de dispersión de partículas, uno por cada uno de los 3 años naturales completos del modelo hidrodinámico descrito en este mismo objetivo (2016, 2017 y 2018).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Cada uno de estos 3 modelos hidrodinámicos anuales se simuló para 4 escenarios diferentes, resultantes de la combinación de 2 tipos de partículas (derivador pasivo y Caligus rogercresseyi) y 2 modos de dispersión (*downstream* o "corriente abajo" y *upstream* o "corriente arriba"), para un total de 12 modelos de dispersión de partículas. En cada uno de los 12 modelos anuales de dispersión de partículas, éstas ingresan al modelo desde cada uno de los 36 centros de cultivo de Skyring a una tasa constante de 1 partícula a la hora, sumando un total de más de 11 millones de partículas. Las partículas se liberan a 1 metro de profundidad (pues las jaulas de cultivo se encuentran en la superficie) y si las partículas alcanzan la costa y dejan de moverse con las corrientes entonces se eliminan de los cálculos y dejan de contabilizarse.

## 3.1.8.1.1 Tipos de partículas

Debido al enfoque bio-sanitario de la conectividad se consideraron 2 tipos de partículas.

- <u>Derivadores</u>: partículas abióticas cuyas propiedades no varían en el tiempo y que son transportadas pasivamente por los campos de corrientes advectivo-difusivos. Dada su inmutabilidad su horizonte temporal, o el tiempo que permanecen en dispersión, debe ser impuesto arbitrariamente. En el modelo de dispersión de partículas el horizonte temporal para los derivadores ha sido de 30 días que, además, se corresponde aproximadamente con el tiempo de vida promedio para las condiciones ambientales promedio del seno Skyring de otros parásitos de la salmonicultura, como el virus ISA y la bacteria *Piscirickettsia salmonis*. Según Tapia et al. (2013) el virus ISA tiene una expectativa de vida de 29.9 días para una temperatura y salinidad de 10°C y 21.01 PSU, respectivamente, ambos valores muy cercanos a los promedios del seno Skyring. *Piscirickettsia salmonis* por su parte tiene una esperanza de vida de entre 21 y 28 días para temperaturas de entre 10°C y 5°C, respectivamente (Lannan y Fryer, 1994). Además, tanto el virus ISA, como *Piscirickettsia salmonis* se comportan como partículas pasivas en su dispersión pues carecen de movilidad más allá de la escala microscópica, lo que en ese sentido se corresponde con las características de los derivadores.
  - <u>Caligus rogercresseyi</u>: crustáceo copépodo parásito de la salmonicultura en Chile (Bravo, 2003). A continuación, se describen las principales características biológicas durante su vida libre planctónica, en que es dispersado por las corrientes marinas en busca de nuevo huésped y que pueden ser definidas y parametrizadas en modelos IBM (*individual based models*, Grimm et al., 2006) acoplados a modelos de dispersión de partículas. De esta manera las partículas caracterizadas como *Caligus rogercresseyi* pueden responder (según se describe en la literatura) en su comportamiento biológico a las condiciones ambientales del entorno del modelo hidrodinámico.

El ciclo de vida de *Caligus rogercresseyi* consta de 8 fases o estadíos de desarrollo (**Figura 11**), de los cuales 2 son planctónicos, es decir, de vida libre en suspensión/natación en la columna de agua: la fase nauplio y la fase copepodito, siendo esta última fase en la cual *Caligus rogercresseyi* puede infestar un nuevo huésped (González y Carvajal, 2003).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 11**: Fases planctónicas *Caligus rogercresseyi* "n1: first nauplius (0.43 mm long); n2: second nauplius (0.46 mm long); cop: copepodid (0.66 mm long); ch1: first chalimus I (0.83 mm long); ch2: second chalimus (1.27 mm long); ch3: third chalimus (2.15 mm long); ch4: fourth chalimus (3.15 mm long); ya: young adult which is not a different stage from adults (4.1 mm long); am: adult male (4.83 mm long); af: adult female with egg strings (4.79 mm long)" (figura extraída de González y Carvajal, 2003).

En *Caligus rogercresseyi* la duración de la maduración o paso de una fase larval a la siguiente es función de la temperatura. La maduración entre la fase nauplio y copepodito es dada por el modelo de la **Figura 12**.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Temperature (°C)	$y = a + b \ln x$		
	y=1/T (days <sup>-1</sup> )	T (days)	
4.2	0	0	
5	0.025	40.0	
6	0.05	20.0	
7	0.075	13.3	
8	0.09286	10.8	
9	0.10952	9.1	
10	0.12321	8.1	
11	0.13571	7.4	
12	0.14702	6.8	
13	0.15893	6.3	
14	0.16964	5.9	
15	0.17857	5.6	
16	0.18750	5.3	
17	0.19524	5.1	
17.5	0.20000	5.0	

**Figura 12.** Días que demora Caligus rogercresseyi para desde la fase nauplio a la fase copepodito "Predicted development time in days of larval stages to infection using the average temperature of water in (°C) and logarithmic model" (figura extraída de González y Carvajal, 2003).

Una vez alcanzado el estadío de copepodito, éste puede sobrevivir en la búsqueda de un nuevo huésped hasta 7 días más a una temperatura de 12.4°C (González y Carvajal, 2003; Bravo, 2010), que en el modelo IBM se produce a través de un proceso por el cual la temperatura se va acumulando como días-grado. Es decir, si la temperatura fuera constante e igual a 12.4°C, el copepodito sobreviviría 7 días, pues en esos 7 días ha acumulado su límite de 7 x 12.4 = 86.8 días-grado; pero si la temperatura (por ejemplo) fuera menor, digamos 10°C, entonces cada día se irían acumulando menos grados y, por tanto, el copepodito necesitaría más días (8.68 días) para alcanzar su límite de 86.8 días-grado. Por lo tanto, el horizonte de vida de *Caligus rogercresseyi* es variable y dependiente de la temperatura del agua.

La mortalidad, excluyendo la depredación, es función de la salinidad según describe Bravo et al. (2008) en 4 estaciones de la Patagonia Norte (**Figura 13**). En el modelo IBM la mortalidad por salinidad se introduce como una tasa horaria promedio de la mortalidad de las 4 estaciones y que va restando unidades a la carga o masa a cada partícula de manera que cuando tales carga o masa decaen por debajo de 1, la partícula se elimina de la simulación. En el modelo cada partícula posee una carga o masa de inicio, con el propósito de que cada partícula represente un número mayor de partículas sobre las que pueda actuar la mortalidad sin tener que introducir un número mayor de partículas al modelo con este objetivo. En el presente estudio de la conectividad de *Caligus rogercresseyi* entre unidades de producción salmonícola del seno Skyring la carga o masa con que parten de inicio cada partícula es de 100 unidades, valor que es igual entre todas las partículas (independientemente del centro de cultivo o barrio de origen) para equiparar su significancia estadística entre ellas y las conectividades que establezcan.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Salinity	Exposure time	Survival			
		Pto.Montt %	Ancud-Castro %	Quellón %	Hornopire %
	30 min	0	0	0	0
	1 hr	0	0	0	0
0 ‰	12 hrs	0	0	0	0
	18 hrs	0	0	0	0
	24 hrs	0	0	0	0
	30 min	50	50	85	80
	1 hr	45	45	65	80
5 ‰	12 hrs	30	0	5	40
	18 hrs	30	0	5	25
	24 hrs	30	0	0	15
	30 min	95	95	100	100
	1 hr	95	90	95	100
10 ‰	12 hrs	70	35	55	50
	18 hrs	70	25	35	50
	24 hrs	15	20	25	45
	30 min	95	100	100	100
	1 hrs	95	95	95	95
15 ‰	12 hrs	70	40	85	80
	18 hrs	65	30	50	80
	24 hrs	40	20	50	80
	30 min	100	100	100	95
	lhr	100	90	100	90
20 ‰ 30 ‰	12 hrs	80	70	100	85
	18 hrs	65	45	95	85
	24 hrs	65	40	95	80
	30 min	100	100	100	100
	1 hr	100	100	100	100
	12 hrs	100	100	100	100
	18 hrs	100	100	100	100
	24 hrs	100	100	100	100

**Figura 13**: Supervivencia/mortalidad de Caligus rogercresseyi en función de la salinidad "Caligus rogercresseyi survival at different salinity gradients in the four areas studied" (figura extraída de Bravo et al., 2008).

Si bien las partículas de *Caligus rogercresseyi* son transportadas libremente por las corrientes, también las propias partículas tienen la capacidad de poder moverse verticalmente arriba y abajo por la columna de agua. Los transportes verticales son muy importantes, y especialmente en sistemas que presentan diferentes circulaciones en diferentes profundidades. Si bien no hay descripción de migraciones verticales específicas para *Caligus rogercresseyi*, es bien conocida la capacidad natatoria vertical (ascenso/descenso a través de la columna de agua) de otros copépodos, como *Lepeophtheirus salmonis*, también parásito de la salmonicultura en el hemisferio norte. A pesar de las diferencias propias de cada especie, ambas son muy similares en cuanto a los factores que condicionan su dispersión (Burka et al., 2012). Así se ha caracterizado a

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

*Caligus rogercresseyi* análogamente a *Lepeophtheirus salmonis* en su capacidad natatoria y su respuesta a estímulos lumínicos y ciclos de día-noche (Heuch et al., 1995). La fase nauplio es fotosensible a partir 10^17 fotones y la fase copepodito a partir de 10^13 fotones (Flamarique et al., 2000), ascendiendo a la superficie de día mediante natación activa a 1.55 mm/s (Heuch & Karlsen, 1997) y descendiendo pasivamente hasta la picnoclina en la noche a 1 mm/s (Bricknell et al., 2000). El coeficiente para calcular la tasa de extinción de luz para mediciones de disco Secchi fue de 1.16 (French et al., 1982). Adicionalmente y en caso de encontrar salinidades inferiores a 27 PSU *Caligus rogercresseyi* desciende hasta capas donde la salinidad exceda este umbral para evitar altas mortalidades por periodos prolongados (Bricknell et al., 2000).

Por todo esto, la dispersión de las partículas de *Caligus rogercresseyi* está condicionada no sólo por los flujos advectivo-difusivos y propiedades físico-químicas que encuentra cada partícula en su trayectoria de deriva, sino que también por la radiación solar de onda corta (ciclos día-noche) y por la estratificación de la columna de agua y la profundidad a la que se encuentra la picnoclina (de ésta existir). Estos forzantes biológicos, radiación de onda corta y estratificación, son incluidos a través de los modelos IBM a través del modelo WRF y campos tridimensionales de temperatura y salinidad del modelo MIKE, respectivamente.

## 3.1.8.1.2 Modos de dispersión

*Downstream* y *upstream* son los dos modos en que puede aplicarse la dispersión de partículas. En *downstream* las corrientes (y los campos de flujo y propiedades físico-químicas) están en el mismo sentido espacio-temporal del modelo hidrodinámico o positivo. Sin embargo, en *upstream* el sentido espacio-temporal de las corrientes (y los campos de flujo y propiedades físico-químicas) está revertido. De esta manera, el modo *downstream* sirve para calcular hacia dónde van las partículas (y cómo cada área se conecta con todas las demás), mientras que *upstream* sirve para calcular de dónde vienen las partículas (y cómo cada área ha sido conectada por las demás), pues es tan importante saber cómo cada fuente emisora afecta a los demás sumideros (*downstream*), que cómo cada sumidero es afectado por las demás fuentes (*upstream*).

Las **Figura 14 y 15** ejemplifican cómo se calcula la conectividad del porcentaje de partículas en los modos de dispersión *downstream* y *upstream*.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 14. Ejemplo de conectividad del porcentaje partículas para una dispersión downstream.



Figura 15. Ejemplo de conectividad del porcentaje partículas para una dispersión upstream.

<sup>33</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

En el caso de *Caligus rogercresseyi* en la dispersión *downstream* sólo contabiliza la conectividad cuando las partículas están en la fase copepodito por ser ésta la única fase infestiva (cuando *Caligus rogercresseyi* puede atacar al huésped) y que, por tanto, tiene interés bajo un enfoque bio-sanitario de la conectividad. Sin embargo, en modo *upstream* se tiene en cuenta la conectividad de *Caligus rogercresseyi* durante todo momento (fases nauplio y copepodito) para tener en cuenta de donde procede este patógeno desde el primer instante en que entra en dispersión (fase nauplio).

## 3.1.8.2 Estadísticas de conectividad

La conectividad se calculó como el porcentaje de las partículas que llegan o pasan en algún momento de su trayectoria por cada centro de cultivo (sumidero) respecto del total de partículas que inician su trayectoria desde cada centro de cultivo dado (fuente). A lo largo de su trayectoria de deriva una misma partícula puede establecer conectividades con varios otros centros de cultivo, incluido el mismo centro fuente de inicio y origen de trayectorias, lo que llamaremos auto-conectividad. La auto-conectividad puede darse cuando tras el inicio en el primer paso de tiempo las partículas aún no han egresado del centro fuente (baja velocidad de la corriente) o cuando posteriormente al primer paso de tiempo las corrientes regresan a las partículas al área fuente de inicio (excursión mareal, *eddies*). El paso de tiempo con el que se computa la conectividad es cada 1 hora.

Para cada uno de los 12 modelos de dispersión de partículas de Skyring (2 tipos de partícula y 2 tipos de dispersión de cada uno de los 3 modelos hidrodinámicos anuales) y bajo el enfoque biosanitario anteriormente descrito se calculó la conectividad entre los 36 centros de cultivo de Skyring (Figura 16a), donde el área de cada centro es dada por un radio de 0.5 kilómetros alrededor del centro de cada centro de cultivo y un área de 0.8 km2 (promedio aproximado del área de los 36 centros de Skyring). Así, las matrices resultantes tienen 36 filas en el eje de ordenadas por cada uno de los 36 centros de cultivo fuentes que emiten partículas, y 37 columnas en el eje de abscisas por cada uno de los 36 centros de cultivo sumideros susceptibles de recibir partículas + 1 columna extra que recoge todas las demás conectividades establecidas en áreas donde no hay centros de cultivo o fuera de los 0.5 kilómetros alrededor de cada uno de dichos centros (lo que se muestra en los gráficos como "zona libre"). Estas zonas libres de centros de cultivo salmonícolas suponen el 98% de la superficie del seno Skyring (1554/1583 km2).

A partir de las matrices, que relacionan la conectividad entre los centros de cultivo de cada ACS, se calcularán posteriormente las conectividades entre ACS, agrupando las conectividades de los centros de cultivo según la ACS a la que pertenecen (Figura 16b), siendo esta última la conectividad entre ACS la medida en que se cuantificó la conectividad interanual en el seno Skyring pues reduce el número de elementos de la matriz (de 36x37 = 1332 a 4x5 = 20), permitiendo una mejor interpretación y evaluación de la conectividad (sin detrimento de la cobertura espacial). Con el fin de estimar la conectividad interanual se promediaron (por media aritmética) cada una de las matrices de conectividad entre ACS de cada año 2016, 2017 y 2018 para cada uno de los 4 escenarios de modelación (partículas tipo derivador y *Caligus rogercresseyi*, y dispersión *downstream* y *upstream*).

Finalmente, la variabilidad interanual de la conectividad en el seno Skyring se estima como la anomalía de la conectividad entre ACS de cada uno de los años 2016, 2017 y 2018 respecto del promedio del periodo total de estos 3 años para cada tipo de partícula y modo de dispersión.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 16. a) Centros de cultivo y ACS del seno Skyring. b) códigos centros de cultivo y ACS a la que pertenecen.

<sup>35</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

# **3.4 Objetivo específico 2.2.4** *Monitorear las condiciones oceanográficas en la columna de agua dentro del Mar interior de Chiloé y Aysén.*

Las mediciones hidrográficas se realizaron en 57 estaciones oceanográficas, que incluyen las zonas del fiordo Reloncaví, fiordo Comau, golfo de Ancud, golfo Corcovado (región de los Lagos). Además del fiordo Puyuhuapi, fiordo Aysén, canal Costa, estero Elefantes, fiordo Quitralco y Laguna San Rafael (región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo). En esta red de estaciones se dio especial énfasis de cobertura espacial al fiordo Quitralco, muestreando 17 estaciones oceanográficas (figura 17).

Para cumplir con este objetivo, se utilizó un CTD-OF de AML Oceanographic, modelo Metrec-XL. Este CTD-OF está equipado con sensores de temperatura, conductividad, presión, oxígeno disuelto y fluorescencia. La resolución temporal de captura de datos fue de 8 Hz. Es decir, tiene la capacidad de registrar 8 datos por segundo hasta una profundidad de 500 metros. Las características técnicas del equipo aparecen en la tabla VI.



**Figura 17**. (A y B) Mapa que muestra la posición de las 57 estaciones realizadas en el muestreo de CTDO y de agua (círculos rojos).

Los datos obtenidos del CTD-OF pasaron por un control de calidad, eliminándose los registros fuera de rango. Una vez cumplido esta etapa del proceso, se realizaron promedios cada 1 metro de todas las variables.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Simultáneamente a las mediciones de CTD-O se tomaron muestras de agua con botellas Niskin a profundidades estándar. Las muestras de agua de 1000 mL, fueron filtradas utilizando un filtro GF/F microfibra WHATMAN (diámetro filtro 47mm; 0.7 micras de tamaño de poro). El volumen de agua filtrada se utilizó para el análisis de nutrientes, reservando 450 ml de agua. Esta muestra fue almacenada y etiquetada en contenedor plástico y congelada a -20° C. El filtro fue congelado, etiquetado y almacenando en papel aluminio a -80° C, para análisis posterior de clorofila-a (Chl-a). Los análisis fueron realizados en el mismo laboratorio externo descrito en el objetivo 2.2.1

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022. **3.5 Objetivo específico 2.2.5** Caracterizar oceanográficamente las Agrupaciones de Concesiones de Salmónidos (ACS) mediante mapas temáticos montados en una plataforma de información geográfica.

Mediante los resultados obtenidos en este estudio, se obtendrá una caracterización ambiental preliminar a nivel de ACS (**figura 18**). La caracterización incluirá la descripción de las corrientes, batimetría, columna de agua en términos de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, entre otros.

Toda la información de estas caracterizaciones o descripciones por ACS serán mostrados de manera interactiva en el sistema de información oceanográfico 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 de la División de Investigación en Acuicultura de IFOP con asiento en Castro, Chiloé.



Figura 18. ACS localizadas dentro del seno Skyring.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

# 4. GESTIÓN DEL PROYECTO

# 4.1 Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA: 25/03/2021

- Fecha: 25 marzo de 2021.
  - Ubicación: Video conferencia,
- Participantes:
  - Susana Giglio Gabriel Soto Elías Pinilla
- SUBPESCA IFOP IFOP

Objetivo de la reunión: Detallar mediciones, señalar las principales problemáticas, como los relacionados con los flujos de agua dulce, se indican la incorporación de información biogeoquímica a las mediciones de la hidrodinámica y los registros con series de tiempo (oxígeno disuelto, conductividad y temperatura). Además, se indica a contraparte técnica que, producto de la situación sanitaria (COVID19), la unidad de oceanografía se encuentra todavía en modalidad de teletrabajo.

# 4.2 Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA: 12/05/2021

- Fecha:
- 12 mayo de 2021.
- Ubicación:
- Video conferencia,
- Participantes:
  - Susana Giglio Gabriel Soto Elías Pinilla
- SUBPESCA IFOP IFOP

Objetivo de la reunión: Debido a que la parte más significativa de este estudio es una continuación del estudio oceanográfico del periodo anterior 2020-2021, focalizado en la zona de Seno Skyring. El retraso se ha estimado en alrededor de 7 meses. Los atrasos que se generaron producto de la serie de restricciones sanitarias COVID19, en el desplazamiento desde y hacia la región de Magallanes 2020-2021, tuvieron repercusiones en la actividad de este estudio. No obstante, la reprogramación de las actividades, permitirá realizar los objetivos y su correcto desarrollo.

# 4.3 complicación en Contratación de la embarcación para realización de mediciones:

Para la realización de los cruceros oceanográficos de este estudio se realizó una licitación publica ID N°1049-26-LQ21, proceso que finalizó en septiembre de 2021. Producto de todos los retrasos

39

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

que se han generado, con las restricciones de ingreso a la región de Magallanes, por motivos sanitarios (COVID19). En esta licitación se incluyeron 2 campañas oceanográficas del periodo anterior en la zona de Skyring, debido a un cese de mutuo acuerdo con la embarcación contrada para esos fines. Esto ha significado una reprogramación para las mediciones de este estudio.

### 4.4 Realización de campañas oceanográficas

A la fecha del presente estudio ya se encuentran reprogramadas las diferentes campañas oceanográficas y se ha comenzado a acortar los tiempos de retrasos estimados preliminarmente en 4 meses. Para la zona de Skyring: marzo, mayo, julio de 2022. Para el caso de las campañas denominadas Patagonia norte, ya se realizaron las mediciones de primavera y verano, quedando pendiente solo la de otoño.

