



INFORME DE FINAL

Convenio de Desempeño 2014
Desarrollo de sistema de predicción sinóptico de
circulación marina para apoyo a la acuicultura, I Etapa.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / Enero 2016



INFORME DE FINAL

Convenio de Desempeño 2014

Desarrollo de sistema de predicción sinóptico de
circulación marina para apoyo a la acuicultura, I Etapa.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA / Enero 2016

REQUIRENTE

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

Subsecretario de Economía y Empresas de Menor Tamaño
Katia Trusich Ortiz

EJECUTOR

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Jefe División Investigación en Acuicultura
Leonardo Guzmán Méndez

Director Ejecutivo
Leonardo Núñez Montaner

JEFE PROYECTO

Elías Pinilla Matamala

AUTORES

Elías Pinilla Matamala
Cristian Ruiz Soto

COLABORADORES

Milton Salas Salas



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	1
ÍNDICE FIGURAS	2
ÍNDICE TABLAS	4
RESUMEN EJECUTIVO	5
1. ANTECEDENTES	7
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo general	17
2.2 Objetivos específicos	17
3. METODOLOGÍA	18
3.1 Objetivo específico 2.2.1	18
3.2 Objetivo específico 2.2.2	22
3.3 Objetivo específico 2.2.3	24
3.4 Objetivo específico 2.2.4	24
4. GESTIÓN DEL PROYECTO	25
5. RESULTADOS	28
5.1 Objetivo específico 2.2.1	28
5.2 Objetivo específico 2.2.2	35
5.3 Objetivo específico 2.2.3	39
5.4 Objetivo específico 2.2.4	42
6. DISCUSIÓN	48
7. CONCLUSIONES	55
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

FIGURAS

TABLAS

ANEXO: Evaluación del Modelo Operacional Sur Austral (MOSA).



ÍNDICE FIGURAS

- Figura 1.** Sistema oceanográfico operacional en el golfo de Finlandia
- Figura 2.** Marco conceptual para un sistema de información sobre el clima. Fuente: Trenberth (2008), Boletín de la OMM 57 (1).
- Figura 3.** Analisis secuencial de observaciones agrupadas en el tiempo. Las lines rojas mindican el estado del oceano predecido a partir de condiciones iniciales en el tiempo de analisis (puntos rojos). Las observcaciones obtenidas dentro dse la vnetana de analsis (verde) se han agrupado y asimilado solo en los tiempos de analisis. Figura obtenida de Andreas Schiller, Gary B. Brassington: Operational Oceanography in the 21st Century, 2011.
- Figura 4.** Observaciones de corrientes en la zona Sur-Austral realizadas por IFOP (2010-2015).
- Figura 5.** Campo tridimensional estático utilizado como condición de inicial en un modelo hidrodinámico.
- Figura 6.** Sección transversal de salinidad utilizada como condición de borde en un modelo. Notar que estos valores presentan variabilidad temporal y espacial.
- Figura 7.** Campo de viento de ejemplo, utilizado en un dominio similar a MOSA. Datos descargados de GFS.
- Figura 8.** Ubicación de los grandes ríos de la zona sur austral de Chile bajo monitoreo de la DGA.
- Figura 9.** (Arriba) Estructura de grilla tipo Arakawa –C utilizada en MOSA, (abajo) distribución de niveles verticales tipo sigma, similar a la utilizada en MOSA.
- Figura 10.** Diagrama que describe la operación periódica de MOSA.
- Figura 11.** Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo de MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.
- Figura 12.** Cronología que involucra el desarrollo del sistema operacional en tres etapas (2014-2017).
- Figura 13.** Diagrama de flujos que representa la estructura de funcionamiento de MOSA.
- Figura 14.** (Izquierda) Mascara del dominio de Chiloé-Aysén, (derecha) mascara del dominio de Magallanes.



- Figura 15.** (Izquierda) Modelo de elevación digital del dominio de Chiloé-Aysén, (derecha) Modelo de elevación digital del dominio del dominio de Magallanes.
- Figura 16.** Aspecto inicial del sitio web www.iproach.cl, el cual presentara los resultados de MOSA, será la plataforma de trabajo para montar otras herramientas de gestión ambiental.
- Figura 17.** Pronostico de salinidad superficial en el dominio de Chiloé-Aysén para los días 26 y 27 de agosto, 2015. El campo de 0h corresponde al día 25 de agosto, el cual es el día que se realiza la simulación.
- Figura 18.** Pronostico de temperatura superficial en el dominio de Chiloé-Aysén para los días 26 y 27 de agosto, 2015. El campo de 0h corresponde al día 25 de agosto, el cual es el día que se realiza la simulación.
- Figura 19.** Series de tiempo extraídas del pronóstico realizado para los días 26 y 27 de agosto 2015 de a) salinidad superficial, b) temperatura superficial, c) componente u de la corriente superficial y d) componente v de la corriente superficial. Estos pronósticos corresponden a valores horarios.
- Figura 20.** Distribución de boyas oceanográficas que alimentan el modelo operacional Previmer, en (izquierda) costa norte, en el canal Ingles, y en la costa sur, en el mar Mediterráneo (derecha).
- Figura 21.** Red de mareógrafos que disponen información en línea a través del portal www.ioc.org presentes en el sur de Chile, los cuales son operados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).
- Figura 22.** Sistemas de observación oceanográfica disponibles en la actualidad en la Norpatagonia.
- Figura 23.** (Izquierda) Agrupación de concesiones de salmónidos en las regiones X y XI, (derecha) distribución de puntos de medición propuesta, acorde a la Ley General de Pesca N° 20657.
- Figura 24.** (Izquierda) Agrupación de concesiones de salmónidos en Región XII, (derecha) distribución de puntos de medición propuesta, acorde a la Ley General de Pesca N° 20657.



ÍNDICE TABLAS

- Tabla 1.** Valores de los parámetros generales del dominio de Chiloé-Aysén de MOSA.
- Tabla 2.** Valores de los parámetros generales del dominio de Magallanes de MOSA.
- Tabla 3.** Tiempos de cálculo con distintas configuraciones de paralelización con el dominio de Chiloé-Aysén y Magallanes con el objeto de buscar la configuración más eficiente en cuanto a tiempo de cómputo.
- Tabla 4.** Características de los sistemas de monitoreo oceanográfico disponible en el sur de Chile.



RESUMEN EJECUTIVO

Durante el último tiempo la oceanografía operacional ha alcanzado un grado importante de desarrollo alrededor del mundo siguiendo los pasos de la meteorología en términos de poder predictivo. Un sistema de pronóstico oceanográfico, por tanto, se fundamenta en los mismos principios que sus antecesores atmosféricos/climáticos, estos son: la integración de modelos numéricos junto con observaciones a través de la asimilación de datos con el fin de obtener resultados predictivos en la escala espacial y temporal deseada.

Sin embargo, el desconocimiento de los límites reales de un cuerpo de agua, especialmente en el caso de un sistema estuarino tan extenso como el del sur de Chile, ha sido uno de los temas preponderantes durante los últimos años, especialmente debido a la escasa información para tomar decisiones a corto plazo, así como a largo plazo. En el último de estos casos, se ha llevado a cabo un gran esfuerzo por aumentar la densidad de observaciones ambientales y desarrollar sistemas de modelación que permitan zonificar y conocer las interrelaciones entre las áreas acuicultoras. Esto ha permitido, entre otras cosas, una planificación sanitaria y el desarrollo de normativas preventivas más que reactivas. El aumento de observaciones oceanográficas y la aplicación de modelos matemáticos para simular la hidrodinámica en las áreas donde la actividad acuícola está presente han avanzado como una necesidad en pro de una mejor gestión de la acuicultura. Queda aún vigente el desafío de predecir de forma más precisa el transporte de un sinnúmero de elementos en el ambiente marino, como por ejemplo, el transporte de patógenos luego de generado un brote de virus ISA, de manera que permita con antelación tomar las decisiones correctas.

Este proyecto establece el inicio del desarrollo de la oceanografía operacional para la zona Sur-Austral de Chile, dirigida a proporcionar herramientas de análisis y predicción que permitan gestionar problemas tanto en un corto como mediano plazo asociado principalmente a la acuicultura. Esta herramienta entregará información ambiental relevante en casos de dispersión de patógenos, vertidos de hidrocarburos, deriva de objetos flotantes, naufragios y mayor comprensión de la dinámica estuarina, entre otros.

Se elaboró un diseño para el desarrollo de un sistema operacional dividiéndolo en 3 etapas, siendo este informe, la finalización de la etapa I. Este marco conceptual consiste en una serie de módulos que deben desarrollarse durante estas 3 etapas. Estos módulos incluyen: Sistema de observación en tiempo real, sistema de control y asimilación de datos, modelo atmosférico, submodelo de agua dulce, modelo hidrodinámico y plataforma de visualización de datos.

Se implementó un modelo hidrodinámico operacional basado en ROMS_AGRIF, con pronósticos a 48 horas de variables oceanográficas (nivel del mar, temperatura, salinidad y corriente), desarrollándose la automatización de los elementos que alimentan el modelo. Se dividió en 2 dominios el área de estudio, uno que comprende los mares interiores de la región de Los Lagos y de Aysén y otro exclusivo



para la región de Magallanes. Este modelo utiliza condiciones iniciales y de borde desde el modelo global Mercator e información atmosférica desde el modelo global GFS.

De la evaluación preliminar de MOSA se desprende que para concentrar los esfuerzos y recursos disponibles de manera más eficiente, se resolvió no abordar la región de Magallanes en estas etapas iniciales del modelo, concentrando los recursos en el dominio Chiloé - Aysén, el cual ha sido menos demandante computacionalmente y a la vez más estable, lo que permite gestionar los recursos informáticos de manera más eficiente, permitiendo una mayor cantidad de trabajo en el proceso de evaluación y calibración que fundamentalmente se aborda en la etapa II del proyecto.

Para el dominio Chiloé Aysén, MOSA logra pronosticar de manera confiable el nivel del mar en los puntos de control, obteniendo correlaciones cercanas al 90 % en todos los casos, logrando reproducir la componente M2, principal constituyente armónica de la marea en este sistema.

El campo de masa arrojó resultados pobres, no logrando reproducir la estratificación adecuadamente. La temperatura aún está alejada de los valores observados mostrando valores de +2°C de diferencia con lo observado en toda la columna. Todo esto estaría indicando que las condiciones iniciales basadas en el modelo global Mercator son inadecuadas para zonas estuarinas internas, a su vez parece claro existe una subestimación del volumen de agua dulce que ingresa al sistema marino. La etapa II se ocupará de corregir ambos problemas.

Desde la región de los Lagos a Magallanes se identificaron 5 puntos de observación oceanográfica permanentes de los cuales 3 de ellos presentan posibilidades ciertas de ser utilizadas en el sistema operacional, estas se ubican en canal Dalcahue y canal Lemuy en Chiloé central, mientras que la restante se ubica en canal Puyuhuapi. El resto de las observaciones o presentan datos no confiables o no se encuentran disponibles para su uso.

La importancia de implementar sistemas de monitoreo para el desarrollo sustentable de la acuicultura, se refleja en una de las últimas modificaciones a la Ley General de Pesca y Acuicultura, promulgada en Abril de 2010 que establece que las agrupaciones de concesiones acuícolas, deberán disponer de una tecnología que registre y transmita, al menos, indicadores de conductividad, salinidad, temperatura, profundidad, corrientes, densidad, fluorescencia, turbidez según lo establezca el reglamento. Producto de lo anterior es que se puede proyectar el desarrollo de un sistema de monitoreo a largo plazo para la costa del sur de Chile. Esto redundaría en la generación de extensas series de tiempo para estimar tendencias, conocer los procesos oceanográficos involucrados en la variabilidad del ambiente, mejorar los modelos predictivos y disminuir la incertidumbre desde el punto de vista productivo y ambiental.



1. ANTECEDENTES

Del afán por mejorar la gestión y el control de las áreas de explotación marinas surge la necesidad por implementar sistemas de pronóstico oceanográficos que permitan anticipar escenarios de circulación a corto plazo y que permitan la toma de decisiones en el manejo de dichas áreas.

Un sistema de pronóstico oceanográfico se fundamenta en los mismos principios que sus antecesores atmosféricos/climáticos, estos son: la integración de modelos numéricos junto con observaciones a través de la asimilación de datos con el fin de obtener resultados predictivos en la escala espacial y temporal deseada (Schiller y Brassington 2011). Una amplia gama de resultados pueden ser obtenidos, incluyendo campos de vectores y series de tiempo para estudio euleriano de corrientes. Esto tiene aplicaciones de gran relevancia, en el seguimiento de partículas, gestión ambiental, climatología oceánica, defensa y aplicaciones industriales entre otras.

Durante los últimos 40 años, los modelos numéricos se han desarrollado con gran rapidez, apoyados especialmente por el constante aumento de capacidad de cálculo de las supercomputadoras actuales. Aunque hay avances significativos en la aplicación de sistemas mundiales de observación de los océanos, aún sigue siendo limitado el desarrollo simultáneo de las capacidades de observación en áreas que exigen una alta resolución espacial, tales como dominios costeros.

Actualmente existe una infinidad de instrumentos y técnicas que nos permiten medir y registrar variables del ambiente, in-situ y por medio de satélites, en un punto fijo del espacio (medición euleriana) o a través del espacio (medición lagrangiana). Dado el gran tamaño del océano, y el gran costo asociado a la toma de información o muestreo, no hay un sistema de observación que permita completamente determinar el estado del océano, y es aquí donde los modelos se vuelven relevantes y a la postre esenciales, pues su objetivo es lograr replicar aquellas condiciones observadas en puntos discretos del espacio sobre toda su extensión espacial y temporal.

En este contexto GODAE, Global Ocean Data Assimilation Experiment, organización internacional que desarrolla la oceanografía operacional a escala global para la promoción de sus recursos entre la comunidad científica para beneficio de la sociedad (GODAE 1997), cimentó las bases de la oceanografía operacional a través del desarrollo de la asimilación de datos de observaciones in-situ y satelitales junto con los más avanzados modelos de circulación oceánica global. Así pues, esta extensa labor es fragmentada entre diversos colaboradores y paneles y coordinada por la oficina central, como lo muestra la **Figura 1**. En los últimos años instituciones de todo el mundo han empezado a desarrollar a nivel pre-operacional y operacional plataformas a escala global y de cuenca con sistemas de pronósticos a corto plazo.



Modelo Oceanográfico Operacional

Un sistema de predicción operacional consta básicamente de un sistema de observaciones (datos recopilados en tiempo real o cerca de lo real), y un sistema de procesamiento de estos datos de manera de poder incluirlos dentro de la siguiente etapa que es la modelación. La modelación por su parte genera productos, ya sean estos, resultados directos de las simulaciones (corrientes, temperatura, salinidad, etc.) o bien, post procesos que generen subproductos que sirvan para la toma de decisiones de las autoridades. El diagrama de la **Figura 2**, basado en un sistema operacional conceptual de Trenberth (2008), lo ilustra de manera más gráfica. Este sistema comienza con las observaciones, la investigación científica, el análisis y los resultados de la información requerida por los tomadores de decisiones. Las decisiones sobre las prioridades y la coordinación entre los componentes del sistema, están generados por la necesidad de una comprensión científica junto con el tipo de información oceanográfica requerida por los tomadores de decisiones.

Observaciones

Las observaciones son la base para construir un modelo operacional. Son la fuente de los forzantes y condiciones iniciales de los modelos numéricos, son los datos que el modelo asimila para mantenerse lo más próximo posible en su evolución al estado real del océano tal como es observado y finalmente servirán para validar los resultados de los modelos.

Dentro de las observaciones y mediciones que se deben integrar a los modelos numéricos a través de la asimilación de datos, cobran especial importancia las **mediciones satelitales** debido al carácter global de los modelos numéricos y la cobertura que proporcionan estas mediciones. Los parámetros medibles con satélites son altimetrías del nivel del mar (SSH), temperatura (SST) y salinidad superficial (SSS), el color del mar (para medir clorofila y procesos asociados), campos de olas y viento (SAR y scatterometer), dispersión de contaminantes y cobertura de hielo marino (Le traon 2011).

Además de las recientes técnicas satelitales, la oceanografía operacional sigue necesitando de mediciones in-situ, tanto para calibración de los sensores satelitales, como para medición de parámetros en la columna de agua (Ravichandran 2011). Las mediciones in-situ pueden ser eulerianas (emplazamiento fijo, asigna propiedades a cada punto del espacio para cada instante) y lagrangianas (miden en distintos puntos, seguimiento de las partículas en su posición y propiedades en cada instante).

Como ya se indicó, los modelos son alimentados no sólo por forzantes oceánicos, sino también por forzantes atmosféricos: viento (dirección y velocidad), radiación solar, temperatura, presión atmosférica, balance neto precipitación/evaporación sobre el océano y aportes fluviales (dependientes de la precipitación/evaporación terrestre). Los datos, una vez registrados y transmitidos a los centros de “ensamblaje” deben ser sometidos a controles de calidad, para establecer si se encuentra dentro de los rangos apropiados. Las bases de datos deben pasar una serie de pruebas estandarizadas y dependientes del tipo de datos sujetos a análisis que permitan su uso rápido y eficiente a la comunidad



de usuarios, así como eliminar los datos erróneos. Debido a la dispersión en un vasto sistema como el oceánico, el aportar un alto número de datos es clave (Dombrowsky 2011). En el desarrollo de un sistema de pronósticos el control de calidad de los datos es el paso previo a la asimilación de datos y el mejor método de control de calidad será aquel que mejores resultados de pronósticos genere.

En resumen, un sistema de predicción oceanográfico consta de 3 etapas o componentes: las observaciones, la asimilación de datos y los modelos numéricos a los que se integran las observaciones vía asimilación de datos. Los datos registrados por mediciones (observaciones) forman la base de un modelo preciso y fiable, y así la calidad de un modelo de predicción depende de la fiabilidad con la que el modelo numérico representa la física y dinámicas del sistema.

Modelo numéricos

Un modelo se definirá por su capacidad de poder resolver los fenómenos físicos mediante la matemática y además de parametrizar aquella física no resuelta aún (Chassignet y Verron 1998). Las fuentes de error vendrán dadas por estas aproximaciones y por la resolución espacial y temporal del modelo, y como estas resoluciones logren resolver procesos a escala y sub-escala (viscosidad/difusión).

Los requerimientos de cada modelo dependen de la escala espacial y temporal. Así, la oceanografía operacional de alta resolución necesita ser global y dar una descripción detallada de la variabilidad de mesoescala (eddies, frentes y estructura superficial), lo que exige que la malla del dominio (grilla) sea de una resolución tal que permita resolver los procesos barotrópicos y baroclínicos. A su vez, la modelación costera debe ser precisa en la obtención de un nivel del mar bien estimado por sus forzantes de marea, viento y presión atmosférica; mientras que en predicciones estacionales a interanuales el campo de masa de la capa superficial oceánica y su interacción con la atmósfera debe estar bien definido.

El uso de altas resoluciones espaciales y temporales reduce errores de truncamiento locales en esquemas numéricos discretos y permite una mejor representación de las pequeñas escalas dinámicas y de las características topográficas. Sin embargo está limitada a un costo computacional. (Debreu *et al.*, 2011)

Los modelos oceanográficos de circulación global difieren entre sí en su configuración y la manera en que son implementados. Así, un modelo optará por un tipo de coordinada vertical, esquema de mezcla, capa límite, aproximación de turbulencia, superficie libre o tipo de advección. Sin embargo, mantendrán en común las siguientes premisas: los códigos deben ser implementados en configuraciones realísticas, esto es, disponer de batimetrías de calidad y detalladas que den solución en los modelos globales a la singularidad de las altas latitudes para ser representadas en una grilla; deben ser eficientes en términos de computación (paralelización explícita y descomposición del dominio) para poder reducir el tiempo de retraso entre el ingreso de los datos al modelo y la salida de los resultados al usuario.



Asimilación de Datos

Uno de los pilares principales de los sistemas operacionales son las mediciones, con ellas podemos establecer el nivel de incertidumbre del modelo, y permite orientar los métodos de ajuste y calibración del mismo. Esta funciona a través de un análisis secuencial de observaciones agrupadas en el tiempo (**Ver Figura 3**). También establece una base para que en etapas posteriores del proyecto se comience el desarrollo de técnicas de asimilación de datos, las cuales suponen un desafío mayor, debido a las pocas experiencias nacionales en este ámbito y el carácter experimental que posee actualmente.

La asimilación de datos se ha desarrollado en distintas direcciones, donde cada camino ha conducido a un énfasis diferente. La literatura en general es diversa y la nomenclatura a veces dispar, lo cual a veces puede oscurecer los temas comunes y los enfoques metodológicos. Aun así los principales objetivos de la asimilación de datos pueden resumirse en:

- a) *Interpolación, extrapolación y filtrado*: En este enfoque el propósito de la Asimilación de datos es estimar el estado del océano utilizando toda la información disponible para generar un análisis que desemboque en una estimación de los campos dinámicos, que sean consistentes con las consideraciones físicas previas. Esta es la visión que albergan la mayor parte de los trabajos oceánicos de asimilación de datos, siendo algunos Oke *et al.* (2002), Paduan And Shulman (2004) y Moore *et al.* (2004).

Varios grupos actualmente están trabajando en la incorporación de datos reales a través de asimilación de datos en modelos globales y regionales bajo este enfoque, incorporando datos de distintas fuentes (i.e boyas perfiladoras ARGO, datos XBT, SST, etc). Generalmente son instituciones que trabajan en el análisis de datos globales en tiempo real y en la generación de pronósticos. Entre ellos están el European Center for Medium Range Forecast (ECMRF), Australian Bureau of Meteorology, U.S National Center for Environment Prediction (NCEP).

- b) *Calibración de parámetros*: Acá el propósito de la asimilación de datos es desarrollar el modelo oceánico lo más preciso posible a través de ajustes sistemáticos de parámetros de los cuales no se tiene información o presentan una considerable incertidumbre. El énfasis está en el ajuste de lo que es incierto y muy difícil de medir, por ejemplo, parámetros de turbulencia o la topografía del fondo marino. Sin embargo, este enfoque exige una estimación de parámetros que generalmente implica problemas altamente no lineales que son más complejos.
- c) *Prueba de Hipótesis*: El propósito de la asimilación de datos en este enfoque es poner a prueba un sistema de predicciones del océano, el cual incluye como subcomponentes del modelo, dinámicas hipotéticas del océano, un modelo de error y un modelo de error para validación de datos. Buscándose finalmente un análisis de los defectos primarios en el modelo dinámico o de la observación del sistema. Una vez que un sistema de predicción se ha validado por la prueba de hipótesis formal u otros medios, el sistema de asimilación de datos puede utilizarse para



diseñar y predecir el rendimiento de los futuros sistemas de observación. Para este propósito se puede realizar una simulación de un sistema de observación experimental, utilizando la llamada prueba del gemelo idéntico, y así evaluar el impacto de las observaciones presentes y futuras pueden tener en la modelación. Una evaluación de este sistema fue realizada por Zhang *et al.* (2007).

Sistemas operacionales en el mundo

Francia posee varios sistemas operacionales, entre ellos algunos de carácter global como MERCATOR, el cual otorga condiciones de borde y condiciones iniciales a distintos modelos operacionales en el mundo. También posee el PREVIMER, sistema sinóptico de predicción que entrega pronósticos de condiciones oceanográficas para las costas de Francia. El sistema operacional de pronóstico oceanográfico de Francia, el Previmer (<http://www.previmer.org>), el cual, es un sistema altamente desarrollado, que se compone de todos los elementos que debe poseer un sistema de estas características, por lo que su arquitectura nos puede generar una idea conceptual básica de cómo se debe desarrollar un sistema predictivo, el cual por filosofía se construye de la combinación entre un modelo de pronóstico y un proceso de asimilación de datos.

Este sistema operacional funciona entregando pronósticos de temperatura, salinidad, corriente, nivel del mar, olas, concentraciones de nutrientes y zooplancton a lo largo de la costa de Francia, incluyendo el canal de la Mancha, la bahía de Biscay y el mar Mediterráneo. Las validaciones de sus modelaciones las realizan con datos ambientales in-situ y a través de imágenes satelitales.

La red de observaciones in situ utilizadas en la validación del modelo y para asimilación de datos está distribuida en 2 zonas geográficas, el océano Atlántico en la costa norte y el mar Mediterráneo en la costa sur.

Las corrientes se miden In situ a través de una red de radares HF dispersos en la costa norte. Estos Radares de alta frecuencia proporcionan mediciones en tiempo real de las corrientes superficiales, altura de las olas y la dirección del viento. El rango de operación de los radares WERA desarrollados en la Universidad de Hamburgo, Alemania, los cuales son los utilizados en el sistema Previmer, varía según la resolución deseada, por ejemplo:

Largo alcance: 150 a 300 Km, con una resolución de 3 a 6 kilómetros

Alcance medio: 75 a 150 km, resolución de 1.5 a 3 kilómetros

Corto alcance: 30 a 75 km, resolución de 0.3 a 1.54 kilómetros.

Por su parte, las mediciones de olas, temperatura, salinidad, nutrientes y producción primaria la realizan con una amplia red de Boyas oceanográficas (24 Boyas en el mar del norte y 17 boyas en el mar Mediterráneo (ver **Figura 20**). Para complementar a información de las boyas, se utilizan imágenes satelitales de temperatura superficial del mar (SST), salinidad superficial del mar (SSS),



turbidez, y producción primera, mientras que para medir el nivel del mar utilizan una red de mareógrafos en la costa.

Todas estas fuentes de medición (boyas, radares, mareógrafos e imágenes satelitales) otorgan información en tiempo real. Esta información queda disponible en la página, mientras que sus datos son introducidos en el modelo para corregir sus condiciones iniciales, aumentando la certidumbre de los pronósticos (asimilación de datos), y a su vez permite visualizar el desempeño del modelo en tiempo real.

Noruega tiene implementado desde 2011 el sistema Norkyst-800 (Albretsen, 2011) desarrollado en colaboración entre el Instituto de Investigación Marina, el Instituto Meteorológico Noruego y el Instituto Hidrológico Noruego. Este sistema basado en el modelo numérico oceánico ROMS (Regional Ocean Modelling System) cubre la totalidad de la costa noruega desde las aguas profundas hasta el interior de los fiordos, con una grilla de resolución horizontal de 800 metros, pudiendo realizar modelaciones sobre todo el dominio o zonas arbitrarias de él. El objetivo de este sistema está pensado para servir de nexo entre modelos oceánicos de baja resolución (4 kilómetros) y modelos costeros de alta resolución (150-200 metros en la horizontal). Entre las aplicaciones de Norkyst-800 se encuentra el desarrollo racional de la acuicultura salmonera, lo que junto a la topografía de la línea de costa noruega, hacen de este sistema un buen ejemplo análogo para las costas chilenas.

En Canadá, el equipo científico de Oceanografía Operacional del Departamento de Pesquerías y Océanos (DFO) perteneciente al Instituto Maurice Lamontagne ha construido un modelo de predicción (SLGO, Saint Lawrence Global Observatory) de corrientes, temperatura y cobertura por hielo en el estuario y golfo del río San Lorenzo, de vital importancia para las comunicaciones portuarias del país entre las grandes ciudades de la región de los Grandes Lagos y el Atlántico exterior. En este sistema se encuentran integrados un modelo numérico 3D oceanográfico junto a un modelo de predicción atmosférica del Servicio Meteorológico Canadiense. Este modelo ha sido validado con diferentes parámetros (cobertura, espesor y deriva del hielo, corrientes, temperatura, etc.).

En Estados Unidos la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) tiene en ejecución diferentes modelos de predicción oceánica:

- NCOM (Navy Coastal Ocean Model) es un modelo de predicción de tiempo real a cargo de la Oficina Naval Oceanográfica basado en el Modelo de Océano de Princeton. Arroja información global de la superficie global de los océanos y resultados interpolados en una malla regular horizontal a diferentes profundidades de las aguas territoriales de los EEUU.
- HYCOM (Hybrid Coordinate Ocean Model) modelo de predicción a 4 días con una resolución horizontal de 1/12 grados y coordenadas híbridas en la vertical. El modelo está alimentado por datos asimilados de altimetrías satelitales, SST satelital, perfiles verticales de temperatura y salinidad de redes de boyas de deriva y ancladas.
- AMSEAS (American Seas) está basado en el modelo NCOM y cubre el Golfo de México y el Caribe con una resolución horizontal de 1/36 grados y 40 niveles verticales. Como HYCOM



- también se basa en la asimilación de datos (NCODA) de distintas fuentes para forzar el modelo.
- USEAST (United States East Coast) basado en los mismos principios de AMSEAS pero siendo un modelo regional de la zona oceánica de la costa Este de EEUU.
 - RTOFS (Real Time Ocean Forecast System) es un sistema de asimilación de datos de predicción a 120 horas operado por el Servicio Meteorológico Nacional.
 - CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) es un sistema global integrado atmosférico-tierra-oceánico operado por el Servicio Meteorológico Nacional.
 - GFS (GLOBAL FORECAST SYSTEM) es un modelo atmosférico de pronóstico desarrollado por el National centers for Environmental Prediction (NCEP).

La unión europea ha integrado distintos sistemas desarrollados por sus miembros en una sola plataforma, llamada Copernicus (www.copernicus.eu), anteriormente conocido como GMES (Global Monitoring for Environment and Security). Marine Copernicus está orientado a ofrecer productos de oceanografía operacional entre otros, gestionando los productos de MERCATOR.

Ejemplos en Chile: El caso de la acuicultura en el sur de Chile

En Chile, el desarrollo de sistemas operacionales está acotado a dos experiencias: El primero de ellos data del año 2004 basado en el proyecto “Manejo integral de la salmonicultura a través de un enfoque ecosistémico utilizando técnicas de percepción remota y tecnologías oceanográficas de última generación”. Este fue desarrollado en conjunto por Intesal de Salmonchile y las empresas AquaChile, Fjord Seafood, Marine Harvest Chile, Salmones Chiloé y Salmones Multiexport, enmarcado en el Fondo de Desarrollo e Innovación (FDI) de Corfo.

Básicamente este proyecto buscaba reforzar el monitoreo ambiental de las macrozonas de cultivo del salmón, junto con la configuración de un registro de variables atmosféricas, oceanográficas y biológicas relevantes para la producción acuícola. Así, las empresas dispondrían con anticipación de los pronósticos climáticos, oleaje, mareas y corrientes, mezclas, proliferaciones planctónicas y disminución de oxígeno disuelto, información de gran valor en el desarrollo de la actividad. Este proyecto contaba con tres grandes unidades de trabajo: monitoreo e integración de información; montaje de un sistema de información geográfico, además de un sistema de pronósticos basados en modelos numéricos de oleaje, hidrodinámico y ecológico para los siguientes cuatro días. El sistema de modelación estaba basado en la suite DHI MIKEZERO v2004, con los módulos hidrodinámicos MIKE 3 HD, oleaje MIKE 21 SW y ecológico EcoLab. El año 2009 y con el antecedente de la crisis del virus ISA que se arrastraba del año 2007, Intesal pone fin al programa de monitoreo y pronóstico ambientales, quedando el desarrollo de este sistema truncado.

De este caso se pueden derivar algunas conclusiones que son de conocimiento personal de unos de los autores de este informe, quien trabajó en el desarrollo de ese sistema (Elías Pinilla, comunicación personal, diciembre 2015).



Obviando el hecho de que la crisis del virus ISA redujo los presupuestos que involucraban el desarrollo de este sistema, y que finalmente derivó en el cierre del programa, existieron dos situaciones que pudieron impactar de manera importante el desarrollo de sistema:

- 1) Desarrollo de capital humano: En lo que respecta al desarrollo e implementación de modelos numéricos (circulación, oleaje, ecológico) se utilizó un esquema mediante el cual se contrató una asesoría con el desarrollador de la suite MIKE (DHI), para la implementación completa del modelo además de la plataforma de visualización de la información. Esto derivó en un escaso aporte al desarrollo y mejoramiento del sistema por parte de la institución local, ya que no existía la experiencia suficiente para direccionar, por ejemplo, el proceso de evaluación, calibración y validación del modelo.
- 2) Plataforma web de información para usuarios: Por otra parte la información presentada en la plataforma para usuarios no parecía adecuada para el tipo de usuarios (no expertos) a los cuales estaba dirigida, esta información se referiría básicamente a mapas con las variables directas del modelo (temperatura, salinidad, vectores, etc.) o bien series de tiempo de puntos específicos, no existiendo aplicaciones derivadas del modelo que pudiesen ser utilizadas de forma más directa por este tipo de usuarios, como alertas ante una situación crítica (bajas de oxígeno, oleaje extremo, etc.), además de esto el modelo no se encontraba evaluado de manera consistente, el error no era conocido, y por tanto su uso no generaba la confianza suficiente.

Sistema integrado de monitoreo y pronóstico en la IV Región.

Entre Septiembre 2008 y Marzo 2012, se desarrolló el proyecto "Sistema de Monitoreo y Pronóstico de las Condiciones Oceanográficas para la Gestión Productiva y Pública del Océano Costero: Fase I (SIPO), financiado por INNOVA CORFO y ejecutado por la Universidad Católica del Norte, el Centro de Estudios Avanzados en Zonas Áridas y la Universidad de Concepción, junto con el Instituto de Fomento Pesquero como entidad asociada, además de la colaboración del Servicio Meteorológico de la Armada de Chile, empresas acuícolas y sindicatos de pescadores artesanales locales. El proyecto logró desarrollar un sistema de observación y modelación costera para la IV Región, cuyos productos (monitoreo a tiempo real, monitoreo oceanográfico por cruceros, pronósticos meteorológicos, oceanográficos y biofísicos) se distribuían públicamente en la página web del mismo.

Basado en el informe final de este proyecto (Ramos, 2012) algunas conclusiones respecto de modelación son las siguientes:

- El proceso de validación tomó mayor tiempo del esperado. De acuerdo a lo planificado inicialmente en el proyecto dicho proceso se prolongaría solo durante la Etapa 2. Sin embargo, el proceso de validación y ajuste de los modelos no se detuvo en esta etapa dado que debe ser un proceso continuo a fin de perfeccionar los modelos permanentemente.



