

INFORME FINAL

Convenio de desempeño 2020: 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. SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / enero 2022



INFORME FINAL

Convenio de desempeño 2020: 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

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT /enero 2022

REQUIRENTE SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO

Subsecretaria de Economía y Empresas de Menor Tamaño Julio Pertuzé Salas

EJECUTOR INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Director Ejecutivo Luis Parot Donoso

Jefe División Investigación en Acuicultura Leonardo Guzmán Méndez

JEFE PROYECTO Gabriel Soto

AUTORES

Gabriel Soto Elías Pinilla Pablo Reche Camila Soto Javier Cortés

COLABORADORES

Patricio Salas Manuel Moya Miguel Vergara Luis Avello Marcela Arriaga Oliver Venegas

RESUMEN EJECUTIVO

Como parte del convenio de desempeño entre el Ministerio de Economía mediante la Subsecretaria de Economía y Empresas de Menor Tamaño e IFOP, se encuentra en ejecución el estudio: "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". Este estudio tiene como uno de sus objetivos fundamentales, determinar los patrones de circulación mediante la implementación de modelos de alta resolución y su relación con los procesos químicos-biológicos al interior del seno Skyring, dentro de la región de Magallanes y la Antártica Chilena. Para la realización de este estudio, se diseñó una serie de actividades, las que incluyen campañas oceanográficas para la instalación de equipos y mediciones de diferentes parámetros en la columna de agua, abarcando periodos diferentes. Además de la implementación del modelo hidrodinámico, se determinó la conectividad del sistema a nivel de ACS, desde una perspectiva sanitaria. La información generada en este estudio fue sistematizada para su visualización interactiva en la plataforma IFOP www.Chonos.cl.

Uno de los aspectos más complejo durante la ejecución del presente estudio, fue el retraso en las campañas oceanográficas, este retraso estuvo enmarcado en los problemas y restricciones de desplazamiento generadas producto del COVID, la región de Magallanes fue una de las primeras en entrar en una larga fase de cuarentenas, que se prolongaron desde agosto hasta diciembre de 2020. lo que significó en la practica una serie de restricciones en los desplazamientos he imposibilitó poder realizar las mediciones en esta región, según lo programado en carta Gantt.

Se implementó un sistema de modelación que incluyó: un modelo barotrópico de mareas, un modelo hidrológico para estimar los caudales diarios agua dulce y un modelo meteorológico que suministrara el forzamiento atmosférico, cada uno de estos componentes fue evaluado mediante diversas comparativas con datos observaciones. Estos modelos proporcionaron la información de entrada para inicialización del modelo hidrodinámico y que fue implementado, en esta etapa, para los años 2016 y 2017.

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 y el producto grillado global CCMP. El viento simulado por WRF entre 2015 y 2017 revela un patrón estacional con una marcada componente de viento que sopla desde el oeste persistentemente 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). De acuerdo a este modelo el promedio anual de todas las fuentes de agua dulce que ingresan al seno Skyring es de 138 m³s⁻¹, lo que representa valores por debajo de otras cuencas de la Patagonia, tales como: rio Puelo (~645 m³s⁻¹) o Palena (~812 m³s⁻¹). Los aportes de agua dulce en seno Skyring muestran un marcado ciclo anual con máximos que se prolongan desde noviembre hasta marzo, y mínimos durante la época de invierno. La variabilidad interanual de las descargas de agua dulce en seno Skyring muestra una tendencia positiva. La señal interanual muestra una variabilidad con un máximo de descarga durante el año 2014 con un caudal por sobre los 160 m³s⁻¹ y mínimos ocurridos durante los años 1992, 2002 y 2016 por debajo de los 120 m³s⁻¹. Cabe señalar que el modelo hidrodinámico

CONVENIO DESEMPEÑO 2020: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP. INFORME FINAL. 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

simuló el año 2016 y 2017 y que este coincide con un periodo de mínimos caudales (periodo 1980-2018).

Al interior de seno Skyring se evidenció una disminución de la amplitud de los constituyentes mareales. La disipación de la energía de la onda de marea responde a la presencia de umbrales topográficos en los canales de acceso a seno Skyring. Lo anterior indica que la marea no es forzante relevante en la dinámica al interior del seno Skyring, pero si puede serlo como agente en el intercambio de agua en los canales de conexión Gajardo y Fitzroy.

El modelo hidrodinámico en el seno Skyring logra reproducir los principales atributos de este sistema marino. Por una parte, la hidrografía representada en el modelo por los campos de temperatura y salinidad es consistente con las estaciones de CTD, tanto espacial como temporalmente. Esto considerando que las observaciones de estaciones de CTD se realizaron en un periodo distinto de modelación. Por otra parte, los principales 3 modos de variabilidad de la corriente son coincidentes entre el modelo y un perfilador de corrientes desplegado en el año 2013, años distintos, pero expresiones similares en su estructura. El análisis mediante EOF revelo que el modo 1 y que explica la mayor parte de la variabilidad, es coincidente con la señal del viento zonal, esto sugiere al viento como el principal agente en la circulación al interior del seno Skyring. La circulación superficial sigue un patrón de corrientes a lo largo del año en dirección oeste-este, 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 incrementando su intensidad.

La batimetría permite distinguir 2 zonas claramente definidas y con características 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 con máximos, en zonas con depresión batimétrica de 500-600 m, lo que caracteriza la batimetría de esta área, principalmente como irregular y abrupta. En este sentido, destaca, además, la constricción batimétrica localizada dentro del canal Gajardo, como el estrechamiento de la batimetría del canal Fitz-Roy, limita la conexión entre el seno Otway y el seno Skyring, comparando esos resultados con resultados de las zonas adyacentes, así geomorfológicamente, las constricciones de canal Gajardo y Fitz-Roy, generó la formación de 2 microcuencas con características oceanográficas propias.

Con los estudios ejecutados con anterioridad en la zona de seno Skyring, 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, estructurar 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 para zonas estuarinas de canales y fiordos de la región sur Austral de Chile.

Es de suma importancia señalar que en el interior del seno Skyring no se registró agua de características oceánicas, debido a que las constricciones, producto de la batimetría irregular

CONVENIO DESEMPEÑO 2020: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP. INFORME FINAL. 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

mencionada anteriormente, limitan o restringen el intercambio al interior de este, ingreso de agua de salinidad >20, lo que correspondería a agua estuarina salada, estructurando estos sistemas de fiordos con características particulares. Esto se encuentra estrechamente relacionado con la estructura de los elementos no conservativos como fue el caso de los nutriente inorgánicos (nitrato, fosfato y silicato), ya que en los estudios en los estudios anteriores ejecutados por IFOP, sobre todo en la Patagonia Norte, se ha identificado como una de las principales fuentes de nutrientes dentro de los sistemas de fiordos, corresponde al transporte advectivo de las aguas de características oceánicas, las cuales transportan al interior de estos sistemas elevadas concentraciones de nutrientes, trasporte que se restringe en gran medida por la batimetría, específicamente por las contracciones batimétricas

De esta forma no se idéntico un flujo de nutrientes desde la zona oceánica hacia el interior del seno Skyring. El cual proviniera o bien de las zonas oceánicas adyacentes mediante la conexión del canal Gajardo, o la zona de conexión a través del canal Fitz-Roy, con el seno Otaway. Con estos resultados se determina la importancia de la batimetría en la oceanografía, preliminarmente en la zona del Seno Skyring, ya que los resultados son concordantes a lo reportado por estudios anteriores de IFOP, donde se ha determinado la implicancia de la batimetría en restricciones en la conexión entre una zona y otra, lo que tiene implicancias tanto en las propiedades (físico-quimicas) de la columna de agua, como también en la circulación y los tiempos de renovación de diferentes cuerpos de agua.

La conectividad en el seno Skyring ha sido abordada bajo un enfoque sanitario de la salmonicultura debido a las actuales y persistentes problemáticas en la XII región de Magallanes de brotes de patógenos y el riesgo que suponen la transmisión de dichos patógenos entre unidades de cultivo de salmónidos. El estudio de conectividad muestra que, en promedio para los años 2016-2017, los patrones de conectividad y transporte de partículas son significativamente diferentes según el tipo de partícula empleado. Las partículas caracterizadas como derivadores pasivos presentan una conectividad promedio entre centros de 6.96% y entre ACS de 5.57%, frente al 2.3 % y 0.4%, respectivamente de las partículas caracterizadas como Caligus rogercressevi. Esto se explica principalmente en las diferencias de la vida promedio de ambas partículas, que en el caso de los derivadores es constante e igual a 30 días y en el caso de Caligus rogercresseyi es de 1.7 días debido a la alta mortalidad que sufre Caligus rogercresseyi a bajas salinidades como las presentes en el seno Skyring (20 PSU), de manera que un menor tiempo de transporte limita el alcance de la dispersión. Independientemente del tipo de partícula, los centros de cultivo con mayor conexión (y riesgo sanitario) con otros centros son aquellos más cercanos entre sí, como los centros 120109, 120118 y 120107 en la ACS 49A y 120110, 120115, 120111 y 120112 en la ACS 50A situados en el clúster de alta densidad de centros entre punta Laura y punta Dársena, al Oeste de la isla Escarpada. De la misma manera, la alta conectividad de estos centros compartidos entre las ACS 49A y 50A, hacen de estas dos ACS las más riesgosas en cuanto a su capacidad para contener y/o mantenerse aisladas de brotes infecciosos.

Finalmente, tal como se ha señalado anteriormente, El seno Skyring poseía poca información oceanográfica, ninguno de los cruceros CIMAR había realizado mediciones. Este estudio ha entregado información que quedará disponible de manera interactiva en portal chonos.cl, para ser consultada por cualquier usuario de forma simple y expedita. Esta información estará enfocada bajo la perspectiva de ACS.

CONVENIO DESEMPEÑO 2020: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP. INFORME FINAL. 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

CONVENIO DESEMPEÑO 2020: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP. INFORME FINAL. 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

INDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO i				
ÍNDICE GENERAL iv				
1.	ANTECEDENTES	1		
2.	OBJETIVOS	6		
2.1	Objetivo general			
2.2	Objetivos específicos			
3.	METODOLOGÍA	7		
3.1	Objetivo específico 2.2.1 Determinar la circulación en el seno Skyring, mediante observaciones in situ y la implementación de un modelo hidrodinámico de alta resolución.	7		
3.2	Objetivo específico 2.2.2 Realizar una caracterización químico-biológica a través de observaciones de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes y biomasa fitoplanctónica, que permitan relacionar el estado de las condiciones químicas y biológicas, con la hidrodinámica del sistema.	26		
3.3	Objetivo específico 2.2.3 Determinar la conectividad dentro del seno Skyring.	30		
3.4	Objetivo específico 2.2.4 Caracterizar oceanográficamente las Agrupaciones de Concesiones de Salmónidos (ACS) mediante mapas temáticos montados en una plataforma de información geográfica.	39		
4.	GESTIÓN DEL PROYECTO	40		
4.1	Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA: 8/04/2020	40		
4.2	Licitación embarcación: 28/04/2020 hasta 25/05/2020	40		

CONVENIO DESEMPEÑO 2020: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP. INFORME FINAL. 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

4.3	Contratación de la embarcación para realización de mediciones: 1/06/2020 hasta 30/10/2020	40	
4.4	Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA: 25/09/2020	41	
4.5	Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA: 25/11/2020	41	
4.6	Realización de campañas oceanográficas		
5.	RESULTADOS	42	
5.1	Objetivo específico 2.2.1	42	
5.2	Objetivo específico 2.2.2	68	
5.3	Objetivo específico 2.2.3	90	
5.4	Objetivo específico 2.2.4	97	
6.	DISCUSIÓN	102	
7.	CONCLUSIÓNES	108	
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110	
9.	ANEXOS		

- 7. Anexo I: Base de datos
- 8. Anexo II: Mediciones in situ: ADCP remolcado (bottom tracking).

CONVENIO DESEMPEÑO 2020: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP. INFORME FINAL. 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

CONVENIO DESEMPEÑO 2020: SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / IFOP. INFORME FINAL. 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

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

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

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 Ley 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.

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 ejecutados por IFOP, 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 intra-anual 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

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 km²) 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

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar los patrones de circulación mediante la implementación de modelos de alta resolución y su relación con los procesos químicos-biológicos al interior del seno Skyring, dentro de la región de Magallanes y la Antártica Chilena.

2.2. Objetivos específicos

- **2.2.1**. Determinar la circulación en el seno Skyring, mediante observaciones *in situ* y la implementación de un modelo hidrodinámico de alta resolución.
- **2.2.2**. Realizar una caracterización químico-biológica a través de observaciones de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes y biomasa fitoplanctónica, que permitan relacionar el estado de las condiciones químicas y biológicas, con la hidrodinámica del sistema.
- **2.2.3**. Determinar la conectividad dentro del seno Skyring.
- **2.2.4**. Caracterizar oceanográficamente las Agrupaciones de Concesiones de Salmónidos (ACS) mediante mapas temáticos montados en una plataforma de información geográfica.

3. METODOLOGÍA

3.1 Objetivo específico 2.2.1 *Determinar la circulación en el seno Skyring, mediante observaciones in situ y la implementación de un modelo hidrodinámico de alta resolución.*

Conocer los patrones de circulación de un sitio como seno Skyring requirió información in situ recolectada como parte de campañas oceanográficas, pero también de herramientas como la modelación que permitan extender la información de aquellos forzantes que forman parte del balance dinámico de este lugar, tales como; las descargas de agua dulce, el viento y las mareas (**figura 1**), y la geometría del reservorio dada por la información batimétrica. Por tanto, de realizó una descripción de información in situ, principalmente de corrientes, obtenidas como parte de las campañas ya señaladas y posterior con la modelación.

3.1.1 Datos in situ

Corriente y Marea

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 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 I**.