- 4.5 Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA grupo de Estación Patagonia, -Instituto de Geografía Pontificia Universidad Católica UC. Presentación estudio: "PRINCIPALES FUENTES DE AGUA DULCE QUE APORTAN AL SISTEMA DE MICRO CUENCAS DE LA REGIÓN DE MAGALLANES Y ANTÁRTICA CHILENA (ETAPA 1). LICITACIÓN ID 4728-29-LQ20," 15/09/2021
  - Fecha:
- 26 de agosto 2021.
- Ubicación:
- Video conferencia, meet google
- Participantes:

-Susana Giglio - SUBPESCA -Gabriel Soto - IFOP -Elías Pinilla - IFOP -Alejandro Salazar - UC -Francisca Flores - UC -Luca Mao- UC -Ricardo Carrillo - UC -Juan Pablo del Pedregal - UC -Joaquín Lobato - UC

Esta reunión fue organizada por la SSPA, para dar a conocer el estudio hidrológico que, mediante licitación pública, se adjudicó el grupo de la estación Patagonia (UC). En este estudio se determinarán los ciclos anuales de los principales flujos de agua dulce que descargan directamente dentro del se Skyring, junto con determinar diferentes propiedades físico-químicas de estos estos flujos. El principal objetivo de esta reunión, fue invitar al grupo de investigadores de oceanografía de IFOP (Putemún), para dar a conocer los detalles del estudio hidrológica que se ejecutara durante el 2021 y 2022. Durante el desarrollo de este estudio será generada información pertinente para el progreso del objetivo de balance de nutrientes.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

# 5. RESULTADOS

**5.1 Objetivo** Caracterizar la variabilidad interanual de las condiciones químico-biológicas (temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, biomasa fitoplanctónica) en seno Skyring.

## 5.1.1 Distribución vertical salinidad, temperatura y oxígeno disuelto

La conformación batimétrica y los límites topográficos que separan Seno Skyring de la influencia oceánica, se reflejan en las características hidrográficas presentes en el lugar. La salinidad de la columna de agua para todo el periodo de estudio, reveló que el agua al interior del Seno no supera el valor de 20 psu (figura 19), registrándose mínimos cercanos a ~17 psu en los primeros metros de la columna de agua. Conforme aumentó la profundidad, la salinidad presentó un leve incremento hasta alcanzar máximos de 19 psu a 100 m que se mantuvieron hacia el fondo. Mientras que a través de las constricciones batimétricas de los canales Gajardo (Oeste) y Canal Fitz Roy (Este), se observó que el agua oceánica ingresa débilmente con valores sobre los 24psu.

Por otra parte, la temperatura exhibió diferencias estacionales dentro del Seno, donde máximos cercanos a ~10°C se registraron en superficie durante el periodo de verano (figura 19). Estos valores fueron disminuyendo hasta alcanzar mínimos de 7° C a los 100 m que se prolongaron hacia el fondo de la columna de agua evidenciando una columna de agua estratificada. Durante el periodo de otoño la temperatura no presentó grandes diferencias espaciales, registrando una condición similar al periodo de verano que mostró estratificación de la columna de agua. Se observó un estrato de 0 a 100 m con valores del orden de los ~8°C y un estrato más profundo entre 100 m y el fondo con valores de 7°C. Mientras que, para el periodo de invierno, se registró mínimos superficiales de 5°C y máximos sub superficiales de 7°C que evidencian una inversión térmica característica de este periodo.

Para el oxígeno disuelto, se observó una columna de agua bien estratificada durante todo el periodo en estudio (figura 19). Valores máximos del orden de los ~8.5 ml/L se registraron en la capa superficial. Mientras debajo de esta capa, la concentración del oxígeno disuelto disminuyó a valores en torno a los 4.5-5 ml/L. Las menores concentraciones se encontraron bajo los 200 m en el sector de Estero Navarro con valores cercanos a los 3.5 ml /L.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 19:** Distribución vertical de las variables oceanográficas salinidad, temperatura y oxígeno disuelto en Seno Skyring, durante los meses de marzo, mayo y julio del 2022.

### 5.1.2 Distribución espacial de nutrientes.

La distribución espacial de los nutrientes en la capa superficial de la columna de agua reveló principalmente diferencias espaciales. En marzo, los nutrientes nitrato, fosfato y silicato expresaron las menores concentraciones promedio del periodo de estudio (nitrato 1.5  $\mu$ mol/L, fosfato 0.3  $\mu$ M y 4  $\mu$ M silicato), concentrándose en mayor proporción hacia el sector Oeste del Seno (canal Gajardo isla Escarpada) en relación al sector Este (isla escarpad – canal Fitz-Roy) donde se registraron menores concentraciones de nitrato y silicato (<0.5  $\mu$ M en nitrato y silicato). Cabe destacar un máximo de 12.5  $\mu$ M en la concentración del silicato en la cabecera de Estero Navarro (figura 20).

Durante el periodo de otoño, se observó un incremento en la concentración de los nutrientes en relación al periodo de verano (figura 20). Observándose concentraciones de nitrato (4  $\mu$ M), fosfato (0.5  $\mu$ M) y silicato (6  $\mu$ M), en el sector medio del Seno. Los canales Gajardo Y Fitz Roy que separan al Seno Skyring de la influencia oceánica, presentaron diferencias entre sí en la concentración de los nutrientes. Concentraciones mayores de nitrato y fosfato (3.5  $\mu$ M y 0.5  $\mu$ M respectivamente) se registraron hacia el Canal Fitz Roy, mientras que para el silicato se observó bajas concentraciones <2  $\mu$ M en ambos canales (figura 20).

Para el periodo de invierno, se registraron las mayores concentraciones promedio en los nutrientes en la capa superficial (figura 20). Valores máximos de nitrato y fosfato (>6  $\mu$ M y 0.7  $\mu$ M respectivamente) se registraron en los canales Gajardo y Fitz Roy en comparación al sector medio del Seno, donde se observó las menores concentraciones del periodo de otoño. Particularmente el silicato exhibió una concentración homogénea del orden de los 5  $\mu$ M en toda el área de estudio, a excepción del canal Fitz Roy que presentó un mínimo cercano a ~2.5  $\mu$ M (figura 20).

<sup>42</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 20:** Distribución espacial (horizontal) de la concentración promedio de los nutrientes nitrato, fosfato y silicato en la capa de 0 a 25 metros en Seno Skyring durante los meses de marzo, mayo y julio del 2022.

La distribución espacial promedio en la concentración de los nutrientes entre los 26 m y el fondo, exhibió una columna de agua con concentraciones más elevadas hacia el sector Oeste del Seno (figura 21). Durante el periodo de verano, los nutrientes se presentaron en bajas concentraciones en toda el área de estudio. Máximos cercanos a ~4 µM para nitrato, ~0.7 µM para fosfato y ~7.5 µM para silicato fueron registrados hacia el sector oeste de Seno Skyring, mientras que el sector Este presentó las menores concentraciones del periodo en estudio.

Hacia el periodo de otoño, se observó un incremento en la concentración de los nutrientes observado en el sector medio del Seno (Isla Escarpada). El nitrato exhibió concentraciones >5  $\mu$ M, el fosfato con concentraciones del orden de ~0.7  $\mu$ M y el silicato con concentraciones sobre los >6  $\mu$ M (figura 21).

Para el periodo de invierno se registró las mayores concentraciones promedio de los nutrientes entre los 26 m y el fondo (7  $\mu$ M nitrato, 0.7  $\mu$ M fosfato y 9  $\mu$ M silicato) (figura 21), focalizándose hacia el sector Oeste del Seno. Mientras que, en el sector Este del Seno se evidenció un bajo aporte de los nutrientes. Concentraciones máximas de 9  $\mu$ M en nitrato, 0.8  $\mu$ M en fosfato, y mínimas de 2.5  $\mu$ M en silicato se registraron en Canal Gajardo. Cabe destacar un máximo de silicato en el sector de Estero Navarro con concentraciones promedio del orden de 12.5  $\mu$ M.

<sup>43</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 21:** Distribución espacial (horizontal) de la concentración promedio de los nutrientes nitrato, fosfato y silicato en la capa de 26 metros a fondo en Seno Skyring durante los meses de marzo, mayo y julio del 2022.

La distribución de las concentraciones de los nutrientes en el fondo reveló zonas de máximas concentraciones como el sector medio - Oeste del Seno y zonas de nulo aporte como el sector Este del Seno en Canal Fitz Roy (figura 22). Durante el periodo de verano, se destacan concentraciones máximas en los niveles de nitrato, fosfato y silicato hacia la desembocadura del Rio Pérez en el sector medio del Seno (7.5  $\mu$ M nitrato, 1.5  $\mu$ M fosfato y 35  $\mu$ M silicato). Concentraciones mínimas cercanas a ~0  $\mu$ M se registraron en Canal Fitz Roy.

En otoño, los nutrientes se concentraron en mayor proporción en el sector medio del Seno, donde se registró máximos de 11  $\mu$ M en nitrato, 1.5  $\mu$ M en fosfato y 20  $\mu$ M en silicato entre la desembocadura del Río Pérez y Estero Navarro (figura 22). El aporte de nutrientes hacia el sector Este del Seno en Canal Fitz Roy, fue prácticamente nulo con concentraciones <1.5  $\mu$ M en nitrato, fosfato y silicato. Durante el periodo de invierno, se observó la mayor concentración de los nutrientes en el fondo. Concentraciones >12  $\mu$ M en nitrato, >1  $\mu$ M en fosfato y > 20  $\mu$ M en silicato se registraron entre las Islas Larga y Escarpada en el sector medio de Seno Skyring. Al igual que en los periodos anteriores, el aporte de nutrientes a través de Canal Fitz Roy fue prácticamente nulo con concentraciones <2  $\mu$ M en nitrato, fosfato y silicato (figura 22).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 22:** Distribución espacial (horizontal) de la concentración promedio de los nutrientes nitrato, fosfato y silicato en la capa de fondo en Seno Skyring durante los meses de marzo, mayo y julio del 2022.

#### 5.1.3 Variación temporal de los nutrientes (figura 23).

El nitrato en los primeros 50m, tiende a aumentar sostenidamente desde febrero 2021 hacia julio del 2022. Este patrón tiende a replicarse en la capa debajo de los 50m, exceptuando el periodo de febrero de 2021. El fosfato tiende a replicar un patrón similar al del nitrato, un aumento sostenido en la concentración media. La capa más profunda, tiende a replicar el esquema superficial. Los valores de silicatos fueron menores en febrero y noviembre de 2021. Aumentan en enero y marzo de 2022. En la capa mas profunda y hasta el fondo la concentración de silicato no registro grandes fluctuaciones y o diferencias mensuales. Manteniéndose entre rangos de 10-20  $\mu$ M.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 23**. Boxplot para comparar las concentraciones de nutrientes en la capa estratificada 0-50m (cajas rojas) y capa profunda 50m fondo (cajas azules).

### 5.1.4 zonificación clorofila

Los niveles de clorofila en marzo y mayo, registraron poca variabilidad espacial, no sobrepasando los 5 como también temporal, con valores medios de 3.1 mg m<sup>-2</sup> y 2.4 mg m<sup>-2</sup>, respectivamente, en contraste durante julio se observó una alta variabilidad espacial, destacando los peak de las estaciones 24-25 y 32. Además, los valores de clorofila en julio fueron en promedio más elevados (11.2 mg m<sup>-2</sup>) que los valores medios de marzo y mayo (figura 24)

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 24.** Zonificación de clorofila, panel superior promedio integrado (mg m<sup>-2</sup>), concentración clorofila. panel inferior estaciones clorofila, las áreas achuradas indican los máximos de clorofila

# 5.1.5 Series de tiempo de salinidad (psu), temperatura (°C) y oxígeno disuelto (ml/L) OD3 (canal Gajardo).

Línea de anclaje del sensor localizado al oeste dentro del canal Gajardo, contó solo con sensores localizados a fondo (profundidad aprox. 43m). La salinidad presentó una alta variabilidad temporal, entre un máximo absoluto de 20.52 psu registrado en junio, mientras que la mínima de salinidad se registró en julio 2022 con 17.77 psu. La variabilidad se observó con pulso aproximados de 15 días, los cuales se hacen más pronunciados entre mayo-julio. (figura 25a) La salinidad promedio durante el periodo de medición fue de 18.8 psu. En promedio la salinidad en los meses de invierno de 2021, fue ligeramente mayor que en invierno de 2022 en ~1 psu, en términos generales se aprecia que la

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

salinidad es menor es los meses estivales y mayor en época invernal (figura 25b). La temperatura, exhibió una marcada variabilidad estacional con los menores registros en primera e invierno (~6.5-7 °C y las máximas de temperatura ~(9°C) no se observaron diferencias entre los periodos del 2021 comparados con el 2022 (figura 25c y d). El oxígeno disuelto exhibió una alta fluctuación con un máximo absoluto en febrero 7.52 ml/L, mientras que el mínimo absoluto se registró en abril con 5.96 ml/L. la concentración promedio fue de 6.77 ml/L, la alta fluctuación estuvo, determinada por pulsos quincenales Figura 24 e). Se observó que, entre febrero y hasta diciembre (2021) la concentración de oxígeno disuelto, en promedio fue >7ml/L a partir de enero hasta mayo la concentración media disminuye en aproximadamente 1 ml/L (figura 25f). En términos generales las altas concentraciones de oxígeno disuelto estuvieron asociadas a una disminución de la salinidad.



**Figura 25**. Panel izquierdo Series de tiempo de la salinidad, temperatura y oxígeno disuelto anclaje (OD2). Panel derecho promedio mensual de los parámetros salinidad, temperatura y oxígeno disuelto.

# 5.1.6 Series de tiempo de salinidad (psu), temperatura (°C) y oxígeno disuelto (ml/L). anclajes A1 (boca canal Gajardo).

En este anclaje tuvo datos de salinidad solo a 100m. la salinidad oscilo entre un mino de 19.36 en febrero y una máximo de 19.59 psu con una salinidad promedio, esto indicó una baja variabilidad. No obstante, una marcada señal estacional con menores valores en los meses de febrero-abril, años 2021 y 2022 respectivamente y los máximos valores correspondieron a los meses más invernales junio-julio (figura 26 b)

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 26. a) Serie tiempo salinidad, b) promedio mensual de salinidad desde febrero de 201 hasta julio de 2022.

La temperatura más superficial la serie de 30m osciló entre un mínimo de 5.9°C (julio 202) y un máximo de 9.8°C registrado el 8 de marzo 2022. la temperatura media de esta profundidad fue 8.5°C. se observó, además, una marcada señal estacional con los máximos registros térmicos entre los meses de febrero-abril, mientras que la temperatura promedio fue menor en los meses de junio-julio Figura 27b. la serie de 100m, varió entre un mínimo absoluto de 6.1°C en noviembre (2021) y un máximo térmico de 7.9°C observado en junio (2022). La temperatura media 6.7°C. Esta serie presento una alta fluctuación entre abril-julio. Con marcados peak en mayo y junio. Esta serie no presento diferencias interanuales marcadas (figura 27c). la serie de 200m, estuvo caracterizada por una baja variabilidad oscilando entre 6.2-6.5°C, con una temperatura media de 6.2°C. no se observaron marcadas diferencias intra-anuales.



Figura 27. a) Serie tiempo salinidad, b) promedio mensual de salinidad.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

En la serie de tiempo más superficial (30m) la concentración de oxígeno vario entre un mínimo absoluto de 6.03 ml/L registrado el 10 de marzo 2022 y una concentración máxima de 7.3 ml/L en noviembre (2021). La concentración media de OD fue de 6.6 ml/L. esta serie no registró una gran oscilación en la concentración. Se observaron algunas diferencias interanuales, en la concentración de marzo-mayo 0.5 ml/L mayor en 2021 que 2022. La serie de oxígeno de 100 m, registró mayor variabilidad con rangos mínimos entre 4.6 ml/L registrados en marzo de 2022y máximos de 4.7 ml/L observados en diciembre de 2021, la concentración media fue de 5.4 ml/L. la serie de 150, registro una baja variabilidad entre noviembre y mayo 2022, en junio y julio se registró una alta variabilidad, en termino estacionales se observa una tendencia de los niveles de oxígeno a decrecer. Desde noviembre 2021 hacia julio de 2022. Se observó diferencias inter-anuales marcadas (figura 28d).



**Figura 28**. Panel izquierdo serie tiempo de oxígeno disuelto a diferentes profundidades. Panel derecho media mensual de la concentración de oxígeno desde febrero 2021 hasta julio de 2022.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

# 5.1.7 Series de tiempo de salinidad (psu), temperatura (°C) y oxígeno disuelto (ml/L). anclajes A2

La salinidad en el anclaje 2, en la capa superficial (30m), registró una baja una variabilidad temporal, oscilando entre mínimo entre un mínimo 17.71 y una máximo de 18.27 psu, con una salinidad media de 17.98. Sólo se observaron 2 peak importantes a finales de mayo y finales de junio (figura 29a). la salinidad media no exhibió diferencias interanuales significativas. El sensor ubicado a 100, registró una menor variabilidad temporal que el sensor de superficie, con un valor mínimo de 19.60 y un máximo de 19.33, por lo que se puede inferir que la salinidad es estable en esta capa. Tampoco se observaron variaciones inter-anuales (figura 29c).



**Figura 29**. Panel izquierdo serie tiempo de salinidad a diferentes profundidades. Panel derecho media mensual de la salinidad desde febrero 2021 hasta julio de 2022.

La temperatura superficial, vario entre un mínimo de 6.54°C y un máximo de 10.17 se observó una marcada señal estacional con los máximos valores en febrero y marzo (~10°C). y menores valores en primavera (noviembre) e invierno (junio-julio). La temperatura media en esta capa fue de 8.73°C. no se observó una variación inter-anual. Lo sensores de 100 y 150m, registraron una baja variabilidad temporal con medias de 6.42 y 6.15 °C, respectivamente. La temperatura tiende a aumentar discretamente desde noviembre del 201 hacia julio de 2022 (figura 30 c y d).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 30**. Panel izquierdo serie tiempo de temperatura a diferentes profundidades. Panel derecho media mensual de la temperatura desde febrero 2021 hasta julio de 2022.

El oxígeno disuelto, en el sensor superficial, oscilo entre un mínimo absoluto (5.93 ml/L) registrado en (abril 2022) y una concentración máxima de 6.78 observada a finales de mayo 2022. La concentración media de esta serie fue de 6.32 ml/L. entre noviembre y abril 2022, la serie no registro una marcada variabilidad, a partir de mayo y hasta julio la serie, registro una mayor variabilidad. Se observó también una marcada señal estacional los mínimos valores de oxígeno (figura 31a), se observaron entre los meses más cálidos enero-marzo, la concentración fue mayor en primavera (noviembre) ye invierno (junio-julio). Se observó que la concentración media mensual fue ligeramente mayor en verano de 2021 (0.4ml/L). figura 31b. la serie de 100m, registro una marcada fluctuación con periodos quincenales, no obstante, la variación de la serie completa fue relativamente baja, mínimo de 4.01 y máximos de 4.57 ml/L. la concentración media mensual fue ligeramente mayor (0.6ml/L) entre febrero-diciembre 2021, que en periodo de 2022 enero-julio). La serie de 150, no presento una variación temporal, oscilando entre un mínimo de 3.61 y un máximo de 3.88 ml/L.

<sup>52</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 31**. Panel izquierdo serie tiempo de oxígeno disuelto a diferentes profundidades. Panel derecho media mensual del oxígeno disuelto desde febrero 2021 hasta julio de 2022.

# 5.1.8 Series de tiempo de salinidad (psu), temperatura (°C) y oxígeno disuelto (ml/L). anclaje OD3

La salinidad de este sensor registro la mayor variabilidad dentro del sistema, con rangos entre un mínimo absoluto de 17.34 registrado en abril 2022 y un valor máximo de 26.51 observado a principios de junio, la salinidad media fue de 19.89 psu. La fluctuación tuvo ciclos aproximados de 15 días. La salinidad media no presentó un patrón definido, como tampoco se observó una variabilidad inter-anual (figura 32b).

La temperatura osciló entre un mínimo de 4.1 °C registrado en julio, en contras el máximos registro térmico se presentó en enero de 2022. La temperatura media fue de 8.8 °C. no registró una alta variabilidad temporal, sí se observó una marcada señal estacional, con altos valores en periodo estival y un descrecimiento hacia los meses invernales. No se observó una marcada variación interanual.