- Configuraciones razonablemente validadas a mesoescala no son suficientes para abordar estudios sobre especies costeras con fines de asesoramiento para el manejo. Validación con mayor detalle en la costa, datos oceanográficos in situ e información adicional son requeridos. Esa conclusión de basa en que los patrones de conectividad de sitios costeros, de relevancia acuícola y pesquera, derivados de simulaciones individuo basadas acopladas a las diferentes salidas hidrodinámicas difieren marcadamente en respuesta a las configuraciones hidrodinámica evaluadas en características tales como las distancias de conectividad máxima, el nivel de auto-reclutamiento, estructura de conexión a lo largo de la costa evaluada a mesoescala, tasas de retención/advección sobre la plataforma continental, entre otros.

Sistema de predicción operacional para la zona sur Austral:

El desarrollo de este proyecto se encuentra dentro del marco de “Asesoría integral para pesca y acuicultura” (ASIPA) que es un convenio entre Subpesca – Min 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. En específico, este proyecto forma parte de la primera de 3 etapas que buscan desarrollar un sistema de predicción operacional para la zona sur austral de Chile para aplicaciones a problemáticas asociadas a la acuicultura.

I Etapa: 2014-2015: En líneas generales, la primera etapa de este proyecto incluye el diseño del sistema, además de la implementación del modelo hidrodinámico ROMS-AGRIF, denominado para los fines del proyecto como MOSA (Modelo Operacional Sur Austral) y su estructura operacional, que permite integrarle a este información del modelo global oceanográfico Mercator y atmosférico GFS, además de su evaluación preliminar con datos históricos. Todo esto acoplado a un sistema que permite visualizar los resultados en línea montados en el servidor web del proyecto (www.iproach.cl). También se incluye un diagnóstico de información oceanográfica disponible actualmente para su eventual uso y las perspectivas a corto plazo para generación de nuevos puntos de observación.

II Etapa: 2015-2016: En esta etapa, el énfasis está puesto en la calibración y evaluación del modelo para mejorar su calidad y disminuir su incertidumbre, esto se realizará en base a evaluación de patrones oceanográficos generales del sistema a través de información de literatura científica y de observaciones recopiladas ya sea por IFOP o por otras fuentes de manera de tener un modelo lo más consistente posible. Además se evalúan diseños de tecnologías de transmisión de datos en tiempo real en nuevos puntos de observación a desplegar como parte este proyecto (Etapa II) y diagnóstico de la Etapa I.

III Etapa: 2016-2017: Se espera que en esta etapa y luego del proceso de calibración del modelo en la etapa anterior, se generen aplicaciones web, principalmente enfocada a herramientas que permitan hacer calcular el transporte de material disuelto o particulado (Ej: acoplado modelo de transporte



lagrangiano de particulada pasivas), esto con el fin de conocer con antelación el posible transportes de materiales riesgosos asociado a la acuicultura (antibióticos, patógenos, etc.)

Cabe señalar que debido a tipo de financiamiento, que es anual, este proyecto está sujeto al correspondiente cierre de ese financiamiento mediante un documento de informe final y que no puede exceder de los 18 meses, por tanto, si bien es cierto que cada etapa constituye en la formalidad un proyecto con su respectivo informe final, el desarrollo del sistema operacional solo debe entenderse como concluido al finalizar la etapa III.

Proyectos en el área de oceanografía ejecutados por la División de Acuicultura de IFOP.

La División de Investigación en Acuicultura del Instituto de Fomento Pesquero ha desarrollado desde el año 2010, mediante fondos del programa ASIPA, una línea de investigación asociado a la caracterización oceanográfica y modelación hidrodinámica como herramienta en gestión de la acuicultura en Chile. Hasta la fecha se han realizado una serie de proyectos con objetivos particulares, pero con un eje común, aumentar la cobertura de mediciones oceanográficas y desarrollo de modelos hidrodinámicos en toda la zona sur austral de Chile (X a XII regiones).

Los proyectos anteriormente descritos tienen una fuerte componente observacional. Las observaciones están referidas principalmente a variables físicas como: corrientes a través del fondeo y ADCPs remolcados (**Figura 4**), así como también de variables atmosféricas, nivel del mar, temperatura, salinidad y oxígeno disuelto entre otras, la mayor parte de estas mediciones son de al menos 30 días. Por otra parte, se han implementado un número importante de modelos de diferentes escalas espaciales utilizando para esto un modelo en volúmenes finitos (MIKE 3 FM), software licenciado de origen Danés (DHI). La información de estos proyectos puede encontrarse en los informes técnicos (Pinilla, 2012a; Pinilla, 2012b; Pinilla, 2013; Pinilla, 2015 y Soto, 2015) de acceso público en <http://biblioteca.ifop.cl/>. Esta información será de gran utilidad para etapas posteriores a esta, para procesos de calibración del modelo numérico.



2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo general

Desarrollo de un sistema de predicción operacional regional oceanográfico para la zona Sur Austral de Chile, X a XII regiones.

2.2. Objetivos específicos

2.2.1. Objetivo N°1

Desarrollo de un sistema de predicción de las condiciones generales de circulación atmosférica y oceanográfica para las regiones X, XI y XII regiones, dirigido a proporcionar resultados de baja definición en todo el dominio propuesto.

2.2.2. Objetivo N°2

Implementar en forma operacional el sistema desarrollado, dando inicio a periodo de marcha blanca produciendo información disponible mediante internet, solamente para un nivel reducido de usuarios en la Subsecretaría de Pesca.

2.2.3. Objetivo N°3

Desarrollar un estudio de evaluación de las tecnologías asociadas a la obtención de información en tiempo real desde terreno y su producción para diferentes niveles de usuarios existentes.

2.2.4. Objetivo N°4

Establecer mecanismos de transferencia tecnológica a fin de permitir el incremento de la experiencia nacional en este tipo de proyectos.



3. METODOLOGÍA

3.1 Objetivo N°1

Desarrollo de un sistema de predicción de las condiciones generales de circulación atmosférica y oceanográfica para las regiones X, XI y XII regiones, dirigido a proporcionar resultados de baja definición en todo el dominio propuesto.

Este objetivo está dividido en las siguientes actividades:

- a) Diseño del sistema de predicción sinóptico: Se generó el diseño del sistema de predicción operacional basado en información bibliográfica sobre sistemas similares implementados en otros lugares del mundo, fundado en componentes de modelación y observación oceanográfica. Para este caso el diseño obedece a un desarrollo de 3 etapas. Las cuales se encuentran circunscritas al marco de “Asesoría integral para pesca y acuicultura” (ASIPA) que es un convenio entre Subpesca – Min 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. En específico, este proyecto forma parte de la primera de 3 etapas que buscan desarrollar un sistema de predicción operacional para la zona sur austral de Chile para aplicaciones a problemáticas asociadas a la acuicultura.

- b) Desarrollo de componente de modelación en modo pronósticos: Para este proyecto se incluye el desarrollo de una de las componentes del sistema operacional que es modelo numérico de pronósticos, denominado Modelo Operacional Sur Austral (**MOSA** en adelante). Este va a estar basado en ROMS AGRIF 3.1.1 (Regional Ocean Modelling System, Adaptative Grid Refinement in Fortran), una versión, desarrollada por el Institut de Recherche pour le Développement (IRD), Francia, el cual permite entre otras cosas realizar modelos anidados, (subdominios dentro del dominio principal, que posee una mayor resolución y se alimenta de las condiciones de borde que le otorga el dominio mayor).

Modelo numérico:

ROMS resuelve las ecuaciones primitivas de conservación del momento, de conservación de energía y de conservación de masa (continuidad). Para resolver el movimiento de una partícula en el océano, se debe resolver por medio de métodos numéricos la ecuación de Navier Stokes, asumiendo:

- i) Balance hidrostático de momento vertical, $H/L \ll 1$ el largo de un océano (~5000km) es mucho mayor a su profundidad promedio ($L \sim 5$ km), haciendo despreciable las aceleraciones verticales, y el termino de Coriolis asociado a velocidades verticales. Esto nos da:



$$0 = -\frac{\partial P}{\partial z} - \rho g,$$

P= presión hidrostática
ρ= densidad del agua
g= aceleración de gravedad
z= profundidad del agua

- ii) Campo de masa no divergente (ecuación de continuidad). Se asume que el agua de mar es incompresible en toda su columna.

$$\nabla \cdot \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

- iii) Aproximación de Boussinesq, los gradientes horizontales de densidad son constantes,
ρ = ρ₀ = cte.

- iv) La densidad el agua se estima en función de la temperatura, la salinidad y la presión, bajo la ecuación de estado

$$\rho = \rho(S, T, p),$$

Bajo estas aproximaciones, se plantea las ecuaciones de conservación de momento horizontal

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla u - fv = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial x} + \nabla_h (K_{Mh} \cdot \nabla_h u) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z}),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla v + fu = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \nabla_h (K_{Mh} \cdot \nabla_h v) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z}),$$

Por su parte también se usan ecuaciones de transporte de temperatura y sal:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla_h (K_{Th} \cdot \nabla_h T) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z});$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla S = \nabla_h (K_{Sh} \cdot \nabla_h S) + \frac{\partial}{\partial z} (K_{Sv} \frac{\partial S}{\partial z})$$



Las condiciones de borde del modelo en superficie ($z=\eta$) son:

a) $\frac{\partial \eta}{\partial t} = w$, condición cinemática,

b) $K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_x}{\rho_0}$;

$K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{y}{\rho_0}$, Esfuerzo del viento horizontal

c) $K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q}{\rho_0 c_p}$, flujo de calor,

d) $K_{Sv} \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{s(E-P)}{\rho_0}$, Flujo de sal: evaporación - precipitación

Las condiciones de borde en el fondo ($Z= -H$), son:

a) $\vec{u} \cdot \nabla(-H) = w$, Condición cinemática

b) $K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{-c_d |\vec{u}|u}{\rho_0}$;

$K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{-c_d |\vec{v}|v}{\rho_0}$, Fricción de fondo

c) $K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} = 0$;

d) $K_{Tv} \frac{\partial TS}{\partial z} = 0$; flujos de fondo de calor y sal.

Estas ecuaciones primitivas son resueltas numéricamente en cada elemento del dominio, tanto en su distribución horizontal, como en su distribución vertical con parametrizaciones temporales y espaciales. El modelo se prepara con un campo estático inicial 3D de velocidad, temperatura, salinidad y un nivel medio del mar que cubre todo el dominio, confiriéndole las propiedades dinámicas en $t=0$. Estos campos iniciales son otorgados a través de datos climatológicos, que son obtenidos de sistemas operacionales globales (MERCATOR, GFS, etc.). Estas condiciones iniciales ayudan a mejorar los



tiempos de estabilización del modelo, sobre todo en dominios con cuerpos de agua semi-cerrados, como lo son gran parte de la zona de canales del sur de Chile, donde existe una alta variabilidad dinámica (Ver **Figura 5**).

Para forzar el movimiento del agua en el modelo, se introducen las condiciones de borde dinámicas, velocidad, temperatura, salinidad y nivel del mar, las que ingresan al dominio entregando variabilidad temporal y espacial como una sección bidimensional en los bordes del dominio. En el caso de la onda se marea, esta se “amortigua” en el borde, para que entre de una manera suave y no perturbada, para no generar inestabilidades (ver **Figura 6**).

Por su parte la superficie del agua es forzada con datos atmosféricos, como el esfuerzo del viento, la radiación solar, flujos de calor (E-P), precipitación, etc. El forzante atmosférico es una parte fundamental de cualquier modelo oceánico, ya que la circulación y la distribución de propiedades conservativas y no conservativas presentes en niveles superficiales y subsuperficiales están altamente relaciones con el viento. Los campos de las variables atmosféricas serán obtenidos de modelos atmosféricos globales (GFS, ECMWF) (ver **Figura 7**).

Otro forzante en el modelo es el ingreso de fuentes de agua dulce, la cual modifica la estructura de la pycnoclina en las zonas costeras y en la zona de fiordos cumple un rol fundamental en la circulación estuarina desarrollando flujos gravitacionales que transportan aguas de baja salinidad a la boca de los fiordos. Se ingresarán fuentes de agua dulce puntuales, con un caudal variable o fijo en el tiempo, dependiendo de la disponibilidad de datos, los cuales son obtenidos de modelos hidrológicos y de datos climatológicos de la Dirección General de Aguas (DGA). (**Ver Figura 8**).

El tipo de mallado horizontal utilizado en **MOSA** es del tipo estructurado, donde cada elemento es un rectángulo, cuyos lados componen las aceleraciones en u y v respectivamente, evaluándose estas en el punto medio entre celdas, se calcula en las intersecciones de la rejilla y la propiedad (T, S, P) a calcular se encuentra en el centro del rectángulo, existiendo así coordenadas para cada componente. Esta grilla se conoce como ARAKAWA-C, su mayor ventaja es que los términos de presión de convergencia se calculan sobre una distancia Δx (Collins et al 2013), mejorando la resolución en comparación con otras grillas y permite una estabilidad numérica para la discretización de las ecuaciones en el tiempo y en el espacio, mientras que en la vertical, los niveles tienen una distribución tipo sigma (siguen la superficie del fondo), (ver **Figura 9**).

MOSA consta de 2 dominios, uno que cubre la zona de Chiloé-Aysén y otro que cubre la región de Magallanes. Esto debido a la extensión del territorio, donde la alta complejidad de la configuración topográfica dificulta la estabilidad de la simulación.

Se desarrollaron herramientas para obtener de forma automatizada las condiciones de borde, las condiciones iniciales y el forzante atmosférico para periodos de 2 días antes del pronóstico y estos integrarse a **MOSA** para realizar los pronósticos.



Una vez ingresado las fuentes de agua dulce, y habiendo obtenido las condiciones de borde, las condiciones iniciales y los forzantes, los datos son llevados a ROMS a través de conversiones, interpolación e iteraciones. Posteriormente el modelo es iniciado y compilado en el servidor de IFOP (Castro), bajo paralelización tipo MPI, la cual permite mejorar el desempeño computacional a través de la descomposición del dominio según el número de núcleos disponibles. La configuración óptima de la paralelización es un trabajo constante de ajuste y prueba, donde se busca la mayor eficiencia del recurso computacional, relacionando resolución espacial-temporal versus tiempo de cómputo.

Se analiza la arquitectura de los modelos operacionales actuales en el mundo y sus componentes, para poder generar un mapa conceptual con todos los elementos que debe poseer un sistema de pronósticos operacional en funcionamiento plenamente, sean incluidos en esta etapa de desarrollo o no.

La componente observacional, es en esta primera etapa, se encuentra abordada en el objetivo 3.

3.2 Objetivo N°2

Implementar en forma operacional el sistema desarrollado, dando inicio a periodo de marcha blanca produciendo información disponible mediante internet, solamente para un nivel reducido de usuarios en la Subsecretaría de Pesca.

3.2.1 Simulación de Pronóstico

El funcionamiento del sistema operacional en esta primera etapa está compuesto al menos por 4 etapas:

- i) Preparación del modelo, (una vez definido el/los dominios) donde se realiza la descarga de datos de condiciones de borde y condiciones iniciales, así como de forzantes atmosféricos de sistemas operacionales globales e ingreso de fuentes de agua dulce.
- ii) Integración de datos a los dominios, convirtiendo los archivos descargados al formato de ROMS AGRIF.
- iii) Inicialización de la simulación a partir de las nuevas condiciones iniciales, definiendo el horizonte de pronóstico y el tipo de paralelización de núcleos.
- iv) Levantar resultados en la página web.

MOSA generará las descargas de datos necesarios para alimentar el modelo (condiciones de borde, condiciones iniciales, y forzantes atmosféricos) a través del uso de “script shell” y “cron”, rutinas de automatización de procesos basadas en Phyton y OpenDapy.



La operación de MOSA se ilustra en la **Figura 10**, donde se observan los hitos relevantes del sistema. Suponiendo que el sistema comenzara un día domingo, las descargas de datos se inician a las 4:30 am, con una duración aproximada de 3.5 horas (suponiendo un ancho de banda fijo y continuo). Una vez finalizada la descarga, se inicializa el modelo, el cual simularía en la modalidad -1, +3, lo que significa, una día atrás y 3 adelante, considerando el mismo día que se realiza el cálculo como pronóstico. Esto para generar estabilidad, y poder entregar un pronóstico de circulación a un horizonte de 48 horas, antes de las 00:00 horas del día siguiente. La descarga, la corrida del modelo y la generación de figuras, así como el almacenamiento de datos se realiza en el servidor de IFOP ubicado en la base de Putemún, Chiloé.

Una vez generado el pronóstico, se procesan las salidas del modelo, se generan imágenes y estas son subidas a la página web www.iproach.cl, presentando pronósticos de circulación, temperatura, salinidad, nivel del mar y viento, para ambos dominios.

En una primera etapa esta información será solo de uso privado, para personal IFOP, Subpesca y Sernapesca, conscientes de que se trata de una puesta en marcha piloto, los resultados obtenidos no deben considerarse como un resultado preciso, ya que en esta etapa, solo se busca iniciar la operación y automatizar los procesos, siendo una aproximación gruesa de las propiedades hidrodinámicas. Etapas posteriores están orientadas a mejorar la precisión de los resultados del MOSA.

El sitio de Información, Pronósticos y Observaciones Oceanográficas Australes de Chile (www.iproach.cl), será implementado sobre un Sistema de gestión de contenidos o “CMS” llamado “Joomla”.

Joomla permite desarrollar sitios web dinámicos e interactivos. Permite crear, modificar o eliminar contenido de un sitio web de manera sencilla a través de un Panel de Administración. Es un software de código abierto, desarrollado en PHP y liberado bajo licencia GPL. Este administrador de contenidos puede utilizarse en una PC local (en Localhost), en una Intranet o a través de Internet y requiere para su funcionamiento una base de datos creada con un gestor de bases de datos (MySQL es lo más habitual), así como de un servidor HTTP Apache.

El sitio www.iproach.cl a través de sus distintos menús, mostrará información a través de artículos de imágenes, gráficos, animaciones flash. Información que se subirá a la plataforma a través de un panel de control o “cpanel” que conecta al “webhosting” o a través de un servidor FTP de forma remota.



3.2.2 Evaluación Pronóstico modelo operacional

La evaluación del modelo numérico mediante índices estadísticos se incluye de manera íntegra en el **ANEXO I**.

3.3 Objetivo N°3

Desarrollar un estudio de evaluación de las tecnologías asociadas a la obtención de información en tiempo real desde terreno y su producción para diferentes niveles de usuarios existentes.

Este objetivo se encuentra relacionado con la componente observacional del sistema operacional. Para este caso se realizó una revisión de las características de sistemas de observación oceanográfica disponibles en el sur de Chile, tales como: ubicación, variables medidas, institución a cargo, disponibilidad de la información, tecnologías asociadas a la transmisión de datos o almacenamiento. Cabe señalar que este objetivo no queda circunscrito a esta, la etapa I, sino también a la etapa II.

El diagnóstico realizado en esta etapa y el levantamiento de nuevos puntos de observación servirá como información de utilidad para la evaluación, calibración y validación del modelo numérico de pronósticos en etapas posteriores.

3.4 Objetivo N°4

Establecer mecanismos de transferencia tecnológica a fin de permitir el incremento de la experiencia nacional en este tipo de proyectos.

Se desarrollaran distintas actividades de difusión, talleres y asesoramiento científico, entre personal de IFOP asociado al proyecto y académicos especializado en el área de la modelación numérica en Chile, con el fin de orientar, definir y desarrollar el sistema sinóptico operacional desde su base, y generar los planteamientos futuros necesarios para llevar el sistema operacional a una fase de consolidación, donde se transforme en una herramienta válida y confiable para la toma de decisiones. En este sentido, la puesta en marcha del sitio web con información experimental (www.iproach.cl) sirve para que tanto, en esta primera como segunda etapa, se reciba la retroalimentación desde los usuarios sobre la mejor forma de representar la información generada por el sistema.



4. GESTIÓN DEL PROYECTO

a) Reuniones de coordinación con SUBPESCA.

Estas reuniones, entre el ejecutor del proyecto (División Investigación en Acuicultura, IFOP) y la contraparte técnica (Departamento de Acuicultura, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura), tienen como propósito reforzar y conducir el desarrollo del proyecto hacia los temas más relevantes y que dieron origen a este estudio (e.g., metodologías y grado de avance de las principales actividades asociadas al proyecto). Por otra parte, para un mejor desarrollo de las actividades comprometidas y para lograr una mayor cobertura participativa, se utilizaron los distintos medios al alcance (correo electrónico, telefonía y teleconferencia). La aplicación de esta modalidad de trabajo facilita la posterior colaboración ante requerimientos específicos que se generen en el desarrollo del proyecto.

Reunión coordinación N°1

Cuándo: 29 de enero de 2014 11:00 – 14:30 (CLST)

Ubicación: CTPA IFOP, Castro – Subpesca, Valparaíso (videoconferencia)

1. Juan Pablo Belmar, Subpesca
2. Elías Pinilla, IFOP
3. Gabriel Soto, IFOP

Objetivo de la reunión: Estado Ejecución de Proyecto

- IFOP indica a grandes rasgos la metodología que se va a utilizar en el desarrollo del proyecto, específicamente en la definición del área de modelación, limitaciones en las resoluciones en canales angostos, etc.
- IFOP indica que los periodos de pronósticos debiesen exceder de las 48 en una primera etapa.
- IFOP indica la necesidad de implementar un modelo atmosférico como forzante del sistema hidrodinámico.

Reunión coordinación N°2

Cuándo: 12 de junio de 2014 15:00 – 17:30 (CLST)

Ubicación: Puerto Montt, Dirección Zonal, Valparaíso, Subpesca. (Videoconferencia)

1. Juan Pablo Belmar, Subpesca
2. Gastón Vidal, IFOP
3. Elías Pinilla, IFOP
4. Gabriel Soto, IFOP



Objetivo de la reunión: Estado Ejecución de Proyecto

- IFOP indica que se están realizando cálculos con distintos tamaños de malla para determinar las limitaciones de resolución del modelo.

b) Asesorías científicas

El proyecto contempla una serie de asesorías científicas, talleres cerrados y vistas entre IFOP y gente del Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, siendo estos los siguientes:

Asesoría n°1

Se realizó una asesoría científica al personal de IFOP por parte del Dr. Andrés Sepúlveda y el estudiante de doctorado Osvaldo Artal, ambos de la Universidad de Concepción, sobre la implementación de ROMS, fundamentos, conceptos básicos, herramientas de pre y post proceso, así como ejemplos de simulaciones. Se acuerda que será la primera de una serie de asesorías en ROMS.

Fecha: 26-30 enero, 2015.

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

1. Dr. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Osvaldo Artal (UdeC)
3. Milton Salas (IFOP)
4. Elías Pinilla (IFOP)
5. Cristian Ruiz (IFOP)

Asesoría n°2

Entre los días 27 y 30 de abril de 2015, se realizó una asesoría científica en las dependencias del Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción al personal IFOP participante del proyecto. La asesoría estuvo orientada a la creación y edición de los dominios del modelo usando las herramientas de ROMS_TOOLS, la construcción de modelos de elevación digital, definir protocolos y mecanismos para la creación de la página web y el montaje del servidor web que albergará el modelo operacional. También se discutió sobre temas técnicos del modelo, parametrizaciones y operación entre otros temas, orientando el trabajo en función de los objetivos contemplados.

Fecha: 27-30 abril, 2015

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

1. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Osvaldo Artal (UdeC)
3. Milton Salas (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)



Asesoría n°3

El asesor científico del proyecto, el Dr. Andrés Sepúlveda visitó las dependencias de la base de Putemún para trabajar en los mecanismos de automatización del sistema operacional, desarrollo de protocolos de descarga de datos y en la definición de la operación del modelo operacional. Se acuerda una nueva visita para el mes de julio.

Fecha: 25-26 de mayo, 2015.

Lugar: Base Putemún, IFOP, Chiloé.

1. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Milton Salas (IFOP)
3. Elías Pinilla (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)

Taller de difusión

El día 14 de agosto se realizó un taller de difusión donde se presentó el desarrollo del sistema operacional, donde estuvieron presentes académicos, autoridades de IFOP, académicos del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, personal de la Dirección Meteorológica de Chile, personal de la Subsecretaría de Pesca entre otros.

Las temáticas abordadas en el taller se distinguieron de 2 partes, la primera sobre modelaciones efectuadas en el pasado, y exposiciones sobre dinámica estuarina, enfocándose en los procesos hidrodinámicos y de mezcla en las zonas de estudio, mientras que en la segunda parte estuvo enfocada en la realización de pronósticos, donde junto con presentar el Sistema de predicción sinóptico, expuso personal de la Dirección Meteorológica de Chile, presentando su forma de trabajo, el cual es una referencia directa del sistema a implementar en este proyecto.

Fecha: 14 de agosto, 2015.

Lugar: Hotel Gran Pacifico, Puerto Montt

Expositores: Gabriel Soto (IFOP)
Elías Pinilla (IFOP)
Cristian Ruiz (IFOP)
Osvaldo Artal (UdeC)
Rodrigo Delgado (DMC)
Manuel Castillo (UdeC-UV)
Carolina Calvete (SHOA)
Oliver Venegas (UdeC)



5. RESULTADOS

5.1 Objetivo N°1

Desarrollo de un sistema de predicción de las condiciones generales de circulación atmosférica y oceanográfica para las regiones X, XI y XII Regiones, dirigido a proporcionar resultados de baja definición en todo el dominio propuesto.

5.1.1 Diseño conceptual:

Se construyó un diagrama conceptual que contiene todos los elementos que deben estar presentes en el modelo operacional definitivo (MOSA). Este modelo conceptual incorpora módulos que en esta etapa inicial no serán implementados, pero que son parte fundamental de este, como el Modelo Biogeoquímico, el monitoreo y asimilación de datos, y el modelo desacoplado atmosférico, que en esta etapa será alimentado con datos del modelo operación GFS. El diagrama de la **Figura 2**, basado en un sistema operacional conceptual de Trenberth (2008), que lo ilustra de manera más gráfica. Este sistema comienza con las observaciones, la investigación científica, el análisis y los resultados de la información requerida por los tomadores de decisiones. Las decisiones sobre las prioridades y la coordinación entre los componentes del sistema están por la necesidad de una comprensión científica junto con el tipo de información oceanográfica requerida por los tomadores de decisiones.

Si profundizamos en el marco conceptual más propio del sistema de modelación nos encontramos que la inicialización de los pronósticos, pasa en primera medida por tener un sistema de asimilación de datos que sea capaz de capturar la variabilidad ambiental y corregir de alguna forma las desviaciones que pueda tener el modelo. En este sentido, la información proveniente de satélites o boyas es preponderante. Posteriormente, se debe proveer de información de los forzantes que interactúan en el sistema marino, como por ejemplo, la información atmosférica que debe ser provista por modelos atmosféricos operacionales y las condiciones de borde que también pueden ser extraídas de modelos de mayores escalas o climatologías adecuadas de la variación del contorno del sistema que quiera ser simulado.

La **Figura 1** muestra el marco conceptual aplicado para un sistema operacional en el mar de Finlandia que indica que pronóstico atmosférico es obtenido por el modelo HIRLAM (High Resolution Limited Area Model) y el pronóstico de las características hidrológicas de las condiciones de borde en la entrada del Golfo de Finlandia por el modelo operacional HIROMB (Modelo de Alta Resolución Operacional para el Mar Báltico). El modelo utiliza los resultados de los cálculos del modelo HIROMB como condiciones iniciales cuando se inicializa el cálculo operacional en el primer paso de tiempo (tiempo $T=0$). Cuando los datos de las observaciones de campo se encuentran disponibles, se utiliza un procedimiento de asimilación de datos para corregir condición inicial.

De acuerdo a lo anterior, se propone un marco conceptual para el desarrollo de la oceanografía operacional en la zona sur-austral de Chile de acuerdo a lo que se observa en la **Figura 11** En este



diagrama es posible observar la dinámica del sistema. Cabe señalar que este marco conceptual implica un desarrollo a largo plazo, por lo que no necesariamente se desarrollarán todas las etapas durante este proyecto. Los módulos contemplados en el marco conceptual son:

- a) Observaciones: Monitoreo de variables océano-atmosféricas en la zona sur austral de Chile. Este sistema de observaciones puede realizarse a través de boyas oceanográficas o estaciones de otro tipo (ej. Estaciones meteorológicas costeras). También se puede incluir aquí a toda la información proveniente de satélites. Las variables que pueden ser monitoreadas a través de boyas oceanográficas pueden tener un amplio rango de características, desde: corrientes, temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, nutrientes, hasta mediciones atmosféricas de estaciones meteorológicas montadas en boyas. Por su parte, la información satelital permite estimar parámetros como: temperatura superficial del mar, clorofila, salinidad, nivel del mar, etc. Estos sistemas de monitoreo deben contar con algún tipo de comunicación remota, esto puede ser a través de comunicación satelital, VHF, GSM, Inmarsat e Iridium (sistema satelital que permite la transmisión de datos oceanográficos en tiempo casi real).
- b) Sistema de control, procesamiento y asimilación de datos: Este sistema receptiona los datos provenientes de las observaciones y genera un control de calidad de manera tal de filtrar todos aquellos datos que no superen cierto rango de calidad, quedando disponibles para su directa visualización, o bien, para ser utilizados en post procesamiento, validación o asimilación de datos. El sistema de asimilación de datos, busca generar puntos de entrada de datos reales dentro de la modelación numérica de manera tal de generar una corrección de los datos simulados, es decir, la asimilación de datos consiste en reprocesar datos de satélite o estaciones en campo en los modelos numéricos, para mejorar los cálculos hechos previamente y de este modo emitir un pronóstico más acertado. Si bien es cierto, el sistema de control y procesamiento de datos puede funcionar de manera independiente al sistema de asimilación, se ubicó dentro de un mismo sistema que elaborará post procesamiento con datos reales.
- c) Modelo atmosférico: Este módulo proporciona las forzantes superficiales en los modelo de aguas ya sean estos, hidrodinámicos o biogeoquímicos. El modelo atmosférico regional funciona de manera operacional para proporcionar distintas variables a plazo de cierta cantidad de días. Para la implementación de este sistema se debe contar con información de observaciones (validación y asimilación de datos) así como también de modelos globales atmosféricos (GFS, ECMWF, etc.) que permitan generar condiciones de contorno e iniciales en el modelo regional. Las variables que son posibles distinguir aquí son: Viento, presión atmosférica, radiación solar, temperatura de aire, humedad relativa, etc.
- d) Modelo hidrodinámico: Este módulo realiza el cálculo de la dinámica del océano basado en información de campo (validación, asimilación de datos) así como también de modelo global (MERCATOR, HYCOM, etc.) para generación de condiciones de borde e iniciales. Las



forzantes atmosféricas son provistas por el módulo de modelación atmosférica, mientras que los flujos de agua dulce son determinados por el sub-modelo de agua dulce. Las variables que pueden calculadas son: corrientes, temperatura, salinidad, etc.

- e) Sub-modelo agua dulce: Este módulo cumple la función de realizar los cálculos numéricos o bien proporcionar climatologías de los puntos de entrada de agua dulce al sistema marino, ya sea por variaciones de los caudales de los ríos, o bien por derretimiento de glaciares, insumo importante como fuente de ingreso de agua dulce dentro del sistema de fiordos y canales.
- f) Modelo globales: Estos modelos que pueden ser tanto atmosféricos como oceánicos cumplen la función de generar condiciones iniciales y de contorno para la inicialización de los modelos regionales. La mayor parte de los datos de estos modelos se encuentran liberados para su uso público. Además usan como fuente de su propia inicialización los datos reales recopilados como parte del sistema global de asimilación de datos basados en observaciones de tierra y océano en todo el mundo.
- g) Modelo Biogeoquímico: Este módulo tiene como función obtener simulaciones de calidad de agua, entendiendo esto como la dinámica de oxígeno disuelto, Fitoplancton, zooplancton, clorofila y nutriente entre otros. Este modelo es acoplado al modelo hidrodinámico de donde obtiene condiciones básicas de corrientes, salinidad y temperatura. Este sistema también debe incluir el uso de datos de observaciones tanto para validación como para asimilación de datos. Si bien es cierto, que dentro del presente proyecto no incluye el desarrollo de este tipo de modelos, un proyecto paralelo de IFOP, "Estudio del desempeño ambiental de la acuicultura en Chile y su efecto en los ecosistemas de emplazamiento", tiene como uno de sus objetivos el desarrollo de un modelo biogeoquímico, en el mar interior de Chiloé, con el énfasis en la dinámica de oxígeno disuelto. Es por tanto esperable que este desarrollo pueda incorporarse más adelante al sistema operacional.
- h) Plataforma usuarios y aplicaciones: Este sistema está encargado de proporcionar la información en forma de datos o visualizaciones del estado atmosférico-oceánico, proveniente tanto de observaciones en tiempo real o climatologías, modelos atmosféricos, hidrodinámicos, biogeoquímicos y aplicaciones para usuarios determinados, en la zona sur-austral de Chile (por ejemplo dispersión de patógenos o derrames de petróleo).

Dentro del desarrollo de la actual etapa del proyecto, el énfasis está puesto en el desarrollo de un modelo hidrodinámico que sea capaz de proporcionar pronósticos a 48 horas de plazo, junto con la generación de una plataforma para la visualización de estos resultados.



5.1.2 Cronología desarrollo sistema operacional:

El desarrollo del sistema está dividido en 3 etapas, en cada una de estas etapas se abordan distintos componentes del sistema operacional. Las etapas y sus principales actividades son mostradas en el esquema de la **Figura 12** y detalladas a continuación:

I Etapa: 2014-2015:

- a) Diseño sistema de predicción sinóptico.
- b) Implementación y evaluación modelo ROMS.
- c) Diagnóstico Sistemas de observación oceanográfica.
- d) Plataforma web experimental para usuarios.