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). Para una observación general se calculó la estadística descriptiva de la corriente total (perfil promedio U, perfil promedio V, varianza U, varianza V, amplitud de eje de máxima varianza, porcentaje explicado por el eje de mayor variabilidad, ángulo, elipticidad).

Se realizó un análisis espectral, en el dominio de la frecuencia, utilizando la técnica de autoespectro (Bendat y Piersol, 1986) para las componentes vectoriales y rotatorios de la corriente (Mooers, 1973) para los 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 & Thomson, 1998). Puesto que cada estimación espectral posee una distribución X² con dos grados de libertad, los grados de libertad del espectro promedio son dos veces el número de trozos (Bendat&Piersol, 1986). En estos registros se empleó sobre 12 grados de libertad. Además, se realizó un análisis de wavelet con el método de Morlet. Finalmente 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.

Se utilizó mareógrafos que midieron durante el año 2012, en la bahía Beaufort, canales Gajardo (interior de seno Skyring), Fitz-Roy y durante el año 2021, en ventisquero, punta verde, canal

Gajardo y Fitzroy (**tabla II**). Se realizó un análisis armónico (Pawlowicz et al., 2002) del nivel del mar y se comparó la amplitud de los principales componentes de marea.

Viento

Se analizó una estación meteorológica HOBO ubicada en Punta verde (52°39'7.48"S – 71°29'26.7"W), la estación registró desde febrero 2021 a diciembre del 2021, variables como; magnitud de la velocidad del viento, dirección del viento, PAR y presión 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). Se calculó la suma acumulada de cada componente y viento mecánico a lo largo de la serie de tiempo.

3.1.2 Modelación hidrodinámica:

Para otorgar una mejor descripción de la fluctuación de los forzantes que influyen en la dinámica de la circulación en el seno Skyring, 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 1**.



Figura 1: Esquema del sistema de modelación y distribución de información del estudio.

3.1.2.1 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 2**), 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°S y ~71 - 73°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 resulta 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 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 se ha Product utilizado CCMP Wind Vector Analysis la base de datos (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 interpoló 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 Y corresponde a la base de datos modelada y X 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 Y y X 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.



Figura 2: Dominios establecidos para la simulación atmosférica (WRF), con resolución espacial de 9km (D01) y 3km (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.

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 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 3 y la tabla l**.





Tabla I: Características del sistema de modelación

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)		

La **figura 4** 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.



Figura 4. Estaciones fluviométricas de la Dirección General de Aguas (DGA) y cuencas hidrográficas sintéticas estimadas para la región de Magallanes.

3.1.2.3 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 5**), bordes este y oeste respectivamente, cuya fuente pertenece al Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).



Figura 5: 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 II**). Se realizó un análisis armónico (Pawlowicz et al., 2002) del nivel del mar en base a datos de estos mareógrafos (**tabla II**) 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 "F" (Boon, 2004), el cual se obtiene por la suma de las principales amplitudes diurnas dividido la suma de las principales amplitudes semidiurna.

$$F = \frac{K_{1+}O_1}{S_2 + M_2}$$

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.

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 N2	52°49'30,4"S	72°54'47,7"W	10 min	27/10/2012 05/12/2012
Canal Fitzroy N1	52°48'2,0"S	71°23'37,3"W	10 min	29/04/2013 26/05/2013
Ventisquero	52° 37'38.496"S	72°51'55.655"W	1 hora	17/02/2021 27/11/2021
Paso Verde	52°39'17.328"S	71°27'14.328"W	1 hora	17/02/2021 27/11/2021
Canal Gajardo N1	52°50'56.544"S	73°0'16.415"W	1 hora	17/02/2021 27/11/2021
Canal Fitzroy N2	52° 47' 29.652"S	71° 24'3.672"	1 hora	17/02/2021 27/11/2021

 Tabla II. Información de Mareógrafos instalados en la región

3.1.2.4 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, trasporte 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 6**), 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 4**). 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 4**). 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 III**.



Figura 6: Ubicación del seno Skyring en la región de Magallanes, modelo digital de elevación basado en cartas naúticas SHOA y malla triangular con resolución variable. ADCP en isla Escarpada.

Tabla III: 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 tomo un tiempo de 8 años, para el periodo 2016-2017 se realizó una simulación en bucle hasta alcanzar el periodo de equilibrio.

3.1.2.5 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 7**) 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). Cabe señalar, que en esta etapa no se utilizaron las observaciones recolectadas durante el año 2021, ya que la mayor parte de estos estuvieron disponibles solo en etapa final del proyecto, para cuando las simulaciones ya estaban generadas, sin embargo, estos datos serán incluidos en la segunda etapa de este estudio que finaliza el año 2022.



Figura 7: 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 η_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:

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

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

3.1.2.6 Corrientes en seno Skyring

Para conocer la estructura de las corrientes al interior del seno Skyring se comparó la información de un perfilador de corrientes (ADCP) instalado durante el otoño del año 2013, por un periodo ~30 días, ubicado en el sector de isla Escarpada (-Lat. -52,60°, Long. -72,35°) (**figura 6**), lamentablemente el periodo de medición no coincide con el de modelación, sin embargo, se realizará 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 corrientes submareales (observadas y modeladas) para determinar la capacidad del modelo en replicar los principales modos de variabilidad.



Figura 6: Ubicación del seno Skyring en la región de Magallanes, modelo digital de elevación basado en cartas naúticas SHOA y malla triangular con resolución variable. ADCP en isla Escarpada.

Tabla III: 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 tomo un tiempo de 8 años, para el periodo 2016-2017 se realizó una simulación en bucle hasta alcanzar el periodo de equilibrio.

3.1.2.5 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 et. al., 2015), las cuales, permitieron caracterizar la hidrografía del sistema marino de Skyring y su entorno. Además, se extrajo información específica de estaciones oceanográficas (**figura 7**) 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).



Figura 7: 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 η_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:

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

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

3.1.2.6 Corrientes en seno Skyring

Para conocer la estructura de las corrientes al interior del seno Skyring se comparó la información de un perfilador de corrientes (ADCP) instalado durante el otoño del año 2013, por un periodo ~30 días, ubicado en el sector de isla Escarpada (-Lat. -52,60°, Long. -72,35°) (**figura 6**), lamentablemente el periodo de medición no coincide con el de modelación, sin embargo, se realiró 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 corrientes submareales (observadas y modeladas) para determinar la capacidad del modelo en replicar los principales modos de variabilidad.

Cabe señalar que este proyecto contemplaba obtener una mayor cantidad de información de corrientes mediante campañas oceanográficas realizadas entre 2020 y 2021, mediante la colaboración con otros proyectos que IFOP lleva a cabo en el seno Skyring, sin embargo, estos han tenido constante retrasos en su obtención por problemáticas asociadas al COVID-19, sin embargo, todos estos datos están disponibles para la segunda parte de este proyecto en seno Skyring, cuyo informe final debiese elaborarse para el segundo semestre de 2022.
3.2 Objetivo específico 2.2.2 Realizar una caracterización químico-biológica a través de observaciones de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes y biomasa fitoplanctónica, que permitan relacionar el estado de las condiciones químicas y biológicas, con la hidrodinámica del sistema.

3.2.1 Mediciones CTDO, muestras de agua, sensores de conductividad, temperatura y oxigeno disuelto.

Para caracterizar las diferentes propiedades de la columna de agua se realizaron estaciones con mediciones de CTDO (salinidad, temperatura y oxígeno disuelto, utilizando un CTD Seabird 19 SplusV2. Los datos fueron tomados en la columna de agua, desde superficie (1m) hasta la máxima profundidad de fondo dependiendo de la batimetría. Para el pos procesamiento de los datos se utilizó el protocolo estándar mediante software de fabricante, modalidad SeaSofTerm (Seabird 1993). Para las diferentes etapas fue realizado este protocolo de calidad de datos y garantizar la confiabilidad de la información obtenida.

Una vez que los datos de CTDO se procesaron, junto al control de calidad, se construyó una matriz numérica integrando salinidad, temperatura (°C) y oxígeno disuelto (mlL-1). Conjuntamente para la caracterización en la columna de agua, se tomaron muestras de agua discretas a profundidades estándar: 0, 5, 10, 25, 50, 100, 200, 300, 400 metros. Las muestras de agua fueron utilizadas para determinar concentración de nutrientes (nitrato, nitrito, fosfato y silicato) y biomasa pigmentaria (clorofila total, clorofila activa y feopigmentos), las estaciones se detallan en la figura 6. Las muestras de agua fueron filtradas mediante un filtro de microfibra whatmann GFS de 0.7 µM. aproximadamente 1000 ml de agua, 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, fueron realizadas en 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).

Para la estimación de la clorofila integrada en la columna de agua se utilizó el procedimiento recomendado por Ramírez y Pizarro 2005.

Toda la representación graficas de y estadísticos básicos de los parámetros, utilizando mínimos, máximos y promedios, fueron realizadas mediante el software ODV (Schlitzer 2017). Ademas, con este software se construyeron la diferentes gráficas para describir el comportamiento y la distribución de cada una de estas variables. También se compararon las secciones temporalmente para determinar si existan diferencias en los patrones y/o la distribución.

Cabe señalar que este proyecto contemplaba obtener una mayor cantidad de información referente a mediciones de CTDO y muestras de agua para la columna de agua (nutriente y clorofila), estos han tenido constante retrasos en su obtención por problemáticas asociadas al COVID-19. No obstante lo

anterior, debido a que este estudio es la primera parte de la zona de Skyring, durante este año (2022), estará la información completa disponible en el estudio de la etapa 2 en la zona de Skyring. Particularmente en el caso de los CTDO debido a no contar con una campaña de invierno se utilizó la data obtenida en un estudio realizado en la zona de Skyring durante otoño (marzo del 2012). Mientras que para nutrientes solo se contó con la información de febrero y noviembre de 2021.

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. Ios detalles con la posición geográfica se detallan en la **figura** 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.

Los análisis básicos, gráficas y descripción de toda la data hidrográfica (CTD, nutrientes y clorofila) se efectuó utilizando el software libre ODV (Schlitzer 2021), disponible en: https://odv.awi.de/software/download/.

Para cuantificar los grados de mezcla o estratificación vertical, basados en la salinidad, se utilizó el parámetro de estratificación η S, siguiendo los procedimientos detallado en (Haralambidou *et al.,* 2010), posteriormente se promediaron los valores obtenidos para cada perfil vertical en cada una de secciones verticales y se obtuvo un valor promedio para cada sección y para cada periodo estacional. El parámetro se obtiene de acuerdo a la siguiente fórmula:

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

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



Figura 8. Panel superior: Posiciones geográficas con las diferentes estaciones de CTDO, estaciones con muestras de agua, líneas de anclajes con sensores de conductividad, temperatura y oxígeno disuelto. Esquema de anclaje de los sensores columna de agua (sensor 1, 2 y 3) y sensores de bentos (OD 2 y OD 3).

Tabla IV. Especificaciones de los sensores instalados

instrumento	Profundidad (m)	Fecha inicio	Fecha Termino	Intervalo medición
L1				
conductividad/temp.	30	15/02/2021	24/11/2021	60 min
Oxígeno disuelto				
Oxígeno disuelto	100	15/02/2021	24/11/2021	60 min
Oxígeno disuelto	150	15/02/2021	24/11/2021	60 min
L2				
conductividad/temp.	30	17/02/2021	26/11/2021	60 min
Oxígeno disuelto				
conductividad/temp.	100	17/02/2021	26/11/2021	60 min
Oxígeno disuelto				
Oxígeno disuelto	200	17/02/2021	26/11/2021	60 min
L3				
conductividad/temp.	30	15/02/2021	24/11/2021	60 min
Oxígeno disuelto				
Oxígeno disuelto	100	15/02/2021	24/11/2021	60 min
Oxígeno disuelto	150	15/02/2021	24/11/2021	60 min
OD1				
conductividad/temp.	8	15/02/2021	26/11/2021	60 min
Oxígeno disuelto				
OD2				
conductividad/temp. Oxígeno disuelto	20	18/02/2021	27/11/2021	60 min

3.3 Objetivo específico 2.2.3 Determinar la conectividad dentro del seno Skyring.

5.3 Metodología.

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 del objetivo específico 1, se han implementado 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 guardan 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 las perspectivas futuras diagnostican que las condiciones ambientales favorecerán este tipo de eventos en el medio plazo (Lepe-López et al., 2021).

5.3.1 Tipos de partículas

- Derivadores: 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* 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 9**), 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).



Figura 9. 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 10**.

Temperature (°C)	$y = a + b \ln x$		
	y=1/T (days ⁻¹)	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 10. 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 11**). 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 cada partícula (todas las partículas inician con el mismo número de unidades iniciales), de manera que cuando las unidades son < 1, la partícula se elimina de la simulación.

		Survival				
Salinity	Exposure time	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 ‰	12 hrs	80	70	100	85	
	18 hrs	65	45	95	85	
	24 hrs	65	40	95	80	
	30 min	100	100	100	100	
30 ‰	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 11. 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

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). Adicionalmete 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.

5.3.2 Entidades espaciales

En conectividad las entidades espaciales son áreas que se clasifican como fuentes y sumideros. Las fuentes son las áreas desde donde empiezan las trayectorias de las partículas, mientras que los sumideros son las áreas por donde pasan en algún momento las partículas, siendo que toda fuente es sumidero a la vez (pero no inversamente).

Para el caso del seno Skyring y por los motivos anteriormente expuestos (problemas sanitarios en la industria salmonicultora) las fuentes y sumideros del presente estudio son los centros de cultivo de salmón de las agrupaciones de concesiones de salmónidos (ACS de aquí en adelante) en que se ordena la producción de la industria salmonicultora. De esta manera, la conectividad se ha calculado a partir de partir de las trayectorias de partículas (derivadores y *Caligus rogercresseyi*) que inician su deriva desde cada uno de los 36 centros de cultivo que hay concesionados dentro de las 4 ACS que hay dentro del seno Skyring según se muestra en la **figura 12** y **tabla V** (información extraída de <u>https://mapas.subpesca.cl/ideviewer/</u>).