El oxigeno disuelto varios entre una concentración mínima de 6.43 ml/L (febrero 2022) y una máximo de 10.43 ml/L observado en julio, al igual que la temperatura, no se observó una alta variabilidad temporal, pero si una marcada señal estacional (figura 32e), los valores mínimos se observaron en los mese más cálidos, mientras que la concentración tiende a levarse hacia la época invernal (junio-julio). Se registró una marcada variación inter-anual, los niveles de oxígeno en promedio aumentan

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

sostenidamente desde el 2021 (febrero), hacia el 2022 (julio, figura 32f)). Es importante señalar que 2 de las bajas más significativas en los valores de oxigeno disuelto, fueron coincidentes con 2 peak importantes de salinidad, en periodo estival, diciembre y febrero respectivamente.



**Figura 32**. Panel izquierdo serie tiempo de salinidad, temperatura y oxigeno disuelto. Panel derecho media mensual de tiempo de salinidad, temperatura y oxígeno disuelto desde febrero 2021 hasta julio de 2022.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

# **5.2 Objetivo** Realizar un balance de nutrientes a través de un modelo semi-empírico, identificando las principales fuentes naturales que aportan nutrientes dentro del sistema.

Para la configuración del modelo, el sistema denominado seno Skyring (SSK), dado que se encuentra conectado al este por el canal Fitz-Roy y al oeste por el canal Gajardo, es importante señalar que por la complejidad del sistema SSK y las limitaciones del modelo LOICZ, se utilizó como conexión del SSK y la zona externa, el seno Otway, para los valores de ingreso al sistema, tal como intercambio de salinidad y trasporte de nutrientes (DIN y DIP). utilizando para estos efectos los datos del crucero CIMAR FIORDO 16 (octubre 2010). Los datos considerados para el balance de nutrientes en SSK, correspondieron a los cruceros realizados por IFOP en el 2022 (enero, mayo y julio). De esta forma se realizó un balance promedio anual, la capa superficial se localizó entre 0-45 metros, estuvo denotada por la isohalina de 18 psu. Debajo de esta capa se consideró la capa profunda 46-148m Figura 33. En el caso del sistema que conecta (seno Otway), la estratificación promedio se observó en ~28m, denotado por la isohalina de 28 psu.



**Figura 33**. Distribución vertical de la salinidad en el sistema seno Skyring y seno Otway. Resumen promedio de los valores promedio anual: salinidad y nutrientes para la capa superficial y capa profunda de ambos sistemas.

Ingreso de agua dulce: flujo promedio por descarga de agua dulce proveniente de ríos fue de 178 m3/s. la cantidad de agua dulce proveniente de la lluvia fue de 6.3 mm/día. Es importante señalar que los datos fueron obtenidos de la estación meteorológica instalada en fiordo Navarro, por el grupo de hidrología de la Pontificia Universidad Católica, en el marco del estudio hidrológico (ID 4728-29-LQ20, 2020-40-DAC-10). Al hacer una comparación estandarizada de los flujos, se obtiene que la relación rio: lluvia ≈1.6.

Carga de nutrientes: el promedio de carga de foso foro y nitrógeno promedio para los ríos que descarga dentro de seno Skyring fue de 0.051 mg/L y de fósforo fue de 0.014 mg/L. para el ingreso

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

pro aporte de lluvia se utilizaron los valores descritos por Prado *et al.*, (2008), considerando solo la fracción nitrogenado, bajo la forma de amonio, con un promedio anual de 0.096 mg/L.

## Balance de nutrientes en sistema Seno Skyring (SSK)

# a) Balance de nutrientes para el flujo de Fosforo (ΔDIP).

La modelación para el flujo de fósforo en un ciclo anual promedio, en la capa superior (sobre la picnoclina 45m), evidenció un flujo de ingreso proveniente de la descarga de agua dulce de 211 kg d<sup>-1</sup>. El principal flujo de salida en esta capa está asociado a la capa estuarina (1871 kg d<sup>-1</sup>). El principal ingreso de fósforo en esta capa estaría siendo aportado el flujo difusivo proveniente de la capa más profunda con un aporte de 7880, lo que contrasta por le in ingreso del flujo turbulento (2303 kg d<sup>-1</sup>). Es importante señalar que en esta capa prevaleció el metabolismo de los autótrofos, valores positivo s del metabolismo neto del sistema (NEM). La capa superficial tiende a comportarse como un reservorio de fósforo (valores negativos en el flujo).

En la capa más profunda, debajo de la picnoclina (46m), el principal aporte de fósforo, estuvo determinado por flujo advectivo, proveniente de la zona adyacente específicamente del seno Otway. El flujo neto en esta capa indicó un comportamiento de "exportador ", determinado por valores positivos en el flujo de fósforo ( $\Delta$ DIP), el metabolismo neto del sistema estuvo dominado por los organismos heterótrofos (prevalencia de la respiración).

Al integrar el sistema en su totalidad el balance de fosforo para un ciclo anual promedio, considerando estado estacionario, reveló que la principal fuente de nutrientes que ingresan al fiordo, es el flujo advectivo de la zona adyacente (seno Otway), el aporte fluvial es menos significativo, por otra parte, la principal salida de nutrientes, se produce por el flujo estuarino. Esto genera un desbalance final, donde una parte importante de fósforo son retenidos dentro del sistema, con un promedio de 2616 (kg d<sup>-1</sup>).



**Figura 34**. Esquema simplificado para el flujo de fósforo en un ciclo anual promedio; sistema estratificado: (panel izquierdo) sistema integrado panel derecho.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

## Balance de nutrientes para el flujo de Nitrógeno (ΔDIN)

Dentro de la capa superficial, el flujo de nitrógeno modelado, estuvo caracterizado por un flujo de ingreso (de mayor a menos) por difusión: con 39861 kg d<sup>-1</sup>, en segundo lugar, de ingreso de nitrógeno fue por flujo turbulento con 12154 kg d<sup>-1</sup>, la lluvia y el ingreso por ríos fueron de menor magnitud con 915 y 785 kg d<sup>-1</sup>, El proceso dominante en la capa superficial correspondería a la desnitrificación. Al igual que el fosforo, la capa superficial se estaría comportando como un reservorio de nitrógeno (valores negativos en el flujo).

En la capa profunda, debajo de la picnoclina, el principal flujo de nitrógeno se produce por advección desde la zona adyacente (seno Otway), con un traspaso promedio de 29507 (kg d<sup>-1</sup>). Esta capa tiende a comportarse como un exportador neto de nitrógeno y a diferencia de la capa superior el proceso que predomina seria la fijación.

Integrando el sistema en su conjunto, dentro del seno skyring, se produce un desbalance de nitrógeno, ya que el sistema se comporta como un exportador neto de nitrógeno (valores del flujo negativo), reteniendo en el interior del sistema, un promedio de -13366 (kg d<sup>-1</sup>), el proceso que predomina dentro del sistema es la fijación.



**Figura 35**. Esquema simplificado para el flujo de nitrógeno en un ciclo anual promedio; sistema estratificado: (panel izquierdo) sistema integrado panel derecho.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

**5.3 Objetivo 2.2.3.** Estimar la circulación y conectividad hidrodinámica en una escala interanual a través de modelación numérica en seno Skyring.

A continuación, se presenta una caracterización con las mediciones realizadas durante 2021 y 2022 en Seno Skyring para proseguir con los resultados del modelo hidrodinámico.

## 4.1.1 Mediciones

## Marea

La onda de marea ingresa al sistema Skyring por canal Gajardo y por canal Fitzroy, en ambos canales existen constricciones que alcanzan los 10 m (Fitzroy) < 5 m (canal Gajardo, en algunos sectores alcanza la superficie), los mareógrafos se desplegaron (Figura 36.a) al norte de de la constricción en Gajardo y en la entrada y salida de Fitzroy (la constricción en este canal es en el centro) y dentro de Skyring; en el sector de Ventisquero. De acuerdo al análisis Armónico y el coeficiente de Courtier "*F*" (Figura 36.b) el régimen de marea es semidiurno mixto (*F* = 0.61) al ingresar por el sur al canal Fitzroy con una amplitud de 0.50 m, para el constituyente M<sub>2</sub> (Figura 36.d), luego de la constricción, en Fitzroy norte el régimen de marea es diurno mixto (*F* = 1.85) con amplitud de 0.08 m, para el constituyente M<sub>2</sub>. En el sector de Ventisquero (Figura 36.a) el régimen de marea es semidiurno mixto (*F* = 1.44) con amplitud de 0.02 m, para el constituyente M<sub>2</sub>, en el Canal Gajardo posterior a la constricción el régimen de marea es diurno mixto (*F* = 1.69) con amplitud de 0.02 m, para el constituyente M<sub>2</sub>. El análisis espectral del nivel del mar (Figura 36.c) indicó alta varianza explicada por la señal diurna y semidiurna de la marea, además la varianza explicada por la señal diurna y semidiurna de la marea, además la varianza explicada por la señal diurna y la constricciones. Comparativamente la energía de marea que ingresó por canal Gajardo es menor a la que ingresó por Canal Fitzroy.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 36.** Mareógrafos seno Skyring. a) mapa ubicación de mareógrafos, b) Tabla de coeficiente de Courtier "*F*", c) espectro de mareógrafos, d) Espectro de Amplitud de marea de mareógrafos de Fitzroy sur (rojo), Fitzroy norte (negro), Ventisquero (gris) y canal Gajardo (azul).

# **Condiciones Meteorológicas**

Las condiciones meteorológicas están dominadas por patrones regionales, en la **Figura 37** se observó que el viento del oeste dominó a lo largo del año. En verano dominó viento del oeste de alta velocidad (> 10m/s) con recurrentes eventos de velocidad > 20 m/s, en otoño dominó viento del oeste y noroeste disminuyendo la velocidad comparativamente con verano, también se registraron vientos desde el noreste de baja velocidad (< 6 m/s), en invierno dominó viento del noroeste de baja velocidad (< 10 m/s), pero se registraron eventos esporádicos de alta velocidad (>10 m/s), en primavera dominó viento del oeste y noroeste de alta velocidad (< 10 m/s). El espectro de la velocidad del viento (**Figura 38**) indicó que la mayor energía espectral se concentró en la componente oeste-este del viento con un máximo significativo en la alta frecuencia a las 24 horas

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

correspondiente al periodo diurno, también se observó un máximo dentro de la banda sinóptica; en 8 días.

En la Figura 39 se observó el promedio anual de la temperatura atmosférica y la radiación, componentes relevantes en estas latitudes por la inferencia en la precipitación líguida y sólida que ingresa a la zona, y la relación con en el régimen e ingreso de agua dulce al sistema, en Seno Skyring los aportes de agua dulce son de origen glaciar. La Figura 39.a se observó el promedio anual de la temperatura atmosférica, donde la máxima temperatura se alcanzó en los meses de primavera/verano, en promedio las mayores temperaturas son en diciembre a febrero (11°C), en enero se registraron máximas de 24 °C, durante otoño e invierno la temperatura disminuyó con un promedio de 5 a 8 °C, registrando mínimas en julio, con un promedio de 2°C, la mínima temperatura registrada en julio (2022) alcanzó -11.29 °C. Durante períodos prolongados de temperaturas bajo cero combinado con las bajas salinidades presentes en Skyring elevan el punto de fusión del agua de mar y favorece la formación de hielo marino en fiordos, como se registró en julio del 2022; entre el 3 y 16 de julio se registraron temperaturas negativas, con una mínima de -11.29 °C y en contexto de crucero oceanográfico se registró hielo marino el día 8 de julio en fiordo Navarro, en el mismo periodo se constató ríos congelados y precipitación sólida. En la Figura 39.b se observa el promedio anual de la radiación, esta es máxima en primavera/verano (octubre a marzo), con valores máximos alcanzados en noviembre y diciembre (2500 uE) y mínimas en invierno. Este ciclo anual se relaciona con los mayores ingresos de agua dulce al sistema por derretimiento de hielo.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 37: Dirección y velocidad del viento. Rosa de vientos. Verano, otoño, invierno y primavera.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 38:** Espectro de la velocidad del viento. Panel izquierdo: espectro de la componente norte - sur del viento. Panel derecho: espectro de la componente oeste - este del viento.



**Figura 39:** Temperatura y radiación mensual. a) temperatura atmosférica mensual y desviación estándar (puntos azules; mínima mensual, puntos rojos; máxima mensual), b) radiación mensual y desviación estándar (puntos azules; mínima mensual, puntos rojos; máxima mensual).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.
# Corriente

La corriente medida en la salida norte de Canal Gajardo mostró que la corriente residual (Figura 40) se alinea con el canal en un 81%, por lo tanto, la mayor variabilidad es explicada por la componente u, con tendencia a la elipticidad y velocidades que alcanzan los 25 cm/s. La serie de tiempo de la corriente residual (Figura 40.a y 40.b), muestra la serie por componente, la componente v presentó bajas velocidades (< 10 cm/s), mientras que la componente u concentró las mayores velocidades, alcanzando los 25 cm/s. El perfil vertical promedio de la corriente a lo largo del canal (Figura 40.e) mostró que tiene una estructura de dos capas; la capa superficial (ADCP: 7 m - 45 m) sale del canal (valores negativos, hacia fuera), la segunda capa (ADCP: > 45 m - 80 m) ingresa al canal (valores positivos), mientras que el perfil promedio a lo ancho del canal, presentó dos capas con velocidades cercanas a cero. El análisis de EOF vertical de la corriente residual (Figura 40.c y 40.d) mostró que el modo 1 y modo 2 explico el 84% de la variabilidad total en ambas componentes, el EOF-u (Figura 40.d) presentó una estructura de dos capas para el modo 1 y 2; el modo 1 explicó el 47% del total de la variabilidad y el modo 2 explico 37% de la variabilidad. El modo 1 del EOF-u presentó una dirección al oeste entre los 7 m y 60 m de profundidad con una mayor amplitud entre los 20 m a 30 m, bajo los 60 m presentó una dirección al este del canal con una baja amplitud comparativamente. El modo 2 del EOF-u presentó una mayor amplitud en la capa superficial con dirección al oeste del canal (7 m a 25 m) que disminuye con la profundidad, la capa subsuperficial (> 25 m a 80 m) tiene dirección al este con una amplitud que disminuye con la profundidad. El EOF-v (Figura 40.c) presentó una estructura de dos capas para el modo 1 y 2; el modo 1 explicó el 31% del total de la variabilidad y el modo 2 explicó 25% de la variabilidad. El análisis espectral de la corriente (Figura 40.f y 40.g) indicó que la corriente u (a lo largo del canal) concentra mayor densidad espectral que la componente v, la variabilidad explicada semidiurna de la marea no es significativa en el canal Gajardo, la variabilidad explicada por la banda diurna alcanza un máximo significativo pero es baja. La variabilidad de baja frecuencia, específicamente en la banda sinóptica destacan alta varianza en 8, 5 y 2 días.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 40:** Corriente residual Canal Gajardo (noviembre 2021 a julio 2022). a) corriente residual componente v, b) corriente residual en la componente u, c) eof de la componente v de la corriente residual, d) eof de la componente u de la corriente residual, e) corriente promedio para componente u y v, f) espectro de la componente v de la corriente, g) espectro de la componente u de la corriente.

La corriente residual medida cercana a isla Escarpada (Figura 41) mostró una dispersión que tiende a una dispersión orbital donde los ejes de máxima y mínima varianza explicaron el 55% y 44% de la variabilidad de la corriente respectivamente, la máxima velocidad que alcanzó la corriente es de 20 cm/s. La serie de tiempo de la corriente residual (Figura 41.a y 41.b) en ambas componentes mostró periodos en donde hay un aumento de velocidad a media agua, sin embargo, la velocidad promedio es entre 1 cm/s y 2 cm/s. El perfil de la corriente residual promedio (Figura 41.e) mostró un perfil de tres capas para la componente v; capa superficial (13.4 m - 21.4 m) la corriente fue al norte, la capa subsuperficial (25.4 m - 45.4 m) la dirección en promedio fue al sur, bajo los 45 m presentó dirección hacia el norte, el perfil promedio de la componente u presentó dos capas; superficial (13.4 m - 33.4 m) hacia oeste y subsuperficial (37.4 m - 100 m) la corriente presentó dirección al este y alcanzó una máxima velocidad (1.5 cm/s) a los 45.4 m disminuyendo con la profundidad. El análisis de EOF vertical de la corriente residual (Figura 41.c y 41.d) indicó que el modo 1 explicó el 46% de la variabilidad total en ambas componentes, el modo 2 explicó el 15% en la componente v y el 26% de la variabilidad total en la componente u, la amplitud de los modos fue baja (< 0.5), en la componente v ambos modos presentaron una estructura de 3 capas y el EOF de la componente u mostró una estructura de 1 capa (modo 1) y de 2 capas (modo 2). El análisis espectral de la corriente (**Figura 41.f y 41.g**) mostró que en ambas componentes no existe una señal significativa ni tampoco un máximo en las bandas diurna y semidiurna, la mayor energía espectral se observó en la componente u en la banda sinóptica con un máximo en los 8 días.



**Figura 41:** Corriente residual Escarpada (noviembre 2021 a junio 2022). a) corriente residual componente v, b) corriente residual en la componente u, c) eof de la componente v de la corriente residual, d) eof de la componente u de la corriente residual, e) corriente promedio para componente u y v, f) espectro de la componente v de la corriente, g) espectro de la componente u de la corriente.

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

### 4.1.2 Caracterización atmosférica: modelo WRF

El viento simulado por WRF entre 2015 y 2017 revela un patrón estacional con un marcado componente de viento que sopla desde el oeste y que se mantiene durante todo el año especialmente en el sector oriental del seno Skyring, donde se observa además un núcleo de máxima intensidad (**Figura 42**). Hacia el oeste se exhibe una mayor variabilidad espacial y vientos locales más intensos, posiblemente influenciado por un efecto topográfico. La intensidad del viento

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

es mayor durante la primavera (SON) y se debilita hacia los meses de otoño (MAM). La **Figura43** muestra el ciclo anual de la magnitud del viento en tres posiciones a lo largo del seno Skyring (**ver Figura 2**), durante el año generalmente la mayor intensidad ocurre en los extremos del seno y la menor en la zona central. Los máximos se alcanzan durante noviembre con una intensidad media de casi 10 m s<sup>-1</sup> al este y por debajo de 9 m s<sup>-1</sup> hacia el oeste. En estas tres posiciones los vientos se debilitan alcanzando el mínimo en los meses de abril y mayo con magnitudes por debajo de los 7 m s<sup>-1</sup>.



**Figura 42.** Campos de magnitud (colores) y dirección (flechas) del viento estacional en seno Skyring modelados por WRF entre 2015-2017.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 43.** Ciclo anual de la magnitud del viento en tres posiciones a lo largo del seno Skyring (este, centro y oeste). Data modelada por WRF entre 2015-2017.

Este patrón de viento también se evidencia en las observaciones registradas durante el 2021 (**Figura 44**). La estación meteorológica revela el patrón estacional con una componente que sopla principalmente desde el oeste, acompañado de una señal de viento del este, importante durante el invierno y que no está presente en la modelación. Esta señal podría representar una anomalía de aquel invierno o estar condicionada por la ubicación geográfica en la que está instalada la estación meteorológica, lo cual limitaría su simulación debido a una resolución espacial demasiado gruesa (**Figura 44b**). El producto CCMP revela un patrón similar durante 2021, una marcada componente que sopla desde el oeste y que se mantiene por todo el periodo con una mayor presencia de vientos noroeste hacia invierno y primavera (**Figura 44c**).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Por su parte, la magnitud del viento simulado se correlaciona de buena manera con los campos de viento del producto CCMP, se pueden observar valores sobre 0.8 en todo el dominio salvo en el sector de estero Riquelme al sur del seno, donde el coeficiente de correlación alcanza un valor de 0.5 (**Figura 45a**). WRF tiende a sobrestimar levemente la intensidad del viento con respecto a CCMP, se observa un error en la magnitud menor a 2 m/s en casi todo el dominio, a excepción de algunas zonas de mayor altitud donde el error puede llegar en torno a 4 m/s (**Figura 45b**). Cabe destacar que al ser CCMP un producto satelital este puede conllevar a una incertidumbre en la intensidad de la señal en zonas donde el viento depende de condiciones meteorológicas locales, existe una topografía compleja y una alta presencia de nubosidad.



**Figura 44.** Rosas de viento para los periodos de otoño (MAM), invierno (JJA) y primavera (SO). a) Modelo WRF entre 2015-2017, b) estación meteorológica y c) producto CCMP para 2021.



**Figura 45. a)** Mapas de correlación y **b)** raíz del error cuadrático medio (RMSE) entre los campos de magnitud de viento mensual WRF y CCMP para el periodo 2015-2017.

#### 4.1.3 Caracterización hidrológica: modelo VIC

La Patagonia Chilena presenta una gran cantidad de fuentes de agua dulce que desembocan en los mares interiores, canales y fiordos, cambiando las condiciones del sistema. Debido a este gran número la red hidrográfica resulta bastante compleja de estimar, sin embargo, los caudales simulados por el modelo hidrológico VIC se ajustan de buena manera a las observaciones. Por lo general se obtienen correlaciones significativas por sobre 0.7 en casi todas las estaciones fluviométricas, incluido en río Pérez ubicado dentro del dominio seno Skyring (Figura 46a). El modelo es capaz de reproducir la estacionalidad de los caudales, estimando los máximos tanto en verano (DEF) y primavera (SON), como los mínimos en invierno (JJA) (Figura 46b). Lo que

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



demuestra la habilidad del modelo hidrológico de reproducir de manera adecuada la variabilidad de los caudales en la región.