II Etapa: 2015-2016:

- a) Calibración modelo operacional ROMS.
- b) Levantamiento de sistemas de observación oceanográfica en tiempo real:
- c) Plataforma web experimental para usuarios.

III Etapa: 2016-2017:

- a) Optimización y mejoras del sistema operacional (Agua dulce y Atmosfera).
- b) Aplicaciones de transporte de partículas (Conectividad).
- c) Puesta en marcha sistema operacional en plataforma web:

El desarrollo de este sistema operacional va orientado a transformarse en una herramienta de gestión ambiental, que sirva, entre otras cosas, como una plataforma de acceso rápido a información relevante para el manejo ambiental y sanitario de la actividad acuícola. Sin embargo, su utilidad va mucho más allá, ya que una herramienta de este tipo tiene un gran potencial, en lo específico, el modelo busca ser una herramienta que otorgue información relevante en:



- Dispersión de patógenos asociados a la acuicultura
- Vertidos de hidrocarburos
- Deriva de objetos flotantes
- Propagación de Floración de Algas Nocivas (FAN)
- Naufragios
- Mayor comprensión de la dinámica estuarina del sur de Chile

5.1.3 Desarrollo componente modelación: Modelo numérico ROMS operacional

En conjunto con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción se han desarrollado los distintos elementos que componen el modelo numérico operacional en esta primera etapa, la construcción del modelo numérico, los sistemas de automatización de proceso y del desarrollo de la página web que albergará los resultados del modelo numérico (www.iproach.cl).

Las características del modelo oceanográfico estarán limitadas en su diseño y conceptualización por los tiempos de salida que son requeridos para su funcionamiento operacional. Siendo este modelo operacional ideado para realizar predicciones periódicas a un horizonte de 48 horas, los resultados no deben demorarse en obtenerse más de 24 horas. La **Figura 13** presenta un esquema simple del funcionamiento de MOSA en esta primera etapa.

MOSA será configurado de la siguiente manera:

Dominio: Debido a lo extenso de la zona de canales del sur de Chile, y a la dificultad de evaluar un modelo tan complejo, donde la configuración de la línea de costa fragmenta la zona en innumerables microsistemas, se llegó a la necesidad de construir 2 dominios, uno en la zona Reloncaví – Chiloé – Aysén y otro para toda la zona Austral (región de Magallanes). La construcción de dominios en ROMS se realiza en base a la definición de la máscara, archivo que define que es agua y que no en el dominio. Estas mascarar son construidas en base a la línea de costa y la resolución horizontal, siendo de 1/12 de grado en ambos dominios, se usaran 32 niveles verticales, tipo sigma, donde cada nivel es en función de la batimetría.

El Dominio de MOSA en Reloncaví-Chiloé-Aysén, comprende una matriz de 503x601x32 elementos. Este va desde el seno de Reloncaví por el norte, incluyendo al fiordo del mismo nombre, los mares interiores de Chiloé, algunos fiordos de Palena y de la Isla Grande de Chiloé, y la región de Aysén hasta la Laguna San Rafael, al extremo sur del Canal Moraleda. Los bordes oceánicos se encuentran en el -79°W por el oeste, en el Océano Pacifico, en el 41°S por el norte y en el 47°S en el sur.

Por su parte el dominio de MOSA en Magallanes posee 854x1014x32 elementos. Este comienza desde la Península de Taitao por el norte hasta las Islas de Cabo de hornos por sur, incluyendo los canales principales hasta el Estrecho de Magallanes, y los cuerpos de agua semi-cerrados interiores,



Golfo Almirante Montt, Seno Skyring y Seno Otway. También este dominio incluye gran parte de la costa argentina, presentando bordes en el océano Atlántico. Los bordes oceánicos tanto en el océano Pacífico como en el Océano Atlántico están en 46°S en el borde norte y -57°S en el borde sur. El borde oeste está en -79°W en el océano Pacífico, y el borde este está en -64°W en el océano Atlántico. Las características de ambos dominios se presentan en las **Tablas 1 y 2** respectivamente.

La **Figura 14** presenta las máscaras de los dominios de Chiloé-Aysén y Magallanes respectivamente. Estas máscaras definen que es agua y que es tierra en el dominio. A su vez se han elaborado modelos de elevación digital para ambos dominios con datos batimétricos aportados mayormente por cartas SHOA y de algunos proyectos de investigación de diversas instituciones (**ver Figura 15**).

Los modelos globales de los que se nutre de condiciones iniciales a MOSA generan resultados con una periodicidad de 6 horas. Estos modelos son GFS (Global Forecast System) para las forzantes atmosféricas y Mercator para los forzantes oceánicos (Temperatura, Salinidad, Corriente). De esta manera, el modelo acoplado océano/atmósfera toma los resultados de los respectivos modelos globales y dispone de un máximo de 18 horas para completarse.

Simulación de Pronóstico

El funcionamiento del sistema en esta primera etapa está compuesto al menos por 4 etapas:

- v) Preparación del modelo: donde se realiza la descarga de datos de condiciones de borde y condiciones iniciales, así como de forzantes atmosféricos de sistemas operacionales globales e ingreso de fuentes de agua dulce.
- vi) Integración de datos a los dominios, convirtiendo los archivos descargados al formato de ROMS.
- vii) Inicialización de la simulación a partir de las nuevas condiciones iniciales, definiendo el horizonte de pronóstico y el tipo de paralelización de núcleos.
- viii) Levantar resultados en la página web.

Cada una de estas etapas son automatizadas mediante rutinas de ROMSTOOLS para OCTAVE, de modo que sean compatibles con Python y OpenDAP.

- a) Descarga de datos de condiciones de borde

Las condiciones de borde son las que alimentan al modelo a través de sus fronteras con campos de salinidad y temperatura. Estos datos que presentan variabilidad temporal y espacial serán descargados del sistema operacional MERCATOR (Francia) a través de "Copernicus Marine Environment Monitoring Service" (<http://marine.copernicus.eu/>). Esta descarga, que se realiza con una frecuencia diaria, obtiene datos en un formato nativo de MERCATOR, el cual es llevado al formato de entrada para ROMS, adecuándolo a los dominios a través de interpolaciones e iteraciones. Los archivo de condiciones de borde



contienen valores de salinidad, temperatura, salinidad, componentes U y V de la velocidad de la corriente y el nivel del mar.

b) Descarga de datos de condiciones iniciales

Las condiciones iniciales del modelo son una parte fundamental, que cobra mayor importancia en modelos operacionales, ya que son indicadores del grado de ajuste de los pronósticos. Las condiciones iniciales, son las que le otorgan al modelo los campos físicos en el tiempo 0 de la simulación, ayudando a que éste encuentre un equilibrio de manera más eficiente, por lo tanto son condiciones estáticas, que no varían en el tiempo. Estos datos serán descargados del sistema operacional MERCATOR (Francia) a través de “Copernicus Marine Environment Monitoring Service” (<http://marine.copernicus.eu/>), de manera simultánea con las condiciones de borde, los cuales vienen en un formato nativo que debe ser integrado a ROMS. Las condiciones iniciales serán los campos de temperatura, salinidad, corriente (U y V) y la superficie del nivel del mar.

c) Descarga del Forzante Atmosférico

El forzante atmosférico de cualquier modelo oceánico es indispensable, ya que gran parte de la circulación superficial, subsuperficial está regulada por el viento (en zonas someras, puede ser toda la columna de agua), así como el nivel del mar es sensible a variaciones en el campo de la presión atmosférica, la salinidad es sensible a los balances entre precipitación - evaporación, la temperatura lo es con la radiación solar, entre otras cosas, por lo que el campo de velocidad de agua y el campo de masa están estrechamente vinculados, es necesario tener un forzante atmosférico. MOSA va a utilizar como forzante atmosférico, datos bajados de Global Forecast System (<http://www.ncdc.noaa.gov/data-access/model-data/model-datasets/global-forecast-system-gfs>), el cual es un sistema operativo mundial, administrado por la NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration). Las variables utilizadas son dirección y magnitud del viento a 10 metros de la superficie, esfuerzo del viento, flujo neto de calor superficial, flujo superficial de agua dulce (Evaporación -Precipitación), temperatura del aire sobre la superficie del mar, humedad relativa, tasa de precipitación y radiación solar de onda larga y onda corta.

d) Fuentes de Agua dulce

El ingreso de agua dulce a los sistemas estuarios a través de descargas fluviales, glaciales o pluviales es un mecanismo fundamental en el desarrollo de la circulación estuarina. El agua ingresada posee una densidad menor al agua de mar, al mezclarse, esta forma una capa superficial que fluye gravitacionalmente desde su fuente, regulando la profundidad de la pycnoclina y la haloclina, compitiendo en forma directa con la influencia del esfuerzo del viento en superficie. Por lo tanto, es un mecanismo que regula la estratificación vertical y horizontal de los canales y fiordos, así como el transporte en



capas superficiales. Es necesario poseer cuantificación precisa de los aportes mayores de agua dulce, especialmente los grandes ríos de la zona sur de Chile y los aportes glaciales de los campos de hielo en la Patagonia. En una primera etapa MOSA será alimentado con datos de descargas fluviales de los grandes ríos presentes en los dominios y que cuentan con un monitoreo en tiempo real por parte de la DGA. Otras fuentes más pequeñas serán ingresadas a modo de caudales fijos, estimados por datos climatológicos de la DGA.

5.2 Objetivo N°2

Implementar en forma operacional el sistema desarrollado, dando inicio a periodo de marcha blanca produciendo información disponible mediante internet, solamente para un nivel reducido de usuarios en la Subsecretaría de Pesca y Acuicultura.

El sistema es capaz de obtener de forma automatizada las condiciones de borde, las condiciones iniciales y el forzante atmosférico para periodos de 2 días antes del pronóstico (48 horas) y estos integrarse a MOSA para realizar los pronósticos siguiendo la estructura presentada en la **Figura 13**.

Estos procesos son activados a las 04:30 horas del primer día, iniciando la descarga de condiciones iniciales de borde y forzantes para ambos dominios, estimándose el fin de la descarga a las 6:00 horas para el dominio de Chiloé-Aysén, mientras que para el dominio de Magallanes estas finalizan alrededor de las 8:00 horas del mismo día aproximadamente. Seguidamente, el sistema da inicio a la simulación de ambos dominios comenzando cada dominio al terminar su descarga, utilizando una paralelización óptima de los núcleos, que permite dicha operación dividiendo la cantidad de nodos disponibles en el servidor para cada dominio. La **Tabla 3** presenta los tiempos de cálculo con distintas configuraciones de paralelización con el dominio de Chiloé-Aysén y Magallanes con el objeto de buscar la configuración más eficiente en cuanto a tiempo de cómputo.

El tiempo de simulación del modelo operacional depende principalmente de 5 factores sobre muchos otros de menor significancia. Estos son:

- Resolución horizontal: número de elementos de la malla flexible del modelo.
- Resolución vertical: número de capas o niveles.
- Solución numérica de alto o bajo orden del tiempo de integración y discretización del espacio para resolver las ecuaciones de aguas someras que determinan la hidrodinámica y los campos de densidad de regímenes baroclínicos.
- Tiempo total a simular, siendo en nuestro caso 4 días en total por cada operación para ambos dominios (1 día de "hindcast" y 3 días de "forecast").
- Escritura de salida de los datos, en nuestro caso las salidas son horarias, sin embargo en un futuro podrían ser en periodos mayores para mejorar la eficiencia del modelo (e.g 4 o 6 horas).



En términos de operación se ha logrado mantener funcionales los pronósticos para ambos dominios. Sin embargo, la diferencia en el tamaño de las grillas entre ambos dominios se ve reflejada en los tiempos de cómputo que requiere cada dominio. A continuación se presentan los tiempos de cómputo requeridos para cada dominio, y el espacio físico que genera cada dominio entre sus condiciones iniciales, condiciones de borde, forzantes y sus salidas.

Dominio	Variables (horarias)	Espacio en disco (diario)	Tiempo de pronóstico	Tiempo de Calculo
Chiloé-Aysén	T, S, u, v, Z	27 GB	48 horas	8 horas
Magallanes	T, S, u, v, Z	75 GB	48 horas	16.5 horas

Las salidas de temperatura (T), salinidad (S), y de corrientes (U y V), corresponden a campos tridimensionales con valores horarios, mientras que el nivel del mar (Z) corresponde a la superficie del nivel del mar. Los archivos de salida del modelo permiten realizar extracciones de series de tiempo en cualquier punto de los dominios. Si bien el espacio generado por cada simulación es alto, este puede reducirse, cambiando la configuración de salida a periodos más largos entre otras cosas (e.g datos cada 4 o 6 horas).

Por el momento en esta etapa se almacenarán los datos de salidas y los archivo con los cuales se construyen las simulaciones, sin embargo, una vez que MOSA comience a ser evaluado de manera más intensiva, se reducirán los archivos de almacenamiento, guardando solo las condiciones iniciales, condiciones de borde, forzantes y archivos de configuración con los cuales se construyen el modelo, para así en un futuro, si existe la necesidad de modelar ciertos periodos, la reconstrucción de tales modelos este fácilmente disponible.

Considerando los tiempos de computo de cada dominio, MOSA, se estima que el pronóstico del dominio de Chiloé-Aysén esté disponible a las 14 horas del mismo día, mientras que el de Magallanes podría estar disponible a las 23 horas aproximadamente.

Estos resultados serán presentados en la página www.iproach.cl, sitio de Información, Pronósticos y Observaciones Oceanográficas Australes de Chile, el cual es implementado sobre un Sistema de gestión de contenidos o "CMS" llamado "Joomla". La **Figura 16** presenta una captura del sitio web, y su interfaz gráfica, debido a que los resultados de este objetivo son de carácter operacional, deben ser revisados en la página web.



En vista que esta etapa del proyecto solo se contempla el acceso a usuarios limitados a la página, para acceder a ella se debe ingresar un nombre de usuario y una contraseña:

Nombre de usuario: genuser (minúsculas)

Contraseña: iproach2015 (minúsculas)

Joomla permite desarrollar sitios web dinámicos e interactivos. Permite crear, modificar o eliminar contenido de un sitio web de manera sencilla a través de un Panel de Administración. Es un software de código abierto, desarrollado en PHP y liberado bajo licencia GPL. Este administrador de contenidos puede utilizarse en una PC local (en Localhost), en una Intranet o a través de Internet y requiere para su funcionamiento una base de datos creada con un gestor de bases de datos (MySQL es lo más habitual), así como de un servidor HTTP Apache.

El sitio www.iproach.cl a través de sus distintos menús, mostrará información a través de artículos de imágenes, gráficos, animaciones flash. Información que se subirá a la plataforma a través de un panel de control o “cpanel” que conecta al “webhosting” o a través de un servidor FTP de forma remota.

Debido a la naturaleza del proyecto, los resultados de los pronósticos se presentaran en el sitio web www.iproach.cl, sin embargo se presentan a modo de ejemplo, resultados de pronósticos para el dominio de Chiloé - Aysén. La **Figura 17** presenta el campo de salinidad superficial de un pronóstico para los días 26 y 27 de agosto, 2015, siendo el punto inicial el día 25 de agosto (0h). La **Figura 18** muestra pronósticos para el dominio de Chiloé - Aysén de temperatura superficial para el mismo periodo anteriormente mencionado, Notar en ambos pronósticos distribuciones del campo de masa acorde a los esperado en la zona, presentándose las mínimas de salinidad en la zona de Reloncaví por el norte, producto del aporte de agua dulce del fiordo Reloncaví y río Puelo, y mínimos de salinidad en la zona de estero elefantes en Aysén principalmente por la presencia de descargas glaciales de Campos de Hielo norte.

La **Figura 19** presenta series de tiempo de temperatura superficial, salinidad superficial y componentes u y v de la corriente en el Fiordo de Reloncaví, donde se encuentra la boya oceanográfica del proyecto LOBO (hoy inoperativa). Los valores presentados corresponden a valores horarios de los parámetros simulados, y en ellas se puede observar la evolución del modelo hacia un estado de equilibrio.

La presentación de los resultados en el sitio www.iproach.cl, serán en esta primera etapa a modo de imágenes .gif, que mostrarán resultados pronosticados de cada variable cada 4 horas, con campos de salinidad y temperatura para cada dominio, mientras que la corriente será presentada como vectores sobre el campo. Se presentaran en esta etapa de carácter experimental solo los campos superficiales. Junto con ello se presentaran series de tiempo de las variables mencionadas en puntos donde eventualmente se encontrarían sitios de observación en línea que podrían ser usados como posible evaluación. Estos puntos corresponden a las boyas oceanográficas en Canal Puyuhuapi y Reloncaví (UdeC), Isla Chaulinec (Intemit), Magallanes (ENAP).



Evaluación modelo numérico operacional:

Los resultados de la evaluación del modelo numérico implementado se incluyen de manera íntegra en el **ANEXO I**.

Cabe señalar que originalmente se trabajó con dos dominios, uno que comprende las regiones de Los Lagos y Aysén, y otro que comprendía íntegramente toda la región de Magallanes. Sin embargo en la puesta en marcha del modelo, el dominio de Magallanes demandó una mayor atención debido a la alta inestabilidad que presentó. El tamaño del dominio de Magallanes eleva de manera significativa el número de elementos que posee, siendo más del doble que el de Chiloé Aysén, esto es debido a que comprende una zona bastante extensa, con una configuración topográfica extremadamente compleja, que da lugar a un sin número de singularidades en la máscara y en la malla del modelo, lo cual implica necesariamente un mayor tiempo de cómputo.

Los complejos patrones de circulación oceánica resultantes de la interacción con la batimetría en una zona de las dimensiones de la Región de Magallanes lo convierten de momento en un ejercicio de modelación inabordable para los recursos disponibles. Producto de las constantes caídas del dominio de Magallanes, no se ha logrado obtener resultados suficientes para poder construir un set de datos necesario para realizar alguna evaluación preliminar, las corridas presentan errores entre las 8 y 9 horas de iniciada la simulación, y los pocos días que logró simular 4 días, estos resultados presentaron graves incoherencias, y errores, es por esto que no fue posible realizar evaluaciones del dominio. Como consecuencia de lo anterior, y para concentrar los esfuerzos y recursos disponibles de manera más eficiente, que se resolvió no abordar la región de Magallanes en estas etapas iniciales del Modelo, concentrando los recursos en el dominio Chiloé - Aysén, el cual ha sido estable, y su menor tamaño permite gestionar los recursos computacionales de manera más eficiente, permitiendo una mayor libertad en el trabajo de evaluación y calibración que comprende la etapa II del proyecto (actualmente en ejecución).



5.3 Objetivo N°3

Desarrollar un estudio de evaluación de las tecnologías asociadas a la obtención de información en tiempo real desde terreno y su producción para diferentes niveles de usuarios existentes.

Este objetivo se desarrolla tanto en la etapa I como en etapa II. Para la presente etapa se realiza un diagnóstico de los sistemas de observaciones oceanográficas que se encuentran en funcionamiento en la zona sur austral de Chile y finalmente se evalúa la posibilidad de usos de estos datos para ser implementados en la etapa II. También se documenta las perspectivas respecto de observaciones que pudiesen implementarse en un futuro y que pudiesen ser utilizadas por el sistema operacional.

5.3.1 Diagnóstico situación actual de la observación oceanográfica en tiempo real en fiordos y canales de sur de Chile:

Nivel del Mar –SHOA: El nivel del mar es el que posee en la actualidad mayor cantidad de mediciones, encontrándose en el área un total de 11 mareógrafos distribuidos entre Puerto Montt y Puerto Williams (Ver **Figura 21**), los cuales cuentan con transmisión de datos en línea y son operados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA), cuyos datos se pueden visualizar en el sitio <http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>. Estos datos pueden ser integrados a la red de observaciones del sistema predictivo para validar el nivel del mar del modelo, la cual es una condición esencial para resolver la hidrodinámica estuarina de la zona.

- **Boya COPAS – Puyuhuapi:** Boya oceanográfica y meteorológica en el Canal Puyuhuapi, ubicada a una profundidad de 188 metros (fondeo) y a 900 metros de la costa. Esta boya registra en forma continua variables oceanográficas mediante un módulo marino que mide cada 1 hora la temperatura, salinidad, oxígeno y pH superficial; y un módulo atmosférico que mide, cada 3 minutos, la temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar, y magnitud y dirección del viento. Esta boya se encuentra bajo la administración del programa Sur-Austral de COPAS.
- **Plataformas de observación de MUSELS – Chiloé Central:** 2 plataformas flotantes que forman parte del sistema de monitoreo oceanográfico-ambiental del Núcleo Milenio MUSELS, en dos áreas geográficas del mar interior de Chiloé, los canales Lemuy y Dalcahue. Las plataformas, que están sujetas a los sitios de muestro mediante sistemas de anclaje permanente, tienen acoplados equipos oceanográficos que registrarán datos ambientales (e.j. temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, clorofila y turbidez más un sistema de medición de pH de alta precisión).



- **Boya oceanográfica INTEMIT – Chaulinec, Chiloé:** Como parte del proyecto Innova Corfo N°13BPC3-19145. El Instituto Tecnológico de la Mitilicultura (Intemit) busca fortalecer la sostenibilidad de la industria mitilicultora nacional, mediante la generación información ambiental, para esto fue instalada una boya oceanográfica, administrada por la empresa consultora INNOVEX, ubicada al sur de isla Chaulinec. Actualmente, este sistema de monitoreo ambiental autónomo (SIMA) registra cada 10 minutos las variables de temperatura, oxígeno disuelto, la velocidad y dirección de corrientes.
- **Sistema de Monitoreo en Tiempo Real (SMTR)- ENAP Punta Arenas:** Un foco de observación en la región de Magallanes es un sistema en línea perteneciente a ENAP y que se encuentra instalado en el Estrecho de Magallanes, sin embargo el acceso de estos datos está restringido a uso interno, se han comenzado las gestiones para contar en un futuro con dichos datos. Cabe recordar que en esta etapa del proyecto se buscó la implementación de modelo operación dejando las evaluaciones del mismo para la segunda etapa del proyecto.

La **Tabla 4** muestra las características de cada uno de los sistemas descritos anteriormente. De lo anterior se desprende que las fuentes de información oceanográficas disponibles obedecen a objetivos particulares de cada institución responsable y no se encuentran disponibles de manera conjunta, no existiendo ninguna organización que reúna toda esa información en una plataforma común. En general los parámetros tienden a converger en mediciones de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en capa más cercana a la superficie. Respecto de variables atmosféricas la mayor parte de los puntos de observación no contemplan esta componente, excepto de boya ubicada en Puyuhuapi. Información de corrientes es también muy escasa, debido a los mayores costos asociados al instrumento (ADCP). En relación a la trasmisión de datos, es utilizada ampliamente el uso de sistema de comunicación GSM acoplada o no a un sistema de radio entre la boya y la estación en tierra para su retransmisión, por lo tanto, los puntos se encuentran ubicados cercano a zonas donde existe dicha cobertura, no se observó ningún sistema con transmisión satelital.

La calidad de los datos recolectados depende principalmente de la calidad de los sensores y las respectivas mantenciones que se deben realizar a los equipos, principalmente respecto a la acumulación de fouling. De los puntos de observación, la boya ubicada en Puyuhuapi cuenta con una fuerte componente de análisis de datos realizado por los investigadores responsables de esta, incluyendo publicaciones científicas con estos datos (Schneider, 2014), por lo cual, parece ser una fuente confiable de datos. En la actualidad el modulo atmosférico y de transmisión de datos se encuentran fuera de operación y se requiere la mantención de los equipos por parte del fabricante.

Las plataformas de observación de los canales Dalcahue y Lemuy fueron instaladas recientemente (Agosto 2015) y contemplan mantención cada 2 meses, junto con toma de muestras de agua y lances de CTD en el mismo punto, con lo cual, se asegura una mayor calidad de los datos. El equipo instalado en estas plataformas es un WQM D 120% del fabricante Wetlabs y Sea Bird Electronics, el WQM emplea una inyección de biocida activo e inhibidores pasivos para combatir el fouling interno y externo.



En comunicación personal con el investigador responsable de estas plataformas, Dr. Diego Narváez, indicó que los rangos de las variables se corresponden a los valores de la zona y a las mediciones de control realizadas.

La boya ubicada en las cercanías de isla Chaulinec, en Chiloé que se encuentra bajo la responsabilidad del Instituto Tecnológico de la Mitilicultura (Intemit) y la asesoría técnica de la empresa INNOVEX, presenta sensores desarrollados por esta última, cabe señalar al respecto, que la medición de corrientes es realizada por un equipo (minitilt) que contiene un acelerómetro y un inclinómetro, con cual, calcula la velocidad y dirección de la corriente, no existiendo información que permita comprobar su exactitud. Respecto de datos de otras variables se tuvo acceso a información de salinidad, encontrando rangos en la superficie muy superior a los observados en la zona (>34 psu), la temperatura presenta saltos escalonados en su variación temporal, probablemente asociado a un mal ajuste en el redondeo de decimales.

Respecto de la boya de ENAP en Cabo Negro, cercanías de Punta Arenas, no se pudo obtener mayor información del sistema de observación, aunque fue requerida formalmente.

Dado este primer diagnóstico respecto de las plataformas de observación evaluadas, se comenzaron las gestiones para generar vínculos colaborativos con 2 de estas entidades: Copas Sur-Austral y Musels, para lo cual, ya existen protocolos de acuerdo para la firma de convenios entre IFOP y estas instituciones.

Convenio Copas Sur-Austral - IFOP: En general, el acuerdo entre las instituciones es compartir la información, además del compromiso de IFOP de poner en operación el modulo atmosférico y cubrir el costo de las mantenciones del fabricante.

Convenio Musels-IFOP: El compromiso de IFOP respecto de estas plataformas es un primer punto es generar la transmisión en tiempo real y agregar una estación meteorológica en ambos sistemas, para esto se cuenta con un sistema de transmisión de datos vía GSM que se pondrá en operación para la etapa II de este proyecto.

Respecto de lo anterior cabe señalar que IFOP adquirió (noviembre 2015) 5 estaciones meteorológicas marca Gill modelo MetPak Pro con sensor de viento ultrasónico, además de un sistema de comunicación HOBO RX3000 con transmisión GSM, con la posibilidad de poder integrar sensores marinos. Dos de estos equipos se integrarán a las plataformas de Musels, Para los tres sistemas restantes se le agregaran sensores marinos de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto que serán distribuidos en lugares selectos, por determinar en la región de los Lagos y Aysén como parte de la etapa II de este proyecto. Con esto se pretende en el corto plazo contar con 6 sistemas de observación en tiempo real para la X y XI región centralizados en una plataforma de información (www.iproach.cl). En la **Figura 22** es posible ver los puntos de medición antes mencionados y los probables nuevos puntos de observación.



5.3.2 Fuentes de información oceanográfica contempladas en la Ley de Pesca:

La importancia de desarrollar sistemas de monitoreo para el desarrollo sustentable de la acuicultura, se refleja en la modificación a la Ley General de Pesca y Acuicultura, promulgada en Abril de 2010 que establece en su artículo 87 ter:

“A fin de tener un control en línea de los parámetros ambientales de las agrupaciones de concesiones acuícolas, éstas deberán disponer de una tecnología que registre y transmita, al menos, indicadores de conductividad, salinidad, temperatura, profundidad, corrientes, densidad, fluorescencia, turbidez según lo establezca el reglamento”.

Producto de lo anterior es que se puede proyectar el desarrollo de un sistema de monitoreo a largo plazo con una gran cobertura geográfica a lo largo de la costa del sur de Chile. Una aproximación simple que pueda ilustrar la eventual densidad observacional en el sur de Chile se puede apreciar en la **Figura 23**, aquí se presentan las agrupaciones de concesiones de salmónidos (ACS) en las regiones de Los Lagos y de Aysén. Considerando solo este dato, podemos localizar una plataforma de observación oceanográfica en cada ACS, lográndose una gran densidad de datos como se observa en la **Figura 23**, siendo 23 puntos de medición en la región de Los Lagos y 33 puntos en la región de Aysén. Estos puntos de medición pueden ser localizados de manera tal dentro de una ACS que entreguen información relevante no solo para el mismo barrio, sino también para MOSA, el cual elevaría las capacidades de la red de monitoreo otorgándole una lectura ingresada de todo el sistema y dándole un sentido regional a las mediciones, evitando que se convierta en un punto aislado de medición con información ambiental de escasa relevancia.

Por su parte, las ACS para la región de Magallanes aún no se encuentran plenamente establecidas, siendo al momento de realizar este informe solo aproximaciones de como debiera ser su disposición final. Usando resultados del proyecto “Diseño y estudio técnico de macrozonas de agrupaciones de concesiones en la zona sur austral X a XII Regiones, ASIPA 2012” (Pinilla *et al.*, 2012), en el cual se establecen ciertas zonas con características similares, se podría suponer posiciones tentativas para observaciones oceanográficas, tal como se presentan en la **Figura 24**, siendo por el momento 9 posibles puntos de medición.

5.4 Objetivo N°4

Establecer mecanismos de transferencia tecnológica a fin de permitir el incremento de la experiencia nacional en este tipo de proyectos.

Para el desarrollo de este proyecto se realizaron asesorías científicas y talleres cerrados de discusión técnica entre el personal IFOP asociado al proyecto y los asesores científicos, el Dr. Andrés Sepúlveda y el estudiante de Doctorado en Fisca Osvaldo Artal, Geofísico, ambos académicos pertenecientes al



Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción y con vasta trayectoria en modelación numérica.

Estas actividades fueron enfocadas sobre los diversos aspectos que componen el modelo en forma operacional, desde su marco conceptual hasta su implementación. En una primera etapa se realizaron reuniones de discusión y enfoque técnico del proyecto, con el objeto de resolver aspectos principales del sistema, como la definición de el/los dominio(s), sus resoluciones espaciales/temporales y los horizontes de pronósticos deseados así como la definición de los equipos informáticos requeridos, Clúster de computo, y servidor de página web entre otros aspectos.

Una segunda etapa estuvo enfocada en la realización de talleres de trabajo donde se efectuó una capacitación intensiva a personal IFOP por parte de los asesores en el uso e implementación de ROMS, versión AGRIF en equipos de alto rendimiento y en modo operacional, para poder trabajar en el Servidor de IFOP en Chiloé. Seguido de esto, los sucesivos talleres cerrados y reuniones de trabajo fueron para la construcción del modelo, realización de pruebas de desempeño con los equipos, evaluación del modelo, discusión de los resultados y diseño de las salidas en el sistema IPROACH (www.iproach.cl).

Cabe destacar que estos sistemas oceanográficos operacionales no existen en la actualidad en el país, y solo se cuenta con experiencias previas acotadas a zonas geográficas específicas, cuyos resultados quedaron en una etapa experimental, no logrando una continuidad necesaria para su total desarrollo, sin embargo, la experiencia obtenida en estos sistemas, especialmente el Sistema integrado de monitoreo y pronóstico en la IV región (SIPO), ha permitido generar una plataforma de conocimiento suficiente para montar el modelo operacional MOSA. Aun así, el reducido número de especialistas en este ámbito en el país ha dificultado integrar más académicos a la discusión. En total se realizaron 5 talleres de trabajo entre el personal IFOP y los asesores, y un taller de difusión con académicos invitados.

Taller de trabajo n°1

Fecha: 26-30 enero, 2015.

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

Participantes:

1. Dr. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Osvaldo Artal (UdeC)
3. Milton Salas (IFOP)
4. Elías Pinilla (IFOP)
5. Cristian Ruiz (IFOP)



El objetivo de este taller, fue preparar al personal IFOP en el uso e implementación de ROMS AGRIF, estudiar y definir sus conceptos básicos, teoría numérica, alcances y limitaciones, así como su uso en equipos de alto rendimiento.

Como resultado de este taller, se consiguió trabajar en la construcción de un dominio para un modelo ideal en ROMS AGRIF. Una vez construido el dominio, se procedió a establecer los parámetros del modelo, integrar las condiciones de borde e iniciales, acoplar los forzantes, compilar y ejecutar el modelo. Se logró obtener resultados, manejar las salidas del modelo y familiarizarse con el ambiente ROMS AGRIF. También se trabajó con las ROMS TOOLS, un paquete de herramientas de pre y post proceso para trabajar con los datos del modelo.

Específicamente se trabajó en comandos básicos en consola Linux Ubuntu para realizar navegación, revisión, manejo y creación de archivos. Conexión remota a través de protocolo SSH (Secure Shell) o intérprete de órdenes segura. Por medio de consola Linux o software PUTTY en Microsoft Windows. Comandos para el manejo de editores de texto en Linux. (NANO y VIM).

Por su parte se trabajó en una propuesta para la creación de la página web www.iproach.cl, donde se definió los elementos que debe tener la interfaz gráfica de un modelo operacional en este tipo de páginas web y las características del servidor a utilizar.

Taller de trabajo n°2

Fecha: 27-30 abril, 2015

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción.

Participantes:

1. Dr. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Osvaldo Artal (UdeC)
3. Milton Salas (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)

El objetivo de este taller fue trabajar en la creación de los dominios de MOSA, en la construcción de modelos de elevación digital coherentes para la zona de estudio, basados en datos batimétricos de cartas náuticas del SHOA, y en la definición de las máscaras para cada dominio. También se tuvo por objetivo establecer los protocolos para la página web, y se comenzó la creación de esta.

Como resultado de este taller se profundizó en el uso de ROMSTOOLS, el cual es un paquete de herramientas de pre y post proceso de datos de ROMS AGRIF, basado en MATLAB, aunque en este caso se ajustó al uso de OCTAVE, el cual es un código de programación libre. Se logró realizar rutinas en OCTAVE que permiten modificar los dominios del modelo, archivos tipo "GRID", que contienen los modelos de elevación digital, las máscaras y la línea de costa. Se definieron parámetros para las interpolaciones de las batimetrías y las iteraciones necesarios para ser integradas al modelo. Se



acordó realizar 2 dominios para el sistema debido a la gran extensión de la zona de estudio y la dificultad de evaluar un solo dominio con tan extenso y complejo, especialmente la región de Magallanes.