Agrupaciones de Concesiones de Salmónidos + Centros de Cultivo



Figura 12: Centros de cultivo y ACS del seno Skyring.

ACS	Código Centros de Cultivo
49a	120193, 120169, 120168, 120107, 120116, 120108, 120007, 120118, 120109
49b	120194, 120176, 120188, 120167, 120177, 120208, 120129, 120130, 120051
50a	120112, 120111, 120115, 120110
50b	120144, 120150, 120145, 120165, 120132, 120146, 120156, 120180, 120184,
	120143, 120216, 120215, 120158, 120175

Tabla V: Centros de cultivo y ACS a la que pertenecen.

5.3.3 Modelos de dispersión de partículas

El modelo hidrodinámico de Skyring comprende los años 2016-2017 en 8 simulaciones consecutivas. A cada una de estos modelos hidrodinámicos se le ha acoplado un modelo de dispersión de partículas con inicio y fin según la **tabla VI**.

	Inicio Modelo	Fin Modelo	Inicio Modelo	Fin Modelo
	Hidrodinámico	Hidrodinámico	Dispersión Partículas	Dispersión Partículas
Verano 2016	01/01/2016	01/04/2016	15/01/2016	14/02/2016
Otoño 2016	01/04/2016	01/07/2016	15/04/2016	15/05/2016
Invierno 2016	01/07/2016	30/09/2016	15/07/2016	14/08/2016
Primavera 2016	30/09/2016	01/01/2017	15/10/2016	14/11/2016
Verano 2017	01/01/2017	01/04/2017	15/01/2017	14/02/2017
Otoño 2017	01/04/2017	30/06/2017	15/04/2017	15/05/2017
Invierno 2017	30/06/2017	01/10/2017	15/07/2017	14/08/2017
Primavera 2017	01/10/2017	01/01/2018	15/10/2017	14/11/2017

Tabla VI. Inicio y fin de cada uno de los modelos hidrodinámico y de dispersión de partículas de Skyring.

En cada uno de los 8 modelos de dispersión de partículas de Skyring, las partículas se liberan durante 30 días a una tasa de 1 partícula a la hora desde cada uno de los 36 centros de cultivo de Skyring. 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.

Cada uno de los 8 modelos de dispersión de partículas de Skyring se simulan tanto para partículas tipo derivador como *Caligus rogercresseyi*, y cada uno de éstos cuentan a su vez con su modelo de dispersión en modo *downstream* ("corriente abajo") y *upstream* ("corriente arriba"), para un total de 32 modelos de dispersión de partículas (**tabla V**I) y casi medio millón de partículas.

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*).

5.3.4 Estadísticas de conectividad

El grado de conectividad entre las áreas de un sistema, en nuestro caso los centros de cultivo de Skyring, puede cuantificarse de diversas maneras.

En el presente caso la conectividad se calculará como el porcentaje de las partículas que llegan a cada centro de cultivo respecto del total de partículas que inician su trayectoria en un centro de cultivo dado.

Las **figuras 13** y **14** ejemplifican cómo se calcula la conectividad del porcentaje de partículas en los modos de dispersión *downstream* y *upstream*.



Figura 13: Ejemplo de conectividad del porcentaje partículas para una dispersión downstream.



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

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 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).

Para cada uno de los 2 tipos de partícula y 2 tipos de dispersión de cada uno de los 8 modelos hidrodinámicos de Skyring (32 modelos de dispersión de partículas en total) se calculó la conectividad entre 36 los centros de cultivo de Skyring, 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 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 ("zona libre" en los gráficos).

A partir de las matrices que relacionan 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 (**tabla VI**).

3.4 Objetivo específico 2.2.4 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. 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 15. ACS localizadas dentro del seno Skyring.

4. GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1 Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA: 8/04/2020

- Fecha:
- 8 de abril 2020.
- 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 encontrará en modalidad de teletrabajo, realizando funciones desde sus respectivas casas.

4.2 Licitación embarcación: 28/04/2020 hasta 25/05/2020

El Instituto de Fomento Pesquero, en el marco de este proyecto, efectuó a licitación pública a armadores, personas naturales y jurídicas, para la contratación de embarcación menor destinada al transporte de personal. Las bases fueron publicadas en el portal web mercado público (ID N°1049-20-LP20). El proceso finalizó el 25 de mayo, la licitación fue declaro desierta, solo se presentó un oferente, con una oferta económica superior al presupuesto indicado en dicha licitación.

4.3 Contratación de la embarcación para realización de mediciones: 1/06/2020 hasta 30/10/2020

Considerando que licitación para la contratación de embarcación (ID N°1049-20-LP20), fue declarada desierta, en etapa posterior a licitación se procedió a la búsqueda de una embarcación que pueda cumplir con todos los requerimientos técnicos, que permitan efectuar adecuadamente las mediciones requeridas para este este estudio. Este proceso fue en extremo complejo, debido a que la condición sanitaria, producto del COVID19, significó que la región de Magallanes, se encuentre con varias medidas sanitarias que limitan o restringen el ingreso a la región, junto con las limitaciones del equipo de trabajo el cual reside en la isla de Chiloé, región de Los Lagos. Con estas complicaciones, solo se pudo localizar una embarcación adecuada en septiembre de 2020, para la ejecución de las diferentes actividades. A la fecha del presente informe, están finalizando los trámites administrativos: generación de contratos legales y firmas correspondientes, para la contratación de la embarcación.

4.4 Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA: 25/09/2020

- Fecha:
- 25 de septiembre 2020.

SUBPESCA

IFOP

IFOP

- Ubicación:
- Video conferencia,
- Participantes: Susana Giglio Gabriel Soto Elías Pinilla

En esta reunión se informa que las mediciones se encuentran con retrasos de a lo menos 5 meses, las cuales dependerán de la evolución experimente las diferentes restricciones sanitarias producto del COVID19, que implican restricciones en movilidad, traslado e ingresos en la región de Magallanes. Apenas las condiciones sanitarias lo permitan, se comenzará con la primera campaña y reprogramará el resto de las actividades pertinentes.

4.5 Reunión Investigadores IFOP personal SUBPESCA: 25/11/2020

- Fecha: 25 de noviembre 2020.
- Ubicación:
 - Video conferencia,
- Participantes:

SUBPESCA
IFOP
IFOP

En esta reunión se informa que las comenzaran en le periodo de verano de 2021, fecha en la cual estará la embarcación disponible y se podrá desplazar personal IFOP, desde Castro hasta la región de Magallanes.

4.6 Realización de campañas oceanográficas

Durante el mes de febrero de 2021, se realizó la primera campaña oceanográfica. Se estima que este estudio, se encuentra con un retraso en 8 meses aproximadamente, estos retrasos se produjeron por las limitaciones y restricción de movilidad que ha significado los efectos de la condición sanitaria actual (COVID19).

5. RESULTADOS

5.1 Objetivo *Determinar la circulación en el seno Skyring, mediante observaciones in situ y la implementación de un modelo hidrodinámico de alta resolución.*

Los resultados de este objetivo referidos la obtención de los patrones de circulación en seno Skyring se encuentra descrito para la información in situ y 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.

El análisis del viento de la estación meteorológica en Punta verde (52°39'7.48"S – 71°29'26.7"W) muestra (**figura 16**) un dominio del viento del Oeste a lo largo del año con una magnitud máxima de 20 ms⁻¹, se registraron vientos del Este de baja magnitud (<10 ms⁻¹) entre mayo y julio. La componente meridional del viento presento menor magnitud comparativamente, en los meses de invierno domina el viento hacia el sur que alcanza magnitud de 10ms⁻¹ en los meses de verano el viento tiene dirección hacia el norte con magnitudes <7 ms⁻¹. La Energía mecánica del viento reveló que en los meses de primavera/verano la energía disponible fue más alta que en invierno, considerando que en invierno existieron eventos de alta magnitud, pero no dominaron como es el caso de primavera/verano.

Una variable relevante fue la radiación, la cual estuvo asociada a mayor deshielo, un factor relevante en la zona, la radiación a lo largo del año; se observó mayor en los meses de primavera/verano, disminuyendo en abril, entre mayo y julio son los valores mínimos (<250 uE), en agosto comienza el aumento de la radiación alcanzando un máximo de 2500 uE. El análisis wavelet del viento (**figura 17**) muestra en la presión una banda de alta energía entre 8 y 16 días a lo largo del año, en la componente u, se observó una señal diaria; entre abril y mayo, julio a noviembre, seguido de alta varianza en la banda sinóptica entre 2 a 16 días. La componente v de viento mostro una alta energía en la banda sinóptica (2 – 16 días) y mensual en los meses de invierno.

En base a un análisis armónico se realizó un espectro de amplitud comparativo para los mareógrafos (**figura 18**) disponibles en el sistema Skyring (**tabla II**). El constituyente de marea más importante es M_2 y alcanzo la mayor amplitud en Fitzroy (0.5m) y Bahía Beaufort (>0.4m). La onda de marea, ingresa a Skyring por canal Gajardo y canal Fitzroy, en ambos existe una constricción de ~5m y ~10m respectivamente, los mareógrafos que están dentro de Skyring o posterior a estas constricciones registraron una amplitud >0.1m indicando una amortiguación de la onda de marea en Skyring.

La corriente medida con ADCP en el caso de canal Gajardo (**figura 19**), muestra una mayor oscilación en la componente norte-sur, en promedio la corriente los primeros 40m sale hacia el suroeste del canal alcanzando una velocidad de 4cms⁻¹ en promedio. Ingresa a Skyring bajo los 40m a una velocidad media de 14cms⁻¹, la componente oeste-este en promedio es cercana a cero, en la componente v se observaron pulsos de velocidades >10cms⁻¹ en ambas direcciones. Al observar el wavelet de corriente norte-sur de canal Gajardo (**figura 20**) se observa una alta energía entre los 2 y 16 días a lo largo del año, con una banda específica entre 8 y 16 días muy marcada en superficie que disipa con la profundidad. El ADCP ubicado cercano a isla Escarpada (**figura 21**) se observó una oscilación predominante oeste-este, en promedio la corriente en los primeros 40m de profundidad tiene dirección hacia el este y bajo lo 40m hacia el oeste con velocidades cercanas a cero. En el análisis wavelet cruzado entre el viento y la corriente (**figura 22**) muestra una alta coherencia y en fase en superficie, bajo los 10 m la corriente no se encuentra en fase con el viento.



Figura 16. Estación meteorológica. A) Par y presión atmosférica, b) Velocidad del viento en la componente oeste-este, c) velocidad del viento en la componente norte-sur, d) energía mecánica del viento y e) suma acumulada de la velocidad del viento por componente.



Mar Apr May Jun Jul Aug Sep Oct Nov



Figura 17. Wavelet de variables de estación meteorológica. a) Presión atmosférica, b) velocidad del viento en la componente oeste-este, c) velocidad de la corriente norte-sur.



Longitud (°W)



Figura 18. Mareógrafos. A) mapa con la ubicación de mareógrafos. B) espectro de amplitud de marea.



Feb MarAprMayJunJulAugSepOctNovFigura 19. ADCP canal Gajardo 2021. A) velocidad de la corriente en la componente norte-sur. B)velocidad de la corriente en la componente oeste-este.



Figura 20. Wavelet de la corriente ADCP canal Gajardo 2021 para 3m, 19m, 31m, 43m, 63m y 83m de profundidad.



Figura 21. ADCP Escarpada 2021. A) velocidad de la corriente en la componente norte-sur. B) velocidad de la corriente en la componente oeste-este.



Figura 22. Wavelet coherencia entre el viento y la corriente ADCP Escarpada 2021 para 5m, 13m, 21m, 33m, 49m y 85m de profundidad.

4.1.1 Caracterización atmosférica: modelo WRF

El viento simulado por WRF entre 2015 y 2017 revela un patrón estacional con una marcada 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 23**). Hacia el oeste se exhibe una mayor variabilidad espacial y vientos locales más intensos, posiblemente influenciado por un efecto topográfico. La intensidad del viento es mayor durante la primavera (SON) y se debilita hacia los meses de otoño (MAM). La **figura 24** 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 ms⁻¹ al este y por debajo de 9 ms⁻¹ 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⁻¹.



Figura 23. Campos de magnitud (colores) y dirección (flechas) del viento estacional en seno Skyring modelados por WRF entre 2015-2017.



Figura 24. Ciclo anual de la magnitud del viento en tres posiciones (ver **figura 7**) a lo largo del seno Skyring. Data modelada por WRF entre 2015-2017.

Este patrón de viento también en las observaciones registradas durante el 2021 (figura 25). La estación meteorológica revela el patrón estacional con una componente que sopla principalmente desde el oeste, acompañado de una señal de viento 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 25b). 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 25c).

Por su parte, la magnitud del viento simulado se correlacionó de buena manera con los campos de viento del producto CCMP, se logró 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 alcanzó un valor de 0.5 (**figura 26a**). 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 26b**). 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 25. 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 26. 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.

4.1.2 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 27a**). 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 27b**). Lo que demuestra la habilidad del modelo hidrológico de reproducir de manera adecuada la variabilidad de los caudales en la región.



Figura 27. 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 m³s⁻¹año⁻¹, la cual resulta ser significativa con una confianza del 95% según test de Mann-Kendall. La señal interanual muestra una variabilidad con una desviación estándar de 14 m³s⁻¹, con un máximo de descarga durante el año 2014 con un caudal por sobre los 160 m³s⁻¹ y mínimos ocurridos durante los años 1992, 2002 y 2016 por debajo de los 120 m³s⁻¹ (**figura 28a**). Las principales descargas de agua dulce en el sistema se evidencian mayoritariamente hacia el sector occidental del seno Skyring (**figura 28c**), donde destacan máximos caudales en las cuencas

que desembocan en estero Navarro y estero de Los Ventisqueros con caudales medios de 25 y 15 m³s⁻¹ 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 m³s⁻¹ aproximadamente. Por su parte, la región oriental del seno hacia el canal Fitz Roy no presenta descargas significativas en el sistema (**figura 28c**).