**Figura 46. a)** Caudal mensual y **b)** ciclo anual entre los ríos con observaciones de la DGA y los estimados por la herramienta FLOW-CHONOS, en la región de Magallanes.

Los resultados de las simulaciones en seno Skyring muestran que en términos generales el sistema recibe un relativamente escaso aporte fluvial. La cantidad de agua dulce que ingresa al sistema alcanza valores bajos en comparación a las principales cuencas y ríos de la Patagonia.

La variabilidad interanual presente en la señal acumulada muestra una tendencia positiva en los caudales de 0.52 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>, la cual resulta ser significativa con una confianza del 95% según un

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

test de Mann-Kendall. La señal interanual muestra una variabilidad con una desviación estándar de 14 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, con un máximo de descarga durante el año 2014 con un caudal por sobre los 160 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y mínimos ocurridos durante los años 1992, 2002 y 2016 por debajo de los 120 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> (**Figura 47a**). Las principales descargas de agua dulce en el sistema se evidencian mayoritariamente hacia el sector occidental del seno Skyring (**Figura 47c**), donde destacan máximos caudales en las cuencas que desembocan en estero Navarro y estero de Los Ventisqueros con caudales medios de 25 y 15 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> respectivamente. En segundo orden la zona central presenta 3 cuencas con aportes de agua dulce significativos, ubicadas al norte del seno Skyring las cuales acumulan una descarga media de 27 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> aproximadamente. Por su parte, la región oriental del seno hacia el canal Fitz Roy no presenta descargas significativas en el sistema (**Figura 47c**).



**Figura 47.** a) Variabilidad interanual de la suma de aportes de agua dulce sobre el seno Skyring. b) Ciclo anual del caudal acumulado. c) Caudal promedio de las principales cuencas de seno Skyring, caudales simulados entre 1980-2018 por el modelo hidrológico VIC.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Los aportes de agua dulce en seno Skyring muestran un marcado ciclo anual con máximos que se prolongan desde noviembre hasta marzo de ~175 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, y mínimos durante la época de invierno que llegan a ~75 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> durante julio (**Figura 47b**). Este régimen estacional, con dos máximos anuales, se asocia a una diferencia del forzante que induce la descarga de los caudales en el seno. La diferencia estacional entre verano (DEF) y primavera (SON) revela un patrón espacial que divide al sistema en dos fuentes de variabilidad. Al oeste del sistema la señal de caudales es dominada principalmente por la descarga ocurrida durante los meses de verano resaltando la importancia del derretimiento de las masas de hielo presentes en esta zona del dominio y por su parte al este de 72.5°O, la estacionalidad se vuelva más importante durante primavera, lo cual sugiere un mayor dominio de la precipitación sobre la descarga en esta zona.



**Figura 49.** Diferencia entre el caudal medio de verano (DEF) y primavera (SON) para las principales cuencas que aportan agua dulce sobre el sistema de seno Skyring. Caudales simulados entre 1980-2018 por el modelo hidrológico VIC.

Por otro lado, las tendencias de los caudales en seno Skyring considerando todo el periodo simulado (1980-2018), revelan una inclinación positiva prácticamente en todo el dominio, según un test de mann-kendall con un intervalo de confianza del 95% (Figura 49).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 49.** Magnitud de la tendencia en las principales cuencas que aportan agua dulce sobre el sistema de seno Skyring. Los puntos señalan las cuencas que no son estadísticamente significativas (p > 0.05p > 0.05). Caudales simulados entre 1980-2018 por el modelo hidrológico VIC.

#### 4.1.4 Simulación nivel del mar

En base a un análisis armónico, se caracterizó el régimen de marea del sistema Skyring considerando mediciones in situ con mareógrafos (Figura 5). El coeficiente de Courtier para bahía Beaufort, canal Gajardo, Seno Skyring y Canal Fitzroy es entre 0,60 y 1,50 (Figura 50), indicando que el régimen de marea que presenta sistema Skyring es semidiurno mixto, lo cual es concordante con lo que muestra el modelo. El espectro de amplitud de marea tanto en el mareógrafo como en el modelo (Figura 51), muestra una disminución de la amplitud de la marea en el canal Gajardo y Skyring. En el caso del constituyente M<sub>2</sub> presenta una amplitud de 0,47 m en Fitzroy (previo a la constricción) y en canal Gajardo 0,02 m (posterior a la constricción), en Beaufort más cercano al océano costero por donde ingresa la onda de marea desde el norte; M<sub>2</sub> registra una amplitud de 0,41 m.

<sup>74</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 50.** Nivel del mar observado (izquierda) y modelado (derecha), junto al coeficiente de Courtier (F) para cada sector.

<sup>75</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 51.** Espectro de Amplitud de marea observada (arriba) del modelo (abajo) de Beaufort, canal Gajardo y canal Fitzroy.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

### 4.1.5 Caracterización hidrográfica.

El seno Skyring es una cuenca semicerrada en la región de Magallanes (**Figura 52**) exhibió la formación de 2 micro-cuencas, separadas por los umbrales batimétricos dentro del canal Gajardo (~5 m) y canal Fitz-Roy (~10 m). La zona Este (MCE) exhibió una batimetría irregular y variada, con profundidades de 100 m en la proximidad del canal Fitz-Roy y máximos de 600 m hacia el canal Gajardo, antes de la constricción umbral. La zona *oeste* (MCO) se caracterizó por exhibir una profundidades entre 150-250 m dentro del canal Gajardo, mientras que el golfo Xaultegua reveló profundidades entre 450-650 m. Finalmente, en Paso del Mar se registraron las mayores profundidades entre 600-800m. La conformación batimétrica tiende a exhibir una disminución en sentido oeste-este.



Figura 52: Perfil batimétrico de seno Skyring y zonas aledañas.

Los límites topográficos que separan a seno Skyring de los canales aledaños, se reflejan en las características hidrográficas. La sección vertical salinidad muestra que el agua oceánica ingresa de forma acotada por las constricciones batimétricas, así el agua al interior del seno no supera el rango de 20 psu, mientras que, a su exterior, estas presentan una salinidad sobre 30 psu, tanto en

<sup>77</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

primavera como en otoño (Figura 53). Por otra parte, la temperatura presenta, en general, valores más más reducidos al interior del seno Skyring, especialmente bajo los 100 m de profundidad. Finalmente, el contenido de oxígeno disuelto se encuentra sobre los valores de 5 mL L<sup>-1</sup> en las zonas más profundas, no observándose zonas hipóxicas a su interior. El tipo de masa de agua que domina en seno Skyring puede caracterizarse como agua estuarina salobre (Figura 54) conformada en una gran proporción por el agua dulce proveniente de glaciares y lluvia, y por aguas mezcladas con remanentes de Agua Subantártica Modificada.



Figura 31: Condiciones hidrográficas en seno Skyring en otoño de 2012 (panel izquierdo) y primavera de 2013 (panel derecho).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 54: Esquema de masas de agua presentes en seno Skyring y zonas aledañas.

### 4.1.6 Evaluación de características hidrográficas en modelo hidrodinámico

Determinar la capacidad del modelo hidrodinámico en reproducir las estructuras verticales de las propiedades físicas (temperatura y salinidad) de la columna de agua, es un punto esencial en la evaluación del modelo hidrodinámico. Para este propósito, se utilizaron diagramas de temperatura y salinidad. Está comparación fue realizada para años distintos, por lo tanto, eventualmente existe una fuente de error adicional al desempeño del modelo, que tenga su origen en la variabilidad temporal propia de este sistema.

La **Figura 55** muestra una comparación entre diferentes estaciones de CTD realizadas en periodos puntuales y se compararon con datos extraídos del modelo El modelo en el sector oeste del seno (E2 y E3) tiene en general un buen desempeño, especialmente en la salinidad, está se encuentra en los rangos adecuados, entre 15 a 20 psu. En cambio, para la temperatura, el modelo tiene menos habilidad para reproducir valores más bajos, en cambio en la zona central (E4) de Skyring, el modelo reproduce de mejor manera y en un rango adecuado la temperatura y la salinidad, además de la variabilidad temporal de esos rangos. Finalmente, en el lado este (E8), se observa una estructura distinta a la zona interna del seno, aquí la variabilidad de la salinidad aumenta, mientras que en la temperatura disminuye, este rasgo es capturado por el modelo, sin embargo, no con exactitud, sobreestimando los valores de temperatura, especialmente en diciembre.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 55: Diagramas TS en distintos sitios en seno Skyring entre estaciones de CTD (azul) y el modelo (rojo).

Uno de los aspectos fundamentales en los cuerpos estuarinos, corresponde a la estratificación, una forma de sencilla de medir el grado de estratificación dentro de un sistema corresponde al parámetro de estratificación ( $\eta_s$ ) y que la estima a partir de diferencias entre la salinidad superficial y de aguas más profundas. Una mirada general del comportamiento espacial de la estratificación indica que existe una disposición mayor a estratificación en los canales de conexión y, por el contrario, al

80

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

interior del seno, esta tiende a disminuir, sin embargo, este comportamiento general tiene matices (**Figura 56**). Así en febrero, el modelo tiende a subestimar la estratificación en la parte oeste del seno, de manera opuesta las estaciones de la parte este del sistema estaciones 5-9, indicaron una sobreestimación de la estratificación, es importante señalar que en este periodo se registraron el menor número de observaciones de CTD. Una de las mejores concordancias se dio en las observaciones de marzo, si bien el modelo subestima la estratificación si se logra apreciar el mismo patrón, con elevados valores hacia las estaciones hacia el oeste (E1-E2), también el modelo replica el mismo patrón hacia las estaciones canal Fitz-Roy, aunque sobreestimando los valores. En diciembre también se observó una buena concordancia entre la estratificación observada y la representada por el modelo, si bien el modelo subestima, la diferencia es las más reducida de todos los periodos comparados (febrero-marzo) (**Figura 56**). Se insiste en que las mediciones fueron realizadas en un periodo distinto a la modelación, por lo cual, las divergencias podrían no ser necesariamente atribuibles al desempeño del modelo.



Figura 56: Esquema de masas de agua presentes en seno Skyring y zonas aledañas.

Los valores medios estacionales de la temperatura superficial (0 - 20 m) en seno Skyring (**Figura 57**) muestra, como es esperable, máximos en verano y mínimos en invierno. Durante el verano la temperatura tiende a ser mayor hacia el lado Este, con valores sobre los 10 °C, mientras que esta es menor hacia el lado este y principalmente cercano a descarga de agua dulce de origen glaciar, mientras que, durante los inviernos, los valores mínimos alcanzan valores cercanos a 5°C, en tanto, durante el otoño y la primavera en las capas superficiales tienen un comportamiento similar con valores de temperatura cercano a 7°C. La salinidad en cambio, muestra homogeneidad al interior

<sup>81</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

del seno Skyring, y con valores relativamente bajos (~17 a 19 psu) esto contrasta con los canales de conexión al seno que alcanzan valores entre 25 a 30 psu (**Figura 58**). Durante el verano se producen los valores más bajos de salinidad en las cercanías de las descargas de ríos, época en la que se producen deshielos.



Figura 57: Temperatura superficial (0-20 m) para cada estación del año 2017.

82

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 58: Salinidad superficial (0 m - 20 m) para cada estación del año 2017.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

#### 4.1.7 Corrientes

Se comparó la salida del modelo (enero - diciembre 2018) con los datos de ADCP (noviembre – julio 2022) en base a un análisis de EOF de la corriente submareal de seno Skyring. En general, los 3 modos verticales de la corriente coinciden entre el ADCP y el modelo (**Figura 59**). El modo 1 mostró una estructura barotrópica hacia el este que disminuye su amplitud con la profundidad. El modo 1 del modelo explicó el 67 % de la variabilidad total, mientras que el modo 1 del ADCP alcanzó un 46%. El modo 2 del modelo presentó una estructura baroclínica con una capa sobre los 40 m hacia el oeste y una capa bajo los 40 m hacia el este, esta estructura se observó en el ADCP explicando un 26% de la variabilidad total, el modelo lo hizo en un 23%. El modo 3 presentó una estructura de 3 capas; sobre los 25 m, la corriente presentó dirección hacia el este y entre los 25 m y 60 m, la corriente tuvo dirección hacia el oeste, bajo los 60 m la corriente tuvo dirección al este, este modo explicó el 7% en el modelo y 9% en el ADCP. El modo 1 explico la mayor variabilidad, se comparó el modo 1 del modelo con viento el viento zonal, se encontraron correlaciones relativamente altas, sobre todo en otoño e invierno (r = 0.65 y 0.62 respectivamente), esto sugiere que el viento es el principal forzante en la circulación, al menos en los primeros 50 m de la columna de agua (**Figura 60**).



Figura 59: EOF de la componente u del modelo 2018 y de ADCP 2021 - 2022, Isla Escarpada.

<sup>84</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



Figura 60: Serie temporal del modo 1 de EOF (negro) y el viento zonal (azul), para cada estación del año 2017 con su respectivo valor de r.

El patrón de circulación superficial de las corrientes (**Figura 61**), obtenido como promedios estacionalmente para el año 2017, muestra en general, una dirección del flujo desde oeste a este, siendo más intenso durante invierno y principalmente en la primavera, alcanzando en algunos sectores valores máximos de 15 cm s<sup>-1</sup>. Por otra parte, durante otoño se observan las menores

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

magnitudes de corrientes, aunque conservando su dirección. Estas diferencias estacionales sugieren un activo forzamiento del viento en la estructura de las corrientes en seno Skyring.



**Figura 61**: Patrón estacional de corriente superficiales promedio (0 - 20 m) proveniente del modelo hidrodinámico para el año 2017.

<sup>86</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

## 4.1.8 Conectividad hidrodinámica en seno Skyring

Acorde a la metodología descrita en 3.1.8 la conectividad se calculó en primera instancia entre los 36 centros de cultivo concesionados dentro del sistema del seno Skyring (matrices conectividad entre centros de cultivo en **ANEXO 3**), a partir de las cuales se calculó la conectividad entre las 4 ACS en que se agrupan tales centros de cultivo (**Figura 13 y Tabla 5**). De los 4 posibles escenarios de conectividad considerados, según el tipo de partícula (derivador y *Caligus rogercresseyi*) y de modos de dispersión (*downstream y upstream*) se obtuvo la matriz de conectividad (definida como el porcentaje de partículas que desde cada fuente alcanzan cada sumidero) para cada uno de los 3 años de simulación (2016, 2017, 2018). Posteriormente estas matrices de conectividad intra-anual (de cada uno de los 4 escenarios de modelación) se promediaron para obtener la conectividad interanual del periodo 2016-2018, a partir de la cual poder finalmente calcular la variabilidad interanual de la conectividad como la anomalía de cada escenario de modelación para cada uno de los 3 años del periodo 2016-2018.

Para hacer una lectura e interpretación más rápida, intuitiva y para facilitar su visualización e identificación de patrones, la información de conectividad se presenta cuantitativamente según una escala de colores segmentada y de distribución lineal (a intervalos de 10%), mientras que la de la anomalía de conectividad se presenta en escala continua (centrada en el cero) de distribución logarítmica, por ser esta última una medida en promedio para los diferentes modelos y escenarios de menor desviación estándar (27% para conectividad vs 0.25% para anomalía de conectividad).



**Figura 62**: Conectividad promedio periodo 2016-2018 entre ACS del seno Skyring, escenario partícula tipo derivador y dispersión *downstream*.

En el promedio de los años 2016, 2017 y 2018 las mayores conectividades de partículas de tipo derivador y dispersión *downstream* (**Figura 62**), se dan desde ACS hacia zonas libres de centros de

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

salmonicultura (+99%) por ocupar estas áreas la práctica totalidad de la superficie del seno Skyring (98%). Exceptuando las zonas libres y considerando solamente las conexiones entre centros de cultivo de ACS, las mayores conectividades se dan entre los centros de cultivo de la misma ACS desde donde se inician las trayectorias de las partículas (auto-conectividad), como las ACS 49a, 49b y 50a, siendo esta última la que presenta una mayor conectividad con un 47% de las partículas que salen de sus 4 centros de cultivo estableciendo conectividades entre alguno de esos mismos centros de cultivo. Por el contrario, solo el 16% de las partículas de la ACS 50b establecen conectividades con centros sumideros de la misma ACS fuente. Las ACS más exportadoras hacia otras ACS son la 49a y 50a hacia la 50a y 49a respectivamente (y recíprocamente entre ambas), con cerca de un 15% de las partículas originarias de los centros de la ACS fuente, cuyas trayectorias han pasado en algún momento por alguno de los centros de la otra ACS (sumidero). La mayoría de las demás conectividades entre ACS se mantienen entre 2%-5% de las partículas, siendo la menor de todas las conectividades desde la ACS 49b a la 50b (<1%).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 63**: Conectividad (columna izquierda) y anomalía de conectividad (columna derecha) de los años 2016, 2017 y 2018 entre ACS del seno Skyring, escenario partícula tipo derivador y dispersión *downstream*.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

A lo largo del periodo 2016-2018 la conectividad de partículas tipo derivador y dispersión *downstream* entre ACS del seno Skyring (**Figura 63**) no difiere prácticamente entre los 3 años de modelación, en tal grado que la mayor anomalía en valor absoluto (considerando anomalías tanto positivas como negativas) no excede siguiera el 1% respecto del promedio de este mismo escenario (**Figura 62**).



**Figura 64**: Conectividad promedio periodo 2016-2018 entre ACS del seno Skyring, escenario partícula tipo derivador y dispersión *upstream*.

Para el escenario de partículas derivador y dispersión *upstream* (Figura 64), inverso a *downstream* (Figura 62), en donde las corrientes se han revertido de sentido para determinar el origen de las partículas que inician sus trayectorias en cada fuente, la situación es prácticamente idéntica en los patrones generales de transporte de partículas *downstream* entre los centros de cada ACS. Aparte de las esperadas muy altas conectividades con zonas libres de centros de cultivo (+99%), las auto-conectividades de cada ACS siguen dominando y en casi la misma proporción que en escenario *downstream* (diferencias máximas del 2%). En cuanto a la conectividad entre distintas ACS, debido a que en dispersión *downstream* los únicos transportes de cierta relevancia (superiores al 10%) se daban recíprocamente entre las ACS 49a y 50a (es decir las partículas de una ACS van a la otra y viceversa), este mismo comportamiento se observa en la dispersión *upstream*, solo que un poco más intenso con el 19% partículas *upstream* vs 15% *downstream*.

<sup>90</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 65**: Conectividad (columna izquierda) y anomalía de conectividad (columna derecha) de los años 2016, 2017 y 2018 entre ACS del seno Skyring, escenario partícula tipo derivador y dispersión *upstream*.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Al igual que en el escenario de derivador *downstream*, la variabilidad interanual del periodo 2016-2018 de partículas tipo derivador y dispersión *upstream* (Figura 65), presenta anomalías de la conectividad (positivas y/o negativas) menores al 1% respecto del promedio de conectividad para este escenario (Figura 64).



**Figura 66** Conectividad promedio periodo 2016-2018 entre ACS del seno Skyring, escenario partícula tipo *Caligus rogercresseyi* y dispersión *downstream*.

Para el escenario de partículas *Caligus rogercresseyi* y dispersión *downstream*, y como se argumenta en la metodología bajo el propuesto enfoque bio-sanitario, solo computan las conectividades de las partículas cuando éstas alcanzan la fase copepodito (segunda fase planctónica e infestiva del *Caligus rogercresseyi*). Por esta consideración metodológica el promedio de conectividad 2016-2018 entre las ACS del seno Skyring de partículas *Caligus rogercresseyi* y dispersión *downstream* (**Figura 66**) es baja y menor que para el resto de escenarios, al excluir una parte considerable de la trayectoria de las partículas (la primera fase nauplio). A ello se une el hecho de que de por sí ya son escasas las partículas que alcanzan la fase copepodito que sí contabiliza en la conectividad (ver detalle en discusión). La suma de estos factores (metodológico más ambiental) lleva a que las conectividades entre las ACS sean muy débiles (<1%), incluso para la autoconectividad, siendo la mayor conectividad (1.5%) la que forman las partículas de la ACS 49b con zonas libres de salmonicultura. En general la conectividad es tan débil que incluso la ACS 50a no llega establecer conectividad efectiva con ninguna ACS ni zona libre.

<sup>92</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 45**: Conectividad (columna izquierda) y anomalía de conectividad (columna derecha) de los años 2016, 2017 y 2018 entre ACS del seno Skyring, escenario partícula tipo *Caligus rogercresseyi* y dispersión *downstream*.