Taller de trabajo n°3

Fecha: 25-26 de mayo, 2015.

Lugar: Base Putemún, IFOP, Chiloé.

Participantes:

1. Andrés Sepúlveda (UdeC)
2. Milton Salas (IFOP)
3. Elías Pinilla (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)

El objetivo de este taller fue la realización de pruebas in situ de desempeño de los algoritmos de automatización de procesos en el sistema. Estos procesos son la descarga programada de datos para alimentar el modelo operacional, tales como las condiciones de borde y condiciones iniciales de las variables oceanográficas, así como los archivos de forzantes necesarios desde servidores de sistemas operacionales globales.

Como resultado se logró implementar la automatización de procesos de descarga en el servidor de IFOP, y que estos funcionaran de manera operacional. Se testeó la confiabilidad del proceso simulando situación de quiebre de sistema y de establecieron protocolos de emergencia en caso de que los modelos globales no estén disponible, lo cual, quedo pendiente por implementar.

Taller de Difusión

Lugar: Hotel Gran Pacifico, Puerto Montt.

Fecha: 14 de agosto, 2015

El día 14 de agosto se realizó un taller de difusión donde se presentó el desarrollo del sistema operacional, estuvieron presentes académicos, autoridades de IFOP, académicos del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada, personal de la Dirección Meteorológica de Chile, personal de la Subsecretaría de Pesca entre otros.

Las temáticas abordadas en el taller se distinguieron de 2 partes, la primera sobre modelaciones efectuadas en el pasado, y exposiciones sobre dinámica estuarina, enfocándose en los procesos hidrodinámicas y de mezcla en las zonas de estudios, mientras que en la segunda parte estuvo enfocada en la realización de pronósticos, donde junto con presentar el Sistema de predicción sinóptico, expuso



personal de la Dirección Meteorológica de Chile, presentando sus forma de trabajo , el cual es una referencia directa del sistema a implementar en este proyecto.

Los académicos presentes pudieron conocer el desarrollo de MOSA, celebrando la iniciativa y comprometiendo apoyo ya sea a nivel de información como discusión. Se rescataron diversas sugerencias y experiencias, resaltando en total unanimidad el carácter de largo plazo que deben tener estas iniciativas. Al momento de la realización del taller la página web www.iproach.cl aún no estaba operativa, por lo que no se pudo presentar, sin embargo quedo expresado que al momento de su abertura se informará oportunamente a la comunidad.

Por su parte, los académicos presentes expusieron sobre los desafíos que existen en la modelación de las zonas estuarina, resaltando la complejidad que representa también para el mundo académico el poder entender los procesos dinámicos y biogeoquímicos que imperan en la zona, resaltando la importancia que puede ser MOSA para la academia. También se rescata que un desarrollo de esta envergadura no debe recaer solo en una institución, y que se debe emular experiencias exitosas de otros países donde el desarrollo de modelos predictivos lo dirigen un par de instituciones, cada una aportando con una parte del proceso. Es de ahí la relevancia de presentar el proyecto a representantes de distintas instituciones públicas en Chile que pueden ser colaboradores de este desarrollo. En este punto se destacó la presencia de Rodrigo Delgado, quien es el encargado del desarrollo de los modelos sinópticos de la DMC, quien mostró el trabajo técnico y las capacidades empeladas en el sistema de pronósticos meteorológicos, destacando los requerimientos que tienen, y dejando entrever que hemos avanzado en el camino correcto en lo técnico en esta primera etapa.

Como punto destacable, se logró que la Dirección Meteorológica de Chile implementara un modelo de alta resolución para el dominio de MOSA basado en Weather Research Forecasting Model (WRF), siendo este un modelo acoplado que otorgará el forzante atmosférico a MOSA, el cual, hasta ahora es obtenido del modelo global GFS (EEUU).

Otro punto relevante fue el compromiso del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada en la entrega de datos relevantes para la mejora del modelo, entre ellos datos batimétricos de alta resolución recientemente adquiridos por el SHOA, los cuales permitirán construir modelos de elevación digital más precisos, permitiéndole al modelo resolver procesos hidrodinámicos asociados a accidentes topográficos, rasgos característicos de la zona de fiordos del sur de Chile.

Exposiciones:

- “Condiciones oceanográficas en fiordos y canales de la región de Aysén”. Gabriel Soto (Instituto de Fomento Pesquero).
- “Resultados preliminares Modelación Alta Resolución Canales Jacaf/Puyuhuapi”. Elías Pinilla (Instituto de Fomento Pesquero).



- “Resultados preliminares Modelación Alta Resolución Archipiélago de Chonos Central”. Cristian Ruiz (Instituto de Fomento Pesquero).
- “Implementación de un modelo sinóptico operacional para el sur de Chile (x-xii regiones) etapas 1, 2 y 3”. Osvaldo Artal (Universidad de Concepción), Cristian Ruiz (Instituto de Fomento Pesquero).
- “Modelo operacional Atmosférico de la Dirección Meteorológica de Chile”. Rodrigo Delgado (Dirección Meteorológica de Chile).
- “Hidrodinámica de fiordos Australes (región de Aysén), implicancia en la acuicultura”. Manuel Castillo (Universidad de Concepción-Universidad de Valparaíso).
- “Cuantificación de la capa de agua superficial y zonas frontales en los fiordos chilenos, entre la boca del Guafo (43°30's) y el estero elefantes (46°30's)”. Carolina Calvete (Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada).
- “Proyecto de tesis “Efecto de la topografía de alta resolución en las salidas de WRF, para los canales del Sur Austral de Chile”. Oliver Venegas (Universidad de Concepción).



6. DISCUSIÓN

Diseño del sistema operacional

Este proyecto se encuentra dividido en 3 etapas, siendo el presente informe, el documento final de la etapa I, sin embargo hay que tener en cuenta que el desarrollo del sistema operacional en su conjunto, no entrará en marcha sino hasta la etapa III.

Se construyó un marco conceptual para el desarrollo de la oceanografía operacional en la zona Sur-Austral de Chile. Este modelo esquemático (**Figura 11**) presenta los módulos principales de un sistema de estas características, estos son: un sistema de observación, un sistema de gestión y asimilación de datos y modelos numéricos, en general, la mayor parte de este tipo de sistemas desarrollados alrededor del mundo tienen ese esquema.

Cada una de las etapas contempla el desarrollo escalonado de cada uno de los módulos (**Figura 12**), así en esta primera etapa se presenta el diseño del sistema operacional relacionado principalmente con la implementación y evaluación del modelo numérico ROMS_AGRIF en modo pronósticos, un diagnóstico de sistemas de observación en la zona sur de Chile y el desarrollo de un sitio web experimental. La segunda etapa, que ya se encuentra en ejecución, contempla de modo general la calibración del modelo ROMS_AGRIF, principalmente en lograr consistencia en rasgos típicos de la zona (amplitud de marea, estratificación vs mezcla, sensibilidad a fuente de datos de viento, etc.), en esta etapa también se contempla el levantamiento de nuevos puntos de observación. Finalmente, la etapa III contempla la optimización del modelo, que básicamente es la continuación del proceso que debe ser permanente de evaluación y calibración, en este caso las etapas anteriores permitirán direccionar de mejor forma el mejoramiento del modelo (mejora fuentes de datos, anidamientos, etc). La puesta en marcha de aplicaciones relacionadas con conectividad también se visualiza como parte de esta etapa que comprende la marcha oficial del sistema.

Respecto de experiencias anteriores en Chile, cabe señalar algunos puntos importantes en los cuales se debe poner atención. En primer lugar, el sistema operacional desarrollado para la acuicultura carecía fundamentalmente del capital humano y experiencia suficiente como para direccionar la mejora constante del sistema, eso contribuyó a que los procesos de evaluación-calibración no fueran los adecuados, al mismo tiempo, la estructura rígida de presentación de resultados no lograba conectar con las necesidades del usuario específico (industria del salmón).

Para el caso del sistema implementado en la IV región (Ramos, 2012), se incluía distintos niveles de modelación (hidrodinámico, bio-físico, bio-económico) para abordar estudios sobre especies costeras con fines de asesoramiento para el manejo, sin embargo, la dificultad de replicar los patrones de circulación costero a través de modelos de escala oceánica dificultaron el desarrollo de los restantes modelos. La implementación de modelos costeros de mayor resolución como FVCOM, pueden mejorar la circulación costera pero a un mayor costo computacional.



El desarrollo de este sistema operacional toma en cuenta las dificultades encontradas en los sistemas operacionales anteriormente planteados, o al menos en parte. En este sentido, la formación de capital humano en procesamiento y análisis de observaciones oceanográficas y la implementación de modelos hidrodinámicos en el sur de Chile, contabiliza ya un desarrollo de 5 años, en donde se ha formado una masa importante de profesionales especializados en estos tópicos, aunque sigue siendo insuficiente. Junto a esto, se ha realizado un acercamiento permanente hacia académicos tanto chilenos como extranjeros relacionado a estas temáticas.

El principal usuario de este sistema, al menos en su concepción original, es el Estado de Chile a través de las instituciones encargadas de la regulación de la acuicultura (Subpesca y Sernapesca), por tanto, las aplicaciones que se desarrollan en la etapa III están dirigidas a resolver algunos de los problemas más recurrentes en la industria acuícola, como son la conectividad de partículas entre centros de cultivo, barrios y macrozonas, principalmente respecto a transporte de patógenos y contaminantes.

Otro punto que cabe mencionar es la aparición en el diseño conceptual de un modelo biogeoquímico, que si bien no forma parte del desarrollo de las 3 etapas, si debiese acoplarse en una siguiente fase, dado que existe un proyecto paralelo llevado por IFOP en donde se ha comenzado su implementación en el mar interior de Chiloé. Este modelo funcionaría acoplado a la hidrodinámica pronosticada, pudiendo entregar parámetros críticos para el manejo medioambiental, tales como oxígeno disuelto, clorofila, nutrientes, etc. Es por esta razón, que es imprescindible que la continuación del sistema operacional forme parte de un programa permanente que permita en un futuro en manejo de la acuicultura de manera integral.

El marco conceptual, por tanto resume como debiera ser este sistema operacional en su etapa final, es decir, un modelo que es forzado por un modelo atmosférico acoplado, y que recibe condiciones de borde y condiciones iniciales de modelos operacionales globales. Mientras que una red de observaciones entra a un sistema de gestión de datos y a través de procesos de asimilación de datos, modifican la condición inicial de este, mejorando considerablemente el desempeño del modelo. Los resultados del modelo finalmente son presentados en una página web para que todo nivel de usuario tenga acceso a ellos, incluidas las observaciones.

Implementación de un modelo numérico de predicción sinóptico para el sur de Chile (MOSA)

Durante el presente proyecto, el objetivo principal recae en el desarrollo de un modelo hidrodinámico operacional basado en ROMS AGRIF, es decir, en la implementación de un modelo capaz de realizar pronósticos a 48 horas de las condiciones oceanográficas en la zona sur de Chile.

Para ello, en conjunto con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción (DGEO), se implementó el Modelo Operacional Sur Austral (MOSA). El desarrollo del modelo contempló la



creación de 2 dominios, uno que comprende los mares interiores de la región de Los Lagos y de Aysén y otro exclusivo para la región de Magallanes. Esto permite una mejor evaluación de los modelos, como también una mejor configuración de los núcleos para su corrida, haciendo más eficiente la operatividad y mejorando los tiempos de cómputo, los cuales siempre son un limitante en la realización de modelaciones hidrodinámicas. Los dominios tienen resoluciones horizontales cercanas a 1 Km y 32 niveles verticales tipo sigma, la cual es una distribución que considera la configuración topográfica del fondo marino, dándole peso a los accidentes batimétricos que interfieren la dinámica de la zona. Esto representa una limitante en cuanto que muchos canales con un tamaño menor no podrán ser resueltos por la resolución del modelo, sin embargo, se considera que a largo plazo, este tipo de limitaciones debiesen ir superándose, en términos de poder contar con una capacidad de computo que permita aumentar la resolución de estos modelo, sin que el tiempo de simulación se transforme en un problema, y que por otra parte MOSA se convierta en un modelo de referencia para la comunidad de modelación numérica, otorgando las condiciones iniciales y condiciones de borde para la realización de modelos hidrodinámicos de alta resolución que apunten a resolver la dinámica de una zona más acotada.

En este sentido, MOSA recoge la idea de Noruega tiene implementado desde 2011 el sistema Norkyst-800 (Albretsen, 2011) desarrollado en colaboración entre el Instituto de Investigación Marina, el Instituto Meteorológico Noruego y el Instituto Hidrológico Noruego. Este sistema basado en el modelo numérico oceánico ROMS (Regional Ocean Modelling System) cubre la totalidad de la costa noruega desde las aguas profundas hasta el interior de los fiordos, con una grilla de resolución horizontal de 800 metros y 35 niveles sigma, pudiendo realizar modelaciones sobre todo el dominio o zonas arbitrarias de él. El objetivo de este sistema está pensado para servir de nexo entre modelos oceánicos de baja resolución (4 kilómetros) y modelos costeros de alta resolución (150-200 metros en la horizontal). Norkyst-800 es capaz de proporcionar información detallada en relación a corrientes y variables ambientales a lo largo de la costa y en los principales sistemas de fiordos. Los pronósticos tienen un horizonte de una semana. Norkyst-800 también se puede utilizar para cuantificar las consecuencias de las medidas reglamentarias relativas a los sistemas de energía hidroeléctrica o el impacto de las actividades comerciales, tales como el uso de fertilizantes y la propagación de enfermedades por la industria de la acuicultura (Asplin 2011).

En términos de operación, MOSA es capaz de entregar resultados de pronósticos de variables oceanográficas con un horizonte de 48 horas, realizando simulaciones del tipo -1,+3, esto quiere decir que simula un día anterior y 3 días hacia adelante, siendo el mismo día que comienza la simulación parte del pronóstico. Como este proceso demora cerca de 22 horas (entre las descargas de datos iniciales, la ejecución del modelo y la presentación de datos en la web), cuyos resultados estarían disponibles cerca de las 23:00 horas, es que se realiza un pronóstico de 3 días, así se logra que la predicción de 48 horas se pueda cumplir.

La operación de MOSA está pensada en ser desarrollada a largo plazo, donde su funcionamiento sea similar al de otros modelos operacionales en el mundo, cuyas arquitecturas están montadas sobre un sistema de observación, un sistema de gestión y asimilación de datos y un modelo numérico. Sin



embargo las limitantes en la cantidad de puntos de medición presentes en la zona sur de Chile actualmente no permiten sino proyectar y planificar a largo plazo como implementar los sistemas de observación y asimilación de datos. Esta tarea supone desafíos mayores, ya que debe poseer mayores capacidades técnicas y humanas que las actuales, y a su vez debe considerar la incorporación de otras instituciones en el desarrollo, tal como lo sugiere la experiencia internacional, donde tomando a modo de ejemplo el sistema PREVIMER, modelo operacional de pronósticos implementados para las costas de Francia, su desarrollo involucró a diversas instituciones gubernamentales y académicas de ese país, resultando en un sistema de referencia para la oceanografía operacional. PREVIMER es un sistema predictivo completamente desarrollado, contando con un sistema de observación compuesto por boyas oceanográficas, radares HF, mareógrafos e imágenes satelitales, un sistema que realiza procesos de asimilación de datos y un modelo numérico montado en servidores de gran capacidad.

De acuerdo a lo anterior, se han comenzado conversaciones y acuerdos con distintas instituciones para colaborar en este desarrollo, de esta manera ya se cuenta con la información del modelo operacional (WRF) de pronósticos atmosféricos de la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), específicamente de su dominio de 12 Km centrado en la zona sur, entonces los datos son transferidos de forma automática del servidor de la DMC hacia el sistema de cómputo de IFOP en Chiloé para su procesamiento. Se espera que un futuro próximo se pueda contar con la colaboración de la Dirección General de Aguas (DGA) en cuanto a la información que poseen de caudales de ríos en la Patagonia Chilena.

La evaluación preliminar del modelo de pronósticos tiene el valor de diagnosticar aquellos procesos que se encuentran mal resueltos y que mediante cambios en datos de entrada (condiciones de borde e iniciales, fuentes de agua dulce, viento, etc.) o bien parametrizaciones. El esfuerzo en esta primera etapa se concentró en buscar los rasgos asociados principalmente a la propagación de la onda de marea hacia el sistema estuarino, así como también verificar la estratificación del sistema. Para evaluar el nivel del mar en la zona de estudio, se consideró que la variabilidad de las corrientes está dominada por la variabilidad de la marea de tipo semidiurno M2 (Salinas & Hormazábal, 2003), la cual contiene la mayor PE (porcentaje de energía), asumiéndose que si el modelo logra resolver de manera adecuada la constituyente M2, será capaz de resolver la circulación en canales de régimen mareal, por ejemplo el Archipiélago de Chonos.

En el trabajo de evaluación se encontró que MOSA resuelve de manera correcta el nivel del mar en los puntos de evaluación, y de manera separada la componente M2, la cual junto con la componente S2 posee el 90% energía mareal. Las correlaciones entre lo observado y lo pronosticado bordearon el 90 %, así como también las correlaciones entre las constituyentes M2 pronosticadas y observadas. Los errores fueron en gran parte de los casos menores a 50 cm, con la excepción de Puerto Montt, que fue levemente mayor a 1 metro. Aun cuando el modelo logró reproducir de manera consistente la conducta del nivel del mar, éste presentó sus mayores errores en cuadratura, tendiendo mayormente a sobrestimar las amplitudes. El modelo obtiene sus condiciones de borde en zonas oceánicas, donde la marea no interactúa con el borde continental; ésta al ingresar a la zona de canales, se ve perturbada y modificada al interactuar con la topografía costera, generando componentes de aguas someras.



Por su parte el campo de masa fue evaluado en algunos canales con distintas características, con el objeto de verificar las capacidades de MOSA de reproducir estructuras hidrográficas en distintos sistemas. Para este efecto se utilizaron datos de canales en el Archipiélago de Chonos, del sistema Jacaf-Puyuhuapi y del sistema Corcovado-Moraleda. Los resultados de estas evaluaciones mostraron que MOSA sobrestimó la temperatura en todos los puntos con una diferencia de $+2^{\circ}\text{C}$. Esto puede deberse en parte a las condiciones iniciales del modelo, las cuales son extraídas de modelos globales de gran escala y baja resolución que no consideran las singularidades del sistema estuarino del sur de Chile. También puede deberse a otras causas, relacionadas con las parametrizaciones del modelo. Si bien los resultados no fueron satisfactorios en este sentido, el campo de masa y la circulación estuarina de esta zona están modulados básicamente por la salinidad, la cual es la que modifica la estructura de la pycnoclina.

En este sentido, la salinidad tuvo una conducta variable. En los sistemas levemente estratificados como en el archipiélago de Chonos, o canal Moraleda, la estructura vertical se aproximó en algunos casos a la observada, incluso con los mismos valores, sin embargo en ningún caso fue capaz de reproducir la capa superficial de baja salinidad presente en casi todos los canales, haciéndose notar con mayor intensidad en el sistema Jacaf-Puyuhuapi, el cual es altamente estratificado debido a diversos aportes de agua dulce presentes. Esto podría deberse a que MOSA en esta etapa experimental no tiene incluido las fuentes de agua dulce, por lo que al momento de ingresarlas se debiera esperar una mejora en los resultados.

El trabajo de evaluación y calibración del modelo está contemplado en la Etapa II del proyecto, la cual ya está en marcha. Dentro de esta etapa, se espera mejorar la calidad de los pronósticos y la reducción del error través de pruebas de sensibilidad, calibración, etc.

Entre las actividades que se realizan actualmente están:

- Ingreso de aportes de agua dulce al modelo.
- Utilizar como forzante atmosférico un modelo de 12 kilómetros de resolución para zona basado en WRF, realizado por la Dirección Meteorológica de Chile a través de un convenio de cooperación con IFOP.
- Ajustar parámetros físicos del modelo a través de pruebas de sensibilidad (fricción de fondo, turbulencia, etc.).
- Prueba para determinar puntos de medición (test de los gemelos).
- Corridas climatológicas para evaluar las corrientes.
- Estimar la habilidad de pronóstico (skill score).



Presente y futuro de un sistema de observación oceanográfica en tiempo real.

En la actualidad existen escasos sistemas de observación permanentes. En la región de los lagos y Aysén se contabilizaron 4 sistemas de observación y para la región de Magallanes existe uno asociado a la ENAP. De estos sistemas no todos tienen la información disponible y además no todos cumplen con estándares mínimos.

De lo anterior se desprende que las fuentes de información oceanográficas disponibles obedecen a objetivos particulares de cada institución responsable y no se encuentran disponibles de manera conjunta, no existiendo ninguna organización que reúna toda esa información en una plataforma común. En general los parámetros tienden a converger en mediciones de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto en capa más cercana a la superficie. Respecto de variables atmosféricas la mayor parte de los puntos de observación no contemplan esta componente, excepto de boya ubicada en Puyuhuapi. Información de corrientes es también muy escasa, debido a los mayores costos asociados al instrumento (ADCP). En relación a la transmisión de datos, es utilizada ampliamente el uso de sistema de comunicación GSM acoplada o no a un sistema de radio entre la boya y la estación en tierra para su retransmisión, por lo tanto, los puntos se encuentran ubicados cercano a zonas donde existe dicha cobertura, no se observó ningún sistema con transmisión satelital.

La calidad de los datos recolectados depende principalmente de la calidad de los sensores y las respectivas mantenciones que se deben realizar a los equipos, principalmente respecto a la acumulación de fouling. De los puntos de observación, la boya ubicada en Puyuhuapi cuenta con una fuerte componente de análisis de datos realizado por los investigadores responsables de esta, incluyendo publicaciones científicas con estos datos (Schneider, 2014), por lo cual, parece ser una fuente confiable de información. En la actualidad el modulo atmosférico y de transmisión de datos se encuentran fuera de operación y se requiere la mantención de los equipos por parte del fabricante.

Las plataformas de observación de los canales Dalcahue y Lemuy fueron instaladas recientemente (Agosto 2015) y contemplan mantención cada 2 meses, junto con toma de muestras de agua y lances de CTD en el mismo punto, con lo cual, se asegura un mayor control en la calidad de los datos. El equipo instalado en estas plataformas es un WQM D 120% del fabricante Wetlabs y Sea Bird Electronics, el WQM emplea una inyección de biocida activo e inhibidores pasivos para combatir el fouling interno y externo.

Con la idea de utilizar la información de calidad disponible dentro del sistema operacional se están generando los vínculos cooperativos a través de la firma de convenios tanto con COPAS Sur-Austral como con el Núcleo milenio Musels. La finalidad es que estos 3 sistemas de observación puedan estar disponibles en tiempo real para su utilización. Acoplado a estos sistemas, IFOP se encuentra en la actualidad implementando 3 nuevos puntos de monitoreo, los cuales serán distribuidos entre el mar interior de Chiloé y la región de Aysén. Con esto se pretende en el corto plazo contar con 6 sistemas



de observación en tiempo real para la X y XI Región centralizados en una plataforma de información (www.iproach.cl).

En el ámbito de la acuicultura austral, el monitoreo en línea, es decir, recolectar información ambiental en tiempo real en los fiordos y canales de la Patagonia chilena, ha surgido como una necesidad impostergable para la adecuada sincronización entre el manejo productivo y las condiciones ambientales. Disponer de información en tiempo real, construir y comprender tendencias de comportamiento de algunas variables claves (por ejemplo, temperatura y oxígeno disuelto) puede ayudar a comprender otros procesos como las recurrentes emergencias sanitarias. La importancia de implementar sistemas de monitoreo para el desarrollo sustentable de la acuicultura, se refleja en una de las últimas modificaciones a la Ley General de Pesca y Acuicultura, promulgada en Abril de 2010 que establece en su artículo 87 ter: “A fin de tener un control en línea de los parámetros ambientales de las agrupaciones de concesiones acuícolas, éstas deberán disponer de una tecnología que registre y transmita, al menos, indicadores de conductividad, salinidad, temperatura, profundidad, corrientes, densidad, fluorescencia, turbidez según lo establezca el reglamento”.

Producto de lo anterior es que se puede proyectar el desarrollo de un sistema de monitoreo a largo plazo con una gran cobertura geográfica a lo largo de la costa del sur de Chile. Dado de que existe una gran cantidad de “barrios” salmoneros (ACS) sería muy importante poder contar con esta información en el futuro. En la medida que dispongamos de series de tiempo lo suficientemente extensas, podremos conocer tendencias, elaborar modelos, establecer escenarios y eventualmente predecir situaciones indeseadas. Además, conocer relaciones causa-efecto nos permitirá disminuir la incertidumbre tanto en decisiones privadas (productivas, económicas) como públicas (sustentabilidad, condiciones ambientales, bien común). Y en la medida que se conforme una red de observación y monitoreo, más robustos y útiles serán los modelos predictivos.



7. CONCLUSIONES

Se generó el diseño para el desarrollo de oceanografía operacional en la zona Sur-Austral de Chile. Este marco conceptual consiste en una serie de módulos que deben desarrollarse durante las 3 etapas de desarrollo del sistema operacional (2014-2017). Estos módulos incluyen: Sistema de monitoreo, sistema de control y asimilación de datos, modelo atmosférico, submodelo de agua dulce, modelo hidrodinámico y plataforma de visualización de información.

Se implementó un modelo hidrodinámico operacional basado en ROMS_AGRIF, con pronósticos a 48 horas de variables oceanográficas (temperatura, salinidad y corriente en esta primera etapa), desarrollándose la automatización de los elementos que alimentan el modelo. Se dividió en 2 dominios el área de estudio, uno que comprende los mares interiores de la región de Los Lagos y de Aysén y otro exclusivo para la región de Magallanes.

De la evaluación preliminar de MOSA se desprende que para concentrar los esfuerzos y recursos disponibles de manera más eficiente, se resolvió no abordar la región de Magallanes en estas etapas iniciales del Modelo, concentrando los recursos en el dominio Chiloé - Aysén, el cual ha sido estable, y su menor tamaño permite gestionar los recursos computacionales de manera más eficiente, permitiendo una mayor libertad en el trabajo de evaluación y calibración que comprende la etapa II del proyecto.

Para el dominio Chiloé Aysén, MOSA logra pronosticar de manera confiable el nivel del mar en los puntos de control, obteniendo correlaciones cercanas al 90 % en todos los casos, y logra también reproducir la componente M2, principal constituyente armónica de la marea.

El campo de masa arrojó resultados pobres, no logrando reproducir la estratificación adecuadamente. La temperatura aún está alejada de los valores observados, no siendo capaz de reproducir la termohalinas observadas y mostrando valores de +2°C de diferencia con lo observado en toda la columna. Todo esto estaría indicando que las condiciones iniciales basadas en el modelo global Mercator son inadecuadas para zonas estuarinas internas, a su vez parece claro existe una subestimación del volumen de agua dulce que ingresa al sistema marino. La etapa II se ocupará de corregir ambos problemas.

Desde la región de los Lagos a Magallanes se identificaron 5 puntos de observación permanentes de los cuales 3 de ellos presentan posibilidades ciertas de ser utilizadas en el sistema operacional, estas se ubican en canal Dalcahue y canal Lemuy en Chiloé central, mientras que la restante se ubica en canal Puyuhuapi. El resto de las observaciones o presentan datos no confiables o no se encuentran disponibles para su uso.

La importancia de implementar sistemas de monitoreo para el desarrollo sustentable de la acuicultura, se refleja en una de las últimas modificaciones a la Ley General de Pesca y Acuicultura, promulgada



en Abril de 2010 que establece que las agrupaciones de concesiones acuícolas, deberán disponer de una tecnología que registre y transmita, al menos, indicadores de conductividad, salinidad, temperatura, profundidad, corrientes, densidad, fluorescencia, turbidez según lo establezca el reglamento. Producto de lo anterior es que se puede proyectar el desarrollo de un sistema de monitoreo a largo plazo con una gran cobertura geográfica a lo largo de la costa del sur de Chile.

En la medida que dispongamos de series de tiempo lo suficientemente extensas, podremos conocer tendencias, elaborar modelos, establecer escenarios y eventualmente predecir situaciones indeseadas. Además, conocer relaciones causa-efecto nos permitirá disminuir la incertidumbre tanto en decisiones privadas (productivas, económicas) como públicas (sustentabilidad, condiciones ambientales, bien común). Y en la medida que se conforme una red de observación y monitoreo, más robustos y útiles serán los modelos predictivos.



8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albretsen J, Ann Kristin Sperrevik, André Staalstrøm, Anne D. Sandvik, Frode Vikebø and Lars Asplin. 2011. NorKyst-800 Report No. 1. User Manual and technical descriptions.
- Asplin L, Anne D. Sandvik and Jon Albretsen. 2011. The coastal model NorKyst-800 a model of the currents along the whole Norwegian coast. Marine Research News N° 8-2011
- A. Schiller, G. B. Brassington (Eds.). 2011. Operational Oceanography in the 21st Century, Springer Science + Business Media B.V. DOI 10.1007/978-94-007-0332-2_13.
- Aiken, C.M, Wilhelm Petersen, Friedhelm Schroeder, Martina Gehrung, and Paola A Ramírez von Holle, 2011: Ship-of-Opportunity Monitoring of the Chilean Fjords Using the Pocket FerryBox. J. Atmos. Oceanic Technol., 28, 1338–1350.
- Chassignet, Eric P., Verron, Jacques (Eds.). 2006. Ocean Weather Forecasting: An Integrated View of Oceanography, XII, 577 p.
- Daley, R., 1991. Atmospheric Data Analysis, Cambridge University Press, pp. 457.
- Debreu, L., P. Marchesiello. & G. Cambon. 2011. Two-way nesting in split-explicit ocean models: Algorithms, implementation and validation. Ocean Modelling 49-50; 1-12.
- Dombrowsky E. Overview. 2011. Global Operational Oceanography Systems en A. Schiller, G. B. Brassington (eds.), Operational Oceanography in the 21st Century. DOI 10.1007/978-94-007-0332-2_13
- Foreman, M.G.G., Chandler, P.C., Stucchi, D.J., Garver, K.A., Guo, M., Morrison, J., Tuele, D. 2015. The ability of hydrodynamic models to inform decisions on the siting and management of aquaculture facilities in British Columbia. DFO Can. Sci. Advis. Sec. Res. Doc. 2015/005. vii + 49 p.
- González, H.E., L.R. Castro., G. Daneri., J.L. Iriarte., N. Silva., F. Tapia., E. Teca., C.A Vargas. 2013. Land-ocean gradient in haline stratification and its effects on plankton dynamics and trophic carbon fluxes in Chilean Patagonian fjors (47-50°S).progress in oceanography 119:32-47.
- Proyecto InnovaChile-Corfo.2012. Sistema de información oceanográfica para la sostenibilidad de la acuicultura en la región de Aysén. Centro de Investigación en ecosistemas de la Patagonia (CIEP) – Universidad Austral de Chile (UACH). 11BPC-10191



- Le Traon P. 2011. Satellites and Operational Oceanography en A. Schiller, G. B. Brassington (eds.), Operational Oceanography in the 21st Century. DOI 10.1007/978-94-007-0332-0332-
- Ley N° 20.657. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 24 de enero de 2013.
- Moore AM, Arango HG, Di Lorenzo E, Cornuelle BD, Miller AJ, Neilson DJ .2004. A comprehensive ocean prediction and analysis system based on the tangent linear and adjoint of a regional ocean model. Ocean Model 7:227–258.
- Oke, P.R., Allen, J.S., Miller, R.N., Egbert, G.D. and Kosro, P.M. 2002. Assimilation of surface velocity data into a primitive equation coastal ocean model. Journal of Geophysical Research 107: doi: 10.1029/2000JC000511. issn: 0148-0227
- Paduan JD, Shulman I 2004. HF radar data assimilation in the Monterey Bay area. J Geophys Res 109. doi: 10.1029/2003JC001949
- Pinilla, E., M. Arriagada, G. Soto, C. Ruiz, P. Reche 2015. Informe final. “Determinación de los patrones de circulación en los mares interiores de la región de Magallanes” Proyecto ASIPA – MINECOM. 183 p+Anexos.
- Pinilla, E., M. Arriagada, G. Soto. 2013. Informe final. “Caracterización y modelación de los patrones de circulación marina en la XII región de Magallanes” Proyecto ASIPA – MINECOM. 111 p+Anexos
- Pinilla, E., G. Soto, M. Arriagada. 2012a. Informe final. “Diseño y estudio técnico de macrozonas de agrupaciones de concesiones en la zona sur-austral X a XII regiones” Proyecto ASIPA – MINECOM. 92 p+Anexos
- Pinilla, E., G. Soto, M. Arriagada. 2012b. Informe final. “Determinación de las condiciones oceanográficas en las áreas del Seno de Reloncaví y mar interior de Chiloé” Proyecto ASIPA - MINECOM. 89 p+Anexos
- Ravichandran M. 2011. In-situ Ocean Observing System en A. Schiller, G. B. Brassington (eds.), Operational Oceanography in the 21st Century. DOI 10.1007/978-94-007-0332.
- Soto, G., M. Arriagada, E. Pinilla, C. Ruiz, P. Reche, L. Méndez 2015. Informe final. “Modelación de alta resolución aplicada a la conectividad y transporte hidrodinámico al interior de macro – zonas en la XI Región de Aysén” Proyecto ASIPA – MINECOM. 63 p+Anexos.



The Global Ocean Data Assimilation Experiment (GODAE), 1997. International Symposium, Biarritz.

Trenberth, K.E., T. Koike and K. Onogi, 2008. Progress and prospects for reanalysis for weather and climate, *Eos*, 89, 234-235.