Figura 28. 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.

Los aportes de agua dulce en seno Skyring muestran un marcado ciclo anual con máximos que se prolongan desde noviembre hasta marzo de ~175 m³s⁻¹, y mínimos durante la época de invierno que llegan a ~75 m³s⁻¹ durante julio (**figura 28b**). Este régimen estacional, con dos máximos anuales, se asociados 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 29. 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 30**).



Figura 30. 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 > 0.05). Caudales simulados entre 1980-2018 por el modelo hidrológico VIC.

4.1.3 Simulación nivel del mar

En base a un análisis armónico, se caracterizó el régimen de marea del sistema Skyring considerando mediciones in situ con mareógrafo (**figura 5**). El coeficiente de Courtier para bahía Beaufort, canal Gajardo, Seno Skyring y Canal Fitzroy es entre 0,60 y 1,50 (**figura 31**), indicando que el régimen de marea que presenta sistema Skyring es semi-diurno 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 32**), muestra una disminución de la amplitud marea en el canal Gajardo y Skyring. En el caso del constituyente M₂ 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; M₂ registra una amplitud de 0,41 m.



Figura 31. Nivel del mar observado (izquierda) y modelado (derecha), junto al coeficiente de Courtier (F) para cada sector.



Figura 32. Espectro de Amplitud de marea observada (arriba) del modelada (abajo) de Beaufort, canal Gajardo y canal Fitzroy.

4.1.4 Caracterización hidrográfica.

El seno Skyring es una cuenca semicerrada en la región de Magallanes (**figura 33**) exhibió la formación de 2 micro-cuencas, separadas por los umbrales batimétricos dentro del canal Gajardo (~5 m) y canal Fitz-Roy (~10m). 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 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 33: Perfil batimétrico de seno Skyring y zonas aledañas.

Los limites 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 primavera como en otoño (**figura 34**). 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⁻¹ 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 35**) 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 34: Condiciones hidrográficas en seno Skyring en otoño de 2012 (panel izquierdo) y primavera de 2013 (panel derecho).



Figura 35: Esquema de masas de agua presentes en seno Skyring y zonas aledañas.

4.1.5 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 36** 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 sobrestimando los valores de temperatura, especialmente en diciembre.



Figura 36: 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 (ns. Este parámetro es estimado, 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 interior del seno, esta tiende a disminuir, sin embargo, este comportamiento general tiene matices (figura 37). 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 sobre estimación 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 más al oeste (1-2), también el modelo replica el mismo patrón hacia las estaciones canal Fitz-Roy, aunque sobrestimando 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 37). 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 37: Esquema de masas de agua presentes en seno Skyring y zonas aledañas.

Los valores medios estacionales de la temperatura superficial (0-20m) en seno Skyring (**figura 38**) muestran, 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 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 39**). 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 38: Temperatura superficial (0-20m) para cada estación del año 2017



Figura 39: Salinidad superficial (0-20m) para cada estación del año 2017.

4.1.2 Corrientes

Se comparó la salida del modelo (abril - mayo del 2017) con los datos de ADCP (abril - mayo 2013) en base a un análisis de EOF de la corriente submareal a lo largo de seno Skyring. En general, los 3 modos principales de la estructura vertical de la corriente son coincidentes entre el ADCP y el modelo (figura 40). El modo 1 muestra una estructura barotrópica hacia el norte que disminuye su amplitud con la profundidad. El modo 1 del modelo explica el 89 % de la variabilidad total, mientras que el modo 1 del ADCP alcanza un 75%. El modo 2 del modelo presenta una estructura baroclínica con una capa sobre los 20m hacia el sur y una capa bajo los 20m hacia el norte, esta estructura se observó en el ADCP explicando un 15% de la variabilidad, el modelo lo hizo en un 8%. El modo 3 presento una estructura de 3 capas: sobre los 10m a 15m la corriente presenta dirección hacia el norte y entre los 10m y 35m la corriente tiene dirección hacia el sur, bajo los 35m la corriente tiene dirección al norte, este modo explica el 1% en el caso del modelo y 4% en el caso del ADCP. El modo 1 explica la mayor parte de la variabilidad tanto en el ADCP como en el modelo, al comparar el modo 1 del modelo con la componente zonal del viento se encontraron correlaciones relativamnte 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 41).



Figura 40: EOF de la componente v del modelo y de ADCP.



Figura 41: 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 42), 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⁻¹. Por otra parte, durante otoño se observan las menores 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 42: Patrón estacional de corriente superficiales promedio (0-20m) proveniente del modelo hidrodinámico para el año 2017.

5.2 Objetivo Realizar una caracterización químico-biológica a través de observaciones de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes y biomasa fitoplanctónica, que permitan relacionar el estado de las condiciones químicas y biológicas, con la hidrodinámica del sistema.

Cabe señalar que este proyecto contemplaba obtener una mayor cantidad de información referente a mediciones de CTDO y muestras de agua para la columna de agua (nutrientes y clorofila), estos han tenido constante retrasos en su obtención por problemáticas asociadas al COVID-19. No obstante lo anterior, debido a que este estudio es la primera parte de la zona de Skyring, durante este año (2022), estará la información completa disponible en el estudio de la etapa 2 en la zona de Skyring. Particularmente en el caso de los CTDO debido a no contar con una campaña de invierno se utilizó la data obtenida en un estudio realizado en la zona de Skyring durante otoño (marzo del 2012). Mientras que para nutrientes solo se contara con la información de febrero y noviembre de 2021.

5.2.1 Distribución vertical temperatura, salinidad y oxigeno disuelto (figura 42)

La distribución vertical, permitió determinar que dentro del seno Skyring, la salinidad promedio para todos los periodos es relativamente baja alrededor de 18.5 psu. Los memores registros de salinidad se presentaron en la capa superficial, (0-25m), denotado por la isohalina de 18 psu, siendo más superficial en noviembre (~25 m) y más profunda en marzo (~50 m), debajo de esta capa superficial la salinidad tiende a aumentar de manera paulatina, hasta alcanzar los mayores valores (19.5-20 psu). Los mayores registros de salinidad se observaron en las zonas de conexión, por una parte, canal Fitz-Roy, el cual es somero y su salinidad es relativamente alta y homogénea (21.5 en marzo - 25 psu en febrero). Es importante señalar que solo en marzo de 2012 se midieron estaciones más oceánicas (golfo Xaultegua conexión estrecho Magallanes), donde se denota aguas de características oceánicas (~33 psu).

La distribución vertical de la temperatura, también evidenció una columna de agua estratificada, donde la capa superficial, que es coincidente con el estrato de la salinidad, denotó los mayores valores de temperatura promedio ~9-10°C en febrero-marzo y 8 en noviembre. Debajo de esta capa superficial la temperatura disminuye, para mantenerse relativamente estable 6-6.5 °C.

La concentración de oxígeno disuelto, revelo una columna de agua estratificada, con valores elevado en la capa superficial sobre los 6 ml/L, donde destacan los mayores registros de oxígeno en noviembre, con un valor promedio 8.6 ml/L. Debajo de esta capa, la concentración disminuyó en torno a los 4.5-5 ml/L., los mínimos valores de oxígeno disuelto se observaron en marzo 3.5 ml/L (≥200 m) en la entrada del canal Gajardo, que conecta con seno Skyring.



Figura 42. Distribución vertical de salinidad, temperatura y oxígeno disuelto.

5.2.2 Distribución espacial salinidad y temperatura (figura 43)

La variabilidad espacial promedio de la capa superficial (0-25 m), reveló que dentro del seno Skyring, las aguas tuvieron una salinidad relativamente homogénea (~18 psu), no observándose diferencias espaciales marcadas. Además, en esta capa, no se registraron grandes diferencias de salinidad entre un periodo otro. Por otro lado, se observó que las conexiones del canal-Fitz-Roy, evidenciaron aguas más salinas ~28 psu (febrero-noviembre) y ~26 psu en marzo. La temperatura promedio en la capa superficial, solo denotó algunas diferencias espaciales en las mediciones de febrero, donde los menores registro térmicos, se observaron en la parte oeste del seno Skyring junto a su conexión con canal Gajardo (figura 2d). Si es importante señalar que fueron observadas diferencias entre los distinto periodos, en promedio febrero fue el periodo más cálido (~11°C) y noviembre el periodo de menor temperatura (~8°C). Al contrastar la distribución espacial de las estaciones de fondo, la salinidad evidencia un patrón similar dentro del seno Skyring, es decir, la salinidad es homogénea y baja (19 psu) con los valores más elevados en las conexiones canal-Fitz-Roy, destacando la conexión oceánica con el canal Gajardo con una salinidad promedio 33 psu. En contraste la temperatura denota diferencias espaciales marcadas con una zona al este del seno Skyring, incluvendo canal Fitz-Roy más cálida en comparación a la zona oeste del seno (febrero- marzo), en noviembre la temperatura fue más homogénea en términos espaciales. Por otro lado, las zonas más cálidas exhibieron en promedio diferencias temporales: 11°C, 10°C y 9°C en febrero, marzo y noviembre respectivamente.



Figura 43. Distribución espacial promedio capa superficial 0-25 m, de salinidad temperatura y oxígeno disuelto.

5.2.3 Variabilidad temporal de salinidad y temperatura (series de tiempo)

Línea de anclaje columna de agua (L1), localizado próximo a la isla Escarpada, solo contó con una serie de salinidad a los 100 m. los dato revelaron una baja variabilidad temporal con un mínimo absoluto de 19,35 en marzo y una máximo absoluto de 19.6 en agosto, con un valor promedio para todo el periodo medido de 19.51 psu se observó además, que los menores valores promedio correspondieron a los meses de febrero-mayo, mientras que entre agosto y noviembre se observaron una leve elevación de la salinidad promedio (figura 44).



Figura 44. Panel izquierdo Series de tiempo de la salinidad para los sensores de 30 m, 100 m y 150 m de anclaje (L1). Panel derecho promedio mensual de salinidad.

Línea de anclaje columna de agua (L1). La serie más superficial (30 m) de temperatura, osciló entre un mínimo absoluto de 5.75 °C en agosto y un máximo de 9.67 °C en febrero, con una temperatura promedio de 7.75°C. Por otro lado, los promedios térmicos mensuales revelaron una marcada señal estacional, lo máximas de temperatura se observaron entre febrero y mayo con una media de ~9°C, mientras que los menores valores se registraron entre agosto-noviembre ~6.5°C. La seria de 100 m, osciló entre una máximo de 7,26°C en y una temperatura mínima absoluta de 6.06°C, la temperatura se mantuvo estable con poca variación entre febrero y mayo, a partir de mayo la temperatura exhibió mayor variación y un incremento, respecto a los meses anteriores (~1°C), a partir de agosto la temperatura disminuyo. La serie de 200 exhibió un comportamiento similar a la serie de 100m, entre febrero-julio, la temperatura se mantuvo estable casi sin variación (~6°C), entre agosto y octubre la temperatura se incrementó con una media ~6.5°C. Por otro lado, esta serie tuvo un máximo absoluto de 6.65 °C y una mínima de 6.01°C (figura 45).



Figura 45. Panel izquierdo Series de tiempo de la temperatura para los sensores de 30 m, 100 m y 100 m de anclaje (L1). Panel derecho promedio mensual de cada sensor.

Línea de anclaje columna de agua (L2): La salinidad en esta esta serie evidenció una fluctuación desde un mínimo absoluto 17.61 psu (8 noviembre) y registros máximos de 18.27 psu (mayo y julio). En promedio la las salinidad aumentó des febrero hacia julio promedio 17.89, disminuyendo paulatinamente desde agosto a noviembre (figura 46 panel derecho superior), entre marzo y junio la serie registró la mayor variabilidad. En contraste en la serie de 100 m, la salinidad registro una oscilación desde mínimo de 18.69 psu (registrados en septiembre), mientras que el máximo valor absoluto de salinidad fue de 17.64 psu registrado también en septiembre. En promedio se observó un aumento discreto de la salinidad desde febrero hacia agosto, particularmente en septiembre se registro el valor más bajo ~19.2 psu.



Figura 46. Panel izquierdo Series de tiempo de la temperatura para los sensores de 30 m, 100 m de anclaje (L2). Panel derecho promedio mensual de cada sensor.

Línea de anclaje columna de agua (L2). La temperatura en este anclaje, en el sensor de 30m registro una alta variación con registros térmicos que fueron desde mínimos absolutos de 5.69 °C en septiembre, hasta valores máximos de 10.6°C en marzo, con una media térmica de 7.59°C. La temperatura promedio mostró una marcada tendencia a decrecer desde febrero hacia agosto, a partir de septiembre esta comienza a aumentar. La serie de 100m registro una variación discreta que fue desde un minio térmico absoluto de 6.18 °C en febrero, hasta una máximo de 6.59 °C en septiembre, esta serie tuvo una temperatura promedio de 6.32°C. se observó en promedio, que la temperatura tiende a aumentar desde febrero hacia noviembre. La serie de 150 osciló de manera discreta entre valores mínimos de 6.08 °C en diferentes periodos (marzo, mayo y junio) y máximos térmicos de 6.13 °C (noviembre). Al igual que la serie de 100 m, esta serie en promedio exhibió una tendencia a aumentar la temperatura des febrero hacia marzo.



Figura 47. Panel izquierdo Series de tiempo de la temperatura para los sensores de 30 m, 100 m y 150 m de anclaje (L2). Panel derecho promedio mensual de cada sensor.