La conectividad de partículas *Caligus rogercresseyi* y dispersión *downstream* a lo largo de los 3 años de estudio varía muy poco (**Figura 67**), pues a la ya escasa variabilidad interanual vista en partículas

<sup>93</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

tipo derivador se une una ya de por sí baja conectividad promedio (**Figura 66**). En este sentido y como ejemplo más sintomático en el año 2017 solo la ACS 50b contabiliza conectividades (consigo mismo y zonas libres). La anomalía interanual es muy tenue, menor al 1% con la excepción de la ACS 49b hacia las zonas libres con anomalías ligeramente superiores al 1% (negativo) los años 2016 y 2017 y cercanas al 3% (positivo) el año 2018.



**Figura 68**: Conectividad promedio periodo 2016-2018 entre ACS del seno Skyring, escenario partícula tipo *Caligus rogercresseyi* y dispersión *upstream*.

El promedio de conectividad de los años 2016, 2017 y 2018 para el escenario de partículas Caligus rogercresseyi y dispersión upstream (Figura 68) sigue un patrón de conectividad similar al escenario análogo para partículas tipo derivador (Figura 64), pues por las consideraciones metodológicas sí se computan todas las posiciones de las partículas de inicio a fin a lo largo de sus trayectorias de deriva (fase nauplio y copepodito). Este patrón, sin embargo, es menos intenso en el escenario de partículas Caligus rogercressevi debido a la mortalidad que sufren este tipo de partículas, y por tanto una menor duración del tiempo de deriva de las partículas respecto de las partículas tipo derivador. Cuando en los escenarios de partículas derivador la conectividad con zonas libres supera el 99%, en el caso de Caligus rogercresseyi upstream esta proporción desciende, oscilando entre 83% (ACS 49a) y 95% (ACS 50b). Por su parte y de nuevo respecto del escenario análogo de derivador upstream (Figura 64) la auto-conectividad se reduce a la mitad aproximadamente (ACS 49a del 23% al 13%; ACS 49b del 25% al 12%; ACS 50b del 17% al 8%), salvo para la ACS 50a que solo desciende del 48% al 31%. La conectividad entre distintas ACS también es menor respecto de partículas tipo derivador, inexistiendo conectividad entre algunas ACS, y otras conexiones que eran relativamente fuertes ven reducida su conectividad como es el caso especialmente de la ACS 49a y la 50a que pasa de un 19% a un 0.5% de partículas de la primera (ACS 49a) que proceden de la segunda (ACS 50a).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 69**: Conectividad (columna izquierda) y anomalía de conectividad (columna derecha) de los años 2016, 2017 y 2018 entre ACS del seno Skyring, escenario partícula tipo *Caligus rogercresseyi* y dispersión *upstream*.

La variabilidad interanual de partículas *Caligus rogercresseyi* y dispersión *upstream* (**Figura 69**) para el periodo 2016-2018 es muy baja y no difiriendo apenas a lo largo de los 3 años de modelación, con anomalías (positivas y/o negativas) menores al 1% en todas las conexiones entre ACS.

<sup>95</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

**5.4 Objetivo 2.2.4.** *Monitorear las condiciones oceanográficas en la columna de agua dentro del Mar interior de Chiloé y Aysén.* 

## Características hidrográficas de la columna de agua

Para entender el comportamiento temporal y vertical de las condiciones hidrográficas y químicas de la columna de agua, se realizaron transectas desde la Laguna San Rafael (Región de Aysén) hasta el fiordo Reloncaví (Región de Los Lagos), durante las tres campañas realizadas en el 2022. Además, se realizaron muestreos en el fiordo Comau, abarcando desde la cabecera (Leptepu), pasando por la boca de fiordo (Isla Llancahué – Paso Comau), llegando hasta Hornopirén y el fiordo Quitralco.

## 5.3.1 Transectas de CTD-O, entre Laguna San Rafael y fiordo de Reloncaví (Figura 70)

En el comportamiento temporal de la temperatura conservativa del agua, se observó en superficie, que el verano (febrero 2022) presento temperaturas más altas que los otros meses. El máximo absoluto (16.3 °C) se registró en febrero del 2022, en la superficie de la estación E19 (canal Jacaf). Las temperaturas máximas a lo largo de las transectas fueron entre el canal Jacaf -fiordo Puyuhuapi y el Seno de Reloncaví. Mientras, las temperaturas y salinidades más bajas siempre se registraron en la estación E31 (Laguna San Rafael). La mínima absoluta (4.5 °C) de las tres campañas, se observó en agosto del 2022 en la estación E31.

La presencia de aguas estuarinas (Salinidades 0–31 g/kg) se registró en toda la columna de agua, desde la estación de la Laguna San Rafael hasta Quitralco durante las tres campañas de mediciones.

En el resto de la transecta, predominó la presencia de las masas de agua Subantártica Modificada (ASAAM, Salinidades 31–33 g/kg) y por debajo de esta, la masa de agua Subantártica (ASAA, Salinidades 33 – 33.8 g/kg). Sin embargo, un núcleo de aguas con salinidades mayores a los 33.8 g kg<sup>-1</sup> se presentó entre el canal Jacaf y el fiordo Puyuhuapi, correspondiendo a la masa de agua Ecuatorial Subsuperficial (AESS).

En la región donde se detectó la presencia del AESS fue donde se registraron los valores mínimos de OD (0.1 - 4 mL L<sup>-1</sup>) y ODS (1–40 %), detectándose condiciones de hipoxia (OD menor a 2 mL L<sup>-1</sup> y ODS menor a 30 %) en el fiordo Puyuhuapi durante las tres campañas de mediciones. Sin embargo, la capa superficial de la columna de agua se mostró bastante oxigenada, presentando sus máximos en la estación E31. En el seno de Reloncaví, a partir de la estación E05 y hasta llegar a la cabecera del fiordo Reloncaví, se registraron zonas de bajo oxígeno (ODS < 60 %).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura** 70. Perfiles de temperatura conservativa (°C), salinidad absoluta (g/kg), saturación de oxígeno (%) y oxígeno disuelto (mL L<sup>-1</sup>) para las campañas realizadas en febrero (A, B y C), mayo (D, E y F) y agosto del 2022 (G, H e I) en la transecta desde Laguna San Rafael hasta fiordo de Reloncaví.

# 5.3.2 Transectas de CTD-O en fiordo Comau (Figura 71).

En el fiordo Comau, la capa superficial de la columna de agua (0-10 m) presentó sus valores máximos en las campañas de marzo y mayo 2022. Mientras, en la campaña realizada en agosto 2022 el patrón anterior se vio invertido, evidenciado menores temperaturas y máximos por debajo de la superficie.

Se registró la presencia de AE durante las tres campañas y en los 10 primeros metros de la columna de agua. La presencia de ASAA predominó a lo largo del transecto.

La columna de agua se mostró oxigenada en superficie. Sin embargo, durante las tres campañas se registraron núcleos de aguas con bajo contenido de OD.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.


**Figura 71**. Perfiles de temperatura conservativa (°C), salinidad absoluta (g/kg), saturación de oxígeno (%) y oxígeno disuelto (mL L<sup>-1</sup>) para las campañas realizadas en marzo (A, B y C), mayo (D, E y F) y agosto del 2022 (G, H e I) en fiordo Comau.

# 5.3.3 Transectas de CTD-O, en el fiordo Quitralco (Figura 72)

El estudio de las condiciones hidrográficas en el fiordo Quitralco, permitió distinguir temperaturas superficiales (hasta los 25 m de profundidad) más altas en febrero que en los otros meses. En abril 2022, la temperatura en la columna de agua se mostró de una forma mas homogénea, variando poco entre superficie y fondo. Mientras, en agosto con relación a lo ocurrido en febrero, se evidenció una inversión térmica, donde las temperaturas mínimas (7.6 °C) se ubicaron en la superficie del fiordo.

Pequeños núcleos de ASAAM se observaron por debajo de los 50 m de las estaciones Q1 y Q2 durante las tres campañas de mediciones. Las Aguas Estuarinas predominaron en el resto de la columna de agua y a lo largo de todo el fiordo.

El estudio del OD y el ODS permitieron distinguir la presencia de aguas altamente oxigenadas (OD=6.3–8.4 mL L<sup>-1</sup>) en los primeros 25 m de la columna de agua. Por otro lado, los registros del oxígeno disuelto detectaron aguas profundas con muy bajo contenido de OD (0.1 mL L<sup>-1</sup>) y ODS (1.8 %). Este cuerpo de agua con condiciones hipóxicas fue localizado durante todo el periodo de estudio en la estación Q17 (cabecera del fiordo). En febrero y mayo 2022 esta condición se presentó desde los 90 m de profundidad. Mientras, en agosto descendió a los 109 m. Así mismo, en las estaciones Q13 y Q14 se reportaron condiciones hipóxicas llegando al fondo marino de cada estación.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 72**. Perfiles de temperatura conservativa (°C), salinidad absoluta (g/kg), saturación de oxígeno (%) y oxígeno disuelto (mL L<sup>-1</sup>) para las campañas realizadas en febrero (A, B y C), mayo (D, E y F) y agosto del 2022 (G, H e I) en fiordo Quitralco.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

# Distribución de nutrientes inorgánicos, clorofila - a y feopigmentos

### 5.3.4 Transecta entre Laguna San Rafael y fiordo de Reloncaví

Se realizaron secciones latitudinales para los nutrientes inorgánicos hasta profundidades de 400 m en febrero en la transecta entre Laguna San Rafael y Fiordo Reloncaví (Figura 73). La distribución de nitratos tuvo valores medios en toda la columna de agua de  $6,39 \pm 3,49 \mu$ moles/L. Se observo a lo largo de toda la transecta que los nitratos son agotados rápidamente a nivel superficial con valores medios de 4,40 µmoles/L (0-10m de profundidad). Un pulso significativo fue identificado entre los 50m y 200m en los fiordos Quitralco, Aysén, Puyuhuapi, el Canal Jacaf y Fiordo de Reloncaví (Figura 73A) con valores superiores a 10 µmoles/L y con valores máximos de 19,45 µmoles/L en el Fiordo Puyuhuapi (E21). En el Fiordo de Reloncaví concentraciones superiores a 10 umoles/L son observadas hasta los 400m. La cantidad de nitritos en la columna de agua es pequeña en comparación con los nitratos. La concentración promedio de nitrito en la columna de agua durante febrero 2022 es de 0.13  $\pm$  0.11  $\mu$ moles/L, con un pulso bien marcado en la columna de agua entre el Canal Jacaf y el Mar Interior de Chiloé (Figura 73B) con concentraciones superiores 0,3 µmoles/L. Un pulso con concentraciones más bajas (entre 0,1 y 0,2 µmoles/L) se observó en las estaciones cercanas a la Laguna de San Rafael hasta el fiordo Puyuhuapi desde los 0 hasta los 100 m. En la superficie del Fiordo Puyuhuapi y en el Sistema Reloncaví los nitritos son agotados superficialmente, además en el Sistema Estuarino Reloncaví se registraron las concentraciones menores de nitritos en toda la columna de agua.



**Figura 73**. Perfiles de Nitrato (A), Nitrito (B), Fosfato (C) y Silicato (D) para la campaña de febrero 2022 en la transecta entre Laguna San Rafael y Fiordo Reloncaví.

La distribución de fosfato en febrero 2022 tuvo valores medios de 1,05  $\pm$  0,44 µmoles/L con mínimos de 0,08 µmoles/L y máximos de 2,55 µmoles/L. De manera general se observo un agotamiento de

<sup>102</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

este nutriente en la superficie (0-20 m) y en el fondo (>150m). En el Fiordo Reloncaví se observaron altas concentraciones en toda la columna de agua con valores medios registrados de 1,18  $\mu$ moles/L y con máximos de 2,54  $\mu$ moles/L a los 200m (**Figura 73C**). La concentración de silicatos al igual que los fosfatos estuvo agotada superficialmente a lo largo de la transecta entre Laguna San Rafael y Fiordo Reloncaví (**Figura 73D**) con valores promedio de 9, 32 ± 4,21  $\mu$ moles/L en toda la columna de agua. Dos pulsos de ingreso de silicatos fueron identificados en el Fiordo Quitralco y el Sistema Reloncaví. La relación N:P fue de r=0.87 (**Figura 74**).



**Figura 74**. Relación Nitrato y Fosfato para la campaña de febrero 2022 en la transecta entre Laguna San Rafael y Fiordo Reloncaví.

Los valores medios de Clorofila-a en la transecta entre Laguna San Rafael y Fiordo Reloncaví hasta los 50 m fueron 0.27 mg/m<sup>3</sup> con poca variabilidad ( $\pm$ 0,3 mg/m<sup>3</sup>). Se alcanzaron a observar dos pulsos superficiales (0 - 15 m) significativos registrados entre el Fiordo Quitralco hasta el Fiordo Puyuhuapi y desde el mar interior de Chiloé hasta el Sistema Reloncaví con valores máximos (0,6 mg/m<sup>3</sup>) en el Sistema Reloncaví (**Figura 75A**). Esta estructura de similares características fue registrada también en febrero 2022 para los feopigmentos con concentraciones mayores (0.37  $\pm$  2,36 mg/m<sup>3</sup>) (**Figura 75B**).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 75**. Clorofila-a (A) y feopigmentos (B) para la campaña de febrero 2022 en la transecta entre Laguna San Rafael y Fiordo Reloncaví hasta los 50 m.

#### 5.3.5 Transecta fiordo Comau

Los valores medios de nitrato en el fiordo Comau para marzo 2022 fueron de 7,80  $\pm$  5,83 µmoles/L (**Figura 76A**). Se observó la presencia de una capa superficial totalmente agotada de este nutriente y un incremento en la capa subsuperficial. Cerca de la boca del fiordo se observaron las mayores concentraciones de nitrato (17,57 µmoles/L) y las menores cerca de la cabeza (0,28 µmoles/L). Para el caso de los nitritos se observaron valores promedio de 0,07  $\pm$  0,09 µmoles/L ((**Figura 76B**). Se pudo observar una señal continua a lo largo del fiordo ubicada subsuperficialmente con valores entre 0,1 y 0,2 µmoles/L.

El promedio de los fosfatos durante marzo 2022 fue de 1,53  $\pm$  0,73 µmoles/L. La distribución vertical de fosfatos evidenció valores < 0,5 µmoles/L en la superficie (0-10m) (**Figura 76C**). A partir de esa profundidad existe un incremento en su concentración hacia el fondo, alcanzando valores máximos de 2,48 µmoles/L en la localidad de Hornopirén. La concentración de silicatos al igual que

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

los fosfatos estuvo agotada sub-superficialmente (0-100m) con valores en promedio de 11,  $30 \pm 5,25$  µmoles/L en toda la columna de agua (**Figura 76 D**). Dos pulsos de ingreso de silicatos fueron identificados entre la FC3 y FC4 y en el sector cercano a Hornopirén con máximos de 25,51 µmoles/L y concentraciones superficiales superiores a 10 µmoles/L.



Figura 76. Perfiles de Nitrato (A), Nitrito (B), Fosfato (C) y Silicato (D) para la campaña de marzo 2022 en el Fiordo Comau.

Se realizó la serie vertical de la Chl-a y feopigmentos (**Figura 77**) a partir de las mediciones in-situ obtenidas de la botella Niskin. Los valores promedio de clorofila-a fueron  $0,09 \pm 0,10 \text{ mg/m}^3$ . Los valores máximos de Chl-a se presentaron en el sector cerca de Hornopirén (FC8:  $0,45 \text{ mg/m}^3$ ). Se observaron concentraciones de clorofila superiores a  $0,1 \text{ mg/m}^3$  hasta los 20m de profundidad a lo largo de todo el fiordo (**Figura 77A**). Los feopigmentos alcanzaron valores promedio más bajos con concentraciones de  $0,08 \pm 0,10 \text{ mg/m}^3$ . Son los sectores de la boca del fiordo (FC6-FC7) y de Hornopirén (FC8) donde están presentes las mayores concentraciones de feopigmentos (**Figura 77B**).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 77.** Clorofila-a (A) y feopigmentos (B) para la campaña de marzo 2022 en el Fiordo Comau, hasta los 50 m.

#### 5.5.6. Transecta fiordo Quitralco

Los valores medios de Clorofila-a en la transecta del Fiordo Quitralco hasta los 50 m fueron 0,32  $\pm$  0,35mg/m<sup>3</sup> (**Figura 78A**). A lo largo de todo el fiordo se observaron concentraciones superficiales elevadas (0-10m) con valores máximos en la Q14 (1,45 mg/m<sup>3</sup>), exceptuando las estaciones cercanas a la boca del fiordo (Q1, Q2, Q3) donde el máximo superficial no excedio los 0,3 mg/m<sup>3</sup>. A lo largo de todo el fiordo a partir de los 15m la Clorofila-a no supera concentraciones > 0,1 mg/m<sup>3</sup>. La concentración de feopigmentos tiene una estructura de similar en febrero 2022 para los con concentraciones menores (0.25  $\pm$  2,5 mg/m<sup>3</sup>) (**Figura 78B**). Los valores máximos se observaron en la estación Q9 (1,17 mg/m<sup>3</sup>).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 78.** Clorofila-a (A) y feopigmentos (B) para la campaña de febrero 2022 en el Fiordo Quitralco, hasta los 50 m.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

**5.5 Objetivo 2.2.5.** Caracterizar oceanográficamente las Agrupaciones de Concesiones de Salmónidos (ACS) mediante mapas temáticos montados en una plataforma de información geográfica.

La caracterización oceanográfica de esta zona, se realizó considerando los diferentes polígonos de cada ACS (asociación concesiones de salmónidos). Durante esta etapa se consideró sólo la zona de seno Skyring y alrededores. La data está disponible en la plataforma de información oceanográfica, (https://chonos.ifop.cl/subpesca/index/).

Actualmente la interfaz (figura 79), se encuentra en su primera versión, donde se pueden visualizar mediciones de CTDO (salinidad, temperatura, oxígeno disuelto); nutrientes (nitrato, fosfato, silicato) y clorofila total, considerando diferentes períodos de tiempo. En este estudio se incluyó la información generada en los diferentes estudios ejecutados por IFOP en 2012, 2013, 2021, y 2022, que incluyen los polígonos de las ACS, 49b, 50a, 50b, 51, 52 y 53 y las estaciones que se han medido dentro de estos polígonos (recuadro rojo). Recuadro verde: Tabla resumen de datos de la variable seleccionada. Recuadro azul Grafica perfil de la variable seleccionada.



**Figura 79.** interfaz grafica del área con mediciones de CTDO, nutrientes y clorofila dentro de las durante el periodo de febrero 2021-julio 2022.

# 5.4.1 Resumen de datos de la variable seleccionada.

En esta parte del interfaz, entrega un resumen estadístico básico indicando los valores mínimo, máximo y promedio de una variable seleccionada, separado en 2 capas, una inferior y otro superior, esta capa es interactiva estimándose los valores de manera automática, al recorrer con el curso, la profundidad de cada perfil o un conjunto de perfiles seleccionados. La variable se selecciona de manera específica: salinidad, temperatura, oxígeno disuelto, nitrato, nitrito, fosfato, silicato y clorofila total (figura 80, panel inferior).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Variable Salinidad	Ţ	]	Límte capas					
Resumen de datos								
Capa	Profundidad	Promedio		Mímimo	Máximo			
Superior Inferior	0 a 21 metros 21 a 36 metros	17.611 17.526	psu psu	17.28 psu 17.517 psu	17.777 psu 17.535 psu			
Variable Salinidad	d			Límte capas 21				
🗸 Salin	idad		e datos					
Temperatura			io	Mímimo	Máximo			
Oxig		su	17.28 psu	17.777 psu				
Nitrato			su	17.517 psu	17.535 psu			
Nitrito			linidad		≡			
Fosfa	ato							
Silica		د	•					
Clore	ofila total		<	$\overline{}$				

**Figura 80.** Estadística básica de la temperatura, salinidad y oxígeno disuelto para las estaciones ubicadas en la ACS 50b.

# 5.4.2 Grafica perfil de la variable seleccionada (recuadro azul)

Los perfiles (a modo de ejemplo) corresponden a gráficos interactivos, que presentan la distribución vertical (eje Y) de una variable determinada, en función de la profundidad (eje X). La estructura de

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

las gráficas, permiten un acercamiento a los puntos para conocer con precisión el valor de cada estación individual o un conjunto de estaciones dentro del polígono de ACS correspondiente. Es importante señalar que, en el caso de la salinidad, temperatura y oxígeno disuelto, corresponden a mediciones continuas desde superficie hasta máxima profundidad de fondo, en contraste las mediciones de nutrientes corresponden a profundidades estándar (muestreo discreto), mientras que las mediciones de clorofila corresponden a profundidades estándar pero sólo hasta 50m.