Zhang, S., M. J. Harrison, A. Rosati, and A. Wittenberg, 2007: System Design and Evaluation of Coupled Ensemble Data Assimilation for Global Oceanic Climate Studies. *Mon. Wea. Rev.*, 135, 3541–3564. doi: <http://dx.doi.org/10.1175/MWR3466.1>

FIGURAS

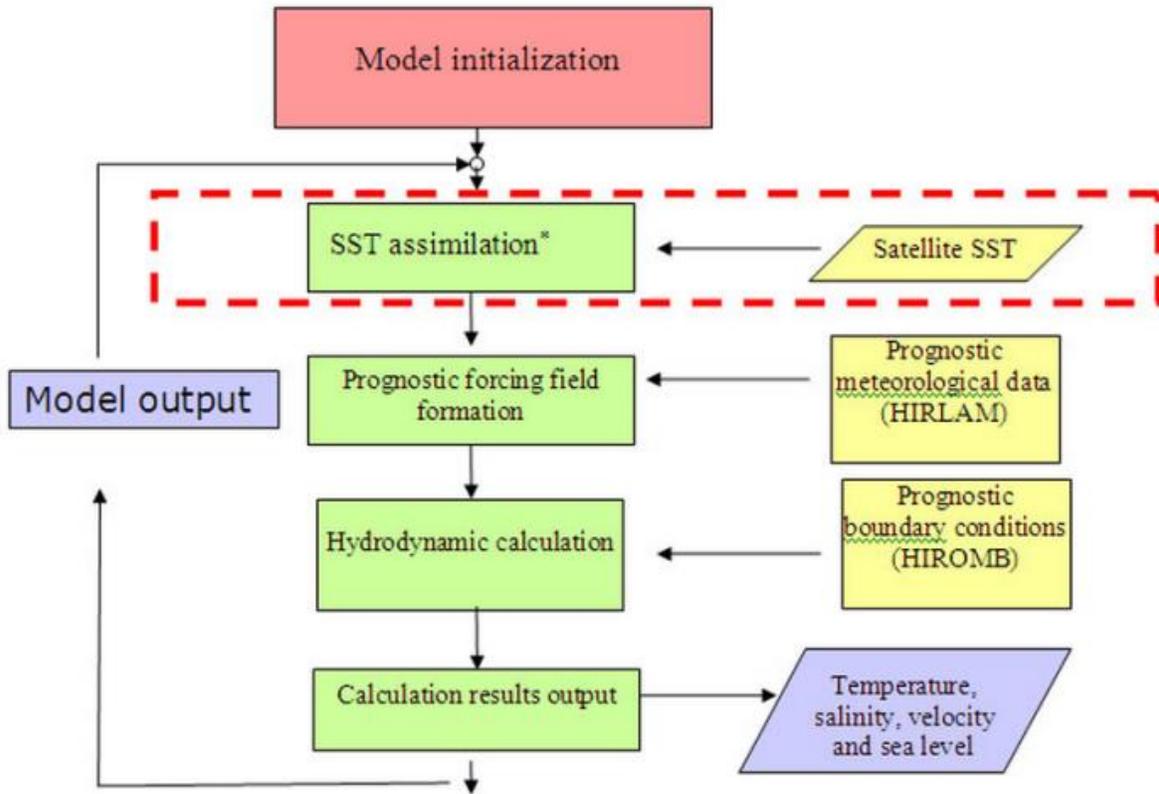


Figura 1. Sistema oceanográfico operacional en el golfo de Finlandia.

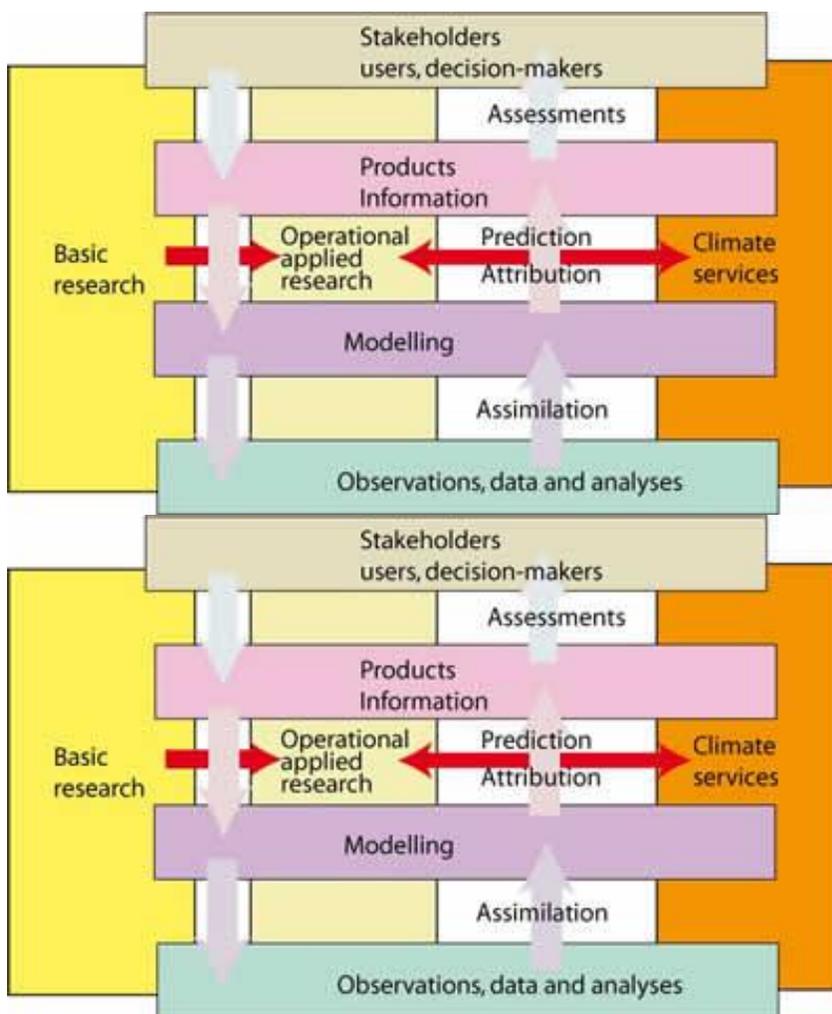


Figura 2. Marco conceptual para un sistema de información sobre el clima. Fuente: Trenberth (2008), Boletín de la OMM 57 (1).

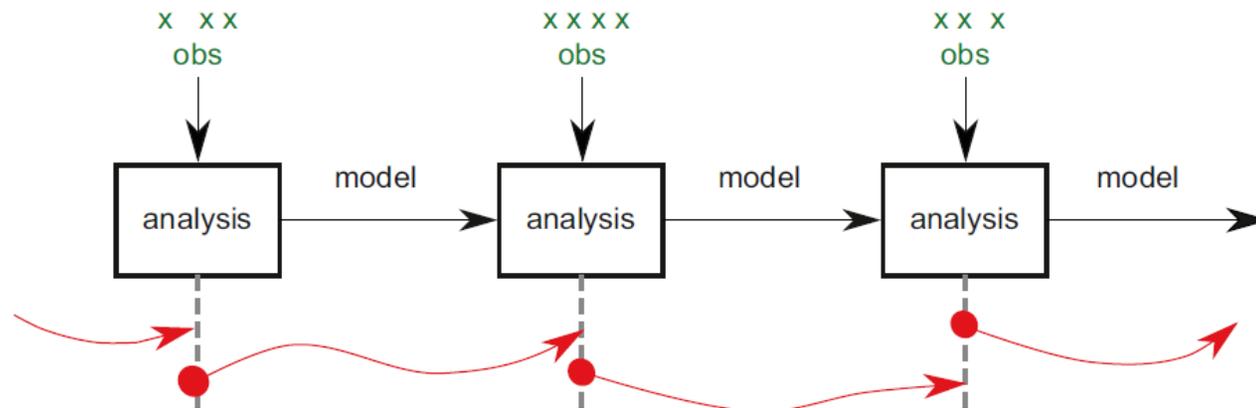


Figura 3. Análisis secuencial de observaciones agrupadas en el tiempo. Las líneas rojas mindican el estado del oceano predecido a partir de condiciones iniciales en el tiempo de analisis (puntos rojos). Las observaciones obtenidas dentro de la ventana de análisis (verde) se han agrupado y asimilado solo en los tiempos de analisis. Figura obtenida de Andreas Schiller, Gary B. Brassington: Operational Oceanography in the 21st Century, 2011.

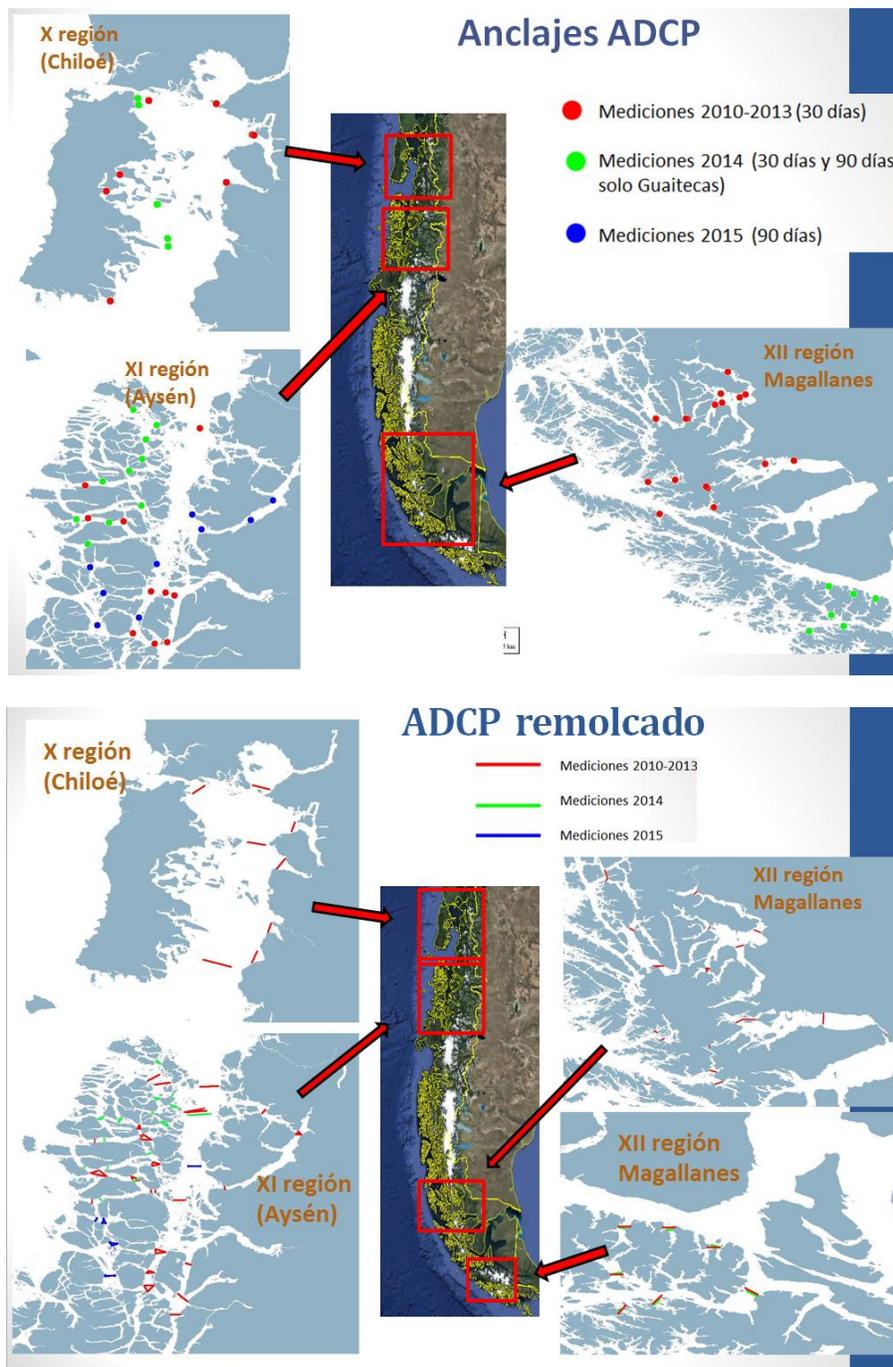


Figura 4. Observaciones de corrientes en la zona Sur-Austral realizadas por IFOP (2010-2015)

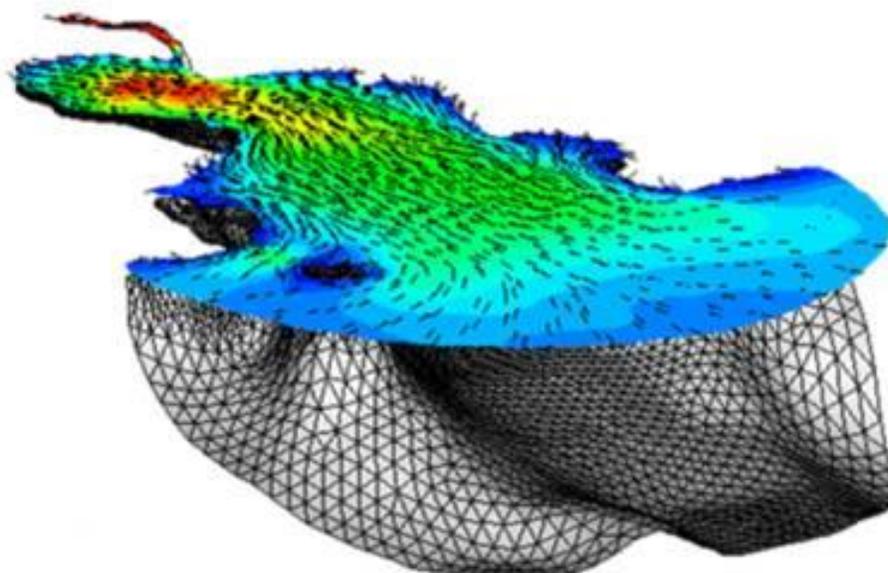


Figura 5. Campo tridimensional est1tico utilizado como condici3n de inicial en un modelo hidrodin1mico.

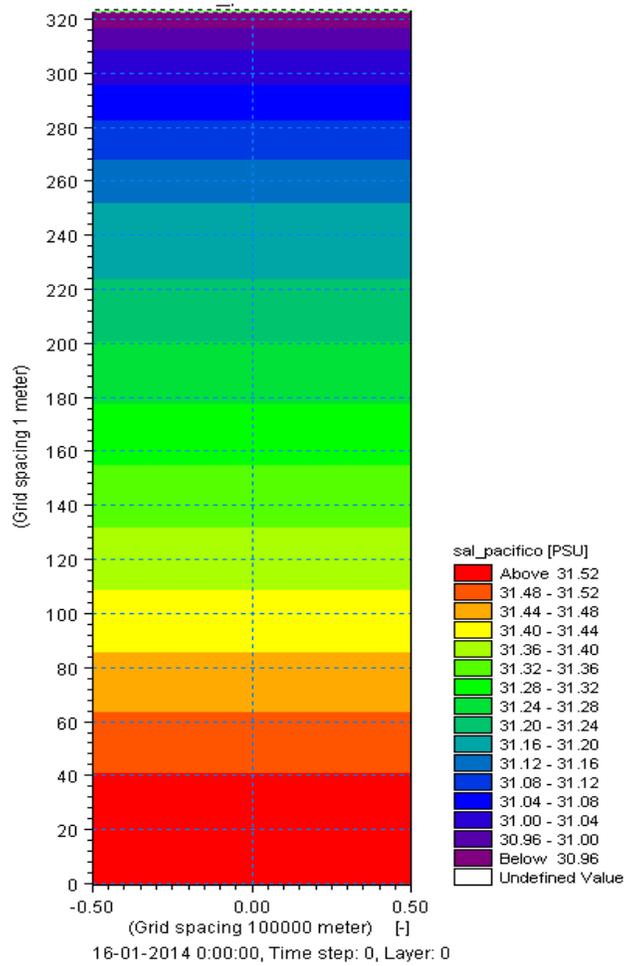


Figura 6. Secci3n transversal de salinidad utilizada como condici3n de borde en un modelo. Notar que estos valores presentan variabilidad temporal y espacial.

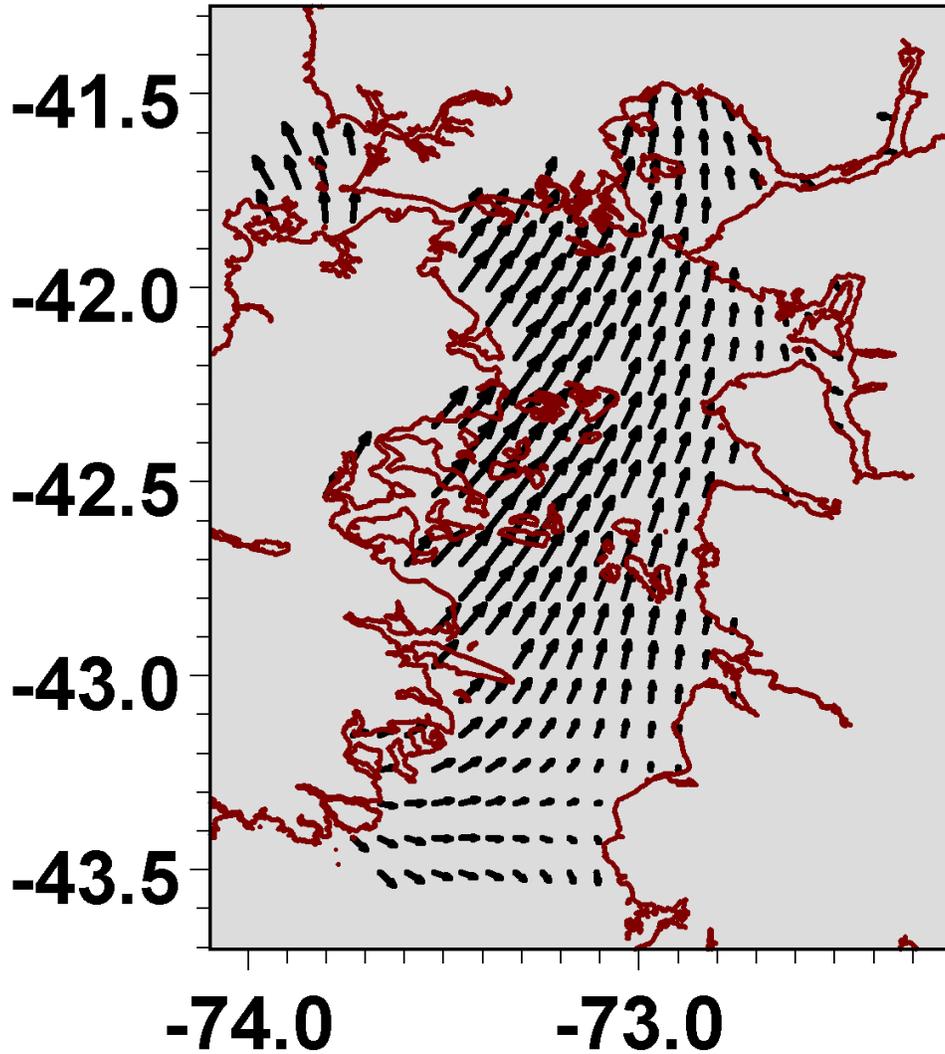


Figura 7. Campo de viento de ejemplo, utilizado en un dominio similar a MOSA. Datos descargados de GFS.

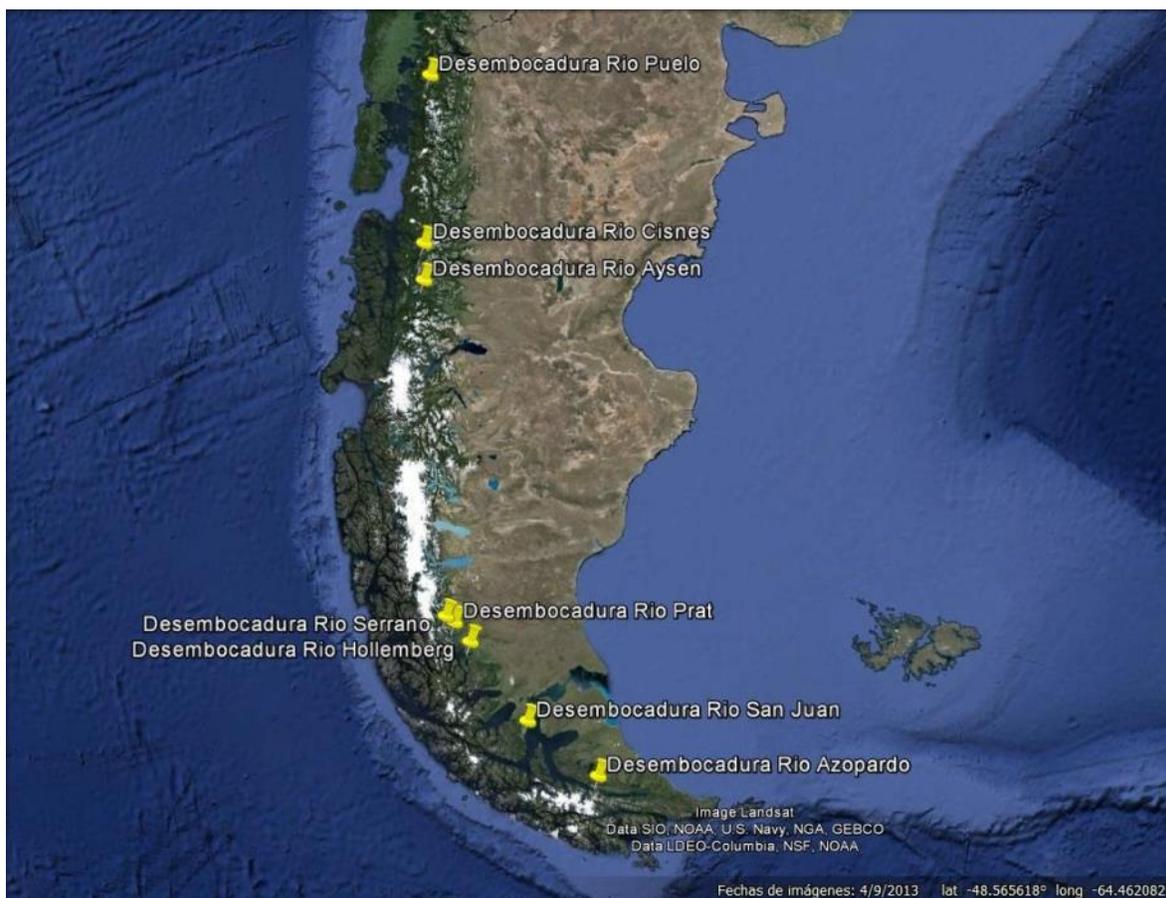


Figura 8. Ubicación de los grandes ríos de la zona sur austral de Chile bajo monitoreo de la DGA.

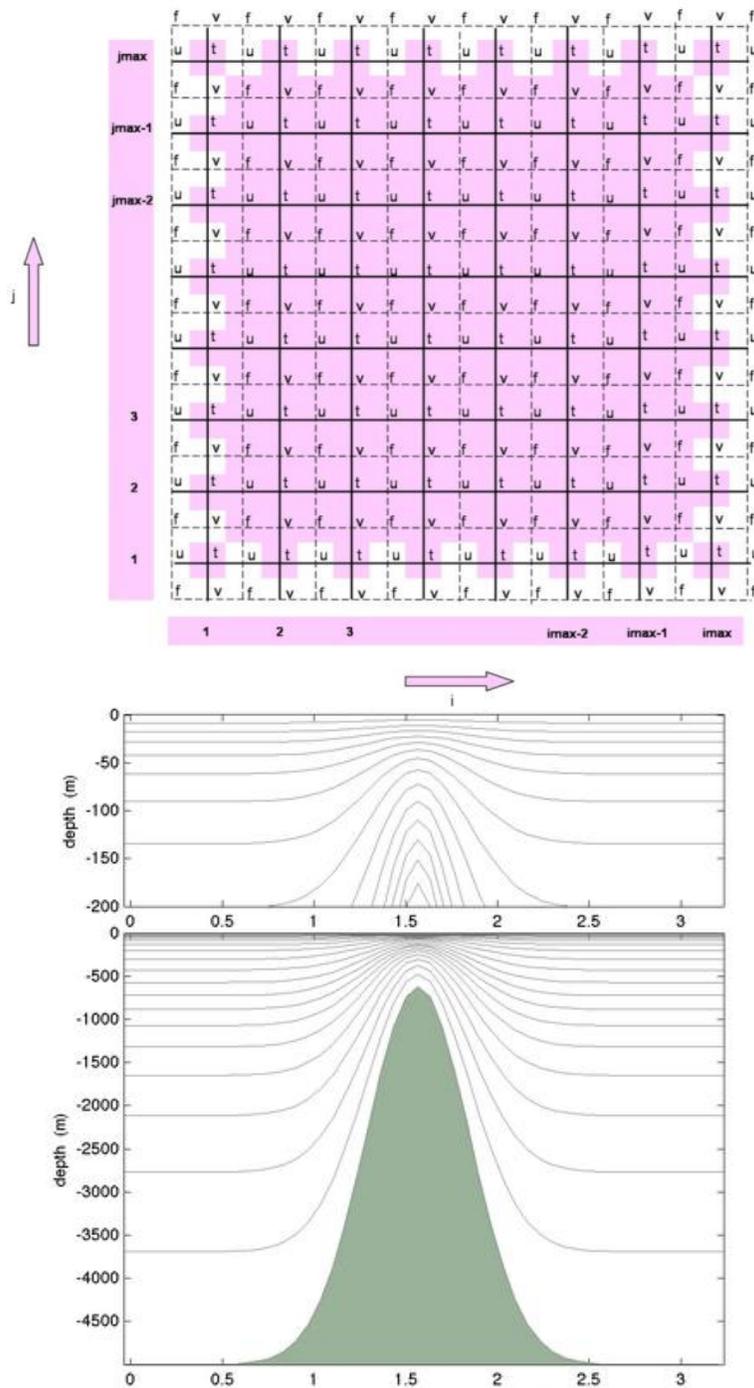


Figura 9. (Arriba) Estructura de grilla tipo Arakawa –C utilizada en MOSA, (abajo) distribuci3n de niveles verticales tipi sigma, similar a la utilizada en MOSA.

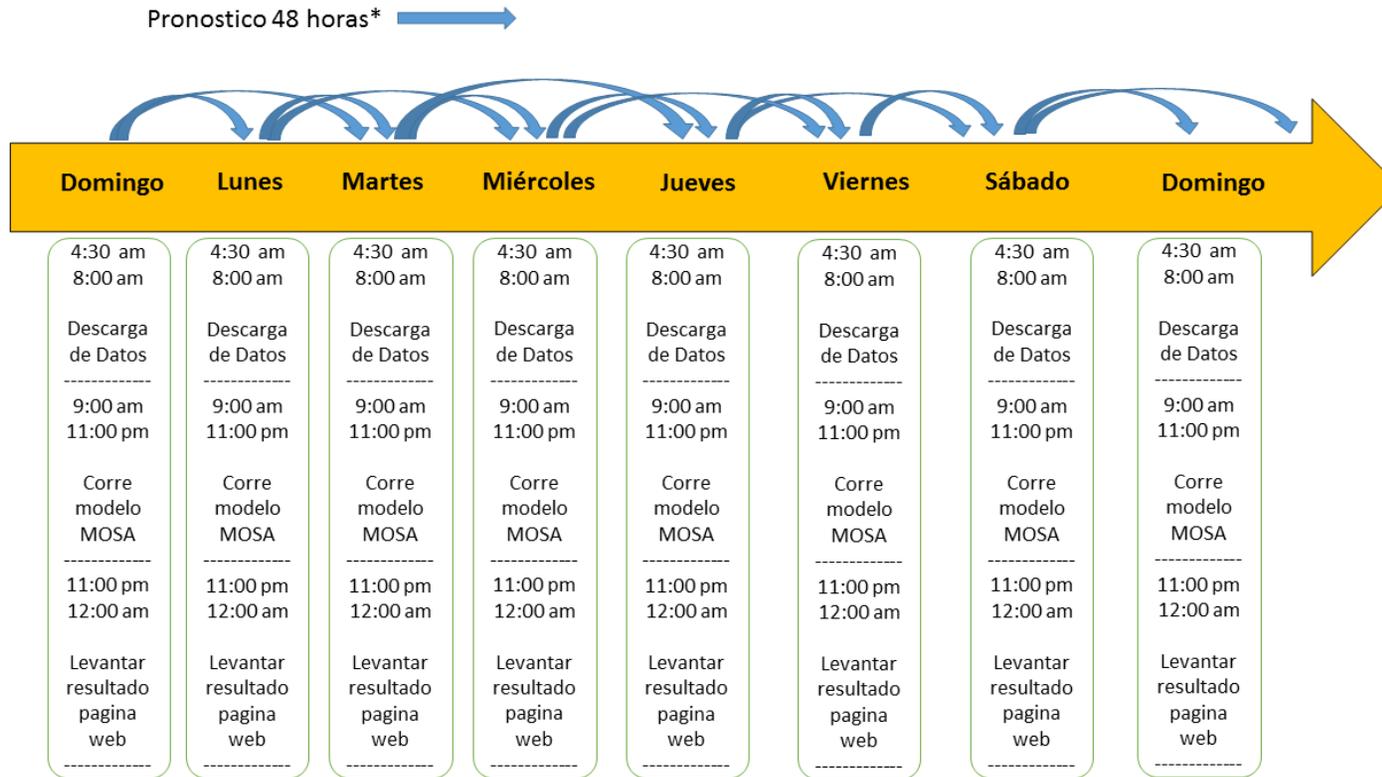


Figura 10. Diagrama que describe la operaci3n peri3dica de MOSA.

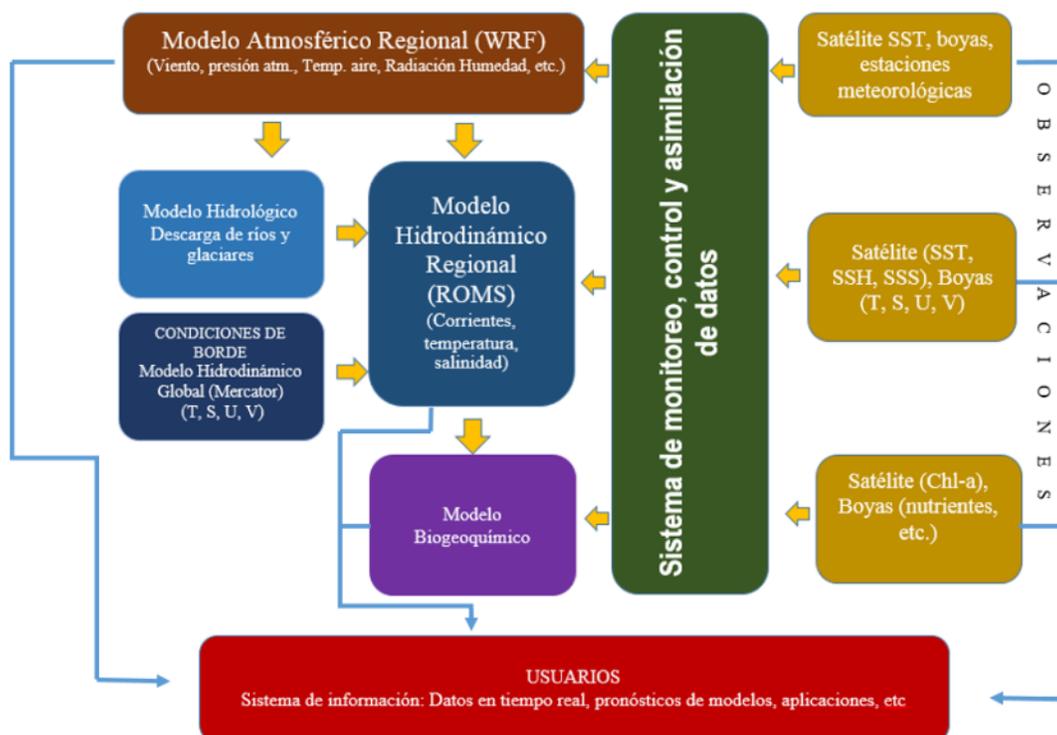


Figura 11. Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo de MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.

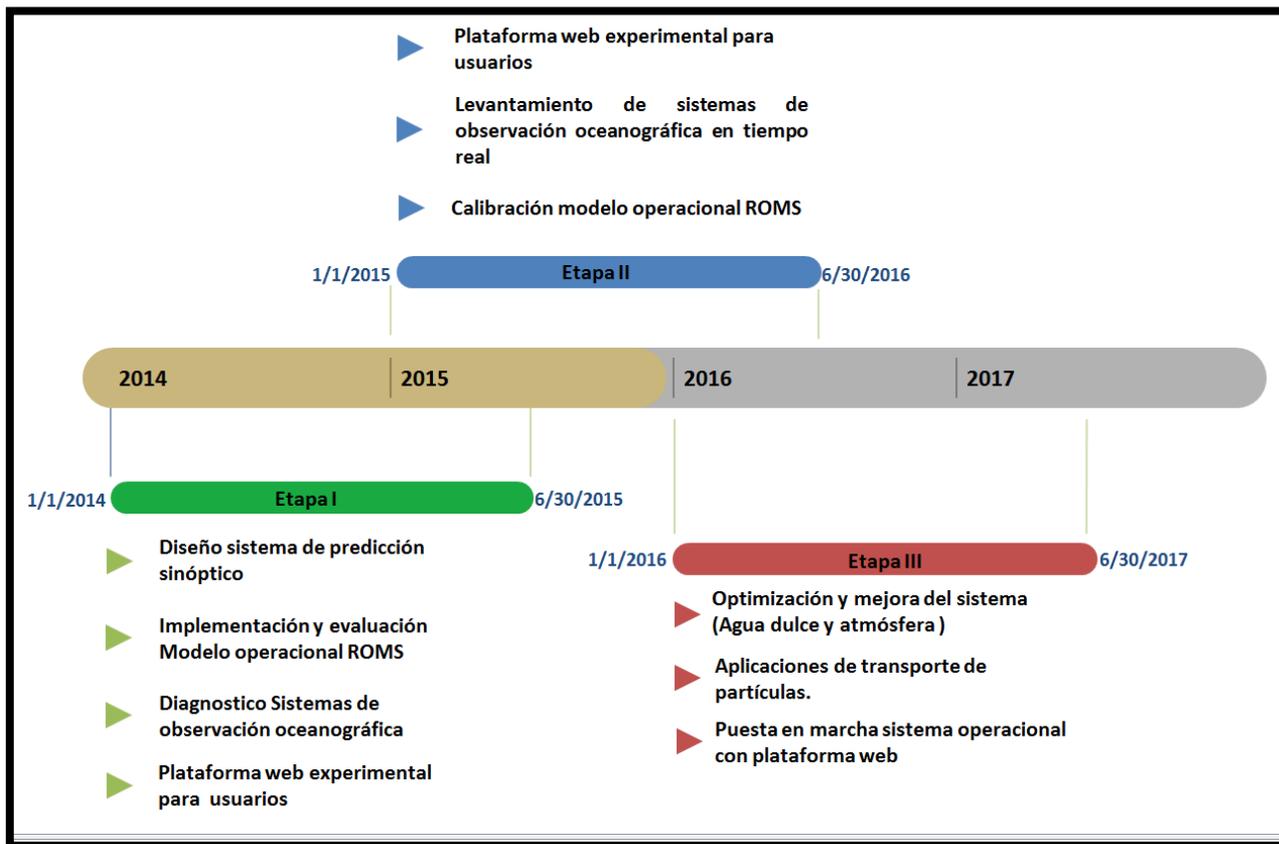


Figura 12. Cronología que involucra el desarrollo del sistema operacional en tres etapas (2014-2017).