Línea de anclaje columna de agua (L3) La serie de tiempo localizada a 30m registró una salinidad mínima absoluta de 16.87 psu, registrado el 5 de octubre, el valor máximo se registró en julio con 18.97. La serie presentó una alta fluctuación. El ciclo estacional de la salinidad reveló que esta aumenta desde febrero hasta julio, a partir de julio comienza una disminución de los valores.



Figura 48. Panel izquierdo Series de tiempo de la salinidad para el sensor de 30 m del anclaje (L3). Panel derecho promedio mensual de cada sensor.

Línea de anclaje columna de agua (L3) La serie más superficial fluctuó entre un mínimo absoluto de 5.19°C registrado el 2 de septiembre y un máximo absoluto registrado el 8 de marzo, se observó una alta fluctuación de la serie, siendo más intensa desde marzo hasta julio. La temperatura media fue de 7.52 °C. El ciclo anual promedio indico un descenso de la temperatura desde febrero hasta septiembre-octubre. La serie de 100 oscilo entre 6.21°C (febrero-marzo) y máximos térmicos de 6.60 (julio), lo que indico una baja fluctuación temporal, el ciclo anual promedio indico un aumento de la temperatura desde febrero hacia agosto, a partir de octubre-noviembre, la temperatura desciende. La serie de 150m fluctuó entre un mínimo de 6.08 °C y una máximo de 6.21 °C, lo que indicó una alta homogeneidad temporal de la tempura.



Figura 49. Panel izquierdo Series de tiempo de la temperatura para los sensores de 30 m, 100 m y 100 m de anclaje (L3). Panel derecho promedio mensual de cada sensor.

Anclaje de fondo canal Gajardo (F1): en esta zona se registró una alta variabilidad a lo largo de toda la serie, con oscilaciones desde 18.10 psu en marzo hasta un máximo absoluto de 21.,09 psu (septiembre). La salinidad promedio en esta zona fu de 19.68 psu. En promedio se observó que la salinidad tiende a aumentar desde febrero hacia julio, a partir de septiembre la salinidad tiende a disminuir nuevamente.



Figura 50. Panel izquierdo Series de tiempo de la salinidad para el sensor del anclaje de fondo (F1). Panel derecho promedio mensual de salinidad.

Anclaje de fondo canal Gajardo (F1): la temperatura en esta zona registró una oscilación entre un mínimo absoluto de 5.36°C en agosto, el mayor registro térmico fue de 9.07°C en mayo y junio, la temperatura promedio fue de 7.02°C. esta serie evidenció que en promedio la temperatura tiende a disminuir desde febrero hasta noviembre.



Figura 51. Panel izquierdo Series de tiempo de temperatura para el sensor del anclaje de fondo (F2). Panel derecho promedio mensual de temperatura.

Anclaje de fondo canal Fitz-Roy (F2): la serie de tiempo de esta zona evidencio una alta variabilidad a lo largo de toda la serie, con un mínimo absoluto de 14.96 psu el 21 de noviembre, el máximo de salinidad fue de 25.67 el 9 de junio. La máxima oscilación se produjo entre febrero a julio, modulada por pulso aproximados cada 15 días. La salinidad media para esta serie fue de 19.34 psu.el ciclo anual promedio reveló 3 pulsos importante el primero en abril (19.5), el segundo junio (20.1) y el 3 septiembre (19.6).



Figura 52. Panel izquierdo Series de tiempo de la salinidad para el sensor del anclaje de fondo (F2). Panel derecho promedio mensual de salinidad.

Anclaje de fondo canal Fitz-Roy (F2): la serie de tiempo osciló entre un mínimo absoluto de 4.39 °C el 8 de agosto y una temperatura máxima de 18.52 °C registrada en 5 de marzo. La temperatura media de esta serie fue de 7.10 °C. La serie en promedio evidencio una marca señal estacional, así los registros térmicos más elevado en febrero con los máximos registros térmicos, a partir de este mes la temperatura decae sostenidamente hasta alcanzar los mínimos en periodo invernal (julioagosto), a partir de este periodo la temperatura nuevamente aumenta sostenidamente hasta noviembre.



Figura 53. Panel izquierdo Series de tiempo de temperatura para el sensor del anclaje de fondo (F2). Panel derecho promedio mensual de temperatura.

5.2.4 Estratificación.

La estratificación determinada mediante el parámetro de esterifican Ns (que es una medida adimensional), reveló que los valores absolutos más elevados se localizaron en el periodo de febrero, dentro de los fiordos (zona G) y Navarro (zona F). La zona B presentó una estratificación baja, lo que se traduce en una columna de agua con una marcada tendencia a la homogenizad, la zona del canal Gajardo (A), también indicó una estratificación permanente en todos los periodos medidos, el canal Gajardo y la entrada este del seno Skyring, indicaron en general para todos los periodos valores bajos de estratificación ≤. Por otro lado, es importante señalar que en promedio la esterificación fue mayor en marzo, que en los periodos de febrero y noviembre. Con estos antecedentes, se infiere que existe una variación espacial y temporal de la esterificación.





5.2.5 Condiciones de oxígeno: distribución espacial.

La variabilidad en la concentración de oxígeno disuelto promedio, en la capa superficial mostró algunas diferencias espaciales, así en febrero los mayores valores fueron observados en la parte este del seno Skyring, junto a la conexión con canal Fitz-Roy y seno Otway, con una concentración media de ~7 ml/L, hacia la parte del canal Euston fueron observados valores ~5-4 ml/L. a nivel superficial los menores valores medios fueron registrado en marzo en la boca del canal Gajargo3. Ml/L, fuera de esta zona con valores bajos, la concentración en marzo se observó mayormente

homogénea con valores en torno a ~6ml/L. La concentración media durante noviembre tampoco evidenció diferencias espaciales, si destaca sus mayores valores promedios con una concentración ~8.5 ml/L. En la capa profunda, es donde se evidenciaron diferencias en todos los periodos medidos, como patrón general los mayores valores se registraron en la zona este del seno Skyring incluyendo canal Fitz-Roy y entrada de seno Otway, dentro de esta zona la concentración promedio de oxígeno, en febrero y marzo fue de ~6.5 ml/L, mientras que noviembre destacan elevados valores promedio ~8 ml/L,. al oeste de esta zona (cala Bertrand y Euston), la concentración media es marcadamente menor (~4 ml/L), sin diferencias entre un periodo y otro, se escapade este esquema las elevadas concentraciones observadas en noviembre en el estero Riquelme (figura 55 F).



Figura 55. Distribución horizontal promedio 0-25m. Oxígeno disuelto.

5.2.6 Condiciones de oxígeno disuelto: Variabilidad temporal de oxígeno disuelto (series de tiempo).

Línea de anclaje columna de agua (L1). El oxígeno disuelto en el sensor de 30 m, varió entre un mínimo absoluto de 6.67 ml/L en marzo y una concentración máxima de 7.89 ml/L en agosto, esto significó una baja variación temporal, la serie exhibió una tendencia a incrementar la concentración desde febrero hacia noviembre. La serie de 100 m, exhibió una alta fluctuación temporal, con un valor mínimo de 4.81 ml/L en junio y una máxima de 7.08 ml/L octubre, la concentración media de esta serie fue 6.17 ml/L. esta serie exhibió una tendencia a aumentar la concentración desde febrero a noviembre. La serie exhibió una tendencia a aumentar la concentración desde febrero a noviembre. La serie mas profunda (200m), osciló entre un mínimo absoluto de 4.98 ml/L en abril y una máximo de 6.67 registrado en septiembre. La serie exhibió una baja variación temporal entre febrero y julio, entre julio y noviembre se observó una mayor variabilidad temporal. Los promedios

mensuales indicaron que la concentración mínima correspondió en junio-julio, se observaron dos máximas importantes una en febrero-marzo 5.2 ml/L y otra de mayor magnitud en octubre-noviembre 6 ml/L.



Figura 56. Panel izquierdo Series de tiempo para los sensores de 30 m, 100 m y 200 m de anclaje (L1). Panel derecho promedio mensual de cada sensor.

Línea de anclaje columna de agua (L2). El oxígeno disuelto en el sensor de 30 m, varió entre un mínimo absoluto de 6.67 ml/L en marzo y una concentración máxima de 7.89 ml/L en agosto, con un valor medio de 6.96 ml/L, esto significó una baja variación temporal, la serie exhibió una tendencia a incrementar la concentración desde febrero hacia noviembre, es importante señalar que entre junio y hasta septiembre, se observó una mayor variabilidad de la concentración. La serie de 100 m, exhibió una alta fluctuación entre un máximo de 5.07 ml/L y un mínimo de 4.44 ml/L, con una concentración media de 4.74 ml/L, se observó una fluctuación permanente a lo largo de la serie. Además, en promedio, se observaron mayores entre marzo y junio, posteriormente los valores disminuyen, aunque no en una magnitud significativa. La serie de 150, exhibió la menor concentración promedio (4.15ml/L). exhibiendo una fluctuación baja con oscilaciones entre un máximo de 4.23 y una concentración mínima de 4.13 ml/L. Si bien la variación no fue significativa, la concentración promedio indicó dos máximos: uno en marzo-abril y otro en agosto-septiembre.



Figura 57. Panel izquierdo Series de tiempo para los sensores de 30 m, 100 m y 150 m de anclaje (L2). Panel derecho promedio mensual de cada sensor.

Línea de anclaje columna de agua (L3): La serie de tiempo de oxígeno superficial (30m), vario entre una concentración mínima de 6.62 ml/L y un máximo de 8.12 ml/L (septiembre). La concentración media de esta serie fue de 7.34 ml/L, entre febrero y mayo, la variación fue baja, de junio en adelante se observó un incremento de la variación. Mensualmente se observó en promedio una tendencia de aumentó en la concentración, desde febrero a noviembre. El sensor de 100 m, osciló entren una concentración mínima de 4.73 ml/L (noviembre) y una máximo de 5.52 ml/L (septiembre), al igual que la serie de 30m, se observó una mayor fluctuación entre junio-noviembre la concentración media en esta serie fue de 4.93 ml/L. si bien la fluctuación fue moderada de esta serie, en término medio se observaron 2 peak uno en marzo y otro en agosto-septiembre. La serie más profunda (150 m), presento una baja variación, con mínimos de 4.33 ml/L (junio) y máximos de 4.62 ml/L (septiembre) y una concentración media de 4.44 ml/L, lo que se tradujo en una seria más bien homogénea.



Figura 58. Panel izquierdo Series de tiempo para los sensores de 30 m, 100 m y 150 m de anclaje (L3). Panel derecho promedio mensual de cada sensor.

Anclaje de fondo canal Gajardo (F1): la serie de tiempo de esta zona registro una alta variabilidad con valores mínimo de 7.08 ml/L en julio y octubre y con una concentración máxima de 8.08 ml/L en septiembre, la mayor variabilidad se observó entre julio y noviembre, la concentración promedio en esta zona fue de 7.46 ml/L. el ciclo anual promedio indicó 2 peak importante el primero de menor magnitud en febrero-mar y el segundo de mayor magnitud en septiembre, los menores valores promedios se registraron entre abril-julio.



Figura 59. Panel izquierdo Series de tiempo para el sensor del anclaje de fondo (F1). Panel derecho promedio mensual del sensor.

Anclaje de fondo canal Fitz-Roy (F2): la serie de tiempo de este sensor de fondo registro una oscilación desde una concentración mínima absoluta de 3.43 ml/L registrada el 6 de abril y una concentración máxima de 7.95 ml/L correspondiente al 12 de septiembre, lo que indicó una alta variabilidad. La concentración media durante estas mediciones fue de 7.17 ml/L. el ciclo anual promedio indico que la concentración exhibió una tendencia a aumentar desde febrero hasta septiembre, a partir de octubre la concentración nuevamente disminuye.



Figura 60. Panel izquierdo Series de tiempo para el sensor del anclaje de fondo (F2). Panel derecho promedio mensual del sensor.

5.2.7 Distribución vertical de nutrientes (nitrato, fosfato y silicato)

La distribución vertical de los nutrientes exhibió una columna de agua estratificada de 3 capas, una capa superficial con valores mínimos y uniformes en los primeros 50m de la columna de agua (nitrato ~1-2 µmol/L, fosfato ~0.25 µmol/L y silicato entre ~0- 2,5 µmol/L).

Una capa intermedia entre los 50 y 100m donde se presenta un aumento progresivo de los nutrientes y que varía entre los meses de febrero y noviembre, siendo éste último el periodo el que presentó un aumento más paulatino en la concentración de los nutrientes.

Bajo los 100m se presenta la capa profunda, donde se registró valores máximos en profundidad hacia la zona oeste de Seno Skyring (Canal Gajardo, Estero Ventisquero). Para el caso de nitratos los valores máximos fluctuaron entre 7 y 10 μ mol/L y para silicatos entre 17,5 y 25 μ mol/L, registrando las menores concentraciones durante noviembre de 2021. El fosfato no exhibió grandes diferencias en su concentración durante ambos periodos. Sin embargo, se observó una capa profunda más homogénea durante febrero hacia el sector Oeste (Canal Gajardo, Estero Ventisquero, Estero Navarro) con valores alrededor de ~1 μ mol/L, en contraste al periodo de noviembre donde estos valores de 1 μ mol/L se focalizaron hacia el sector medio de Seno Skyring (Isla Escarpada).