Figura 80. Grafica de Perfiles de CTDO, nutrientes, clorofila total dentro de la ACS.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

# 6. DISCUSIÓN

El seno Skyring, antes de la ejecución de estos estudios, contaba con una limitada cantidad de información oceanográfica respecto de otras zonas dentro de la región y aún más, si se considera a la X y XI región. Por ejemplo, el programa CIMAR Fiordos, organizado por Comité Oceanográfico Nacional (CONA) y que ha nutrido e impulsado las investigaciones en ciencias marinas en las aguas interiores del sur de Chile, no ha incluido al seno Skyring como sitio de estudio, esto a pesar de ser una zona con actividad acuícola importante dentro de la región de Magallanes. El estudio realizado por IFOP durante el año 2012 y 2013 (Pinilla et al. 2013) y financiado por la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura permitieron mejorar de forma acotada la información hidrográfica para caracterizar este sistema marino, este estudio ha sumado información relevante que permitirá generar mejor información oceanográfica para la toma de decisiones.

La batimetría permite distinguir 2 zonas claramente definidas y con particularidades diferentes, la zona Este (canal Fitz-Roy - isla Escarpada) con una batimetría más somera 30-150 m, mayormente homogénea, otra zona localizada al oeste de la isla Escarpada con una batimetría de mayor profundidad 500-600 m. De manera opuesta, destaca la constricción batimétrica localizada dentro del canal Gajardo, como el estrechamiento de la batimetría del canal Fitz-Roy, limitando la conexión entre el seno Otway y el seno Skyring (Soto et al 2022), comparando esos resultados con resultados registrados en estudios por Valdenegro & Silva (2003). geomorfológicamente, las constricciones de canal Gajardo y Fitz-Roy, generó la formación de 2 microcuencas con características oceanográficas propias: Así con los estudios ejecutados con anterioridad en la zona de seno Skyring (Pinilla et al., 2013), se identificaron las principales masas de agua y diferentes cuerpos de agua que se forman por la interacción del agua oceánica con agua dulce (producto de los diferentes grados de mezcla), de esta forma, en términos estrictos dentro del seno Skyring, solo se encuentra cuerpos de agua estuarinos en sus diferentes grados de mezcla. Por otro lado, uno de los aspectos más relevantes dentro de este estudio fue contar con información de nutrientes que, junto a las condiciones de salinidad, temperatura y oxígeno disuelto, permitieron constituir las principales propiedades físicoquímicas básicas de la columna de agua (Soto et al., Los patrones de distribución vertical hidrográfica, revelaron una columna de agua separada en 2 estratos, siguiendo una estructura característica para zonas estuarinas de canales y fiordos de la región sur Austral de Chile, (Carrasco & Silva 2010, Valle-Levinson et al. 2006).

La distribución de las variables oceanográficas dentro de la cuenca Seno Skyring se caracteriza por la geomorfología presente en el área, los umbrales batimétricos de canal Gajardo (Oeste) y canal Fitz Roy (Este) generan ambientes particulares y distintivos de las condiciones oceanográficas típicas encontradas en cuerpos de agua con mayor influencia marina (Valdenegro & Silva, 2003). De esta manera, las bajas profundidades (discutidas anteriormente) encontradas en ambos umbrales batimétricos (<15 m) actúan de barrera frente a las condiciones oceanográficas presentes en los cuerpos de agua adyacentes al Seno, como lo son el Golfo Xaultegua (Oeste) y Seno Otway (Este) que presentan condiciones que no se registran dentro de la cuenca Seno Skyring.

Las estructuras térmicas verticales presentaron diferencias estacionales: periodos cálidos periodos fríos, donde se observó una columna de agua con leves gradientes registrando máximos superficiales en verano y otoño, mientras que en invierno se presentaron temperaturas mínimas superficiales y máximas sub superficiales típicos del periodo invernal para la zona de canales y fiordos australes (Silva & Guzmán, 2006).

Dentro de Seno Skyring fue posible identificar un cuerpo de agua estuarino en diferentes grados de mezcla. La estructura halina encontrada en la columna de agua permitió identificar dos estratos, un

<sup>111</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

estrato superficial de mayor variabilidad y un estrato profundo más homogéneo en contenido de sales disueltas, lo que evidencia una estructura característica para zonas estuarinas de canales y fiordos de la región sur Austral de Chile (Carrasco & Silva 2010, Valle Levinson et al. 2014).

El oxígeno disuelto, presentó la mayor concentración en superficie en todo el periodo y área de estudio, donde se observó la columna de agua estratificada con mínimos en profundidad. Sin embargo, los valores mínimos de oxígeno que se presentaron en el estrato profundo hacia la zona Estero Navarro se explican en parte por lo señalado en Silva et al. (2000), donde la disminución en la concentración de oxígeno disuelto registrada en las cabeceras de fiordos y/o desembocadura de ríos, se debería a una remineralización de material orgánico autóctono marino y material alóctono continental transportado a través de los ríos.

Es de suma importancia señalar que si bien, se pretendió estimar la variabilidad estacional y determinar la diferencia entre un periodo anual y otro (variación interanual), las diferentes restricciones que se produjeron en los periodos específicos de medición pudieron efectuar las mediciones, no permitieron estimar adecuadamente dicha variabilidad, considerando sí, que las variables medidas registraron una marcada variabilidad estacional.

Para determinar el balance de nutrientes se utilizó el modelo Biogeoquímico LOICZ (Land Ocean Interactions in the Coatal Zone), siguiendo los procedimientos detallados en Gordon et al., 1996. La modelación de los balances, se realiza mediante 3 etapas diferentes: balance de agua, balance de sal y balance de elementos no conservativos: fósforo inorgánico disuelto y nitrógeno inorgánico disuelto. LOICZ es uno de los modelos más sencillos de implementar, esencialmente por los requerimientos de una acotada cantidad de información que, permiten resolver de una manera adecuada y con cierta robustez los cálculos para determinar: cuál es el flujo de nutrientes dentro de un sistema determinado. Por otra parte, debido a que lo nutrientes no tienen un comportamiento conservativo dentro del sistema, es decir la dinámica de estos está sujeta a una serie de interacciones biológicas, que hacen fluctuar sus valores en diversas escalas espacio/temporales LOICZ permitió realizar aproximaciones tanto del metabolismo neto del ecosistema, como de algunos de los procesos más relevantes que ingresan y/o remueven nutrientes dentro de un sistema, Wolanski y Elliot 2016. Es conocido que la carga de nutrientes dentro de un sistema estuarino ingresa a una cuenca a través de diferentes vías. En este ámbito, los ríos presentan la mayor influencia en la composición e intercambio de diferentes sustancias particuladas y/o disueltas como lo son los nutrientes, ya que mediante su descarga ingresa agua rica en materia orgánica portadora de los principales nutrientes. La cantidad de nutrientes encontrados en un sistema depende del volumen de descarga que presente el río dentro de la cuenca. En este sentido, se destaca el alto aporte de silicatos por sobre el nitrato y fosfato. Particularmente, esto coincide con lo observado durante el periodo de estudio en la cuenca de Seno Skyring, dado que las zonas con mayor aporte de nutrientes pertenecen a zonas con gran descarga de agua dulce como lo son Río Pérez, Estero Navarro y Canal Gajardo en contraste a los canales Gajardo y Fitz Roy donde el aporte de nutrientes fue mínimo. No obstante, es de suma importancia señalar que en el interior del seno Skyring no se registró agua de características oceánicas, debido a que las constricciones limitan o restringen el intercambio al interior del mismo, ya que el agua al interior de seno Skyring registró salinidad inferior a 20 psu, valores que de acuerdo a lo planteado por Silva & Guzmán 2006 correspondería a agua estuarina salada, lo que trasforma a estos sistemas de fiordos en zonas particulares.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Bajo esta perspectiva destacan los estudios anteriores ejecutados por IFOP en la zona de Patagonia Norte, donde se ha identificado como una de las principales fuentes de nutrientes, dentro de los sistemas de fiordos, el transporte advectivo de las aguas oceánicas, las cuales logran ingresar al interior de estos sistemas, elevadas concentraciones de nutrientes (nitrato y fosfato). No obstante, el transporte de estos nutrientes está limitado en gran medida por la batimetría, específicamente por las constricciones batimétricas (Soto et al., 2021). Los resultados preliminares de este estudio indicarían que dentro del seno Skyring no se registraron elevados flujos de nitrato y fosfato, desde la zona oceánica hacia el interior del seno Skyring, o desde el seno Adyacente Otway, el cual también tiene mayores concentraciones de nitrato y fosfato. Así, los niveles de estos nutrientes (fosfato y nitrato) registrados en los dos periodos medidos fueron consistentemente menores, a los registros históricos (crucero CIMAR FIORDO 16) de nitrato y fosfato provenientes de las zonas oeste y este. El silicato evidenció un comportamiento opuesto donde al interior del seno Skyring los valores son consistente mayores, tanto en el estrato superficial como la capa subsuperficial, localizada debajo de la estratificación, lo que indicaría una fuente interna de silicato. Lo anteriormente señalado es consistente con los resultados del biogeoquímico LOICZ, ya que el sistema en el balance de fósforo para un ciclo anual promedio (estado estacionario), reveló que la principal fuente de nutrientes que ingresan al fiordo, es el flujo advectivo de la zona advacente (seno Otway), el aporte fluvial es menos significativo, por otra parte, la principal salida de nutrientes, se produce por el flujo estuarino. Esto genera un desbalance final, donde una parte importante de fósforo y nitrógeno son retenidos dentro del sistema, de esta forma el modelo reprodujo el flujo de nutrientes para un estado estacionario y se puede considerar una herramienta adecuada, para comprender el flujo de nutrientes dentro de un sistema altamente complejo. Al integrar el sistema en su totalidad el balance de fosforo para un ciclo anual promedio, considerando estado estacionario, reveló que la principal fuente de nutrientes que ingresan al fiordo, es el flujo advectivo de la zona advacente (seno Otway), el aporte fluvial es menos significativo. Este mismo esquema se registró para las modelaciones de nitrógeno, donde el modelo indica se produce un desbalance de DIP, ya que el sistema se comporta como un exportador neto de nitrógeno (valores del flujo negativo), reteniendo cargas de nitrógeno al interior del sistema, el proceso que predomina dentro del sistema es la fijación. No obstante, se requiere seguir avanzando en obtener información referente a otras fuentes de nutrientes, como los aportes de nitrógeno, debido a que los aportes de agua dulce (por la superficie del sistema), son significativamente mayor a la superficie de los fiordos modelados en el mar Interior de Chiloé y de Aysén (Soto et al., 2019). La principal fuente natural de nutrientes en ambos sistemas, corresponde al ingreso de agua del sistema adyacente (seno Otway). Sin embargo, este flujo es restringido y limitado por la batimetría

Seno Skyring es un sistema estuarino semi-cerrado en la región de Magallanes, con una conexión limitada al océano costero, donde la acuicultura de cultivos de salmones está presente con un creciente requerimiento de expansión por parte de los productores industriales. Este sistema tiene características particulares que lo diferencian de la Patagonia norte (Lat 41°S a 47°S), entre los cuales, se encuentran una conformación geológica intrincada que reduce el intercambio de agua con el océano exterior, limitando la propagación de la onda de marea, aspecto relevante en la circulación de la Patagonia Norte. Por otra parte, los patrones de viento en la región de Magallanes son reconocidos por su alta energía, la cual, emerge como uno de sus principales forzantes. Aspectos de lejanía y condiciones climáticas, a veces extremas, vuelven la labor de la toma de datos un desafío mayor. A continuación, se detalla cada uno de estos aspectos que interactúan en el balance de la

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

circulación en Seno Skyring, construido a partir de mediciones in situ, así como a través de modelación numérica.

Debido al abrupto cambio de la topografía en las entradas del seno Skyring, con el océano costero, la onda de marea es amortiguada. Por lo tanto, dentro del seno, las mediciones de corriente no registraron la señal de marea significativamente, la varianza explicada por la banda semidiurna y diurna en la corriente es < 6% y < 2% respectivamente, la banda sinóptica (2 -16 días) explicó el 50% (Gajardo) y 24% (Isla Escarpada) de la varianza total de la corriente. Las corrientes (entre 7 m y 100 m.) dentro del Seno Skyring son lentas, con un promedio entre 5 cm/s - 2 cm/s y máximas velocidades que alcanzan 20 cm/s.

Los forzantes de circulación relevantes en este sistema son: el ingreso de agua dulce y el viento. Ambos, presentan un régimen estival, en donde, las mayores descargas de agua dulce son por deshielo glaciar en primavera/verano en el mismo periodo dominan viento de alta magnitud (del oeste) mientras que en invierno el ingreso de agua dulce disminuye o es totalmente limitada por las bajas temperaturas, donde se congelan ríos y cascadas. En este periodo domina; baja radiación, bajas temperaturas y baja magnitud del viento con algunos eventos de alta magnitud (viento del oeste). En eventos prolongados de bajas temperaturas (Menores a 0° C), se ha registrado hielo marino (durante el crucero oceanográfico desplegado en invierno de 2022).

Presenta una componente estacional relevante y alta energía espectral en la banda sinóptica, entre 2 y 8 días, esto se evidenció en diferentes variables, tales como: corrientes, nivel del mar, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en toda la columna de agua. Las características hidrográficas están controladas por el aporte de agua dulce y las limitaciones batimétricas, mientras que los resultados sugieren que el viento es el mayor responsable de la circulación en Seno Skyring, sin embargo, hay oscilaciones en la corriente que responden a frecuencias distintas a las que oscila el viento, lo que se podría relacionar a las interacciones del viento con la geometría de seno Skyring generando oscilaciones internas.

Bajo las condiciones antes detalladas, se implementó un sistema de modelación que incluyó: un modelo barotrópico de mareas, un modelo hidrológico para estimar los caudales de las descargas de agua dulce y un modelo meteorológico que proveyera no solamente el viento sino también, la presión atmosférica y los flujos de calor desde la atmósfera. Estos modelos suministraron la información de entrada para la inicialización del modelo hidrodinámico y que fue implementado para los años 2016 al 2018. La importancia de la implementación de un modelo hidrodinámico no solo radica en la información física que puede obtenerse a través de este, sino que es el modelo base para acoplar otro tipo de modelos, como aquellos para estimar el intercambio de agua a través de métricas como la edad de agua, utilizada en este estudio, pero también de modelos biogeoquímicos más complejos o de conectividad basados en dispersiones de partículas.

Las condiciones de viento modeladas por el modelo atmosférico WRF son consistentes con otras fuentes de información que fueron utilizadas para medir su desempeño, tales como una estación meteorológica ubicada en el sector este del seno y el producto grillado global CCMP. Ambas bases de datos (WRF y CCMP) se encuentran en fase y presentaron una alta relación lineal, bajo error en magnitud y congruencia en la dirección de viento según las observaciones, lo que revela la capacidad del modelo WRF de reproducir el forzamiento del viento en el dominio de seno Skyring. El viento simulado por WRF entre 2015 y 2017 revela un patrón estacional con un marcado componente de viento que sopla desde el oeste y que se mantiene durante todo el año, mientras que su intensidad es mayor durante la primavera y se debilita hacia los meses de otoño.

Por otra parte, la información de descargas de agua dulce simuladas por el modelo VIC, muestra un adecuado ajuste con las observaciones fluviométricas de la DGA (r > 0.7). Las estimaciones revelan

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

un caudal medio acumulado de 138 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> para todo el sistema, muy por debajo, por ejemplo, a lo estimado en las cuencas del río Puelo (~645 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>) o Palena (~812 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>), ambos ríos con un importante aporte de agua dulce en la Patagonia. Los aportes de agua dulce en seno Skyring muestran un marcado ciclo anual con máximos que se prolongan desde noviembre hasta marzo de ~175 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, y mínimos durante la época de invierno que llegan a ~75 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> durante julio. La diferencia estacional entre verano (DEF) y primavera (SON) revela un patrón espacial que divide al sistema en dos fuentes de variabilidad. Al oeste del sistema la señal de caudales es dominada principalmente por la descarga ocurrida durante los meses de verano, resaltando la importancia del derretimiento de las masas de hielo presentes en esta zona del dominio y por su parte al este de 72.5°O, la estacionalidad se vuelva más importante durante primavera, lo cual sugiere un mayor dominio de la precipitación sobre la descarga en esta zona.

La variabilidad interanual de las descargas de agua dulce en seno Skyring muestra una tendencia positiva en los caudales de 0.52 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>año<sup>-1</sup>. La señal interanual muestra una variabilidad con una desviación estándar de 14 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, con un máximo de descarga durante el año 2014 con un caudal por sobre los 160 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> y mínimos ocurridos durante los años 1992, 2002 y 2016 por debajo de los 120 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Cabe señalar que el modelo hidrodinámico simuló el año 2016 al 2018 que coincide con un periodo de mínimos caudales (periodo 1980-2018), esto sugiere un impacto, tanto en las características hidrográficas del seno durante estos años y también en su capacidad renovación, este punto es retomado más adelante.

Otro aspecto importante de dilucidar es si la propagación de la onda de marea es importante al interior del seno Skyring y si el modelo barotrópico logra reproducir las principales características de esta. La marea ingresa al sistema Skyring por el norte a través del canal Gajardo y por el sur, por el canal Jerónimo, seno Otway y finalmente canal Fitzroy. Dentro de Skyring se evidenció una disipación de la marea, lo cual se observó en la disminución de la amplitud de los constituyentes mareales. Esta disipación de marea puede responder a la alta variabilidad de la batimetría en la zona, la reducción de la longitud transversal del canal Gajardo y Fitzroy y lo más relevante es la presencia de constricciones en ambos canales. La constricción de Gajardo alcanza una profundidad < 5 m y Fitzroy ~10 m, por lo que esta característica batimétrica restringe y disipa el paso de la onda de marea. Comparativamente la amplitud de M<sub>2</sub> en el mareógrafo y modelo en el extremo sur del canal Fitzroy (punto previo a la constricción) registró una amplitud 0.45 m mayor a la amplitud que registró el mareógrafo y modelo en el centro norte del canal Gajardo (punto posterior a la constricción) y 0.45 m mayor que dentro del Seno Skyring. Esto indica que la marea no es forzante relevante en la dinámica al interior del seno Skyring, pero sí puede serlo como agente en el intercambio de agua con los canales de conexión Gajardo y Fitzroy. En general, la marea es un forzante importante en la Patagonia chilena, que en algunos casos explica sobre el 80% de la variabilidad de la corriente total y el constituyente que explica mayor varianza es M<sub>2</sub>. En la Patagonia Norte la amplitud de M<sub>2</sub> alcanza entre 1 y 1.8 m entre Guafo y Reloncaví (Aiken, 2008) y dentro de Skyring M<sub>2</sub> alcanza una amplitud cercana a 0.02 m. Lo que apunta a la importancia de los umbrales topográficos en el sistema Skyring.

El modelo hidrodinámico en el seno Skyring logra reproducir los principales atributos de este sistema marino. Por una parte, la hidrografía representada por los campos de temperatura y salinidad es bien definida, tanto espacial como temporalmente. Esto considerando que las observaciones de estaciones de CTD se realizaron en un período distinto de modelación y que la simulación fue realizada para años con un déficit importante en descarga de agua dulce (2016-2017). Por otra parte, los principales modos de variabilidad de la corriente son coincidentes entre el modelo y un perfilador de corrientes desplegado en el año 2022, años distintos, pero similar estructura vertical. El

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

análisis mediante EOF reveló que el modo 1 explico la mayor parte de la variabilidad, es coincidente con la señal del viento zonal, esto revela al viento como principal agente en la circulación en seno Skyring. La circulación superficial sigue un patrón de corrientes a lo largo del año en dirección oesteeste, de la misma forma en que se presenta la estructura espacial del viento, así durante la primavera al registrarse la mayor energía del viento, también se produce la respuesta de las corrientes a incrementar su intensidad.