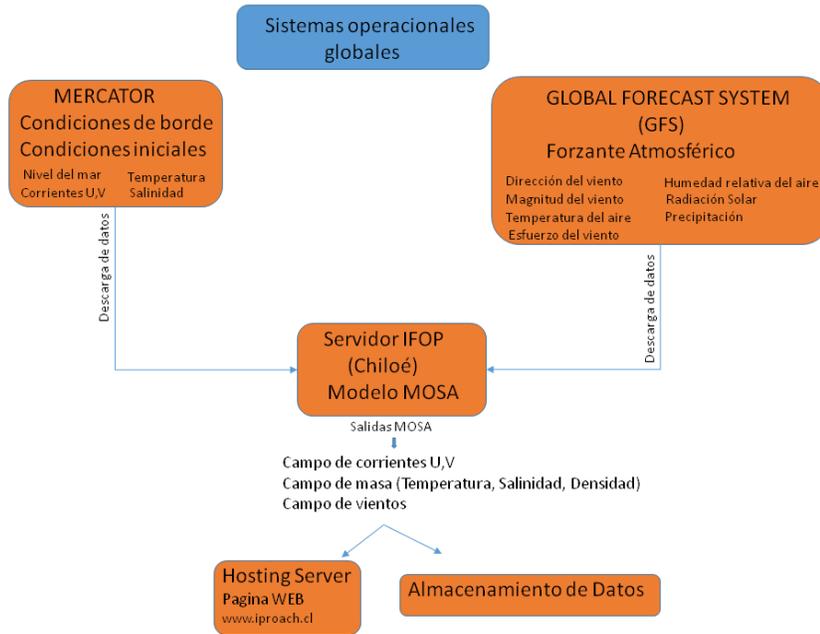


Figura 13. Diagrama de flujos que representa la estructura de funcionamiento de MOSA.

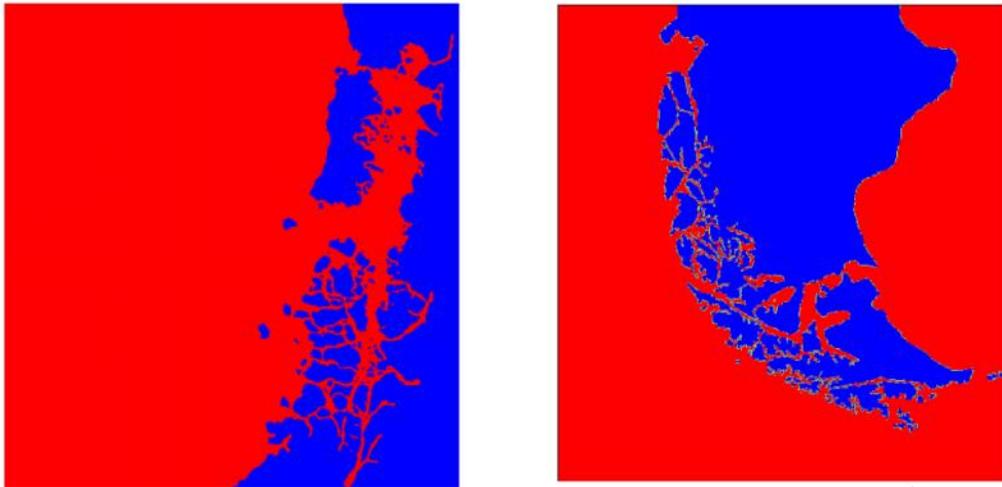


Figura 14. (Izquierda) Mascara del dominio de Chiloé-Aysén, (derecha) mascara del dominio de Magallanes.

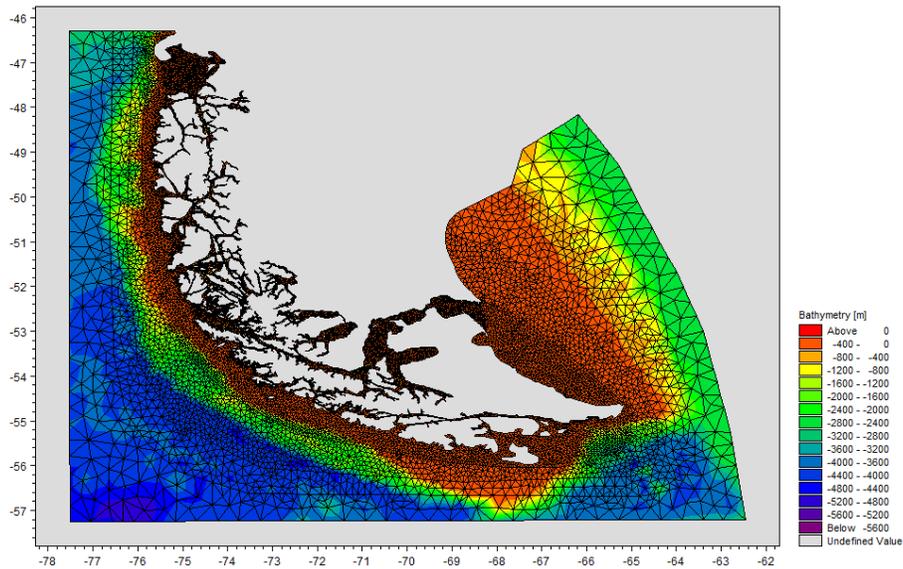
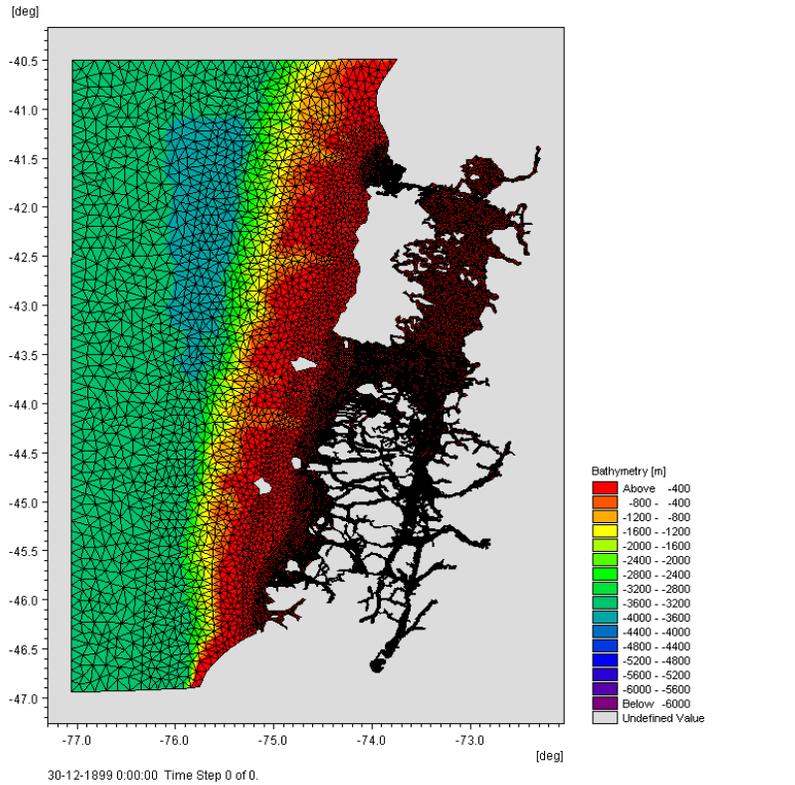


Figura 15. (Izquierda) Modelo de elevaci3n digital del dominio de Chilo3-Ays3n, (derecha) Modelo de elevaci3n digital del dominio del dominio de Magallanes.

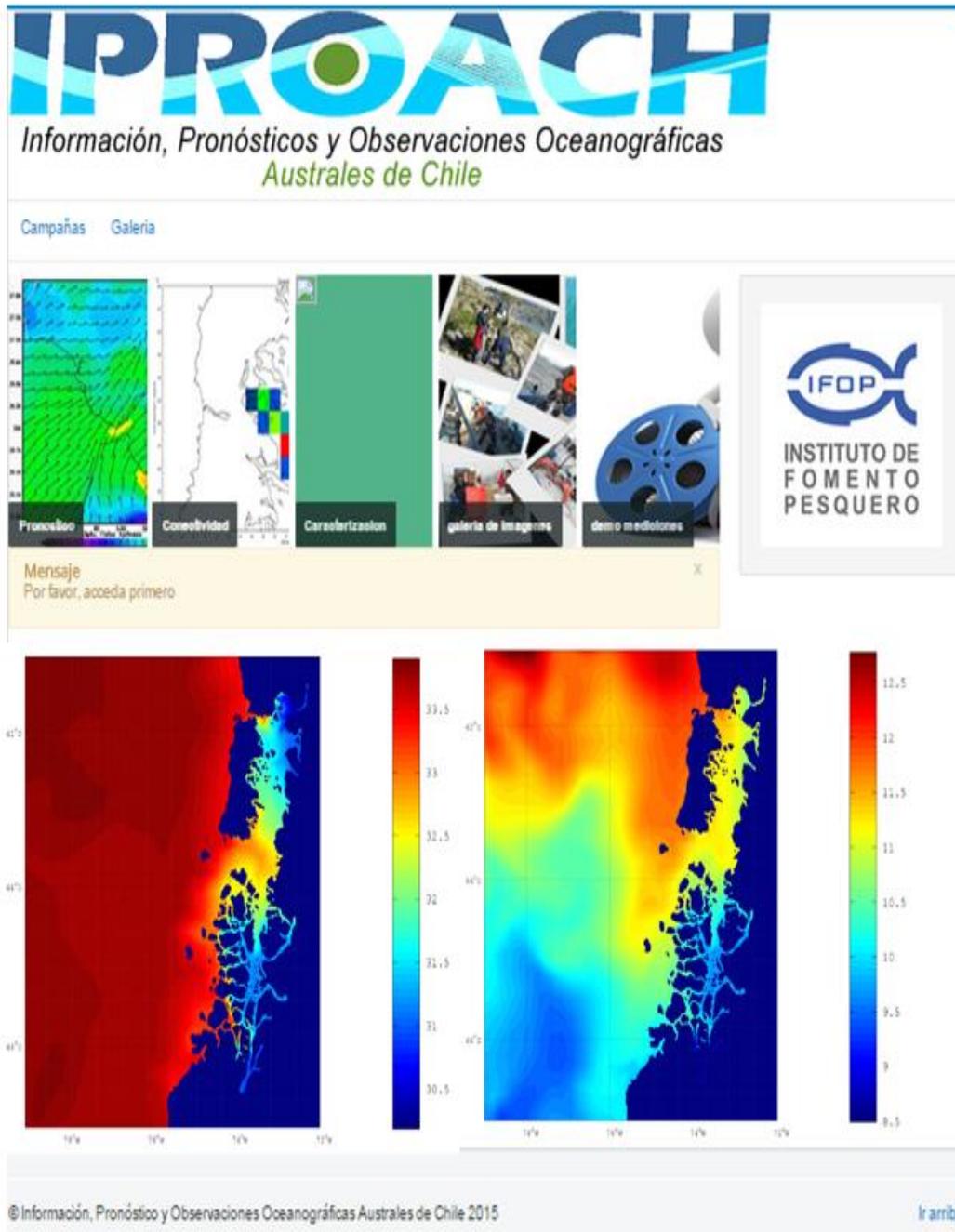


Figura 16. Aspecto inicial del sitio web www.iproach.cl, el cual presentara los resultados de MOSA, será la plataforma de trabajo para montar otras herramientas de gestión ambiental.

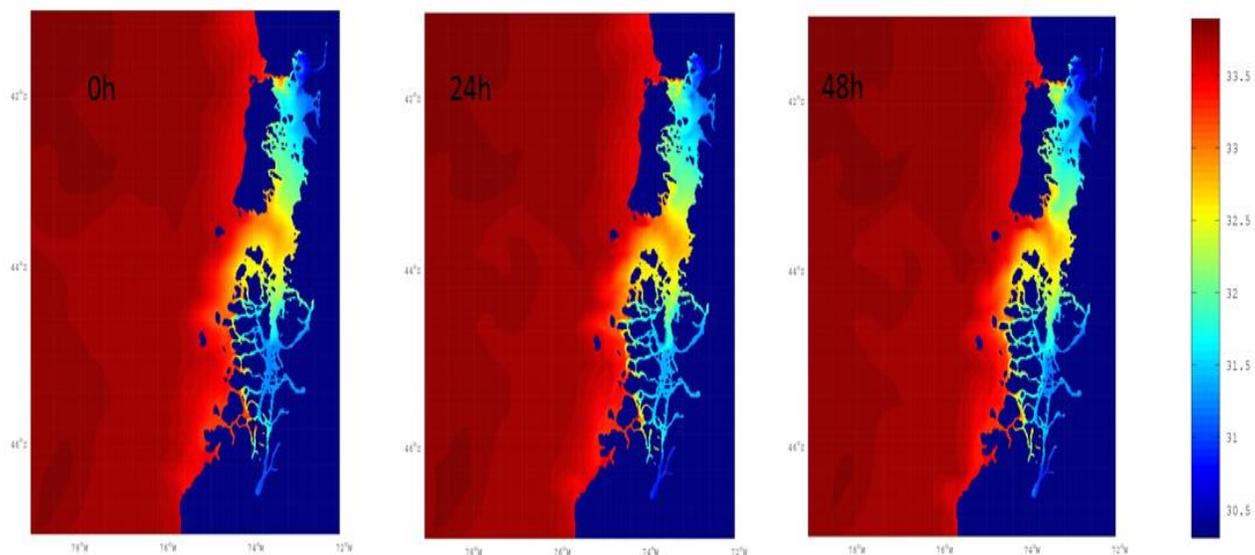


Figura 17. Pronostico de salinidad superficial en el dominio de Chiloé-Aysén para los días 26 y 27 de agosto, 2015. El campo de 0h corresponde al día 25 de agosto, el cual es el día que se realiza la simulación.

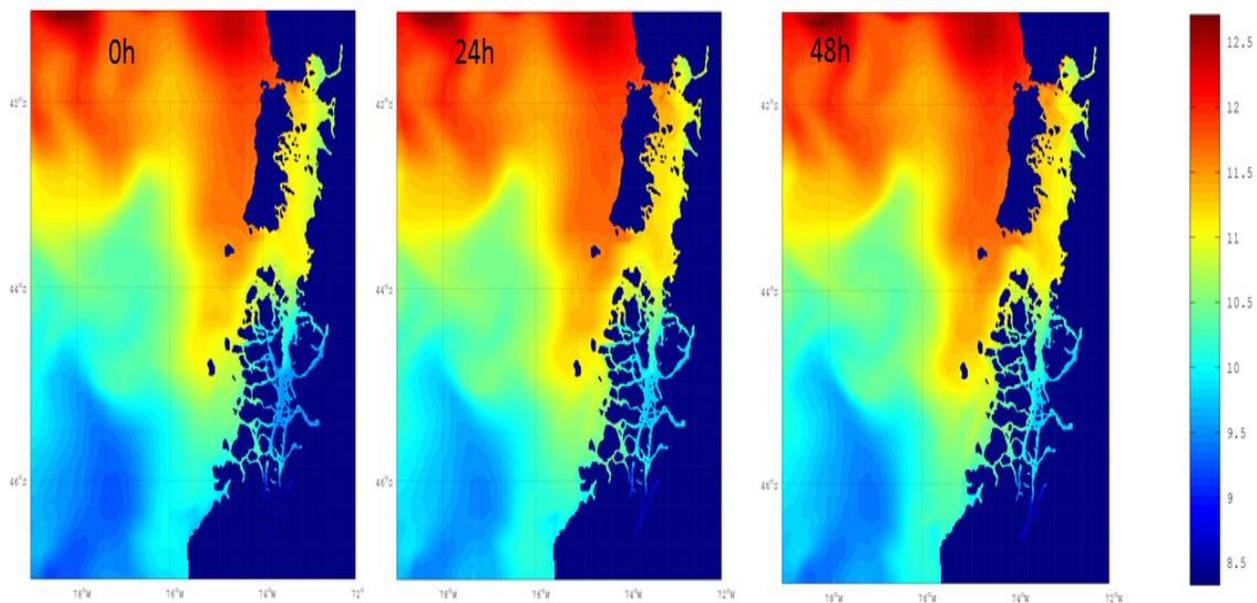


Figura 18. Pronostico de temperatura superficial en el dominio de Chiloé-Aysén para los días 26 y 27 de agosto, 2015. El campo de 0h corresponde al día 25 de agosto, el cual es el día que se realiza la simulación.

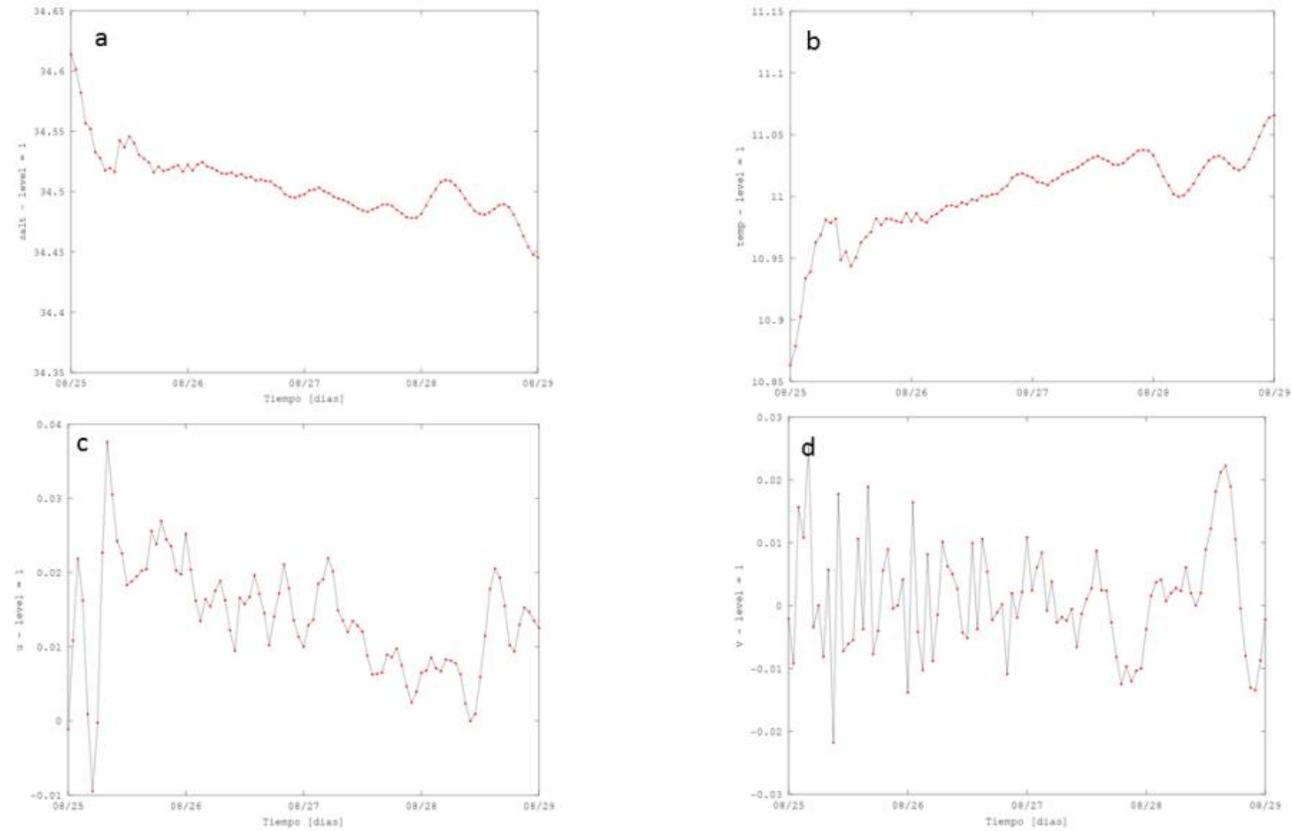


Figura 19. Series de tiempo extraídas del pronóstico realizado para los días 26 y 27 de agosto 2015 de a) salinidad superficial, b) temperatura superficial, c) componente u de la corriente superficial y d) componente v de la corriente superficial. Estos pronósticos corresponden a valores horarios.

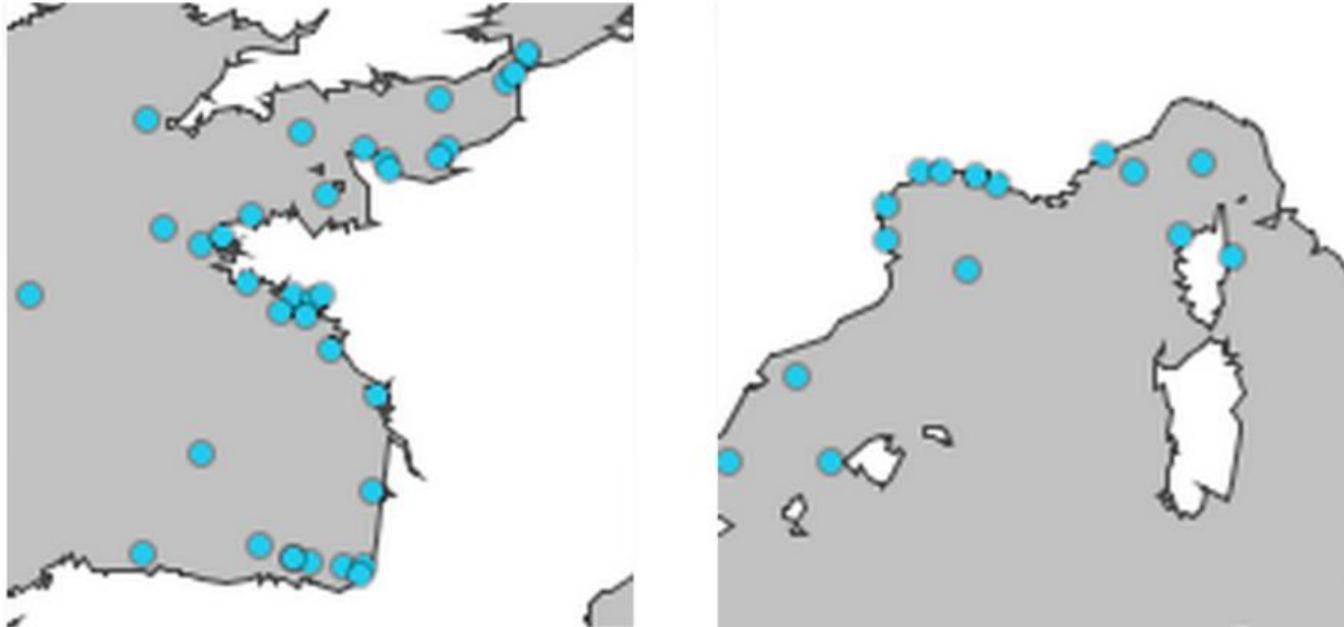


Figura 20. Distribución de boyas oceanográficas que alimentan el modelo operacional Previmer, en (izquierda) costa norte, en el canal Ingles, y en la costa sur, en el mar Mediterráneo (derecha).

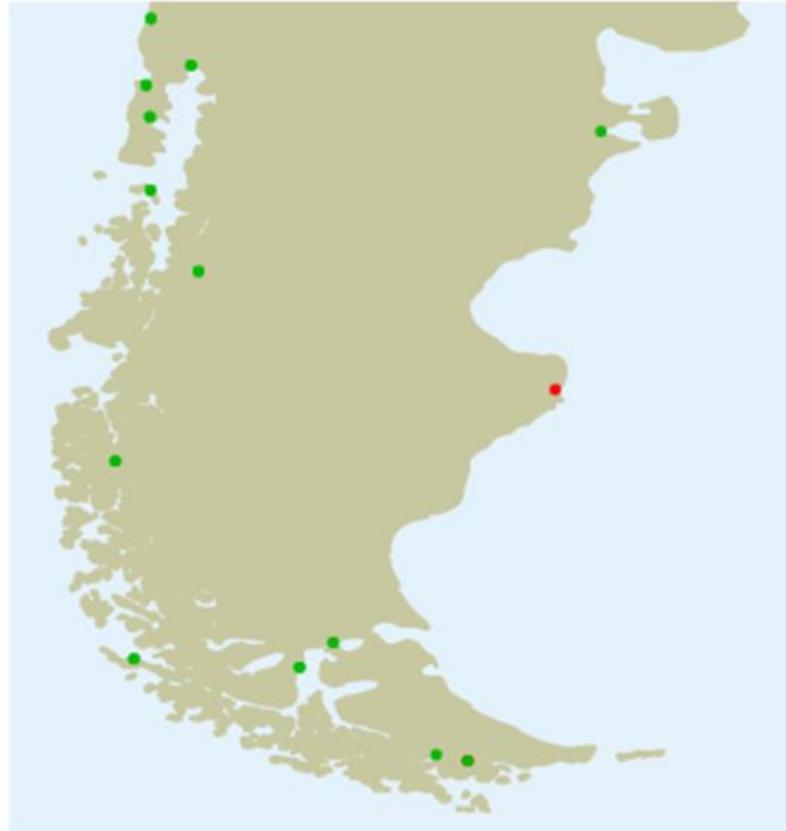


Figura 21. Red de mareógrafos que disponen información en línea a través del portal www.ioc.org presentes en el sur de Chile, los cuales son operados por el Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA).

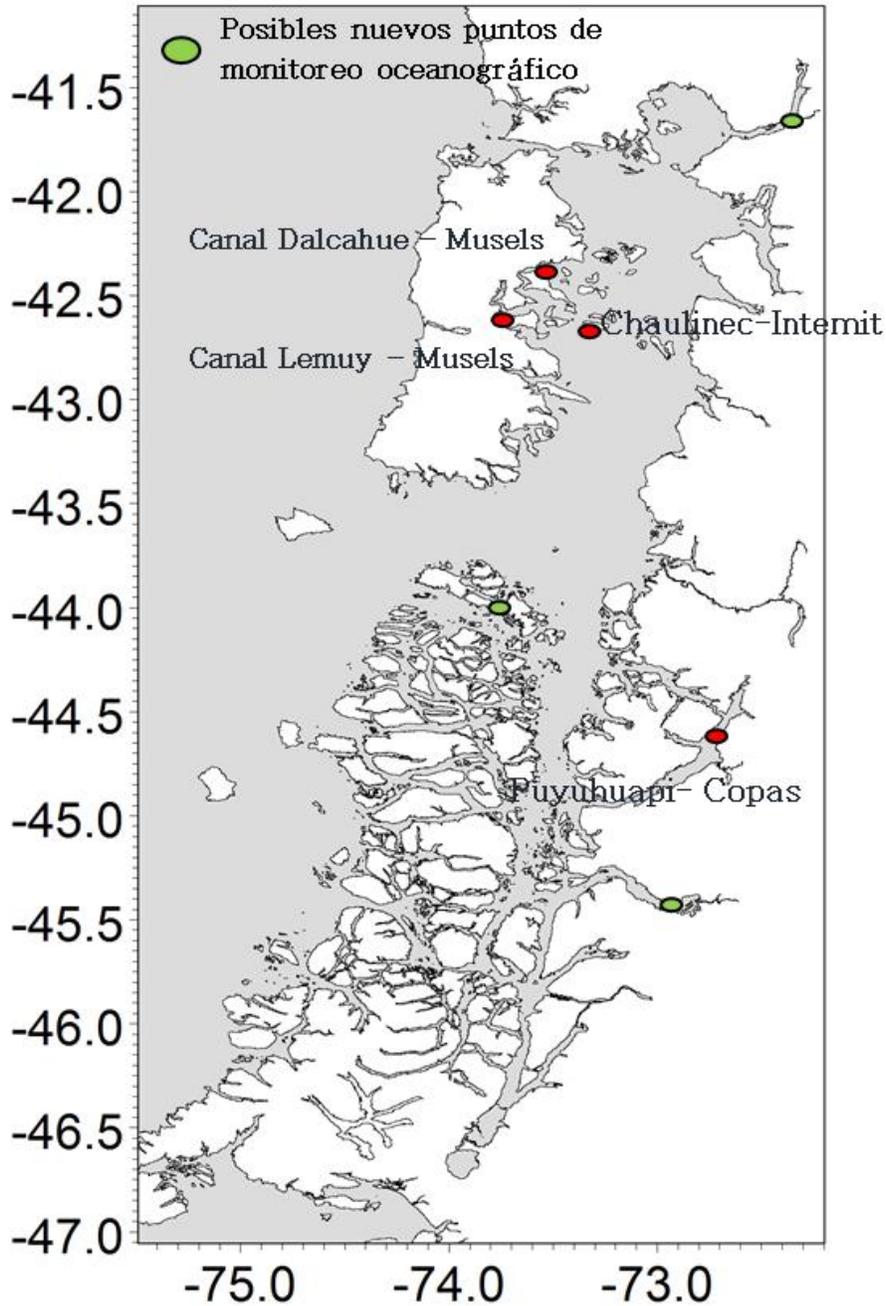


Figura 22. Sistemas de observaci3n oceanográfica disponibles en la actualidad en la Norpatagonia.

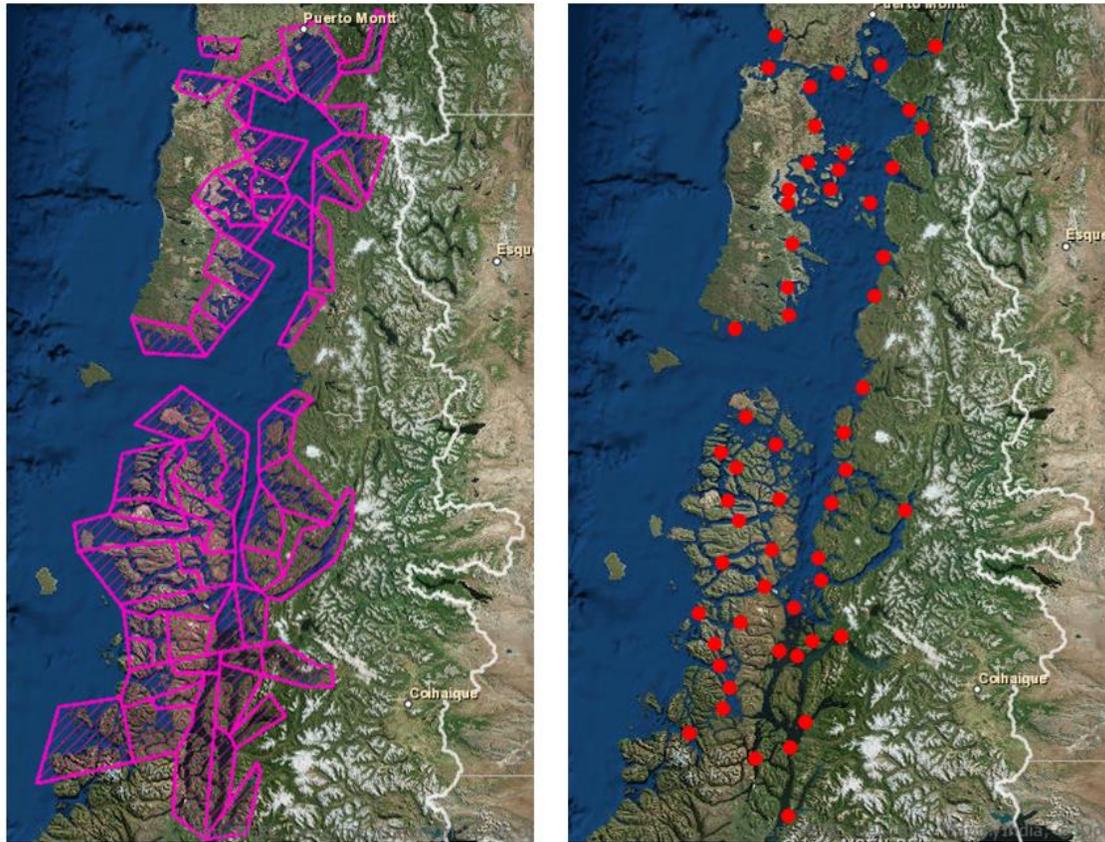


Figura 23. (Izquierda) Agrupaci3n de concesiones de salm3nidos en las regiones X y XI, (derecha) distribuci3n de puntos de medici3n propuesta, acorde a la Ley General de Pesca N° 20657.