Figura 61. Distribución vertical de nitrato, fosfato y silicato

5.2.9 Distribución espacial de nutrientes (nitrato, fosfato y silicato) y clorofila

La distribución espacial de los nutrientes denota claras diferencias espaciales y temporales en el área de estudio. El aporte promedio de nutrientes nitrato y silicato superficial, presentó valores máximos hacia la zona oeste de Seno Skyring principalmente en Canal Gajardo y Estero Ventisquero siendo noviembre el periodo de mayor concentración con valores de nitrato cercanos a 2,5 µmol/L y valores alrededor de 6 µmol/L para el silicato. Mientras que hacia la zona Este (Canal Fitz Roy) se registró las menores concentraciones, entre 0 y 2 µmol/L para nitrato y silicato. Por su parte, el fosfato presentó mayor concentración durante el periodo de febrero hacia el sector medio y Este de Seno Skyring (Canal Fitz Roy) con una concentración levemente mayor (~0.5 µmol/L) en

relación al periodo de noviembre donde el promedio de concentración fue de 0.2 µmol/L en toda el área de estudio (figura 62)

La capa intermedia comprendida entre los 26m y el fondo, denotó una concentración promedio mayor y centralizada en el sector medio de Seno Skyring entre las Islas Escarpada e Isla Grande, mientras que las menores concentraciones (~0.5 µmol/L) se registraron hacia los extremos Oeste y Este del área de estudio. Las mayores concentraciones se observaron durante el periodo de febrero con máximos de 10 µmol/L para nitrato, 1 µmol/L para fosfato y 15 µmol/L para silicato, mientras que para el periodo de noviembre se presentó concentraciones homogéneas con leves fluctuaciones latitudinales (~4 µmol/L para nitrato, ~0.5 µmol/L para fosfato v ~5 µmol/L para silicato (figura 63). La capa de fondo presentó grandes diferencias en la distribución de la concentración de nutrientes, los extremos Oeste-Este (Canal Gajardo – Canal Fitz Roy) de la zona de Seno Skyring presentaron nulo aporte de nitrato, fosfato y silicato. Mientras que en el sector medio entre las Islas Escarpada, Isla Grande y Estero Navarro se presentaron las mayores concentraciones de los nutrientes, alcanzando máximos de 10 µmol/L para nitrato, 1.5 µmol/L para fosfato y 25 µmol/L para silicato. Temporalmente, ambos periodos presentan la misma distribución de concentración de nutrientes, sin embargo, el periodo de noviembre mostró valores máximos menos marcados en relación al periodo de febrero: concentraciones máximas de 7 µmol/L para nitrato, 1 µmol/L para fosfato y 18 µmol/L para silicato (figura 64).



Figura 62. Distribución espacial promedio de nutrientes (nitrato, fosfato y silicatos) capa superficial (0-25).



Figura 63. Distribución horizontal promedio de nutrientes (nitrato, fosfato y silicatos), capa 26m-fondo.



Figura 64. Distribución horizontal promedio de nutrientes (nitrato, fosfato y silicatos), capa de fondo.

5.2.10 zonificación de la biomasa fitoplanctónica.



Figura 65. Concentración de clorofila promedio integrado y zonificación con mayores niveles de productividad (línea punteada negra indica los promedios de clorofila).

5.3 Objetivo 2.2.3. Determinar la conectividad dentro del seno Skyring

Según la metodología descrita en 5.3 la conectividad se calculó entre los 36 centros de cultivo concesionados dentro del sistema del seno Skyring (**figura 12** y **tabla VI**) para cada uno de los 2 tipos de partícula para cada uno de los 8 modelos hidrodinámicos y 2 tipos de dispersión. Para sintetizar y analizar en conjunto la conectividad del seno Skyring de los años 2016-2017 se promediaron las conectividades de los 8 modelos hidrodinámicos y los 2 tipos de dispersión (*downstream – upstream*), presentándose en las **figuras 72-75** las matrices de conectividad de centros de cultivo de salmón por tipo de partícula (derivador – *Caligus rogercresseyi*). Debido al tamaño de las matrices (36 filas x 37 columnas) y para hacer su lectura e interpretación más rápida, intuitiva y para facilitar su visualización e identificación de patrones, la información de conectividad de distribución lineal (a intervalos de 10%). En cualquier caso, las matrices numéricas de cada uno de los 32 modelos de dispersión de partículas que han sido promediadas para su representación en las **figuras 72-75** se incluyen en el **ANEXO I** de la base de datos (referirse a "Matrices Conectividad Skyring.xlsx" en caso de solicitar los valores exactos de la conectividad).



Figura 72: Matriz de la conectividad promedio del porcentaje de partículas tipo derivador entre centros de cultivo.

En la **figura 72** a primera vista se aprecia una marcada auto-conectividad (conectividades establecidas por partículas en el mismo centro de cultivo desde donde iniciaron su deriva) en la diagonal que va de la esquina inferior izquierda a la esquina superior derecha. Como las partículas tipo derivador establecen conectividades desde el primer paso de tiempo hasta el último de los 30 días que permanecen en suspensión el 100% de las partículas que iniciaron su deriva en cada centro de cultivo sumó conectividad en su mismo centro de cultivo, y también en la zona libre de centros de acuicultura (columna en el extremo derecho) una vez que salen de su centro de cultivo de inicio.

Los centros de cultivo (tanto fuentes como sumideros) en los ejes están agrupados por la ACS a la que pertenecen, empezando desde la esquina inferior izquierda por los 9 centros de la ACS 49A, seguidos de los 9 de la ACS 49B, 4 de la ACS 50A y por último los 14 de la ACS 50B (**tabla V**). Las conectividades son más fuertes entre centros de una misma ACS que con centros de otras ACS. El máximo de conectividad entre centros de cultivo se da desde el centro 120145 al 120215 con el 81.125% de las partículas tipo derivador del primero llegando al segundo, seguido por el 74.75% de las partículas del centro 120132 hacia el centro 120144. Estas 3 conexiones se dan todas entre centros de una misma ACS (50B). En el extremo opuesto hay centros que no dispersan nada o muy pocas de sus partículas hacia ningún otro centro como el centro 120051 de la ACS 49B, que no establece conectividades mayores al 10% en ningún caso (máximo 4.33% con el centro 120188 de su misma ACS).



Figura 73: Matriz de la conectividad promedio del porcentaje de partículas tipo derivador entre ACS.

En la **figura 73** se han agrupado y promediado las conectividades de los centros de cultivo por la ACS a la que pertenecen para así poder identificar y cuantificar patrones de conectividad entre las ACS: las ACS 49A y 50A son las ACS que están más conectadas recíprocamente (18.01% de la 49A a la 50A y 16.39% de la 50A a la 49A). Por el contrario, las ACS 49B y 50B no establecen apenas contactos con centros de otras ACS (máximos de 3.71% y 4.17%). La mayor parte de las conectividades de los centros de cada una de las 4 ACS se establecen con centros de su misma ACS y principalmente con zonas libres de centros de salmonicultura (máximo de 51.41% entre centros de la ACS 50A y mínimo de 17.86% entre centros de la ACS 50B).



Figura 74: Matriz de la conectividad promedio del porcentaje de partículas tipo Caligus rogercresseyi entre centros de cultivo.

Para el caso de la conectividad entre centros de cultivo de partículas tipo *Caligus rogercresseyi* (**figura 74**) las conectividades son notoriamente menores y más débiles que para el caso de derivadores. Las auto-conectividades son iguales o ligeramente superiores al 50% de las partículas, porque como se explicó están promediadas las dispersiones *downstream*, donde sólo computan las conectividades durante la fase copepodito (única fase infestiva de interés sanitario), con las dispersiones *upstream*. Aparte de conectividades con zonas libres de centros de cultivo (con un

mínimo de 5.39% del centro 120007 y máximos iguales o ligeramente superiores al 50% para un gran número de centros), las mayores conectividades entre centros se dan desde centros de la ACS 50A: 24.59% del centro 120111 con el centro 120115 de la misma ACS 50A, 24.49% del centro 120110 con el centro 120118 de la ACS 49A y 21.97% del centro 120115 de nuevo con el centro 120118 de la ACS 49A, junto al 28.79% desde el centro 120109 con el centro 120116 estos 2 últimos de la ACS 49A. La gran mayoría de centros establecen conectividades con muy pocos otros centros con una media 3.3 centros conectados, para un máximo de 9 (todos los centros de la ACS 50A están conectados entre sí) y un mínimo de 0 (centros 120168 y 120007 de la ACS 49A, 120007 de la ACS 49B y centros 120132 de la ACS 50B).



Figura 75: Matriz de la conectividad promedio del porcentaje de partículas tipo *Caligus rogercresseyi* entre ACS.

Al agrupar y promediar las conectividades de partículas tipo *Caligus rogercresseyi* de los centros de cultivo por la ACS a la que pertenecen (**figura 75**) se puede constatar y ver más claramente lo anteriormente visto en la **figura 74**. Las conectividades entre los centros de cultivo de cada ACS son muy débiles, siquiera la auto-conectividad tiene un máximo del 15.54% para centros de la ACS 50A (6.75% la ACS 49A, 6.18% la ACS 49B y 3.91% la ACS 50B). El resto de conectividades entre ACS están por debajo incluso del 0.015% salvo la ACS 50A con la ACS 49A con un 2.84% y recíprocamente la ACS 49A con la ACS 50A con un 0.29%. Las conectividades más fuertes de los centros de cultivo de cada ACS se establecen con zonas libres de acuicultura (entre un 40% - 50% de sus partículas pasan en algún momento por estas zonas).

A partir de las matrices de conectividad que muestran el porcentaje de partículas que, saliendo desde cada centro de cada ACS se conectan entre sí, se promediaron las conectividades de cada centro de cultivo, excluyendo las auto-conectividades y con áreas libres de centros de cultivo ("zona libre" en los gráficos), para de esta manera tener un valor único de la conectividad de cada centro de cultivo y cada ACS respecto de los demás centros de cultivo y ACS, respectivamente (**figuras 76 y 77**). Este valor único se puede interpretar como un índice del riesgo de transmisión de enfermedades de afección en la salmonicultura dado el enfoque sanitario de la metodología de conectividad.



Figura 76: Conectividad promedio del porcentaje de partículas tipo derivador de cada centro de cultivo y ACS respecto de los demás centros de cultivo y ACS, respectivamente.



Figura 77: Conectividad promedio del porcentaje de partículas tipo *Caligus rogercresseyi* de cada centro de cultivo y ACS respecto de los demás centros de cultivo y ACS, respectivamente.

En las **figuras 76** y **77**, que muestran la conectividad de cada centro y ACS de cultivo de salmón respecto de los demás centros y ACS, respectivamente, podemos ver nuevamente que las conectividades de partículas tipo derivador son mayores que las *Caligus rogercresseyi*.

Para partículas tipo derivador (figura 76) las mayores conexiones con valores cercanos o superiores al 10% de las partículas son de los centros 120107, 120109, 120116, 120118 (ACS 49A) y 120110,

120111, 120115 (ACS 50A), todos ellos ubicados entre punta Laura y punta Dársena (al Oeste de la isla Escarpada). En el otro extremo está el centro de cultivo 120051 (en el seno Otway) con apenas menos de un 1% de conectividad con otros centros. La conectividad promedio de todos los centros con los demás es del 6.96%. Al agrupar las conectividades de los centros según la ACS a la que pertenecen se puede ver que las ACS 49A y 50A con el 8.38% y 7.81% de las conectividades son las que presentarían un mayor riesgo, mientras que las ACS 49B (2.6%) y 50B (3.49%) contienen más las conectividades de sus partículas entre sus dominios, recibiendo y propagando en promedio menos partículas hacia afuera. La conectividad promedio de todas las ACS con las demás es del 5.57%.

Para partículas tipo *Caligus rogercresseyi* (figura 77) los centros de cultivo de salmónidos que se conectan más con otros centros son el centro 120118 de la ACS 49A (8.38%), los centros 120167, 120208 y 120130 de la ACS 49B (10.74%, 7.47%, 7.41% respectivamente), los centros 120115 y 120110 de la ACS 50A (6.18% y 5.1% respectivamente) y el centro 120215 de la ACS 50B (7.77%). El resto de centros tiene una conexión menor al 5% de sus partículas hacia otros centros de cultivo, con algunos centros con conectividades nulas o menores al 0.1% de sus partículas: 120193, 120169, 120168, 120107 y 120007 de la ACS 49A; 120051 de la ACS 49B; 120144, 120132, 120184 y 120143 de la ACS 50B. La conectividad promedio de todos los centros con los demás es del 2.3%. Por la parte de las ACS, la ACS que muestra más transporte de las partículas de sus centros hacia los centros de otras ACS es la 50A con el 1.46%, siguiéndole la ACS 49A con el 0.15% y por último las ACS 49B y 50B con menos del 0.01%. La conectividad promedio de todas las ACS con las demás es del 0.4%.

5.4 Objetivo 2.2.4. 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, estará basado considerando los diferentes polígonos de cada ACS, tal como se señal en la figura 7. Esta información estará disponible en la plataforma de información oceanográfica, (www.ifop.cl/chonos).

5.4.1 Guía de usuario para el visualizador de datos.

La interfaz de usuario está diseñada para presentar información estadística y geográfica que permita una caracterización ambiental preliminar para los barrios de Agrupaciones de Concesiones de Salmónidos (ACS), utilizando campañas de medición realizadas en el Seno Skyring, Región de Magallanes. Dichas campañas corresponden a mediciones de CTDO (salinidad, temperatura, oxígeno disuelto) y nutrientes (nitrato, fosfato, silicato), tomados en diferentes períodos de tiempo.

Información según barrio: Actualmente se tiene información de 4 polígonos o ACS: 49a, 49b, 50a y 50b. Para conocer la información asociada a cada ACS, se debe hacer click en el barrio de interés delimitado por las líneas verdes (**figura 78**).



Figura 78. Información hidrográfica por barrio (ACS)
Información según campañas: Se tiene información de 4 campañas realizadas en los meses de Marzo y Octubre de 2012, y Febrero y Noviembre de 2021.

Al hacer click sobre un polígono, en el primer paso, se despliega la información disponible de las campañas para ese barrio, en conjunto con la cantidad de perfiles tomados sobre el área (los perfiles se muestran como los puntos de colores encerrados por ACS sobre el mapa).

En la parte izquierda se presenta el mapa que indica la posición de la ACS sobre el Seno Skyring, y la cantidad de estaciones según la campaña que se haya escogido visualizar.