El estudio de la conectividad muestra que a lo largo de las diferentes simulaciones y escenarios, y salvo para el caso de partículas de Caligus rogercresseyi y dispersión downstream (Figuras 44-45) y debido a las consideraciones metodológicas impuestas bajo el enfoque bio-sanitario propuesto, el patrón general para los demás 3 escenarios (Figuras 40-41, 42-43 y 46-47) es que las mayores conectividades desde o hacia ACS (según el modo de dispersión downstream o upstream, respectivamente) se produce con zonas libres de centros de cultivo salmonícolas. Esto se debe a que los 36 centros de cultivo concesionados del seno Skyring ocupan 28.8 km2 (considerando un tamaño igual entre todos de radio 0.5 km), lo que supone apenas el 2% del total de la superficie del seno (estimada en 1583 km2), lo que implica que las partículas al momento de abandonar los límites de su centro fuente ya ingresen a estas zonas libres y por ello las conectividades con estas áreas son tan altas por encima del 99%. Tras la conectividad con zonas libres le siguen en importancia las auto-conectividades, la mayor de todas y que se repite en 3 de 4 escenarios la de la ACS 50a, la cual a su vez también es la ACS que más proporción de partículas intercambia con otra ACS, emitiendo y recíprocamente recibiendo también un mayor número de partículas de la ACS 49a. Los valores de estas conectividades se reducen en algunos casos a menos de la mitad y en otros hasta 20 veces menos para el caso de partículas de tipo Caligus rogercresseyi (Figuras 44-45 y 46-47) debido a altas tasas de mortalidad. Esta mortalidad es debida a la intolerancia y mortalidad asociada de Caligus rogercresseyi a las bajas salinidades (Figura 10; Bravo et al., 2003), como las presentes en seno Skyring (persistentemente por debajo de 20 PSU a lo largo del periodo de simulación), que lleva a que la vida promedio de las partículas de Caligus rogercresseyi sea de apenas 1.7 días, en comparación con los 30 días que dura la deriva de las partículas de tipo derivador pasivo. A ello hay que añadir que las bajas temperaturas (en promedio por debajo de 11°C) provoca que la maduración de Caligus rogercresseyi de la primera fase planctónica de nauplio a la segunda y última fase planctónica de copepodito se demora hasta 7 días (Figura 9; González y Carvajal, 2003), tiempo 4 veces superior a los 1.7 días de expectativa de vida y deriva de este tipo de partículas. Esto significa que en el caso de partículas de Caligus rogercresseyi y dispersión downstream (Figuras 44-45), donde por consideraciones metodológicas bio-sanitarias solo se computan las conectividades durante la segunda fase de vida, la fase infestiva de copepodito, apenas exista conectividad alguna. La variabilidad interanual entre los años 2016, 2017 y 2018 muestra que no hay diferencias significativas para ninguno de los 4 escenarios (Figuras 41, 43, 45 y 47), manteniéndose las anomalías anuales entre ACS por debajo del 1% en el 100% de las 192 posibles conectividades entre ACS de todos los escenarios (4 ACS fuente x 4 ACS sumidero x 4 escenarios x 3 años).

En el caso de las mediciones de las propiedades físico-químicas en la columna de agua dentro del Mar interior de Chiloé y Aysén (cruceros Patagonia Norte), se debe señalar que el estudio de las características hidrográficas y las masas de agua en la esta nueva etapa del crucero Patagonia norte arrojó la presencia de las aguas saladas y densas en el fiordo Puyuhuapi, destacando la presencia de la masa de agua ESSW. Su posición coincidió con las aguas de menor contenido de oxígeno disuelto con valores menores a 2 ml/L entrando en la categoría de hipoxia, como ha sido reportado en trabajos anteriores (Silva y Vargas, 2014, Schneider et al., 2014; Pérez-Santos et al., 2018; Pinilla

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

et al., 2020). Las aguas con menor contenido de oxígeno se registraron en la zona profunda y de la cabeza del fiordo Quitralco, con registros muy cerca de la anoxia (Estación 17= 0.12 ml/L y 1.8 % de saturación). Sin embargo, durante agosto 2022 se observó la ventilación casi total de fiordo, reduciéndose la hipoxia y las aguas de bajo oxígeno. Este evento estuvo asociado a la llegada de aguas más frías y densas por la capa sub-superficial. A pesar de los lugares con hipoxia registrada y descrita anteriormente, se observaron zonas donde el oxígeno disuelto fue bajo, entre el umbral de los 2-3.5 ml/L o el equivalente a la saturación (30 60%), respectivamente. Estas regiones fueron: la cabecera del fiordo Comau, el fiordo y seno Reloncaví. Desde el fiordo Aysén y hasta la Laguna San Rafael se registraron nuevamente las aguas menos densas dominando las aguas estuarinas con salinidades menores a 31, siendo la Laguna donde se observaron los mínimos. El resultado de los nutrientes inorgánicos mostro patrones similares con las etapas anteriores. Sin embargo, es importante destacar que la magnitud de los nitratos fue baja en comparación con los registros históricos.

La caracterización oceanográfica (propiedades físico-químicas) en la columna de agua, de las ACS (agrupaciones de concesiones de salmónidos), tomando como delimitación los polígonos de cada área específica y georreferenciada. Puede ser visualizada por cualquier usuario que ingrese a la plataforma chonos (https://chonos.ifop.cl/subpesca/index/), desarrollada por el grupo de oceanografía en el centro tecnológico de IFOP en Castro. La visualización se realiza de manera interactiva, ingresando a la interfaz gráfica, donde se accede a cada ACS mediante un mapa georreferenciando, donde en cada ACS aparecen las estaciones medidas, representadas mediante puntos amarillos. Un aparte de la información aparece en forma de tabla de resumen, con alore estadísticos básicos (mínimo, máximo y promedio), la tabla resumen indica 2 estratos diferentes, uno superior que corresponde a la capa más próxima a la superficial, la cual es determinada por el cursor del mouse posicionándose en un perfil individual o varios perfiles de una variable determinada. La segunda capa, indica valores promedio, considerando los generados por debajo de la capa superior y hasta la profundidad de fondo. Actualmente la interfaz, se encuentra en su primera versión, donde se pueden visualizar mediciones de CTDO (salinidad, temperatura, oxígeno disuelto); nutrientes (nitrato, fosfato, silicato) y clorofila total. Es importante señalar que, en esta etapa del estudio, se incluyó la información generada en los diferentes estudios ejecutados por IFOP en 2012, 2013, 2021, y 2022, pero sólo para la zona de seno Skyring y alrededores, polígonos de las ACS, 49b, 50a, 50b, 51, 52 y 53. Si bien la información, durante esta etapa, estuvo focalizada en la zona de seno Skyring, conforme avance el desarrollo de esta herramienta en el tiempo, se irá incluyendo información hidrográfica histórica generada precedentemente, con la finalidad de cubrir todas las ACS incluyendo las correspondientes al mar interior de Chiloé y Mar interior de Aysén. Uno de los aspectos más importantes de la interfaz, es que, si bien se encuentra en la primera versión, El diseño permite una navegación intuitiva.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

# 7. CONCLUSIONES

- Seno Skyring, es un sistema con una conexión oceanográfica limitada, esto se reflejó en los bajos valores de salinidad y nutrientes que fueron detectados al interior del sistema. Comparando el sistema oceánico adyacente (canal Gajardo) y la conexión con el seno Otway mediante el canal Fitz-Roy.
- Dentro de Seno Skyring fue posible identificar un cuerpo de agua estuarino en diferentes grados de mezcla. La estructura halina encontrada en la columna de agua permitió identificar dos estratos, un estrato superficial de mayor variabilidad y un estrato profundo más homogéneo y elevados en contenido de nutrientes: nitrato, fosfato y silicato, lo que evidencia una estructura característica estuarina.
- El oxígeno disuelto, presentó la mayor concentración en superficie en todo el periodo y área de estudio, donde se observó la columna de agua estratificada con mínimos en profundidad. Las series de tiempo indicaron que la dinámica del disuelto en las capas superficiales tiene una variabilidad estacional, los mayores valores de oxígeno disuelto, estuvieron relacionados a mayor descarga de agua dulce, menor salinidad y menor temperatura.
- Las propiedades físico-químicas del de la columna de agua indicaron una marcada variabilidad estacional (variación intra-anual). Los niveles de nutrientes dentro del seno Skyring, son menores a los niveles de la zona adyacente (seno Otway).
- La principal fuente de nutrientes al sistema (nitrógeno y fósforo), se produciría por flujos advectivos, aunque estos son limitados. Los flujos por carga de ríos y lluvia fueron poco significativos.
- Las descargas totales de agua dulce que desembocan en seno Skyring alcanzan un valor de 138 m<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>, siendo relativamente bajas respectos de otros sistemas marinos en la Patagonia, por otro lado, el modelo hidrológico muestra una tendencia al alza para el periodo 1980-2018, sin embargo, el año 2016, presentó anomalías negativas en sus caudales.
- La energía de la onda de marea es disipada en por los umbrales batimétricos al ingresar al seno Skyring, donde su amplitud disminuye, por tanto, no es forzante relevante en la dinámica al interior del seno Skyring, pero sí puede serlo como agente en el intercambio de agua con los canales de conexión Gajardo y Fitzroy.
- Las mediciones de corriente no registraron la señal de marea significativamente, la varianza explicada por la banda semidiurna y diurna en la corriente es < 6% y < 2% respectivamente, la banda sinóptica (2 -16 días) explicó el 50% (Gajardo) y 24% (Isla Escarpada) de la varianza total de la corriente. Las corrientes (entre 7 m y 100 m.) dentro del Seno Skyring son lentas, con un promedio entre 5 cm/s 2 cm/s y máximas velocidades que alcanzan 20 cm/s.</li>
- El viento simulado por WRF entre 2015 y 2017 reveló un patrón estacional con un marcado componente de viento que sopla desde el oeste y que se mantiene durante todo el año,

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

mientras que su intensidad es mayor durante la primavera y se debilita hacia los meses de otoño.

- La circulación superficial sigue un patrón de corrientes a lo largo del año en dirección oesteeste, de la misma forma en que se presenta la estructura espacial del viento, así durante la primavera al registrarse la mayor energía del viento, también se produce la respuesta de las corrientes a incrementar su intensidad.
- La conectividad entre las 4 ACS del seno Skyring durante el periodo 2016-2018 es bastante homogénea, donde las diferencias aparte de las propias debidas a las consideraciones metodológicas entre cada escenario, muestra una variabilidad interanual para los 3 años de simulación muy limitada y menor al 1% en todas las posibles conectividades entre ACS.
- La información proveniente del modelo hidrodinámico, como: corrientes, temperatura, salinidad y edad de agua fueron montadas en la herramienta ATLAS en la plataforma CHONOS.
- La caracterización oceanográfica (propiedades físico-químicas) en la columna de agua, de las ACS (agrupaciones de concesiones de salmónidos), tomando como delimitación los polígonos de cada área específica y georreferenciada. Puede ser visualizada por cualquier usuario que ingrese a la plataforma chonos.
- Se consolida el crucero Patagonia Norte, como una actividad permanente de monitoreo de las propiedades físicas, químicas y biológicas, dentro del mar interior de Chiloé y Aysén.
- Fiordo Quitralco se sigue manteniendo con zonas de hipoxia severa, condición que se mantiene a largo de las diferentes mediciones.

### 8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Adams, T. P., Proud, R., & Black, K. D. (2015). Connected networks of sea lice populations: dynamics and implications for control. Aquaculture Environment Interactions, 6(3), 273-284.
- Andrello, M., Mouillot, D., Beuvier, J., Albouy, C., Thuiller, W., & Manel, S. (2013). Low connectivity between Mediterranean marine protected areas: a biophysical modeling approach for the dusky grouper Epinephelus marginatus. PLoS One, 8(7), e68564.
- Ardenghi, N., Mulch, A., Pross, J., Y Niedermeyer, E. M. 2017. Leafwax n-alkaneextraction: Anoptimisedprocedure. Organicgeochemistry, 113, 283-292.
- Arriagada, G., Valenzuela-Muñoz, V., Arriagada, A. M., Núñez-Acuña, P., Brossard, M., Montecino, K., ... & Gallardo-Escárate, C. (2019). First report of the sea louse Caligus rogercresseyi found in farmed Atlantic salmon in the Magallanes region, Chile. Aquaculture, 512, 734386.
- Araya-Vergara, J. 1996. 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.
- Astorga, M. I., & Silva, N. (2005). Textura, materia orgánica, carbono orgánico y nitrógeno total, en sedimentos marinos superficiales de la X región. Crucero Cimar, 10, 203-216.
- Bendat, J. and A. Piersol. 1986. Random Data: Analysis and Measurement Procedures. John Wiley: pp. 566.
- Bendtsen, J., J. Mortensen, and S.Rysgaard, 2014. Seasonal surface layer dynamics and sensitivity to runoff in a high Arctic, J. Geophys. Res.Oceans, 119, 6461–6478.
- Berner, R. A. (1981). A new geochemical classification of sedimentary environments. Journal of Sedimentary Research, 51(2), 359-365.
- Boghen, Andrew D. (ed.), 1995. Cold-Water Aquaculture in Atlantic Canada. Second Edition. (Moncton): The Canadian Institute for Research on Regional Development, (1995).

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

- 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. 2004. Secrets of the tide. Horwood, Chichester, 212pp.
- Boynton, W. R., and W. M. Kemp, 1985. Regeneration and oxygen consumption by sediments along an estuarine salinity gradient,Mar. Ecol. Prog. Ser.,23, 45–55
- Bravo, S. (2003). Sea lice in Chilean salmon farms. BULLETIN-EUROPEAN ASSOCIATION OF FISH PATHOLOGISTS, 23(4), 197-200.
- Bravo, S., Pozo, V., & Silva, M. T. (2008). The tolerance of Caligus rogercresseyi to salinity reduced in southern Chile. Bulletin of the European Association of Fish Pathologists, 28(5), 198-206.
- Bravo, S., Sevatdal, S., & Horsberg, T. E. (2010). Sensitivity assessment in the progeny of Caligus rogercresseyi to emamectin benzoate. Bulletin of the European Association of Fish Pathologists, 30(3), 99-105.
- Bricknell, I. R., Dalesman, S. J., O'Shea, B., Pert, C. C., & Luntz, A. J. M. (2006). Effect of environmental salinity on sea lice Lepeophtheirus salmonis settlement success. Diseases of aquatic organisms, 71(3), 201-212.
- Burka, J. F., Fast, M. D., & Revie, C. W. (2012). 22 Lepeophtheirus salmonis and Caligus rogercresseyi. Fish parasites, 360-380.
- Buschmann, A. H., Riquelme, V. A., Hernández-González, M. A., Varela, D., Jiménez, E., Henríquez, L. A., . . . Filúm, L. (2006). A review of the impacts of salmonid farming on marine coastal ecosystems in the southeast Pacific. ICES Journal of Marine Science, 63, 1338-1345.
- Buschmann, A.H., F. Cabello, K. Young, J. Carvajal, D. A. Varela & L. Henríquez. 2009. Salmon aquaculture and coastal ecosystem health in Chile: Analysis of regulations, environmental impacts and bioremediation systems. Coastal and Ocean Management, 52: 243-249.
- Buschman A, L Farias, F Tapia D Varela & M Vásquez. 2016. Informe final Comision Marea Roja. 1-4. 53 pp. Disponible en: <u>http://www.subpesca.cl/portal/616/articles-</u> <u>95146\_documento.pdf</u>
- 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 Cameron, W. & D. Pritchard. 1963. Estuaries. En M.H. Hill (ed). The Sea. Vol 2. New York: 306-324.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

- Condie, S. A., Waring, J., Mansbridge, J. V., & Cahill, M. L. (2005). Marine connectivity patterns around the Australian continent. Environmental modelling & software, 20(9), 1149-1157.
- Calvete, C., & Sobarzo, M. 2011. Quantification of the surface brackish water layer and frontal zones in southern Chilean fjords between Boca del Guafo (43 30' S) and Estero Elefante (46 30' S). Continental Shelf Research, 31(3-4), 162-171
- Carrasco C & N Silva. 2010. 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.
- Clarke KR & RM Warwick. 2001. Changes in marine communities: An approach to statistical analysis and interpretation, 144 pp. PRIMER-E,Plymouth.
- Daneri, G., Montero, P., Lizárraga, L., Torres, R., Iriarte, J.L., Jacob, B., González, H.E., Tapia, F.J., 2012. Primary productivity and heterotrophic activity in an enclosedmarine area of central Patagonia (Puyuhuapi channel; 44S, 73W).Biogeosciences Discuss 9, 5929– 5968.
- 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.
- Delhez, E.J.M., 2006. Transient residence and exposure times. Ocean Sci. 2, 1–9. doi.org/10.5194/os-2-1-2006.
- Diaz, R. J. (2001). Overview of hypoxia around the world, J. Environ. Qual., 30, 275–281.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

- Ekau W., H. Auel, H.-O.Portner and D. Gilbert (2010).Impacts of hypoxia on the structure and processes in pelagic communities (zooplankton, macro-invertebrates and fish).Biogeosciences, 7, 1669–1699.
- Emery, W. J. 2001. Water types and water masses. Encyclopedia of ocean science.
- DHI, 2016. 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. and R. E. Thomson. 1998. Data Analysis Methods in Physical Oceanography. Pergamon Press: pp. 634.
- Flamarique, I. N., Browman, H. I., Bélanger, M., & Boxaspen, K. (2000). Ontogenetic changes in visual sensitivity of the parasitic salmon louse Lepeophtheirus salmonis. Journal of Experimental Biology, 203(11), 1649-1657.
- French, R. H., Cooper, J. J., & Vigg, S. (1982). Secchi Disc Relationships 1. JAWRA Journal of the American Water Resources Association, 18(1), 121-123.
- González, L., & Carvajal, J. (2003). Life cycle of Caligus rogercresseyi,(Copepoda: Caligidae) parasite of Chilean reared salmonids. Aquaculture, 220(1-4), 101-117.
- Gregoire, M., Oguz, T., 2003. Modeling Biogeochemical Processes in Marine Ecosystems. UNESCO – EOLSS. Sample Chapters. Oceanography – Vol.III.
- Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., ... & DeAngelis, D. L. (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. Ecological modelling, 198(1-2), 115-126.
- 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.
- 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. Disponible en:

http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci\_arttext&pid=S0718-68512014000100013#footnote-33032-2.

- Hansen, P. K., Ervik, A., Schaanning, M., Johannessen, P., Aure, J., Jahnsen, T., & Stigebrandt, A. (2001).Regulating the local environmental impact of intensive, marine fish farming: II.The monitoring programme of the MOM system (Modelling–Ongrowing fish farms– Monitoring). Aquaculture, 194(1-2), 75-92.
- Hargrave, G.A. Phillips, L.I. Doucette, M.J. White, T.G. Milligan, D.J. Wildish and R.E.Cranston. 1997. Assessingbenthicimpacts of organicenrichmentfrommarineaquaculture. Water, Air and SoilPoll. 99: 641-650.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

- Hargrave, B.T, M. Holmer, C.P. Newcombe. 2008. Towards a classification of organicenrichment in marine sedimentsbasedonbiogeochemicalindicators. MarinePollutionBulletin, Volume 56, Issue 5, May 2008, Pages 810-824.
- Hernández-Vaca F., Schneider W., Garcés-Vargas J., 2017. Contribution of Ekman pumping to the changes in properties and volume of the Eastern South Pacific Intermediate Water. Gayana 81(2): 52-63.
- Hormazábal S, Shaffer G., Silva N, Navarro E. (2006). The Perú-Chile undercurrent and the oxygen minimum zone variability off central Chile.Gayana 70: 37-45.Haralambidou, K., G. Sylaios & V.A. Tsihrintzis. 2010. Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth. Estuar. Coast. Shelf Sci., 90(4): 174-184.Kalnay, E., S.J. Lord, and R.D. McPherson, 1998: Maturity of operational numerical weather prediction: medium range. Bull. Amer. Meteor. Soc., 79, 2753-2759
- Heuch, P. A., Parsons, A., & Boxaspen, K. (1995). Diel vertical migration: a possible host-finding mechanism in salmon louse (Lepeophtheirus salmonis) copepodids?. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 52(4), 681-689.
- Heuch, P. A., & Karlsen, E. (1997). Detection of infrasonic water oscillations by copepodids of Lepeophtheirus salmonis (Copepoda Caligida). Journal of Plankton Research, 19(6), 735-747.
- 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., and J. Shen (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
- Iriarte J.L, González H.E & Nahuelhal L. 2010. Patagonian Fjord ecosystem in southern Chile as a highly vulnerable region: problems and needs. Ambio 39, 436–466.
- Jacob B, Quiñones, R.A., Iriarte, J.L., Daneri, G., Tapia, F., Montero, P & Sobarzo, M. 2014. Springtime size-fractionated primary production across hydrographic and PAR-light gradients in Chilean Patagonia (41–50S). Progress in Oceanography.
- Jolliffe, I. T. & Stephenson, D. B., 2003: Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science. John Wiley and Sons.
- Kamga, A., S. Fongang, & A Viltard, 2000: Systematic error of ECMWF operational model over tropical Africa. Mon. Wea. Rev., 128, 1949-1959.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