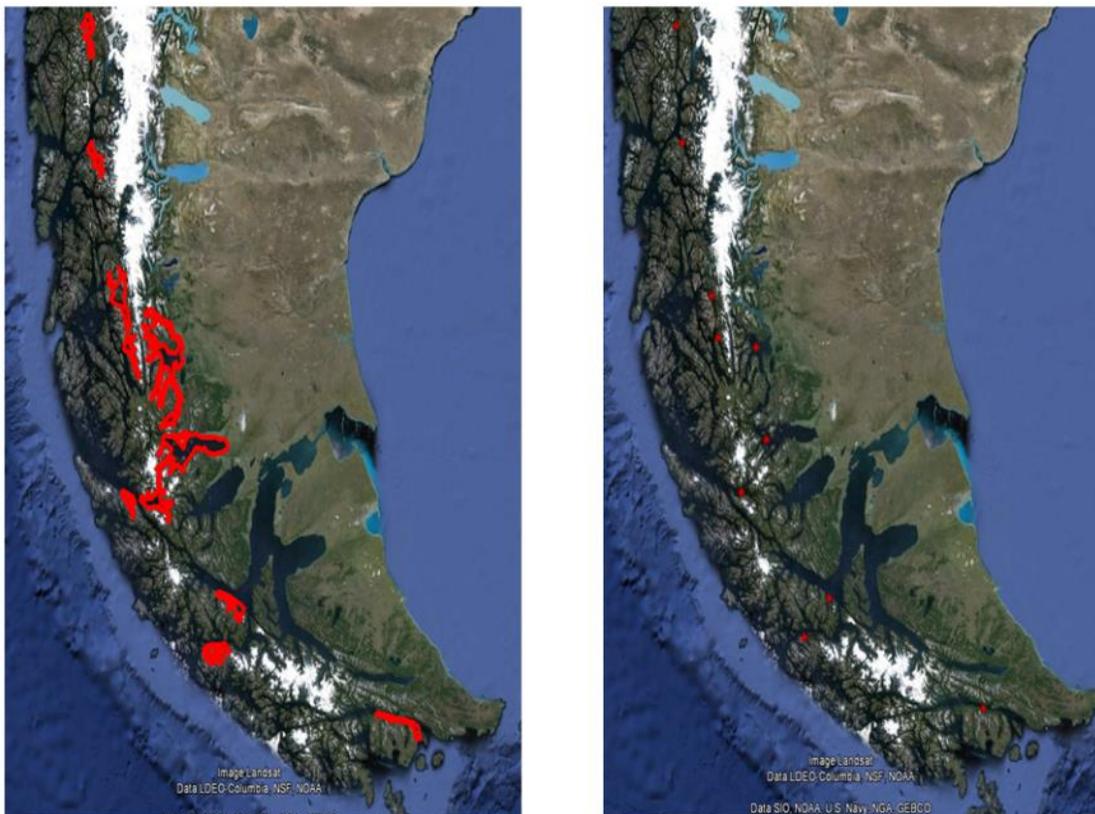


Figura 24. (Izquierda) Agrupación de concesiones de salmónidos en Región XII, (derecha) distribución de puntos de medición propuesta, acorde a la Ley General de Pesca N° 20657.

TABLAS



Tabla 1.
Parámetros básicos del dominio de Chiloé-Aysén.

Parámetros	valor	descripción
L	503	Número de puntos en dirección de longitud
M	601	Número de puntos en dirección de latitud
N	32	Numero de niveles sigma
hmax	500m	Máxima profundidad del dominio
hmin	10m	Mínima profundidad del dominio
θ_s	6	Factor de extensión de coordenada sigma
θ_b	0	Factor de extensión de fondo de coordenada sigma
Δt	720s	Paso de tiempo baroclínico
Δt_f	60s	Paso de tiempo barotrópico
Γ	$3.0 \cdot 10^{-4} \text{m s}^{-1}$	Coefficiente de arrastre de fondo

Tabla 2.
Parámetros básicos del dominio de Magallanes.

Parámetros	Valor	descripción
L	854	Número de puntos en dirección de longitud
M	1014	Número de puntos en dirección de latitud
N	32	Numero de niveles sigma
hmax	500m	Máxima profundidad del dominio
hmin	10m	Mínima profundidad del dominio
θ_s	6	Factor de extensión de coordenada sigma
θ_b	0	Factor de extensión de fondo de coordenada sigma
Δt	720s	Paso de tiempo baroclínico
Δt_f	60s	Paso de tiempo barotrópico
Γ	$3.0 \cdot 10^{-4} \text{ms}^{-1}$	Coefficiente de arrastre de fondo



Tabla 3.

Tiempos de cálculo con distintas configuraciones de paralelización con el dominio de Chiloé-Aysén y Magallanes con el objeto de buscar la configuración más eficiente en cuanto a tiempo de cómputo.

Dominio	Fecha	nodos	núcleos	total	Inicio(CLT)	Fin(CLT)	Total
Chiloé	01-06-2015	4	12	48	19:22	1:37	6h
Chiloé	03-06-2015	2	12	24	19:17	5:37	9h20m
Chiloé	04-06-2015	1	12	12	22:35	16:26	17h51m
Chiloé	08-06-2015	2	12	24	17:52	6:15	12h23m
Chiloé	09-06-2015	2	12	24	13:54	19:15	5h21m
Chiloé	10-06-2015	2	12	24	21:34	1:28	3h54m
Chiloé	15-06-2015	2	12	24	20:36	1:24	4h48m
Chiloé	15-06-2015	2	12	24	13:34	16:58	3h24m
Chiloé	15-06-2015	2	12	24	12:49	16:12	3h24m
Magallanes	08-06-2015	2	12	24	19:20	11:56	16h36m
Magallanes	10-08-2015	2	12	24	21:37	6:37	9h20m
Magallanes	11-06-2015	2	12	24	14:38	1:38	11h



Tabla 4.

Características de los sistemas de monitoreo oceanográfico disponible en el sur de Chile.

Ubicación	Variables oceanográficas / Frecuencia y profundidad	Variable atmosférica / Frecuencia	Almacenamiento/ Transmisión/ Publicación	Institución
FIORDO PUYUHUAPI -44.5881° -72.7271°	Sonda multiparamétrica YSI 6600-V2 -Temperatura, salinidad, oxígeno y pH - Datos cada 1 hora - Prof. 1.5 m	HOBO U-30 -Temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica, radiación solar, magnitud y dirección del viento -Datos cada 3 minutos	Almacenamiento auto contenido. Trasmisión fuera de operación. Publicación discontinuada en http://puyuhuapi.udec.cl/	Copas Sur Austral.
ISLA CHAULINEC -42.6528° -73.3529°	Sensores INNOVEX -Salinidad, temperatura, oxígeno, corrientes (inclinómetro y acelerómetro) y nitrato. -Datos cada 15 minutos - Superficie	NO	Almacenamiento auto contenido y trasmisión vía GSM. Acceso privado desde http://desarrollo.innovex .cl/boya/meteo/	Instituto tecnológico de la Mitilicultura (Intemit)
CANAL LEMUY -42.6033° -73.7766° DALCAHUE -42.3713° -73.5886°	(WQM) Wetlabs. Temperatura, salinidad, oxígeno disuelto, clorofila, turbidez. - Datos cada 1 hora - Superficie	NO	Almacenamiento auto contenido.	Núcleo Milenio Musels.
PUNTA ARENAS (Cabo Negro) -52.9307° -70.7943°	- Corrientes (ADCP Nortek) - Temperatura	NO	Almacenamiento auto contenido. Trasmisión de datos via GSM. Acceso privado http://smtr.enap.cl	ENAP, Punta Arenas.

A N E X O :

Evaluación del Modelo Operacional Sur Austral (MOSA)



Evaluación del Modelo Operacional Sur Austral (MOSA)

ANTECEDENTES

Se implementó un modelo numérico de carácter operacional en las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes. Para este cometido se dividió la zona en 2 grandes dominios, uno con las regiones de Chiloé y Aysén y otro específicamente para la región de Magallanes.

Una vez implementado el modelo, basado en ROMS-AGRIF, comenzó a ejecutarse una serie de procesos automatizados encargados de obtener las condiciones de borde e iniciales así como también sus forzantes desde modelos globales. A su vez se trabajó en la búsqueda de una paralelización ideal para obtener el máximo rendimiento computacional posible.

Desde mediados de julio (2015), se comenzó con las pruebas de paralelización y configuración de los núcleos en los nodos de cálculo. Una vez logrado tiempos de cómputo razonables se inició la puesta en marcha del modelo de forma operacional, comenzando como una etapa experimental, donde se han evaluado distintos aspectos técnicos de su desempeño, tiempos de cómputos, pasos de tiempo, volumen de datos, montaje de página web, entre otros. Aunque se realizan evaluaciones preliminares del nivel del mar y el campo de masa, la siguiente etapa del proyecto (Etapa II, actualmente en ejecución) contempla la calibración del modelo, donde se espera disminuir el error y la incertidumbre de los pronósticos.

Para el dominio de Chiloé-Aysén, se logró generar pronósticos de manera operacional en el modo -1 +3, esto quiere decir que se simula un día anterior (hindcast) y 3 días de pronóstico (nowcast y forecast), totalizando una simulación de 4 días, entregando campos de velocidad de corriente, temperatura y salinidad para todo el dominio, los cuales son presentados como figuras en el sitio web www.iproach.cl.

Por su parte el dominio de Magallanes no ha conseguido ser estable, por lo que no ha logrado generar pronósticos de manera consecutiva para cada día, presentando errores tipo “blow up” a las pocas horas de inicio. Estos errores son generados cuando, debido a inestabilidades numéricas, las iteraciones de las ecuaciones tienden a infinito. Si bien se ha trabajado en lograr que el modelo se estabilice a través de cambio de parámetros, este no ha respondido de manera adecuada, aumentando los tiempos de cómputo y consumiendo gran parte de los recursos de los servidores disponibles.

El tamaño del dominio de Magallanes eleva de manera significativa el número puntos de grilla que posee, siendo más del doble que el de Chiloé Aysén, esto debido a que comprende una zona bastante extensa, con una configuración topográfica extremadamente compleja, dando lugar a un sin número de singularidades en la máscara y en la malla, lo cual implica necesariamente un mayor tiempo de cómputo.



Los complejos patrones de circulación oceánica resultantes de la interacción con la batimetría en una zona de las dimensiones de la Región de Magallanes lo convierten de momento en un ejercicio de modelación inabordable para los recursos disponibles. Debido a esto, no se ha logrado obtener resultados suficientes en el dominio de Magallanes para poder construir un set de datos necesario para realizar alguna evaluación preliminar, las corridas presentan errores entre las 8 y 9 horas de iniciar la simulación, y los pocos días que logró simular (4 días), estos resultados presentaron graves incoherencias, debido a esto, no ha sido posible realizar evaluaciones del dominio.

Esto ha llevado a tomar la decisión de detener la implementación de MOSA en Magallanes, y enfocar todos los recursos disponibles en el dominio Chile Aysén, donde el modelo ha tenido un rendimiento estable. Al liberar recursos computacionales, en la siguientes etapas del proyecto se podrá mejorar la resolución e incluso incorporar al menos un modelo anidado por región. Esto con el objeto de poseer al final de la etapa III de este desarrollo un modelo operacional calibrado y validado, con una calidad de pronósticos mayor a que si se abarcara toda la zona requerida inicialmente.

OBJETIVO

Evaluar mediante índices estadísticos el ajuste del modelo numérico de pronósticos MOSA implementado en la Norpatagonia.

METODOLOGÍA

Para el dominio Chiloé Aysén se utilizarán pronósticos del nivel del mar, de temperatura y salinidad para el mes de septiembre de 2015.

Para la evaluación del nivel del mar se utilizaron como puntos de control, datos de la red de mareógrafos de Chile, los cuales se encuentran disponibles en la pagina (<http://www.ioc-sealevelmonitoring.org>). Se utilizaron datos del mes de septiembre en 4 puntos del dominio de Chiloé Aysén, Puerto Montt, Ancud, Castro y Melinka (ver **Figura I-1**), la **Tabla I-1** muestra las posiciones de los equipos.

Estas series del nivel del mar pronosticadas serán evaluadas con los índices estadísticos más comunes que permiten cuantificar el error del pronóstico.

Los Índices estadísticos utilizados son:



Error cuadrático medio (RMSE)

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - o_n)^2 \right]^{\frac{1}{2}}$$

Error medio absoluto (MAE)

$$MAE = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |f_n - o_n|$$

Error sistemático, Sesgo (BIAS)

$$BIAS = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (f_n - o_n)$$

Coefficiente de Correlación:

$$R = \frac{Cov_{xy}}{S_x S_y}$$

Donde:

f_n : dato pronóstico

O_n : dato observado

N: número total de mediciones

Cov_{xy} = covarianza entre el modelo y la observación

S_x = desviación estándar del modelo

S_y = desviación estándar de la observación

Para evaluar el campo de masa del modelo, se utilizaron datos de campañas previas de IFOP en la zona, que coincidieran con el periodo en que ha estado operativo MOSA (ver **Figura I-2**). Para ello se usaron lances de CTD de la campaña "Chonos - primavera, 2013", realizados en los meses de octubre y noviembre, para los canales Ninualac, Byron y King, se utilizaron datos de la campaña "Chonos-Puyuhuapi, primavera, 2014", entre los meses de octubre y noviembre para comparar los canales Puyuhuapi, Jacaf y Moraleda y finalmente para comparar el Canal Moraleda se utilizaron lances de la



campana de Marea Roja, 2014, realizado durante el mes de noviembre. Las posiciones de cada lance se presentan en la **Tabla I-2**. El análisis del campo de masa constará en verificar si las estructuras térmicas y halinas de la columna de agua son consistentes con lo observado, realizando una evaluación cualitativa de estas.

RESULTADOS

Nivel del Mar

Para evaluar el nivel del mar se utilizaron los pronósticos del día+1 del modelo en el mes de septiembre, con los cuales se construyó una serie de valores horarios en los 4 puntos indicados en la **Figura I.1**. Esta serie de valores pronosticados fue contratada con valores medidos in situ. Cada serie fue descompuesta en sus constituyentes armónicas principales, verificando en los datos in situ la importancia de la componente semidiurna M2, la cual modula la conducta de la marea en la zona de canales siendo la constituyente armónica más energética (~70-80%). La amplitud de las principales constituyentes armónicas de las series observadas y simuladas se presenta en la **Figura I-3**.

A su vez se estimó el porcentaje de energía (PE) que aportan las constituyentes armónicas semidiurnas M2 y S2, tanto para las series observadas como para las series simuladas. El PE es una estimación de la energía potencial y permite identificar las constituyentes principales de acuerdo a la amplitud de estas. La **Tabla I-3** presenta los PE de M2 y S2 para ambas series en cada punto de evaluación.

También se construyeron espectros de energía para ambas series en cada punto. Estos espectros fueron calculados con 10 grados de libertad cada uno sobre series de 30 días con valores horarios. (**Figura I-4**).

Puerto Montt

En Puerto Montt se encuentra la mayor amplitud de marea observada, con un rango máximo mayor a 8 metros en sicigias. Las constituyentes principales son la M2 y la S2, con amplitudes de 1.8 y 1.3 m respectivamente (ver **Figura I-3**), con un PE de 72 % y 20% respectivamente (ver **Tabla I-3**).

Estos rasgos logran ser replicados por el modelo, donde también entre M2 y S2 componen casi el 90% de la energía, sin embargo la amplitud de estas es sobrestimada por el modelo en casi 1 metro en M2 y 0.20 m para S2. Este error se acentúa en la cuadratura.

En la **Figura I-5** se presentan las series de nivel del mar observado y simulado, observándose un alto grado de ajuste entre las fases de las dos series. En los estadísticos obtenidos (**Tabla I-4**) destaca una correlación del 89.8% entre ambas series, sin embargo el error cuadrático medio es de 1.04 m, el error medio absoluto es de 0.83 m y el error sistemático, donde el modelo sobrestima la amplitud de marea, es de +0.02 m.



En la misma figura podemos observar las constituyentes M2 y S2 de ambas series, que también presentan un alto grado de ajuste. La componente M2 presenta una correlación de 0.99 con un error cuadrático de 0.72 y un error absoluto de 0.64 m (ver **Tabla I-4**).

Los espectros de las series muestran como el modelo tiende a reproducir máximos relativos en altas frecuencias, sin embargo los datos observados muestran un máximo absoluto en M2. Este máximo se ajusta con el simulado.

Ancud

En Ancud la mayor amplitud de marea observada fue un poco mas de 2 metros en sicigia, mientras que entre las constituyentes M2 y S2 alcanzan 0.65 y 0.3 m de amplitud respectivamente (ver **Figura I-3**), con un PE cada una de 72 % y 15% respectivamente (ver **Tabla I-3**).

En Ancud la señal simulada presentó un ruido constante. Cerca de esta zona, a la entrada del Canal Chacao, el modelo presento reiteradas inestabilidades, siendo un foco de “Blow up”. Aparentemente, la onda de marea al ingresar por el Canal Chacao, sufre un cambio dramático de profundidad (en el modelo), lo cual provoca que la onda aumente su velocidad de manera desproporcionada. Para resolver esta inestabilidad, se utilizó un paso de tiempo barotrópico de 45 segundos en la parametrización temporal de la ecuación. Esto le permite al modelo resolver con mayor margen inestabilidades de este tipo, aunque conlleva a una mayor capacidad de cómputo. Aun cuando se logró estabilizar la solución, la señal continúa presentando un pequeño ruido de alta frecuencia.

En la **Figura I-6** se presentan las series del nivel del mar observado y simulado. Si bien se observa un buen ajuste de las fases entre ambas, la serie simulada tiende a subestimar la amplitud. La correlación entre la señal observada y la pronosticada es de 0.79, con errores en torno a 0.30 cm y un error sistemático de 0.03 (ver **Tabla I-4**). La constituyente armónica M2 tuvo una correlación de 0.99, con errores menores a 0.20 m y un sesgo de 0.02 m (ver **Tabla I-5**).

Los espectros de ambas series, presentados en la **Figura I-4**, muestran que en la señal diurna y semidiurna el modelo reproduce con gran precisión la distribución de energía, aunque tiende a sobrestimar los máximos en altas frecuencias, es destacable que logra resolver máximos relativos cercanos a las 8 y 9 horas. Estos máximos podrían corresponder al desarrollo de componentes armónicos de aguas someras.

Castro

En Castro la amplitud de marea observada en sicigia alcanzó los 5 metros, mientras que las constituyentes M2 y S2 alcanzan amplitudes de 1.6 y 0.9 m respectivamente (ver **Figura I-3**), con un PE cada una de 73.16 y 19.22 % respectivamente (ver **Tabla I-3**). Con respecto a lo simulado, la M2 pronosticada tiene una amplitud de 2.3 metros con un PE 82.23%, siendo mayor que la observada, mientras que S2 presenta valores levemente subestimados de amplitud (0.88) y PE (13.3%).

Las series observadas y pronosticadas en la **Figura I-7**, presentan un buen ajuste, alcanzando un 0.91 de correlación (la más alta de de los puntos evaluados) con un error cuadrático medio de 0.74 m y un error medio absoluto de 0.59 m, obteniéndose el mayor error en cuadratura. El error sistemático



fue de 0.01, el más bajo de los puntos observados (ver **Tabla I-4**). La serie de la componente M2 también presenta un alto grado de ajuste en comparación con lo observado, logrando 0.98 de correlación con un RMS de 0.5 m. Aunque en este caso el error sistemático fue -0.02.

Los espectros de ambas series presentan su máximo absoluto en la semidiurna, sin embargo en altas frecuencias el modelo tiende a desarrollar máximos relativos, que en los datos observados no se logran apreciar (ver **Figura I-4**). Esta discordancia se presenta de manera similar a lo observado en Puerto Montt, donde el modelo también desarrollaba máximos relativos en altas frecuencias. Notar que estos dos puntos se encuentran en zonas más protegidas de la influencia del océano abierto que los puntos de Ancud y Melinka.

Melinka

El mareógrafo instalado en Melinka se encuentra al norte del archipiélago de las Guaitecas, en una zona donde convergen el canal Moraleda, la Boca del Guafo y el mar interior de Chiloé. En Melinka la amplitud de marea observada en sicigia fue de 2 metros. Las constituyentes M2 y S2 tuvieron una amplitud 0.78 y 0.35 m respectivamente (ver **Figura I-3**), cuyos PE fueron de 72.9 y 15.6 % respectivamente (ver **Tabla I-3**).

Por su parte las series del nivel del mar observadas y pronosticadas presentaron un 0.88 de correlación. El error cuadrático medio y absoluto fue menor a 0.35, aumentando en la cuadratura, donde se acentúan, por su parte el sesgo fue de -0.03 m. La serie de M2 presentó un buen ajuste, logrando una correlación de 0.95 con un error menor 0.20 m y un sesgo de -0.04.

Esto sugiere que las señales están bien ajustadas, aunque al observar los espectros de ambas series, estos presentan alta coherencia para señales diurnas y semidiurnas, pero en altas frecuencias el modelo tiende a sobrestimar la energía, especialmente en la frecuencia cercana a las 8 horas, donde aparece un máximo de energía en el pronóstico, muy por encima del observado, sin embargo y observando que las señales semidiurnas aportan el 90% de la energía, podríamos considerar un buen ajuste.

Temperatura y Salinidad

De acuerdo con Murphy (1993), los modelos tienen que cumplir al menos 3 rasgos, consistencia, calidad y valor, siendo el primero y el último, atributos cualitativos de un pronóstico, mientras que la calidad está asociada a los valores estadísticos que cuantifican el error asociado a la simulación. En esta parte de la evaluación se analizarán de manera cualitativa perfiles de salinidad y temperatura, con el objetivo de poder ver si son consistentes o no. Los valores del pronóstico corresponden a promedios diarios de temperatura y salinidad, mientras que los valores observados corresponden a lances de CTD.

Canal Bynon

El Canal Bynon se encuentra en el archipiélago de Chonos (ver **Figura I-2**), como un canal de conexión entre el ambiente oceánico y el ambiente semi estuarino del canal Moraleda. La campaña oceanográfica de IFOP "Chonos primavera 2013", obtuvo lances de CTD durante la última semana de



octubre en la zona. El pronóstico realizado para el mismo día del CTD se muestra en la **Figura I-9**. La salinidad observada, muestra una capa claramente estratificada, con una haloclina cercana a los 10 metros, y con un mínimo de salinidad superficial cercano a 30 PSU. Sin embargo, el pronóstico no replica la estructura de manera adecuada, aunque es capaz de presentar una capa superficial menos salina, éste reproduce una capa superficial bien mezclada, con un aumento acotado de la salinidad en profundidad hasta llegar a 33.5 PSU, un valor casi de 2 PSU mayor al observado. Los valores solo coinciden a los 10 metros, cerca de la profundidad de la haloclina observada.

La temperatura observada presenta un perfil bastante homogéneo de 10°C, de manera similar al pronóstico de MSOA, que también presenta una columna con temperatura homogénea, sin embargo este último posee una temperatura de 2 grados mayor.

Canal Ninualac

El canal Ninualac se encuentra al sur del canal Bynon, en el archipiélago de Chonos, y al igual que Bynon, este canal conecta el océano Pacífico con el canal Moraleda a la altura de la boca del fiordo Aysén, por lo que su extremo oriental está influenciado por agua dulce que aporta el fiordo Aysén al sistema, mientras que por el extremo occidental, está influenciado por aguas de origen oceánico, convirtiéndose en una zona de transición bastante compleja, con alta variabilidad estacional. Al igual que en con el canal Bynon, los lances de CTD utilizados corresponden a la campaña “Chonos-primavera, 2013”, durante la última semana de octubre.

En la **Figura I-10** se observa la salinidad muestreada, la cual presenta una estructura bastante homogénea, sin desarrollar una termoclina definida. Tampoco se logra observar una capa superficial menos salina, evidenciando una gran mezcla en la zona. La salinidad se mantiene casi invariable en 32.4 PSU en la columna. Por su parte MOSA también desarrolla una columna casi homogénea, aumentando levemente la salinidad en profundidad hasta llegar a un máximo de 33.8 PSU, mas de 1PSU de diferencia con lo observado.

La temperatura observada se presenta bastante homogénea, manteniendo casi 10°C en toda la columna, mientras que MOSA también replica una columna homogénea con una temperatura de 1°C mayor en el pronóstico.



Canal King

Canal King también se encuentra en el archipiélago de Chonos, sin embargo su localización es más al norte, donde también conecta al océano Pacífico con el mar interior de Aysén, sin embargo su extremo oriental es atravesado por el canal Pérez, manteniendo un contacto indirecto con el canal Moraleda, condición que modifica su dinámica con respecto a los dos canales analizados anteriormente. Los datos del canal King también corresponden a la campaña oceanográfica de IFOP “Chonos Primavera 2013”.

Los perfiles de salinidad observados y pronosticados para el canal King se presentan en la **Figura I-11**, donde se puede observar una columna homogénea, casi invariable en profundidad, con una salinidad marcada de 32 PSU, disminuyendo levemente a partir de los 20 metros para alcanzar un mínimo superficial de 31.5 PSU. MOSA tiende a aproximarse en superficie a lo observado, sin embargo en profundidad la salinidad se incrementa paulatinamente hasta llegar a un máximo profundo de 33.6 PSU, más de 2.5 PSU que el máximo observado.

La temperatura observada también presenta una capa mezclada, con valores cercanos a los 10 °C en toda la columna. Esta estructura pareciera replicarla el modelo pero con una diferencia de +2 °C en toda la columna.

Canal Puyuhuapi

El canal Puyuhuapi se encuentra en la costa continental de la región de Aysén, en su extremo norte se conecta con el canal Jacaf y en su extremo sur se comunica con el canal Moraleda. Al estar en la zona continental, es alimentado por diversos ríos y por la presencia de algunos campos de hielo, lo cual le otorga una característica que lo diferencia de los canales anteriormente analizados, recibiendo una cantidad de agua dulce mayor, presentando una columna mayormente estratificada. Los datos fueron obtenidos en la campaña oceanográfica de IFOP “Melinka-Puyuhuapi primavera, 2014”, durante los meses de noviembre-diciembre.

En la **Figura I-12** se puede apreciar el perfil de salinidad, el cual presenta la típica estructura estuarina, con una capa de muy baja salinidad superficial, una haloclina fuerte a los 15 metros y un aumento atenuado de la salinidad en profundidad, presentando una estructura de 2 capas, alcanzando un mínimo superficial de 14 PSU y llegando a 34 PSU en el fondo. Por su parte MOSA tiende a ajustarse bien desde la haloclina hasta el fondo, sin embargo no es capaz de reproducir la capa de agua dulce superficial observada. En parte debido a que en esta etapa experimental de MOSA no se han introducido fuentes de agua dulce al modelo. Este ejercicio de sensibilidad con el agua dulce se desarrollara en la etapa II del proyecto.

La temperatura observada también presenta una estructura de 2 capas, con una capa superficial de mayor temperatura, que llega los 15 °C seguido de una termoclina bien marcada cerca de los 15 metros (cerca a la haloclina), y una capa profunda homogénea cercana a los 9 °C. El modelo nuevamente presenta una diferencia positiva con respecto a lo observado de +2 °C, y con una estructura vertical casi homogénea.



Canal Jacaf

El canal Jacaf se encuentra al norte del canal Puyuhuapi, por el cual está conectado en su extremo oriental, mientras que su extremo occidental se comunica con el canal Moraleda. De manera similar al canal Puyuhuapi, el canal Jacaf recibe numerosos aportes de agua dulce de ríos y descargas glaciares, presentando una columna bastante estratificada. Los datos utilizados corresponden a la campaña oceanografía de IFOP “Melinka-Puyuhuapi, primavera, 2014, entre noviembre y diciembre.

La salinidad observada presenta una estructura bien definida de 2 capas (**Figura I-13**), con una capa superficial de baja salinidad, que llega a 17 PSU, seguida de una fuerte haloclina cerca de los 10 metros, y una capa profunda bien homogénea con valores cercanos a los 32 PSU. De manera similar al canal Puyuhuapi, el pronóstico se ajusta bastante bien al perfil de salinidad bajo la haloclina, presentando un leve incremento de la salinidad en el fondo, hasta llegar a 33 PSU. Sin embargo la capa superficial de baja salinidad no se logra desarrollar en el modelo. Nuevamente, se espera que al incorporar al modelo descargas de agua dulce, este logre aproximarse a la estratificación observada.

Por su parte la temperatura observada también presenta una fuerte estratificación, con una temperatura superficial de 15°C, seguida de una fuerte termoclina pasado los 10 metros, cercana a la haloclina, y una capa profunda homogénea que bordea los 10 °C, mientras que el pronóstico nuevamente presenta valores alejados, con una capa totalmente homogénea con valores 2 °C mayores que los observados.

Canal Moraleda

El canal Moraleda es el canal principal de la región de Aysén, cruzándola de norte a sur y conectando la mayoría de los canales de la zona, por lo que su influencia es bastante variada, presentado descargas glaciares directas en el extremo sur, y comunicándose con el océano Pacífico en la Boca del Guafo en su extremo norte. En este análisis usaremos una estación cercana a su borde norte, donde se conecta con el océano Pacífico, lugar de transición entre un ambiente oceánico y un ambiente estuarino de gran escala. Los datos corresponden a la campaña oceanográfica de IFOP “Melinka-Puyuhuapi, primavera 2014”.

El perfil de salinidad observado (ver **Figura I-14**) presenta una columna bastante mezclada, con un leve descenso de la salinidad en superficie, llegando a 30 PSU, mientras que en el fondo esta llega a 33 PSU. El pronóstico también presenta un perfil bastante homogéneo, que se ajusta a lo observado, a excepción de que nuevamente no presenta la habilidad de replicar la caída de la salinidad superficial, llegando a 32 PSU en superficie, y a 34 PSU en el fondo.

La temperatura observada presenta una estructura de 2 capas más definida, con un máximo superficial de 14 °C una suave termoclina cercana a los 20 metros y una columna profunda homogénea de 10 °C, cayendo levemente en el fondo. Mientras que el modelo nuevamente no presenta la habilidad de representar correctamente la temperatura, presentando una columna bien mezclada cercana a los 12°C (+2 °C de lo observado).



Golfo Corcovado

El golfo Corcovado es la entrada sur al mar de Chiloé, éste se conecta con el océano Pacífico y el Canal Moraleda a través de la Boca del Guafo, representado una zona característica del mar de Chiloé al sur de las Islas Desertores. Los datos fueron obtenidos de la campaña de IFOP “Marea Roja, 2014”.

En la **Figura I-15** se presenta el perfil de salinidad observado, donde se aprecia una columna levemente estratificada, con un mínimo superficial de salinidad de 32 PSU, mientras que en la capa profunda, ésta aumenta levemente a 33 PSU. El modelo presenta una columna semi mezclada, con un mínimo superficial de salinidad cercano al valor observado, sin embargo el aumento en profundidad es gradual pero sostenido, hasta alcanzar un máximo profundo de 34 PSU, un poco mayor al observado.

La temperatura observada se presenta como una columna completamente homogénea, al igual que la simulada, sin embargo, nuevamente el modelo presenta una temperatura al menos 2 °C mayor que la observada.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

Como parte de las actividades de la etapa I del proyecto de “Desarrollo de un modelo sinóptico de predicción”, se realizó la implementación de un modelo numérico con características operacionales para el sur de Chile basado en ROMS AGRIF, el cual ha sido nombrado “Modelo Operacional Sur Austral” (MOSA). Cabe destacar que la etapa I contempla el diseño del sistema y la implementación de un modelo numérico con características operacionales y una evaluación preliminar de los resultados, orientado a mejoras en su desempeño operacional, más que a la calidad de los datos. Las etapas posteriores (Etapas II y III) están orientadas a trabajar en la calidad de los pronósticos a través de evaluación y calibración, entre otras actividades.

Originalmente se trabajó con dos dominios, uno que comprende las regiones de Los Lagos y Aysén, y otro que comprendía íntegramente toda la región de Magallanes. Sin embargo en la puesta en marcha del modelo, el dominio de Magallanes demandó una mayor atención debido a la alta inestabilidad que presentó. El tamaño del dominio de Magallanes eleva de manera significativa el número de elementos que posee, siendo más del doble que el de Chiloé Aysén, esto es debido a que comprende una zona bastante extensa, con una configuración topográfica extremadamente compleja, que da lugar a un sin número de singularidades en la máscara y en la malla del modelo, lo cual implica necesariamente un mayor tiempo de cómputo.

Los complejos patrones de circulación oceánica resultantes de la interacción con la batimetría en una zona de las dimensiones de la Región de Magallanes lo convierten de momento en un ejercicio de modelación inabordable para los recursos disponibles. Producto de las constantes caídas del dominio de Magallanes, no se ha logrado obtener resultados suficientes para poder construir un set de datos necesario para realizar alguna evaluación preliminar, las corridas presentan errores entre las 8 y 9 horas de iniciada la simulación, y los pocos días que logró simular 4 días, estos resultados presentaron



graves incoherencias, y errores, es por esto que no fue posible realizar evaluaciones del dominio. Como consecuencia de lo anterior, y para concentrar los esfuerzos y recursos disponibles de manera más eficiente, que se resolvió no abordar la región de Magallanes en estas etapas iniciales del Modelo, concentrando los recursos en el dominio Chiloé - Aysén, el cual ha sido estable, y su menor tamaño permite gestionar los recursos computacionales de manera más eficiente, permitiendo una mayor libertad en el trabajo de evaluación y calibración que comprende la etapa II del proyecto (actualmente en ejecución).

Las evaluaciones preliminares se realizaron sobre el dominio de Chiloé - Aysén, donde se analizó el nivel del mar y el campo de masa.

Para evaluar el nivel del mar en la zona de estudio, se consideró que la variabilidad de las corrientes está dominada por la variabilidad de la marea de tipo semidiurno M2 (Salinas & Hormazabal, 2003), la cual contiene la mayor PE (porcentaje de energía), asumiéndose que si el modelo logra resolver de manera adecuada la constituyente M2, será capaz de resolver la circulación en canales de régimen mareal, por ejemplo el Archipiélago de Chonos.