Figura 79. Información hidrográfica por campañas (periodo de muestreo)

Una vez que se elige una campaña, se despliegan las herramientas para la caracterización y visualización de los datos, en este ejemplo consideraremos la campaña de Marzo 2012.



Figura 80. Ejemplo del visualizador de estadística básica para la información por campaña.

En la parte superior se presenta el mapa con los perfiles tomados según la campaña (izquierda), y un cuadro resumen para las variables de temperatura, oxígeno, y salinidad (derecha). En esta última se caracterizan las variables mediante medidas de tendencia central como el promedio de los valores, además de sus máximos, mínimos y la cantidad de observaciones en cada caso.

Se consideran dos capas para la clasificación de las variables delimitadas por la altura de la termoclina: la primera capa corresponde a la capa de mezcla, es decir, la capa que comienza en la superficie y llega hasta los 25 metros de profundidad. Luego, la segunda capa corresponde a la capa profunda, es decir, aquella que supera los 25 metros de profundidad.

En la parte inferior se presentan gráficas de los perfiles, representados a través de promedio y una desviación estándar para las variables de temperatura, oxígeno disuelto, y salinidad.



Figura 81. Ejemplo de la representación gráfica de perfiles obtenidos.

Estos perfiles corresponden a gráficos interactivos que permiten un acercamiento a los puntos para conocer con precisión el valor de cada eje, en adición, en la esquina inferior derecha se puede ver la barra de herramientas interactivas. A continuación, se enlistan, de izquierda a derecha, cada una de ellas con su respectiva función, para una mejor comprensión de la visualización.

- Desplazamiento
 - Icono:

- Función: Esta herramienta permite desplazar el gráfico arrastrando el mouse o dedo dentro de la región del gráfico.
- Box Zoom
 - o Icono: P
 - Función: Esta herramienta realiza un zoom dentro de una región rectangular escogida por el usuario. Para establecer sus límites se realiza mediante el click izquierdo.
- Rueda Zoom
 - \circ lcono: ΘP
 - Función: Esta herramienta permite realizar un zoom de acercamiento y alejamiento con la rueda del mouse, respetando los límites y rangos máximos y mínimos del plot actual.
- Guardar
 - o Icono:
 - Función: Esta herramienta permite guardar el plot actual como imagen PNG.
- Reset
 - Icono: ♥
 - Función: Utiliza esta herramienta para resetear los parámetros a su formato por defecto.
- Información
 - Icono:
 - Función: Esta herramienta entrega información respecto al módulo que permite generar los gráficos interactivos (<u>https://bokeh.org</u>)
- Hover
 - o Icono: 🛡
 - Función: Es una herramienta pasiva que está activa permanentemente, permite desplegar información sobre un punto cuando se mantiene el cursor sobre él.

6. DISCUSIÓN

El seno Skyring, se caracteriza geomorfológicamente por la presencia de las constricciones de canal Gajardo y Fitz-Roy, estas generan la formación de ambientes con características oceanográficas distintivas. En este sentido, destaca el canal Fitz-Roy, que exhibió bajas profundidades (<10 m) y actúa de conexión limitada con el Seno Otway, donde algunas condiciones observadas en Otway no se registran dentro del seno Skyring, e.g salinidad (Valdenegro & Silva 2003). Por otra parte, la constricción de lado oeste, en canal Gajardo, es aún más limitada (~5 m), sin embargo, no es conocida en su detalle debido a la ausencia de una batimetría más detallada que permita conocer con exactitud la geometría de esa zona de conexión, esto es un aspecto importante a resolver, ya que puede influenciar de forma dramática los resultados del intercambio de agua entre la cuencas internas y externas.

El seno Skyring, cuenta con una menor 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. Por otra parte, el estudio realizado por IFOP durante el año 2012 y 2013 (Pinilla et al. 2013) y financiado por Subsecretaria de Pesca y Acuicultura permitieron mejorar la información hidrográfica para caracterizar este sistema marino, esto sumado a información que está siendo recopilada durante el año 2021 y continuará durante el año 2022, permitirá generar mejor información oceanográfica para la toma de decisiones.

La información hidrográfica recopilada en 2012 y 2013 (Pinilla et al. 2013) mostraba que las aguas oceánicas ingresan de forma muy acotada al seno Skyring, generando cuencas de características oceanográficas distintas, por ejemplo, en términos de salinidad el seno Skyring presentó una relativa baja variabilidad (rango de 15 a 20 psu) en toda la columna de agua, mientras que la zona externa presenta valores superficiales bajos (~15 psu), pero también valores mayores a 30 psu en capas más profundas, dando cuenta de una mayor influencia oceánica. Por otra parte, también era conocida la disminución de la amplitud del nivel del mar al interior del seno, que sugería, una disipación importante de la energía de la onda de marea al encontrarse con los limites topográficos antes detalladas, así como también la importancia y característica general de los vientos, y la descarga de agua dulce provenientes principalmente del deshielo de glaciares.

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 para inicialización del modelo hidrodinámico y que fue implementado, en esta etapa, para los años 2016 y 2017. 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 basada en individuos.

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, presentan una alta relación lineal, bajo error en magnitud y congruencia en la dirección de viento según las observaciones, esto revela la capacidad del modelo WRF de reproducir el forzante de viento en el dominio de seno Skyring. El viento simulado por WRF entre 2015 y 2017 revela un patrón estacional con una marcada 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 un caudal medio acumulado de 138 m³s⁻¹ para todo el sistema, muy por debajo, por ejemplo, a lo estimado en las cuencas del río Puelo (~645 m³s⁻¹) o Palena (~812 m³s⁻¹), 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 m³s⁻¹, y mínimos durante la época de invierno que llegan a ~75 m³s⁻¹ 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 m³s⁻¹año⁻¹. La señal interanual muestra una variabilidad con una desviación estándar de 14 m³s⁻¹, con un máximo de descarga durante el año 2014 con un caudal por sobre los 160 m³s⁻¹ y mínimos ocurridos durante los años 1992, 2002 y 2016 por debajo de los 120 m³s⁻¹. Cabe señalar que el modelo hidrodinámico simuló el año 2016 y 2017 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 canal Jerónimo, seno Otway, canal Fitzroy. Dentro de Skyring se evidencio 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 <5m y Fitzroy

~10m, por lo que esta característica batimétrica restringe y disipa el paso de la onda de marea. Comparativamente la amplitud de M₂ en el mareógrafo y modelo en el extremo sur del canal Fitzroy (punto previo a la constricción) registro una amplitud 0.45 m mayor a la amplitud que registro 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 si 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 M₂. En la Patagonia Norte la amplitud de M₂ 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 periodo 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 2013, años distintos, pero expresiones similares en su estructura. El análisis mediante EOF revelo que el modo 1 y que explica 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 oeste-este, 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.

Es importante señalar que, en la segunda etapa de este estudio en seno Skyring, finalizará el segundo semestre de 2022, aquí se integrará toda la información recopilada durante 2021-2022 y extenderá la simulación periodos más extensos con el fin de verificar la variabilidad interanual del sistema.

La batimetría permite distinguir 2 zonas claramente definidas y con características diferentes, la zona esta (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 con máximos, en zonas con depresión batimétrica de 500-600 m, lo que caracteriza la batimetría de esta área, principalmente como irregular y abrupta. En este sentido, destaca, además, la constricción batimétrica localizada dentro del canal Gajardo, como el estrechamiento de la batimetría del canal Fitz-Roy, limita la conexión entre el seno Otway y el seno Skyring, 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.

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, estructurar 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 para zonas estuarinas de canales y fiordos de la región sur Austral de Chile, (Carrasco & Silva 2010, Valle-Levinson et al. 2006).

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 de este, ingreso de agua de salinidad >20, valores que de acuerdo a lo planteado por Silva & Guzmán 2006 correspondería a agua estuarina salada, lo que trasformar a estos sistemas de fiordos con características particulares. Este de suma relevancia ya que los niveles de nutrientes registrados en los dos periodos medidos.

En los estudios anteriores ejecutados por IFOP, se ha identificado como una de las principales fuentes de nutrientes dentro de los sistemas de fiordos, corresponde al transporte advectivo de las aguas de características oceánicas, las cuales transportan al interior de estos sistemas elevadas concentraciones de nutrientes, trasporte que se restringe en gran medida por la batimetría, específicamente por las contracciones batimétricas (Soto et al 2021).

De esta forma no se idéntico un flujo de nutrientes desde la zona oceánica hacia el interior del seno Skyring. El cual proviniera o bien de las zonas oceánicas adyacentes mediante la conexión del canal Gajardo, o la zona de conexión a través del canal Fitz-Roy, con el seno Otway.

En relación a esto se ha señalado como la marcada estratificación observada en zona sur austral de fiordos y canales, producto de la interacción de agua dulce que flota en superficie sobre el agua oceánica más densa (Siervers & Silva, 2008) puede presentar una variabilidad estacional (Schnaider et al.,2014) ya que existen diferentes forzantes físicos que pueden romper esta estratificación (Calvete y Zobarzo, 2011), este hecho es relevante debido a que puede tener implicancias biológicas en la biomasa de especies pelágicas y bentónicas (Iriarte et al., 2010), pero sobre todo en la fitoplanctónica al mantener los organismos dentro de la zona fótica, donde las condiciones ambiéntales son adecuadas para su proliferación (Jacob et al., 2014). Particularmente en la zona de Magallanes se ha observado una correlación positiva entre la estratificación y la biomasa fitoplanctónica, señalando que este factor controlaría el incremento de la biomasa (Rios et al., 2016). Estos antecedentes son relevantes, ya que deberían ser considerados en la salmonicultura, principalmente a los efectos registrados recientemente en la X y XI región, entre la mortandad de salmónidos y el bloom de micro-algas Buschman et al. 2016

De esta forma se determina la importancia de la batimetría en la oceanografía preliminarmente en la zona del Seno Skyring, ya que los resultados son concordantes a lo reportado por estudios anteriores de IFOP, donde se ha determinado la implicancia de la batimetría en restricciones en la conexión entre una zona y otra, lo que tiene implicancias tanto en las propiedades (físico-quimicas) de la columna de agua (Soto et al., 2018, 2019), como también en la circulación y los tiempos de renovación de diferentes cuerpos de agua (Pinilla et al., 2021).

La conectividad en el seno Skyring está formulada bajo un enfogue sanitario de la salmonicultura debido a problemáticas actuales en la XII región de Magallanes en cuanto a la propagación de brotes de patógenos. En este estudio se pueden observar una serie de patrones en cómo se conectan las entidades espaciales (centros de cultivo de salmónidos y ACS) entre sí. La característica más destacada es la notoria diferencia en los patrones de conectividad según el tipo de partícula empleado, bien derivador o Caligus rogercresseyi (figuras 72-75). Esto se debe en gran medida a que las partículas tipo derivador pasivo con un horizonte temporal fijo y constante de 30 días, permanecen mucho más tiempo en suspensión y dispersión que las partículas de Caligus rogercresseyi, las cuales tienen una expectativa media de vida de tan sólo 1.7 días. Esta vida promedio tan corta es debida a la alta mortalidad de Caligus rogercressevi a bajas salinidades menores a 20 PSU (figura 11, Bravo et al., 2003) similares en promedio a las presentes en el seno Skyring durante el periodo de estudio (años 2016-2017). Además, la mencionada expectativa de vida promedio de 1.7 días de Caligus rogercresseyi en el seno Skyring hace que sean aún menos las partículas que logren madurar desde la primera fase planctónica de nauplio hasta la segunda fase de copepodito, pues la maduración de una fase a la otra se demora 7 días o más para temperaturas inferiores a 11°C (figura 10, González y Carvajal, 2003), como las más comúnmente presentes en el seno Skyring para el periodo de estudio. Esto hace que, en el caso de la dispersión downstream, la fase copepodito, que es la única fase la única infestiva de Caligus rogercressevi no llegue siguiera a alcanzarse antes de la muerte y eliminación de la partícula por lo que no llegue a computar conectividades en la dispersión downstream.

Además de la diferencia en el tiempo en que ambas partículas permanecen en suspensión y transporte, también está el hecho de que ambas partículas se comportan de manera diferente, pues *Caligus rogercresseyi* posee la capacidad natatoria suficiente para subir y bajar por la columna de agua conforme a estímulos ambientales (radiación solar, estratificación y bajas salinidades < 27 PSU), mientras que las partículas de tipo derivador se mueven exclusivamente conforme a los flujos advectivo-difusivos en las 3 dimensiones espaciales. Las diferentes circulaciones en diferentes capas de la columna de agua, transportan de diferente manera a partículas que están situadas a diferentes profundidades, lo que explica tales diferencias en la conectividad. Así se puede ver en las **figuras 72** y **74** que el grado de conexión para un tipo de partícula no es igual para la otra, y viceversa.

Independientemente del tipo de partícula, el aislamiento o aglomeración de los centros de cultivo entre sí condiciona su grado de conectividad, lo que explica la alta conectividad de centros cercanos entre sí y la baja conectividad de centros situados en canales y fiordos más aislados del sistema central de Skyring donde se encuentran la mayoría de centros de cultivo. En ambas **figuras 76** y **77** se observa un patrón de alta conectividad en el clúster de centros situado entre punta Laura y punta Dársena al Oeste de la isla Escarpada, dada por la alta densidad de centros (hasta 7 centros en 13 km2). Estos centros al estar compartidos entre 2 ACS (120109, 120118 y 120107 en la ACS 49A y 120110, 120115, 120111 y 120112 en la ACS 50A) provoca que también la conectividad entre dichas ACS sean las más altas. Como contraposición, el centro de cultivo 120051 al otro extremo del canal Fitzroy y ya en el seno Otway está tan aislado del sistema del seno Skyring que presenta conectividades muy bajas (derivador) o nulas (*Caligus rogercresseyi*).