- 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. & B. Bang. 2013. Seasonal variability of salinity and circulation in a silled estuarine fjord: a numerical model study. Coni. Shelf Res. 71:109-126.
- Koutitonsky, V. G., T. Guyondet, A. St-Hilaire, S. C. Courtenay, and A. Bohgen (2004), Water renewal estimates for aquaculture developments in the Richibucto Estuary, Canada, Estuaries, 27(5), 839–850.
- Kouzayha A, Rabaa AR, Al Iskandarani M, Beh D, Budzinski H, Jaber F. 2012. Multiresiduemethodfordetermination of 67 pesticides in watersamplesusingsolidphaseextractionwithcentrifugation and gas chromatography–massspectrometry.Am J Anal Chem 3:257–265.
- Lannan, C. N., & Fryer, J. L. (1994). Extracellular survival of Piscirickettsia salmonis. Journal of Fish Diseases, 17(5), 545-548.
- Leth, O, Gary Shaffer, Osvaldo Ulloa (2004). Hydrography of the eastern South Pacific Ocean: results from the Sonne 102 cruise, May–June 1995. Deep-Sea Research II 51, 2349–2369.
- Lepe-Lopez, M., Escobar-Dodero, J., Zimin-Veselkoff, N., Azat, C., & Mardones, F. O. (2021). Assessing the Present and Future Habitat Suitability of Caligus rogercresseyi (Boxshall and Bravo, 2000) for Salmon Farming in Southern Chile. Frontiers in veterinary science, 7, 1248.
- 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
- 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.
- Oliveira, A., Baptista, A.M., 1997. Diagnostic modeling of residence times in estuaries. Water Resour. Res. 33 (8), 1935–1946.
- Paris, C. B., Helgers, J., Van Sebille, E., & Srinivasan, A. (2013). Connectivity Modeling System: A probabilistic modeling tool for the multi-scale tracking of biotic and abiotic variability in the ocean. Environmental Modelling & Software, 42, 47-54.
- Pawlowicz, R., B. Beardsley and S. Lentz. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in matlab using t\_tide. Computers and Geosciences, 28: 929 -937.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

- Pantoja, S., Iriarte, J.L & Daneri, G., 2011. Oceanography of the Chilean Patagonia. Continental Shelf Research 31, 149-153.
- Penven, P., V. Echevin, J. Pasapera, F. Colas, and J. Tam. (2005). Average circulation, seasonal cycle, and mesoscale dynamics of the Peru Current System: A modeling approach, J. Geophys. Res., 110, C10021, doi:10.1029/2005JC002945.
- Pérez-Santos, I., Garcés-Vargas J., Schneider W., Ross L., Parra S. & Valle-Levinson A. 2014. Double-diffusive layering and mixing in Patagonia fjords, Progress in Oceanography, 129, 35-49.
- Pérez-Santos, Leonardo Castro, Nicolás Mayorga, Lauren Ross, Luis Cubillos, Mariano Gutiérrez, Edwin Niklitschek, Eduardo Escalona, Nicolás Alegría and Giovanni Daneri. 2018. Turbulence and hypoxia contribute to dense biological scattering layers in Patagonian Fjord System. Ocean Science, 14, 1185-1206. <u>https://doi.org/10.5194/os- 14-1185-2018</u>.
- Pinilla E.,Soto G, Arriagada M y Ruiz C. 2013. Caracterización y modelación de patrones de circulación marina en la XII Región de Magallanes. Informe final. Convenio: Asesoría Integral Para la Toma de Decisiones en Pesca y Acuicultura. 80-140 pp.
- Pinilla, E., 2018. Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la Patagonia, Etapa I. (Informe final). Valparaíso: Documento técnico IFOP, disponible: https://ifop-primotc.hosted.exlibrisgroup.com/primo-explore/search?query=any,contains,56IFOP\_Aleph&tab=56ifop\_tab&search\_scope=56I FOP&vid=56IFOP&facet=local2,include,informes%20tecnicos&lang=es\_ES&offset=0
- Pinilla E, Soto G, Soto C, Venegas O, Salas P, Reche P, et al. Determinación de las escalas de intercambio de agua en fiordos y canales de la Patagonia sur, Etapa II. Instituto de Fomento Pesquero - Subsecretaría de Economía 2019. Documento técnico IFOP, disponible: https://ifop-primotc.hosted.exlibrisgroup.com/primoexplore/search?query=any,contains,56IFOP\_Aleph&tab=56ifop\_tab&search\_scope=56I FOP&vid=56IFOP&facet=local2,include,informes%20tecnicos&lang=es\_ES&offset=0
- Pinilla E.,Soto G, Arriagada M y Ruiz C. 2013. Caracterización y modelación de patrones de circulación marina en la XII Región de Magallanes. Informe final. Convenio: Asesoría Integral Para la Toma de Decisiones en Pesca y Acuicultura. 80-140 pp. Documento técnico IFOP, disponible: https://ifop-primotc.hosted.exlibrisgroup.com/primoexplore/search?query=any,contains,56IFOP\_Aleph&tab=56ifop\_tab&search\_scope=56I FOP&vid=56IFOP&facet=local2,include,informes%20tecnicos&lang=es\_ES&offset=0
- RES.EXE. N° 3612. 2009. Ministerio de Economía fomento y Reconstrucción Subsecretaria de Pesca. Aprueba resolución que fija las metodologías para elaborar la caracterización preliminar de sitio (CPS) y la información ambiental (INFA).
- 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.

<sup>126</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

- Schneider, W., Pérez-Santos, I., Ross, L., Bravo, L., Seguel, R.,and Hernández, F.: On the hydrography of Puyuhuapi Channel, Chilean Patagonia, Prog. Oceanogr., 129, 8–18, 2014
- 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.
- Salcedo-Castro J, R Cruz-Gómez, A.W Ratsimandresy & da Silva, N.P. 2017. Residual circulation in Aysén Fjord, Chile, during spring conditions. Revista de Biologia Marina y Oceanografia. 52. 353-359.
- Schneider, W., Perez-Santo. I, Ross L Bravo L, Seguel T & Hernandez Freddy. 2014. On the hydrography of Puyuhuapi Channel, Chilean Patagonia. Prog.Oceanogr. 129: 8-18.
- Sievers, A.H. & Silva, N. 2008. Water masses and circulation in austral Chilean channels and fjords, in: Silva, N., Palma, S. (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, Chile, pp. 53-58. Book on line at http://www.cona.cl/.
- Sievers, H. A., C. Calvete & N. Silva. 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.
- Silva, N., C. Calvete & H. Sievers 1997. Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero Cimar Fiordo 1). Cienc. Tecnol. Mar, 20: 23 - 106.
- Silva, N., C. Calvete M. & H. A. Sievers 1998. Masas de agua y circulación general para algunos canales australes entre Puerto Montt y laguna San Rafael, Chile (Crucero CIMAR Fiordo 1). Cienc. Tecnol. Mar, 21: 17-48.
- Silva N & Palma. S. 2006. El programa CIMAR en los canales y fiordos australes. Comité Oceanográfico Nacional - Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 11-15, 2006. Disponible en: <u>http://www.cona.cl/revista/spanish/1-1%20Introduccion.pdf</u>
- Silva N & D Guzmán. 2006. Condiciones oceanográficas físicas y químicas, entre boca del Guafo y fiordo Aysén. (Crucero Cimar 7 Fiordos). Ciencia y Tecnología del Mar 29(1): 25-44.
- Silva N &D Guerra. 2008. Distribución de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes en el canal Pulluche-Chacabuco, Chile. (Crucero CIMAR fiordo 9). Ciencia y Tecnología del Mar 31(2): 29-43.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

- 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, C.A., 2014. Hypoxia in Chilean Patagonian Fjords. Progress in Oceanography 129, 62-74.
- Soto G, E Pinilla, P Reche, C Soto & M Arriagada. 2018. Modelación de Alta Resolución Aplicada al Transporte Hidrodinámico, al interior del Mar Interior de Chiloé, X Región de Los Lagos. Informe técnico Instituto de Fomento Pesquero. Pp 89-100. Documento técnico IFOP, disponible: https://ifop-primotc.hosted.exlibrisgroup.com/primoexplore/search?query=any,contains,56IFOP\_Aleph&tab=56ifop\_tab&search\_scope=56I FOP&vid=56IFOP&facet=local2,include,informes%20tecnicos&lang=es\_ES&offset=0
- Soto G, E Pinilla, P Reche, C Soto, J Cortés. 2019. Modelación de Alta Resolución Aplicada al Transporte Hidrodinámico, en la región de Aysén. Pp 80-90. Documento técnico IFOP, disponible: https://ifop-primotc.hosted.exlibrisgroup.com/primoexplore/search?query=any,contains,56IFOP\_Aleph&tab=56ifop\_tab&search\_scope=56I FOP&vid=56IFOP&facet=local2,include,informes%20tecnicos&lang=es\_ES&offset=0 Ríos F, R Kilian & E Mutschke. 2016. Chlorophyll-a thin layers in the Magellan fjord system: The role of the water column stratification. Continental Shelf Research (124):1– 12
- Soto, P., Reche, P., Soto, C., Cortés, J., Venegas, O., San Martín, J., Valdebenito, P., Vergara, M., Avello, L., Arriagada, M., Pinilla Matamala, E. (2022). Informe final. Modelación de Alta Resolución Aplicada al Transporte Hidrodinámico y su Relación con Procesos químicosbiológicos en Seno Skyring y canales aledaños, región de Magallanes y Antártica chilena
- Rodrigo C. 2004. 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

- Stewart, R.H. 2008. Introduction to physical oceanography. Department of Oceanography, Texas A & M. University, College Station, Texas, 345 pp.
- Tapia, E., Monti, G., Rozas, M., Sandoval, A., Gaete, A., Bohle, H., & Bustos, P. (2013). Assessment of the in vitro survival of the Infectious Salmon Anaemia Virus (ISAV) under different water types and temperature. Bulletin of the European Association of Fish Pathologists, 33(1), 3-12.
- Valle-Levinson, A., Blanco, J. L., & Fierro, J. J. 2002. Observations of wind effects on exchange flows in a channel constriction of the Chilean Inland Sea. In 2nd Meeting on the Physical Oceanography of Sea Straits, Off. of Naval Res., Ville franche, France.

<sup>128</sup> 

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

- Valle-Levinson, A. 2010.Contemporary Issues in Estuarine Physics. Cambridge University Press.315 pp.
- Valle-Levinson A, M Cáceres & O Pizarro. 2014. Variations of tidally driven three-layer residual circulation in fjords. Ocean Dynamics. 64: 459-469.
- Valdenegro A & N Silva. 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.
- 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.
- Wentworth, C. K. (1922). A scale of grade and class terms for clastic sediments. The journal of geology, 30(5), 377-392.
- Wildish, D.J., H.M. Akagi, Ν. Hamilton and Β. Τ. Hargrave. 1999. A recommendedmethodformonitoringsediments to detectorganicenrichmentfrommariculture in theBayofFundy. Can. Rep. Tech. Fish.Aquat.Sci.2286, iii+31 p.
- Wildish, D.J., B.T. Hargrave and G. Pohle. 2001. Cost-effectivemonitoring of organicenrichmentresultingfromsalmonmariculture. ICES J. Mar. Sci. 58: 469-476.
- Wildish, D.J., B.T. Hargrave, C. MacLeod and C. Crawford. 2003. Detection of organicenrichmentnearfinfish net-pensbysedimentprofileimaging at SCUBAaccessibledepths. J. Exp.Mar. Biol. Ecol. 285-286: 403-413.
- Wildish, D., Akagi, H., Hargrave, B., Strain, P., 2004.Inter-laboratorycalibration of redoxpotential and total sulfidemeasurements in interfacial marine sediments and theimplicationsfororganicenrichmentassessment.CanadianTechnicalReportofFisheries and AquaticSciences. Fisheries and OceansCanada, St. Andrews, NB.,p. 24.
- Zhang, W.G., Wilkin, J.L., Schofield, O.M.E., 2010. Simulation of water age and residence time in New York Bight. J. Phys. Oceanogr. 40, 965–982.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

Zimmerman, J.T.F., 1976. Mixing and flushing of tidal embayments in the Western Dutch Wadden Sea. Part I: Distribution or salinity and calculation or mixing time scales. Neth. J. Sea Res.

# 9. Anexos

- 9.1 ANEXO I. Base de datos
- 9.2 ANEXO II. Resultados ADCP remolcado.
- 9.3 ANEXO III. Matrices de conectividad entre centros de cultivos.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

# 9.2 Anexo II: Mediciones in situ: ADCP remolcado (bottom tracking).

#### Metodología

**Objetivo específico 2.2.3** Estimar la circulación y conectividad hidrodinámica en una escala interanual a través de modelación numérica en seno Skyring.

#### Campañas oceanográficas

a) ADCP remolcado

Para la realización de este estudio, se efectuaron mediciones de corrientes en tiempo real, a través de un sistema de ADCP anclado y remolcado, en una sección transversal en la boca del estero Navarro en julio 2022 (**Figura 1**).

Se utilizo un perfilador acústico Doppler (ADCP) ROWE de 75 kHz. Este equipo fue configurado con la opción Bottom Tracking, que permitió medir las corrientes durante un track de navegación a tiempo real por 24 hrs. El equipo fue fijado en un costado de la embarcación, remolcado y orientado hacia el fondo marino, a una velocidad inferior a 5 nudos. Los tracks de navegación fueron posicionados mediante GPS Garmin 60cx. Los datos fueron almacenados inmediatamente en un archivo en el computador. Los intervalos de medición se realizaron cada 5 segundos, mientras que los ensambles son promediados cada 30 segundos. La fecha, duración, tamaños de celda, otras informaciones, junto con la fase lunar (Sicigia y Cuadratura) de cada experimento se detallan en las **Tablas I y II**. En este último caso se definió la fase de sicigia / cuadratura como 2 días antes y 2 días después del evento, en tanto los días exentos son llamados fase intermedia.

Las mediciones de ADCP remolcado fueron utilizadas para extraer la corriente residual, definida como aquella parte de la corriente que queda después de eliminar las señales de frecuencia semidiurna y diurna durante uno o más ciclos de marea (Tee, 1977). Para esto, los datos de compás del ADCP fueron corregidos siguiendo el método de Joyce (1989) y los datos erróneos de velocidades fueron eliminados siguiendo el procedimiento explicado por Valle-Levinson & Atkinson (1999). La señal semidiurna de la marea, M2 con un período de 12,42 horas, y la señal diurna, representada por la constituyente K1 con un período de 23,93 horas, fueron separadas de la señal submareal de los componentes del flujo observado usando un análisis de regresión sinusoidal de mínimos cuadrados (Lwiza *et al.,* 1991). La señal submareal representó el flujo residual o promedio de estas dos componentes armónicas para el período de mediciones. Finalmente, en caso de ser necesario, los datos de velocidad fueron rotados en la dirección de más alta variabilidad.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 1.** Ubicación geográfica del transecto de ADCP remolcado (en color azul), campaña de julio 2022.

				Ta	bla I				
	Deta	lle de me	ediciones d	е	ADCP Re	emolcado e	n julio 202	2.	
			ADCP Rer	nolcado c	ampañas seno	Skyring			
Sector	fecha	tiempo (hr)	repeticiones	tamaño celda (n	o intervalo n) mediciór	o longitud °W	/ latitud° S	longitud °W	latitud °S
estero Navarro	9/7/2022	24	81	4		5 -72.604	-52.7951	-72.5898	-52.808
		-	Fase lunar	Ta` en los	bla II meses de	medición.			
			luna nu	eva	cuarto	luna llena	cuar	to	

mes	luna nueva	cuarto	luna llena	cuarto	
		creciente		menguante	
julio/ 2022	28	7	13	20	

### Resultados

#### Campañas oceanográficas julio 2022. ADCP remolcado (figura 2).

La corriente residual de la componente U (este-oeste) en el estero Navarro presento un flujo dominante de entrada (U negativo) con intensidades cercana a los 30cm s<sup>-1</sup>. Mientras que se observan flujos de salidas (U positivo) adyacentes al fondo con magnitudes de 10 cm s<sup>-1</sup>.



Figura 2. flujo residual (componente U) en estero Navarro durante la campaña de seno Skyring en julio 2022.

# Campañas oceanográficas febrero y noviembre 2021.

En el proyecto ASIPA anterior (656-132) se efectuaron 2 mediciones de ADCP remolcado en estero Navarro (figura 3 tabla IV y Tabla V) tales resultados de muestran a continuación.

# ADCP remolcado (figura 4 y figura 5)

Las figuras 4 y 5 muestran el flujo residual de la corriente, representado por la componente U (componente de mayor variabilidad), obtenido a través de las mediciones con ADCP remolcado en un transecto transversal al estero Navarro, durante febrero y noviembre de 2021. En ellas se observó una configuración del flujo similar para ambos periodos, con dominancia de la corriente de salida, hacia el Seno Skyring. En febrero (**figura 4**) se observaron flujos de salida de menor intensidad en la parte media del canal (~20 cm s<sup>-1</sup>) y de mayor intensidad en los bordes (~ 50 cm s<sup>-1</sup>). Mientras que en noviembre (**figura 5**) los flujos fueron de menor intensidad con valores entre 10 cm s<sup>-1</sup> y 20 cm s<sup>-1</sup>.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.


**Figura 3.** Ubicación geográfica de transectos de ADCP remolcado en color azul campaña de febrero y en color rojo campaña de noviembre 2021.

Tabla IV											
Detalle de mediciones de ADCP Remolcado en febrero 2021 y noviembre 2021.								21.			
ADCP Remolcado campañas seno Skyring											
Sector	fecha	tiempo	repeticiones	tamaño	intervalo	longitud °W	latitud° S	longitud °W	latitud °S		
		(hr)		celda (m)	medición				1		
estero Navarro	16-02-2021	12	19	4	5	-72.5927	-52.7707	-72.5666	-52.8023		
estero Navarro	25-11-2021	24	77	1 v 4	5	-72.6049	-52.7955	-72.589	-52.8093		

Tabla V						
ase lunar en los meses de medición.						
	17					

mes	luna nueva	cuarto	luna llena	cuarto	
mes		creciente		menguante	
febrero	11	19	27	4	
noviembre	4	11	19	27	

135



Figura 4. flujo residual (componente U) en estero Navarro durante la campaña de seno Skyring en febrero 2021.



Figura 5. flujo residual (componente U) en estero Navarro durante la campaña de seno Skyring en noviembre 2021.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.

## Discusión y conclusión

Los resultados del flujo residual en el estero Navarro en febrero y noviembre del año 2021, mostraron corrientes residuales saliendo del estero, mientras que las mediciones realizadas en julio 2022 revelaron corrientes residuales ingresando al estero Navarro. Tal configuración del flujo estaría siendo modulada por los vientos zonales que soplan principalmente desde el oeste, y donde se han identificado eventos más intensos durante los meses de primavera y un debilitamiento en los meses de otoño, lo que coincidiría con los resultados encontrados.

Generalmente si se extrae la marea diurna y semidiurna a la corriente los valores residuales suelen ser bajos(<10cm s<sup>-1</sup>), pero en este caso los valores fueron más altos de lo esperado, lo que sugiere una disminuida influencia mareal, atribuida a la Disipación de la energía de la marea que ocurre al atravesar los canales aledaños al seno Skyring, como son el canal Fitzroy y canal Gajardo y donde otros Forzantes como el viento, el aporte de agua dulce y la batimetría, ejercen un rol más importante para modular la circulación del sector.

## Referencias Bibliográficas

Joyce, T. On in situ calibration of shipboard ADCPs. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* 6,

169-172, 1989.

Lwiza, K. M. M., D. G. Bowers, & J. H. Simpson. Residual and tidal flow at a tidal mixing front in the North Sea. *Continental Shelf Research*, 11(11), 13791395, 1991.

Tee, K. T. 1977. Tide-Induced Residual Current-Verification of a Numerical Model. Journal of Physical Oceanography, 7: 396-402

Valle–Levinson, A. & L. P. Atkinson. Spatial gradients in the flow over an estuarine channel. Estuaries, 22 (2A), 179-193, 1999.

## 9.3 ANEXO III: Matrices de conectividad entre centros de cultivos.



**Figura 1**: Conectividad año 2016 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo derivador y dispersión *downstream*.



**Figura 2**: Conectividad año 2017 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo derivador y dispersión *downstream*.



**Figura 3**: Conectividad año 2018 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo derivador y dispersión *downstream*.



**Figura 4**: Conectividad año 2016 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo derivador y dispersión *upstream*.



**Figura 5**: Conectividad año 2017 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo derivador y dispersión *upstream*.



**Figura 6**: Conectividad año 2018 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo derivador y dispersión *upstream*.



**Figura 7**: Conectividad año 2016 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo *Caligus rogercresseyi* y dispersión *downstream*.



**Figura 8**: Conectividad año 2017 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo *Caligus rogercresseyi* y dispersión *downstream*.

INFORME FINAL CONVENIO DESEMPEÑO 2021: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP MONITOREO Y MODELACIÓN DE LA VARIABILIDAD ESPACIAL Y TEMPORAL DE PROCESOS OCEANOGRÁFICOS EN CANALES Y FIORDOS AUSTRALES, 2021-2022.



**Figura 9**: Conectividad año 2018 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo *Caligus rogercresseyi* y dispersión *downstream*.



**Figura 10**: Conectividad año 2016 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo *Caligus rogercresseyi* y dispersión *upstream*.



**Figura 11**: Conectividad año 2017 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo *Caligus rogercresseyi* y dispersión *upstream*.



**Figura 12**: Conectividad año 2018 entre los centros de cultivo del seno Skyring, escenario partícula tipo *Caligus rogercresseyi* y dispersión *upstream*.



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

www.ifop.cl