Es reseñable que algunas de las mayores conectividades de *Caligus rogercresseyi* se den en centros relativamente aislados del resto como el 120167, que está conectado con solo otros dos centros, pero muy fuertemente a uno de ellos (120130), o los centros 120145, 120215 y 120216 del estero Navarro en la ACS 50B, que se comunican sólo entre ellos, pero relativamente fuerte, y por

ello tienen una alta conectividad. Estas conexiones que no se dan para partículas tipo derivador, pueden ser debidas a diferentes dispersiones de *Caligus rogercresseyi* por sus propios movimientos verticales que las sitúan en capas de la columna de agua con diferente régimen de corrientes que las capas donde se sitúan las partículas de derivador.

Las ACS con mayor conexión con otras ACS (**figuras 73** y **75**) y que, por tanto, suponen un mayor riesgo de contagio para las demás ACS y para ellas mismas, son la 49A y la 50A: tanto para partículas tipo derivador pasivo (8.38% y 7.81%, respectivamente), como para partículas tipo *Caligus rogercresseyi* (0.15% y 1.46%, respectivamente), aunque éstas últimas en menor proporción. Además, las ACS que más conectadas están unas con otras son estas dos mismas 49A y 50A, lo cual, aplicando la argumentación anterior, se explica por la alta densidad de centros en el límite entre ambas ACS.

Finalmente, tal como se ha señalado anteriormente, El seno Skyring poseía poca información oceanográfica, ninguno de los cruceros CIMAR había realizado mediciones y esta limitaba a la publicación de Kilian et al., 2013. Este estudio ha entregado información que quedará disponible de manera interactiva en portal chonos.cl, para ser consultada por cualquier usuario de forma simple y expedita. Esta información estará enfocada bajo la perspectiva de ACS.

7. CONCLUSIONES PRELIMINARES.

- La información batimétrica, indicaría una geomorfología irregular y escarpada, generando así, la formación un sistema de características oceanográficas diferentes, las zonas adyacentes, tanto la conexión oceánica, como la conexión con seno Otway.
- Se implementó un modelo hidrodinámico tridimensional en seno Skyring y canales aledaños (2016-2017) forzado con información proveniente de modelos hidrológico, atmosférico y de mareas, todos estos modelos fueron evaluados y su desempeño es consistente con las observaciones.
- Las descargas totales de agua dulce que desembocan en seno Skyring alcanzan un valor de 138 m3 s-1, 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 si puede serlo como agente en el intercambio de agua con los canales de conexión Gajardo y Fitzroy.
- El viento simulado por WRF entre 2015 y 2017 revela un patrón estacional con una marcada 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.
- La circulación superficial sigue un patrón de corrientes a lo largo del año en dirección oeste-este, 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 información hidrográfica, recopilada en este estudio permitió identificar y estructurar los principales cuerpos de agua presentes dentro del seno Skyring con diferentes tipologías.
- Fueron identificados los principales patrones de distribución de los nutrientes, en cuanto a tu estructura vertical y distribución espacial.
- 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. Comparado con el sistema oceánico adyacente (canal Gajardo) y la conexión con el seno Otway mediante el canal Fitz-Roy.

- Durante este estudio no fueron detectadas zonas con bajos niveles de oxígeno disuelto a nivel hipóxico.
- La conectividad en el seno Skyring está formulada bajo un enfoque sanitario de la salmonicultura.
- Durante este estudio junto con implementar la conectividad entre diferentes ACS, con diferentes patrones que estuvieron diferenciados con los tipos de partículas (pasivas tipo derivador o tipo *Caligus rogercresseyi*.
- La información proveniente del modelo hidrodinámico, como: corrientes, temperatura, salinidad y edad de agua fueron montadas en la herramienta ATLAS en la plataforma CHONOS. Como también las diferentes propiedades físico-químicas del al columna de agua, realizadas en las mediciones quedaron disponibles para su visualización de forma interactiva y de acceso libre para cualquier usuario.

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.
- Aguayo, R., León-Muñoz, J., Vargas-Baecheler, J., Montecinos, A., Garreaud, R., Urbina, M., ... & Iriarte, J. L. (2019). The glass half-empty: climate change drives lower freshwater input in the coastal system of the Chilean Northern Patagonia. Climatic Change, 155(3), 417-435.
- 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.
- 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: <u>http://aysen.udec.cl/wp-content/uploads/Araya_Vergara_1996.pdf</u>.
- 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.
- 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.
- 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.
- Boghen, Andrew D. (ed.), 1995. Cold-Water Aquaculture in Atlantic Canada. Second Edition. (Moncton): The Canadian Institute for Research on Regional Development, (1995).
- Bolin, B., Rodhe, H., 1973. A note on the concepts of age distribution and transit time in natural reservoirs. Tellus 25, 58–62.
- Boynton, W. R., and W. M. Kemp, 1985. Regeneration and oxygen consumption by sediments along an estuarine salinity gradient, Mar. Ecol. Prog. Ser.,23, 45–55Bravo, 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 AH & R Pizarro. 2001. El costo ambiental de la salmonicultura en Chile. Análisis de Políticas Públicas, Fundación Terram (Chile) 5: 1-7.
- 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 : http://www.subpesca.cl/portal/616/articles-95146_documento.pdf
- 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.
- 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.

- 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.
- De Brye B., A. de Brauwere, O. Gourgue, E.J.M. Delhez and E. Deleersnijder, 2012. Water renewal timescales in the Scheldt Estuary, Journal of Marine Systems, 94, 74-86.
- 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.
- DHI, 2019. Mike 3, User guide and reference manual. Danish Hydraulic Institute, Denmark
- England, J. H. (1995), The age of water and ventilation timescales in a global ocean model, J. Phys. Oceanogr., 25, 2756–2777
- 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.

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-

- 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.
- 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.
- 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
- 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.
- 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.
- 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.

- Kärnä, T., & Baptista, A. M, 2016. Water age in the Columbia River estuary. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 183, 249-259. DOI: 10.1016/j.ecss.2016.09.001
- 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.
- Kendall, M.G., 1975. Rank correlation methods. London: Griffin.Lannan, C. N., & Fryer, J. L. (1994). Extracellular survival of Piscirickettsia salmonis. *Journal of Fish Diseases*, 17(5), 545-548.
- León-Muñoz, J., Urbina, M.A., Garreaud, R. et al. Hydroclimatic conditions trigger record harmful algal bloom in western Patagonia (summer 2016). Sci Rep 8, 1330 (2018). https://doi.org/10.1038/s41598-018-19461-4.
- 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.
- Liang, X., D. P. Lettenmaier, E. F. Wood, and S. J. Burges (1994), A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models, J. Geophys. Res., 99(D7), 14415–14428, doi:10.1029/94JD00483.
- Liu, Z., H. Wang, X. Guo, Q. Wang, H. Gao, 2012. The age of Yellow River water in the Bohai Sea. J. Geophys. Res.-Oceans, 117 (C11), C11006, doi:10.1029/2012JC008263
- National Center for Environmental Prediction, 2000. NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, Continuing from July 1999. National Weather Service, U.S. Department of Commerce, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory, Boulder, CO
- Mann, H.B., 1945. Nonparametric tests against trend. Econometrica, 13, 245–259. doi:10.2307/1907187
- Medina, Y., & Muñoz, E. (2020). Estimation of Annual Maximum and Minimum Flow Trends in a Data-Scarce Basin. Case Study of the Allipen river Watershed, Chile. Water, 12(1), 162.
- 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

- Myksvoll, M.S., Sandvik, A.D., Skarðhamar J, Sundby S., 2012. Importance of high resolution wind forcing on eddy activity and particle dispersion in a Norwegian fjord. Estuar Coast Shelf Sci 113: 293–304. <u>https://doi.org/10.1016/j.ecss.2012.08.019</u>.
- MINSAL 2020. COVID-19: Punta Arenas avanza a fase de Transición a partir del próximo jueves 17 de diciembre. Disponible en : <u>https://www.minsal.cl/covid-19-punta-arenas-avanza-a-fase-de-transicion-a-partir-del-proximo-jueves-17-de-diciembre/</u>
- Oliveira, A., Baptista, A.M., 1997. Diagnostic modeling of residence times in estuaries. Water Resour. Res. 33 (8), 1935–1946.
- Pantoja, S., Iriarte, J.L & Daneri, G., 2011. Oceanography of the Chilean Patagonia. Continental Shelf Research 31, 149-153.
- 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.
- 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/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, 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=56IF OP&vid=56IFOP&facet=local2,include,informes%20tecnicos&lang=es_ES&offset=0
- 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: <u>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</u>
- 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

- Soto D, Leon-Muños J, Soria-Galvarro Y y Quiñones R. 2020. Propuesta de Indicadores Ecosistémicos para el desempeño ambiental de la Salmonicultura, enero 2020. Documento tec. Disponible en: <u>https://www.incar.cl/wpcontent/uploads/2020/01/INFORME-COMPILADO-FINAL-Indicadores-ecosistemicospara-el-desempe%C3%B1o-ambiental-de-la-salmonicultura-11012020-1.pdf</u>
- 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
- 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
- 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, 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.
- Silva, N., Vargas, C.A., 2014. Hypoxia in Chilean Patagonian Fjords. Progress in Oceanography 129, 62-74.
- 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.
- Stewart, R.H. 2008. Introduction to physical oceanography. Department of Oceanography, Texas A & M. University, College Station, Texas, 345 pp.
- 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.
- 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.

9. Anexos

Anexo I: Base de datos.

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

Metodología

Se efectuaron mediciones de corrientes en la columna de agua mediante ADCP remolcado. Seleccionando 2 secciones transversales en la boca del estero Navarro (**figura 1**) en febrero y noviembre del 2021 respectivamente.

Para la realización de este estudio, se efectuaron mediciones con un ADCP en tiempo real, a través de un sistema remolcado del ADCP, utilizando para ello 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 cuartidiurna, 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 cuartidiurna, representada por la constituyente M4 con un periodo de 6.21; la 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.



Figura 1. Ubicación geográfica de transectos de ADCP remolcado en color azul campaña de febrero y en color rojo campaña de noviembre 2021.

Tabla I									
Detalle de mediciones de				ADCP Remolcado en febrero 2021 y noviembre 2021.					
ADCP Remolcado campañas seno Skyring									
Sector	fecha	tiempo	repeticiones	tamaño	intervalo	longitud °W	latitud° S	longitud °W	latitud °S
		(hr)		celda (m)	medición				
estero Navarro	16-02-2021	12	19	4	5	-72.5927	-52.7707	-72.5666	-52.8023

1 y 4

5

-72.6049

-52.7955

estero Navarro 25-11-2021

24

77

-52.8093

-72.589

Fase lunar en los meses de medición. luna nueva luna llena cuarto cuarto mes creciente menguante febrero 27 11 19 4 4 19 27 noviembre 11

Tabla II

Resultados Campañas oceanográficas (febrero y noviembre 2021) ADCP remolcado

Estero Navarro (figura 2, figura 3 y figura 4)

Las figuras 2, 3 y 4 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 2**) se observaron flujos de salida de menor intensidad en la parte media del canal (~20 cm s⁻¹) y de mayor intensidad en los bordes (~ 50 cm s⁻¹). Mientras que en noviembre (**figura 3**) los flujos fueron de menor intensidad con valores cercanos a los 20 cm s⁻¹, en tanto en las capas superiores a los 50m (**figura 4**) se observaron valores del orden de los 10 cm s⁻¹.



Figura 2. flujo residual (componente U) en estero Navarro durante la campaña de seno Skyring en febrero 2021.



Figura 3. flujo residual (componente U) en estero Navarro durante la campaña de seno Skyring en noviembre 2021.



Figura 4. flujo residual (componente U) en estero Navarro en las capas superiores (hasta los 50m) durante la campaña de seno Skyring en noviembre 2021.

Discusión y conclusión

Los resultados del flujo residual por medio del ADCP remolcado al interior del seno Skyring, en el estero Navarro, revelaron altos valores de corrientes residuales(U). Generalmente si se extrae la marea diurna y semidiurna a la corriente los valores residuales suelen ser bajos(<10cm s⁻¹), 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 batimetria, ejercen un rol más importante para modular la circulación del sector. Kilian et al., (2013) describe que las fluctuaciones de los niveles de agua en el Skyring están fuertemente controladas por la precipitación $(\pm 1 \text{ m})$ y por acción del viento $(\pm 1 \text{ m})$, mientras que las mareas sólo tienen influencias menores y solo se pueden detectar cerca de Angostura Témpanos y Canal Fitzroy en el rango de 10-20 cms. También describe que la fuerte acción del viento ocasiona fuertes corrientes superficiales en seno Skyring y seno Otway, principalmente en dirección oeste a este. Sin embargo, a pesar de la fuerte influencia del viento con respecto a la corriente superficial la columna de agua sobre el seno Skyring tiene una estratificación de densidad muy estable a lo largo del curso estacional. Esto también está relacionado con las adiciones de agua dulce durante todo el año (Kilian et al., 2007(b)).

Referencias Bibliográficas

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

169-172, 1989.

Kilian, R.,O. Baeza, S. Breuer, F. Rios, H. Arz, F. Lamy, J. Wirtz, D.Baque, P. Korf, K. kremer, C. Rios, E. Mutschke, M. Simon, R. De Pol-Holz, M. Arevalo, G. Worner, C. Shneider & G. Cassasa. Late glacial and holocene paleogeographycal and paleoecological evolution of the seno Skyring and Otway fjord sysyems in the magellan región. Anales instituto Patagonia (Chile), 2013. 41(2):5-26.

Kilian, R.,O. Baeza, T. Steinke, M. Arevalo, C. Rios & , C. Shneider. Late Pleistocene to Holocene marine transgression and thermohaline control on sediment transport in the western Magellanes fjord system of Chile (53°S). Quaternary Internacional, 161(1): 90-107. 2007.

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.

www.ifop.cl