En el trabajo de evaluación se encontró que MOSA resuelve de manera correcta el nivel del mar en los puntos de evaluación, y también la componente M2, la cual junto con la componente S2 posee el 90% energía mareal. Las correlaciones entre lo observado y lo pronosticado bordearon el 90 %, así como también las correlaciones entre las constituyentes M2 pronosticadas y observadas. Los errores fueron en gran parte de los casos menores a 50 cm, con la excepción de Puerto Montt, que fue levemente mayor a 1 metro. Aun cuando el modelo logró reproducir de manera consistente la conducta del nivel del mar, éste presentó sus mayores errores en cuadratura, tendiendo mayormente a sobrestimar las amplitudes, probablemente debido a que el modelo reproduzca efectos de resonancia inexistentes debido a las singularidades que resultan de las interpolaciones para construir el modelo de elevación digital. El modelo obtiene sus condiciones de borde en zonas oceánicas, donde la marea no interactúa con el borde continental; ésta al ingresar a la zona de canales, se ve perturbada y modificada al interactuar con la topografía costera, generando componentes de aguas someras.

Por su parte el campo de masa fue evaluado en algunos canales con distintas características, con el objeto de verificar las capacidades de MOSA de reproducir estructuras hidrográficas bajo distintas condiciones. Para este efecto se utilizaron datos de canales en el Archipiélago de Chonos, del sistema Jacaf-Puyuhuapi y del sistema Corcovado-Moraleta. Los resultados de estas evaluaciones mostraron que MOSA sobrestimó la temperatura en todos los puntos con una diferencia de +2°C. Esto puede deberse en parte a las condiciones iniciales del modelo, las cuales son extraídas de modelos globales de gran escala y baja resolución que no consideran las singularidades del sistema estuarino del sur de Chile. También puede deberse a otras causas, relacionadas con las parametrizaciones del modelo. Si bien los resultados no fueron satisfactorios en este sentido, el campo de masa y la circulación estuarina de esta zona están modulados básicamente por la salinidad, la cual es la que modifica la estructura de la pycnoclina.



En este sentido la salinidad tuvo una conducta variable. En los sistemas levemente estratificados como en el archipiélago de Chonos, o canal Moraleda, la estructura vertical se aproximó en algunos casos a la observada, incluso con los mismos valores, sin embargo en ningún caso fue capaz de reproducir la capa superficial de baja salinidad presente en casi todos los canales, haciéndose notar con mayor intensidad en el sistema Jacaf-Puyuhuapi, el cual es altamente estratificado debido a diversos aportes de agua dulce presentes.

Sin embargo esto podría deberse a que MOSA en esta etapa experimental tiene muy subestimado el volumen de agua dulce que ingresa al sistema marino, por lo que al momento de ingresarlas se debiera esperar una mejora en los resultados.

Como conclusión de la evaluación preliminar de MOSA se desprende que para concentrar los esfuerzos y recursos disponibles de manera más eficiente, se resolvió no abordar la región de Magallanes en estas etapas iniciales del Modelo, concentrando los recursos en el dominio Chiloé - Aysén, el cual ha sido estable, y su menor tamaño permite gestionar los recursos computacionales de manera más eficiente, permitiendo una mayor libertad en el trabajo de evaluación y calibración que comprende la etapa II del proyecto (actualmente en ejecución).

Por su parte en el Dominio Chiloé Aysén, MOSA logra pronosticar de manera confiable el nivel del mar en los puntos de control, obteniendo correlaciones cercanas al 90 % en todos los casos, y logra también reproducir la componente M2, principal constituyente de la marea semidiurna y responsable de los procesos hidrodinámicos atribuidos a la marea.

Por su parte el campo de masa arrojó resultados pobres, donde la salinidad bajo la capa superficial logra ser parcialmente aproximada, aunque el modelo no tuvo la habilidad de reproducir la capa superficial menos salina presente en casi todo el dominio, debido probablemente a que no se ingresaron las fuentes de agua dulce, mientras que la temperatura aun está alejada de los valores observados, no siendo capaz de reproducir la termohalinas observadas y mostrando valores de +2°C de diferencia con lo observado en toda la columna.

PERSPECTIVAS

El trabajo de evaluación y calibración del modelo está contemplado en la Etapa II del proyecto, la cual ya está en marcha. Dentro de esta etapa, se espera mejorar la calidad de los pronósticos y la reducción del error través de pruebas de sensibilidad, calibración, etc.

Entre las actividades que se realizan actualmente están:

-Ingreso de aportes de agua dulce al modelo.



- Utilizar como forzante atmosférico un modelo de 12 kilómetros de resolución para zona basado en WRF, realizado por la Dirección Meteorológica de Chile a través de un convenio de cooperación con IFOP.
- Ajustar parámetros físicos del modelo a través de pruebas de sensibilidad (fricción de fondo, turbulencia, etc.).
- Prueba para determinar puntos de medición (test de los gemelos).
- Corridas climatológicas para evaluar las corrientes.
- Estimar la habilidad de pronóstico (skillscore).

BIBLIOGRAFÍA

- Araya J.F Geomorfología comparada de los fiordos de Chiloé y Aysén. 1996 resumen ampliado crucero CIMAR Fiordo 1.
- Cameron, W. & D. Pritchard. 1963. Estuaries. En M.H. Hill (ed). The Sea. Vol 2. New York: 306-324.
- Meruane C., de la Fuente A., Contreras M. y Niño Y. 2013. Large-scale mass transport in the austral fjords and channels of Chile. Proceedings of 2013 IAHR Congress. Tsinghua University Press, Beijing.
- Salinas, S. y S. Hormazábal, 2004. Capacidad de transporte de la constricción de Meninea para un flujo de dos capas y el efecto de la corriente de marea. Ciencia y Tecnología, vol.27, núm.1, 2004, pp. 5-15.
- Sievers, H & N. Silva. 2006. Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. 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. 53-58, 2006. Disponible en: <http://www.cona.cl/revista/spanish/4-1%20Masas%20agua-circulaci%C3%B3n.pdf>
- Silva N y Guerra, D. 2008. Distribución de temperatura, salinidad, oxígeno disuelto y nutrientes en el canal Pulluche-Chacabuco, Chile. (Crucero CIMAR fiordo 9). Cienc. Tenol. Mar. 31 (2): 29-43.

FIGURAS

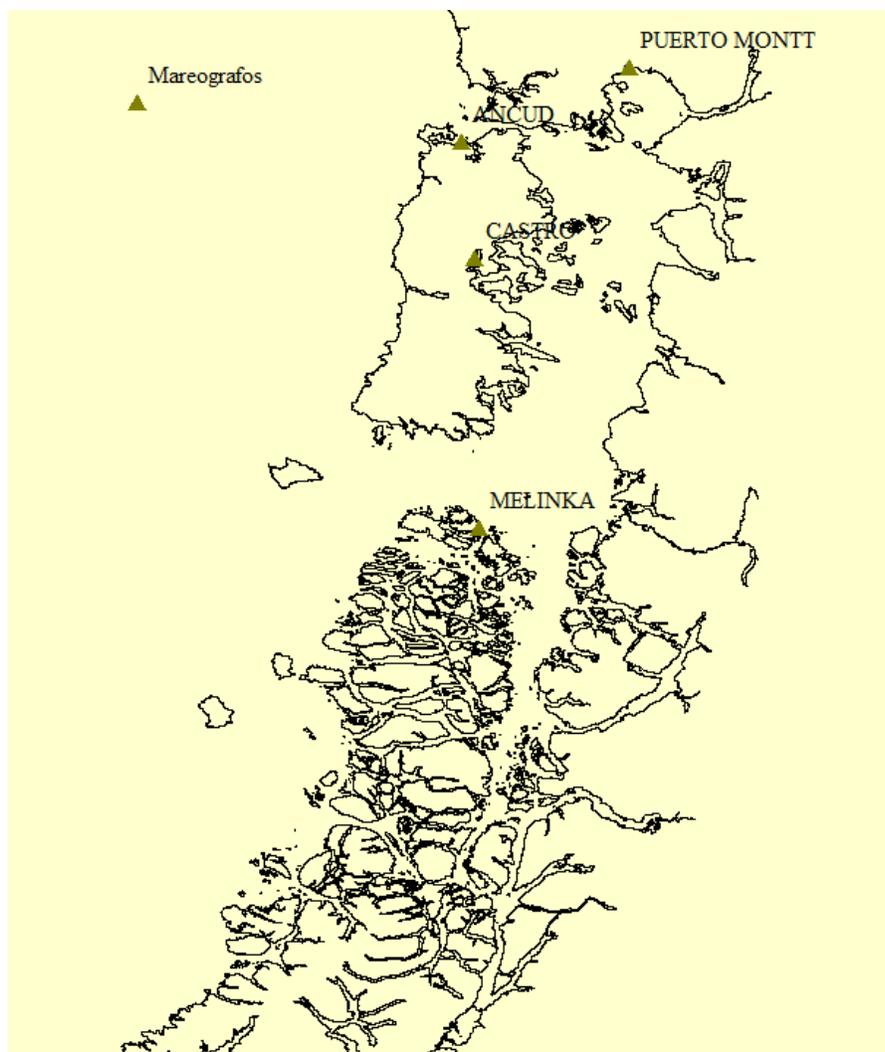


Figura I1. Posición de mareógrafos utilizados en la evaluación del nivel del mar.

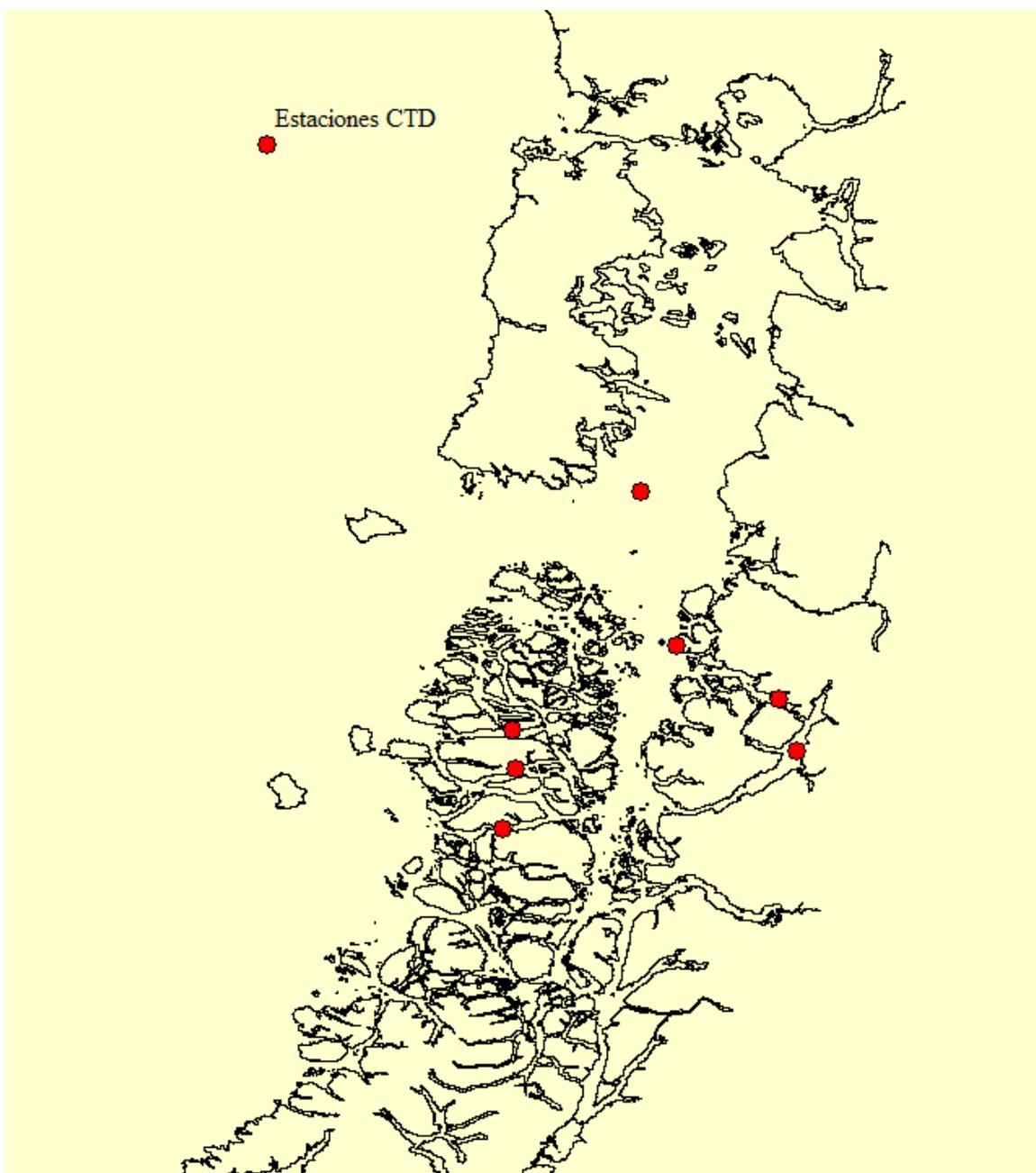


Figura 12. Posiciones de estaciones de CTD utilizadas en la evaluación de temperatura y salinidad.

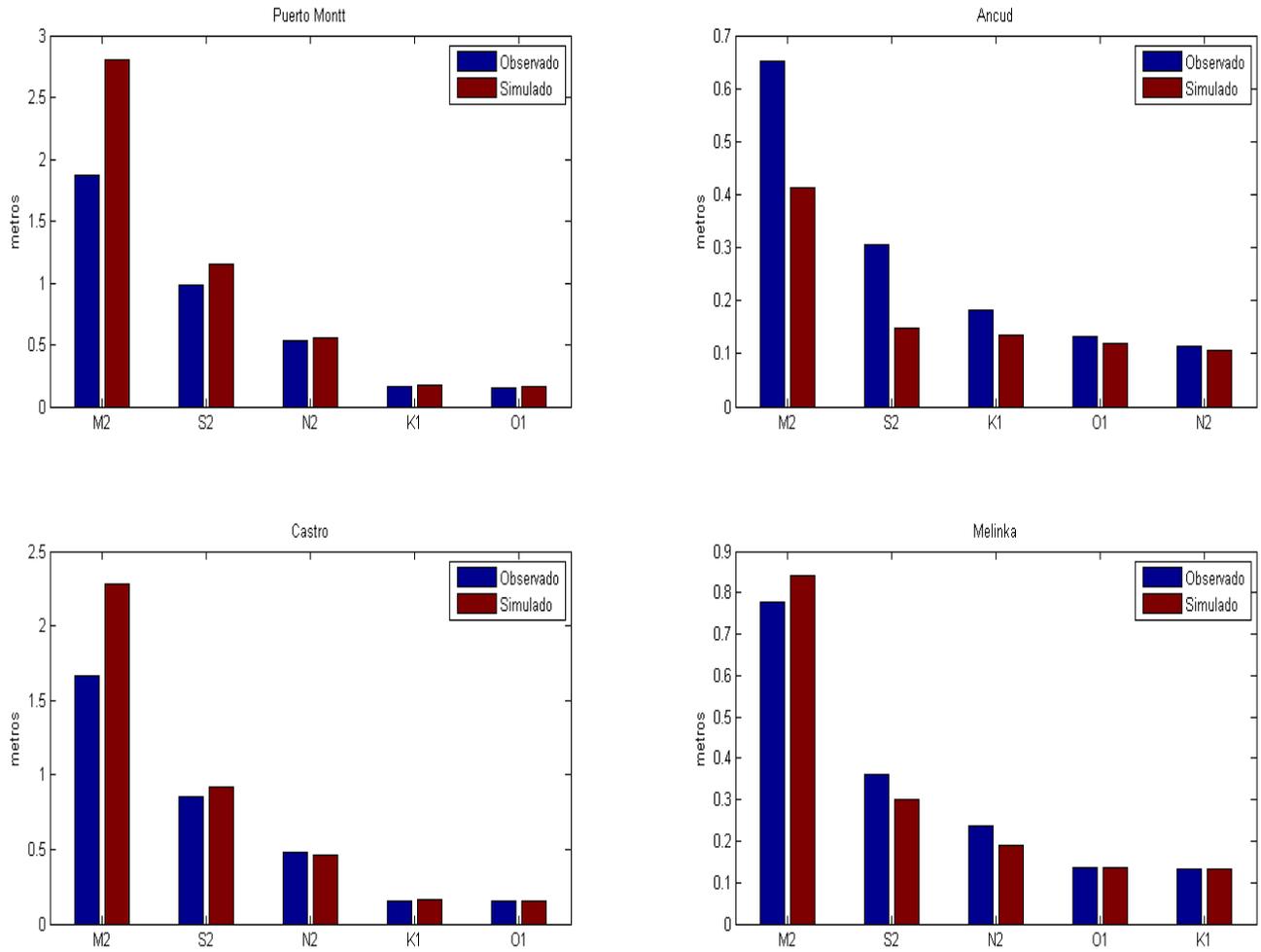


Figura I3. Histograma de la amplitud en metros de las principales constituyentes arm3nicas observadas del nivel del mar en Puerto Montt, Ancud, Castro y Melinka, para una serie de 30 d3as de valores horarios, correspondientes al mes de septiembre de 2015.

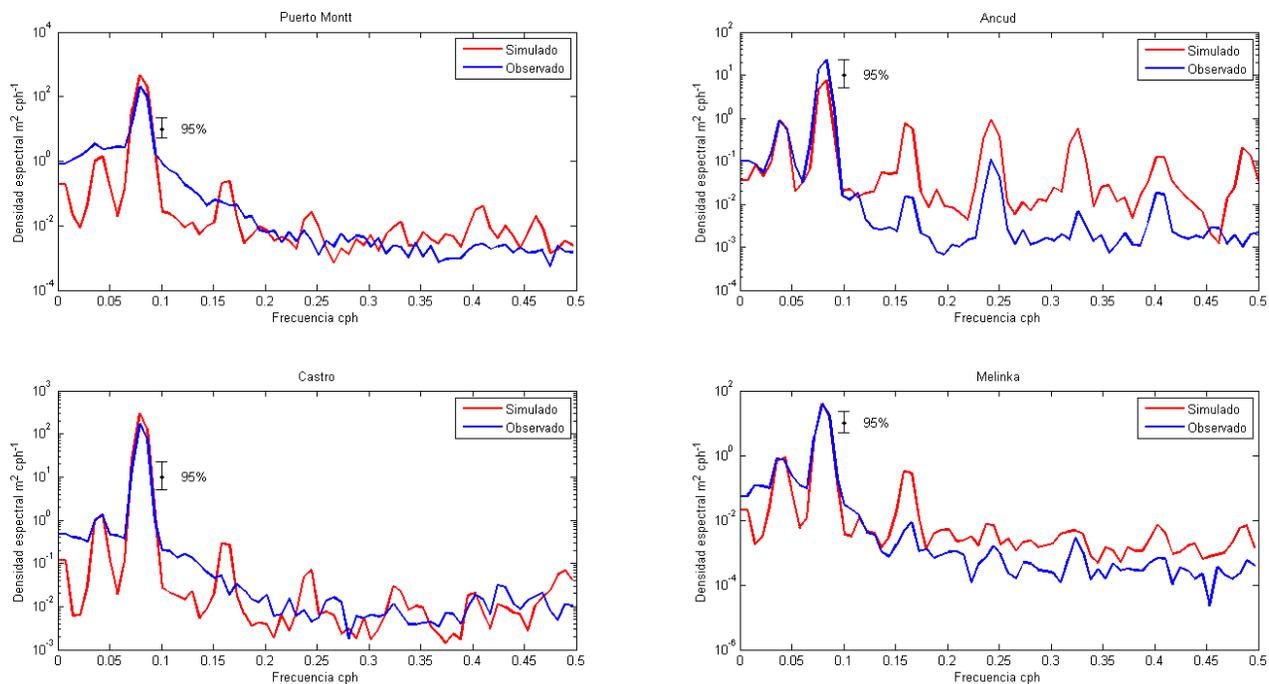


Figura I4. Espectros de energía del nivel del mar para las series observadas (azul) y simuladas (rojo) para Puerto Montt, Ancud, Castro y Melinka. Los espectros fueron contruidos con 10 grados de libertad y corresponden a series con valores horarios de 30 días.

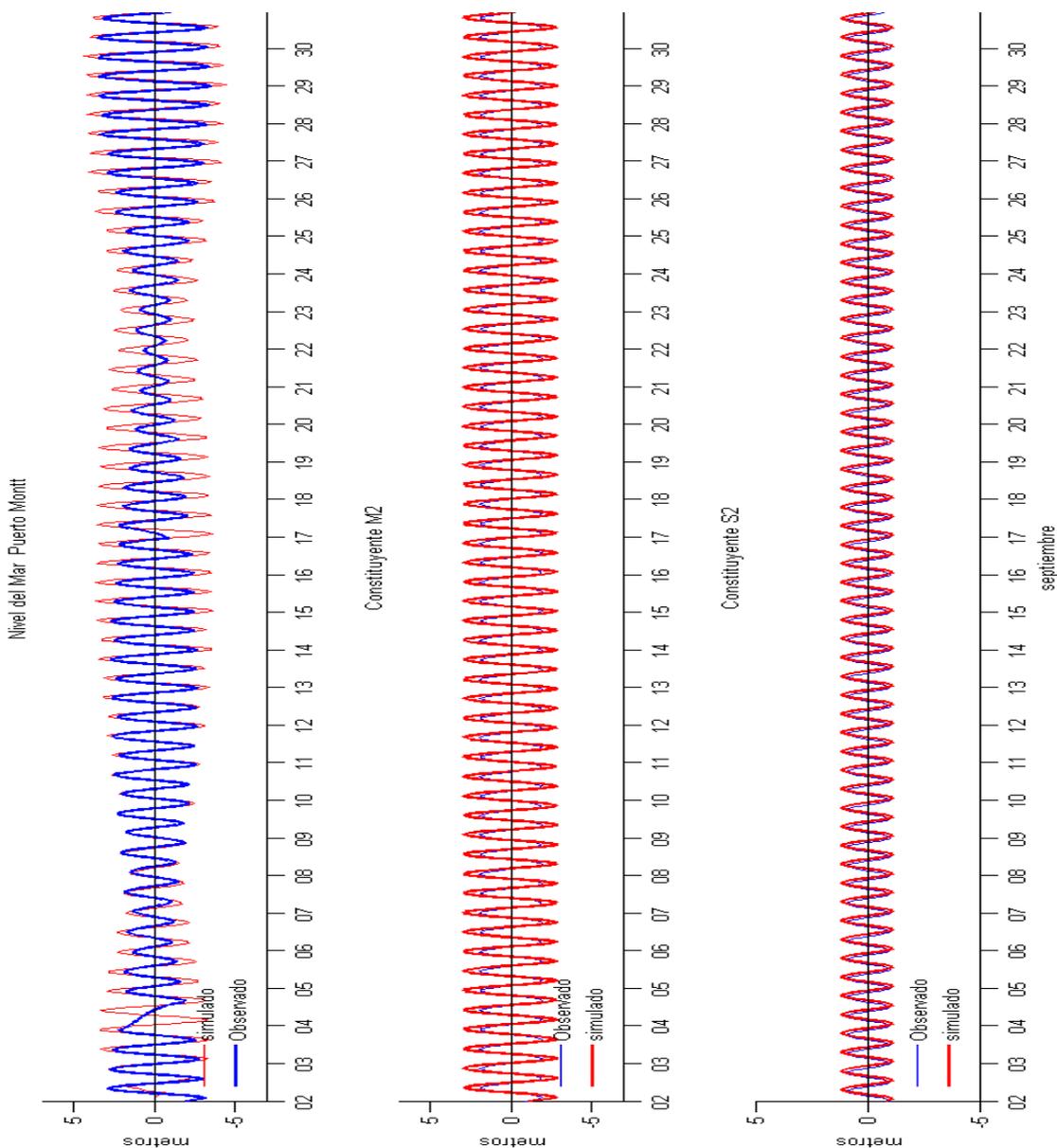


Figura I5. Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Puerto Montt. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015.

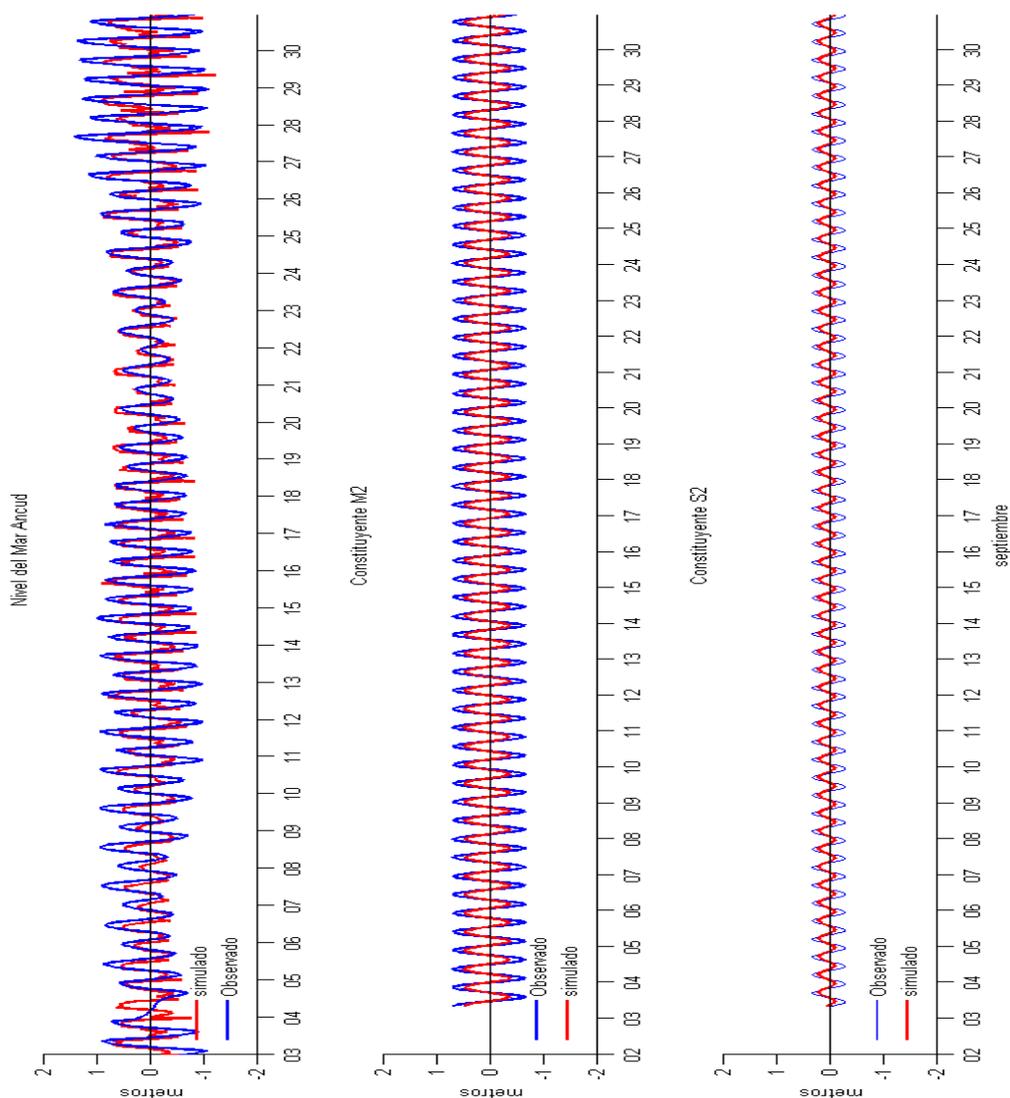


Figura I6. Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Ancud. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015.

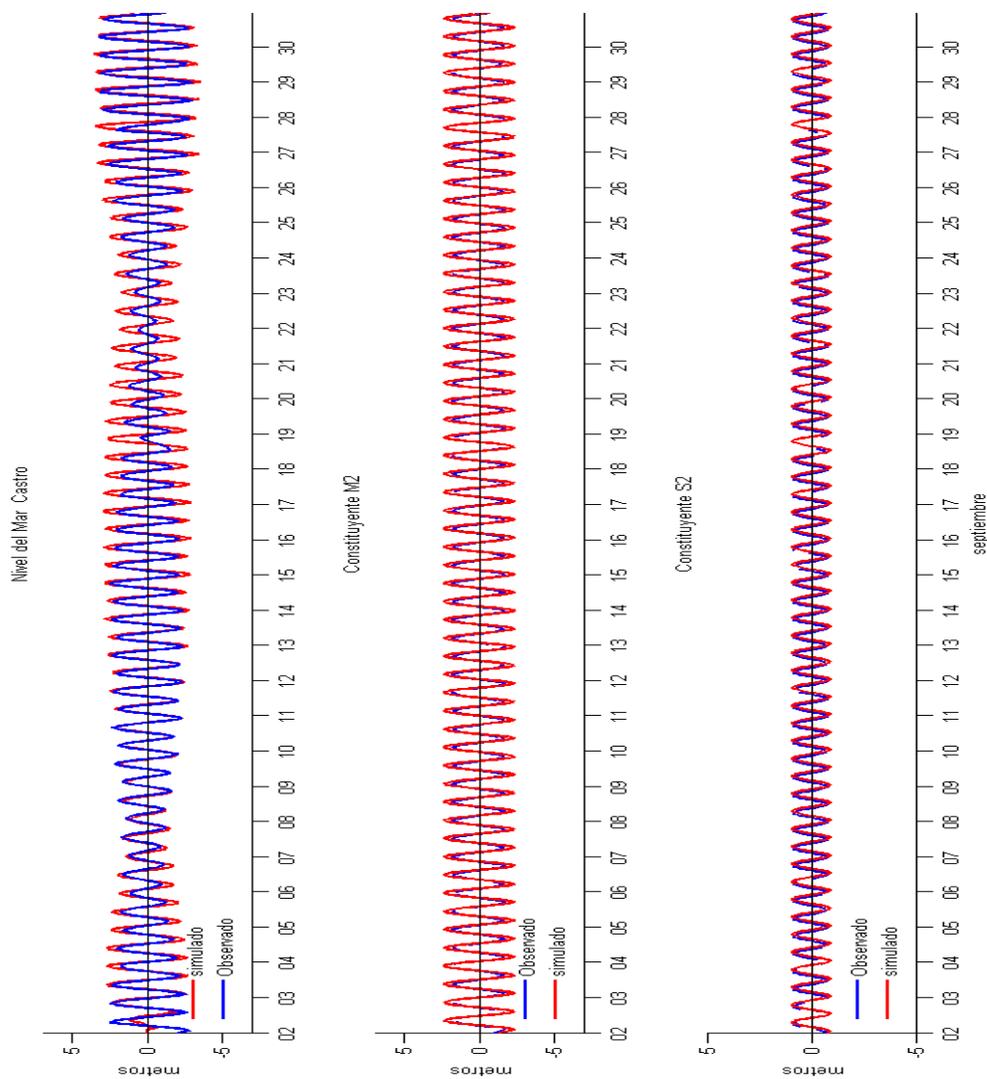


Figura 17. Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Castro. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015

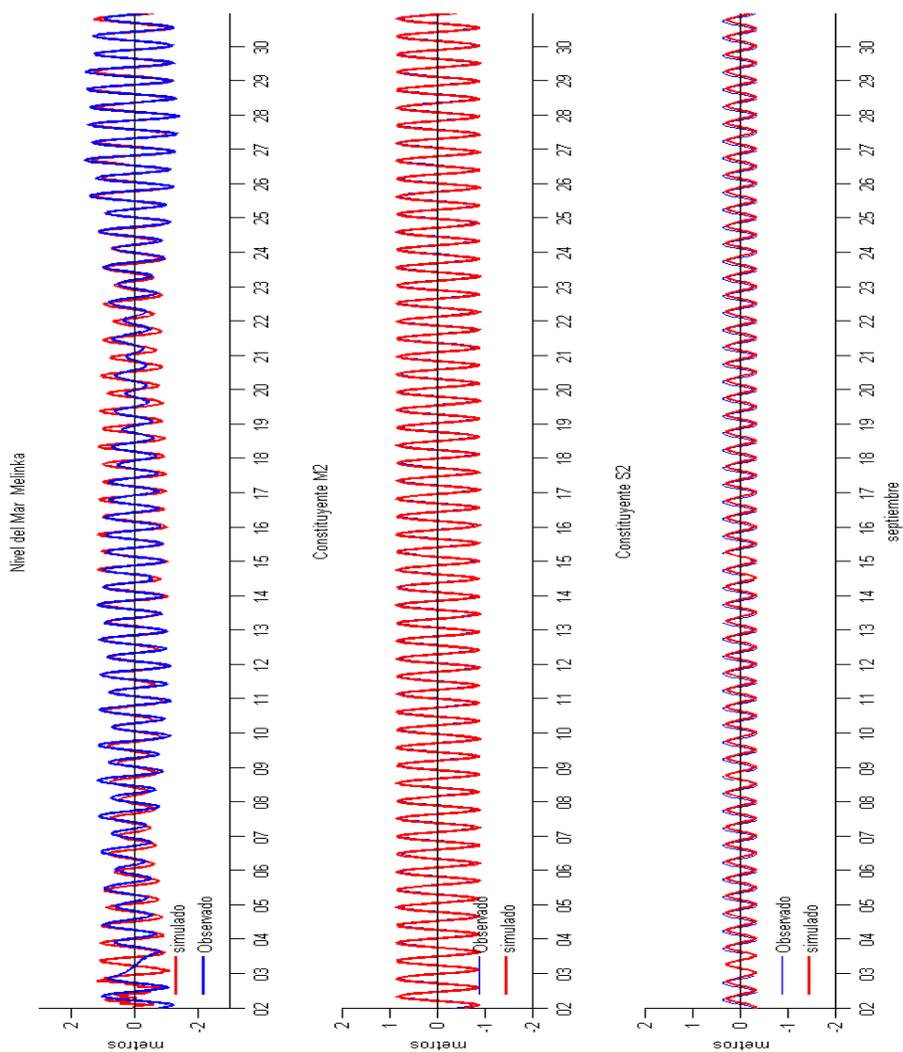


Figura 18. Series de tiempo observadas (azul) y pronosticadas (rojo) del nivel del mar, de la constituyente armónica semidiurna M2 y de constituyente armónica semidiurna S2 en Melinka. Las series corresponden al mes de septiembre de 2015.

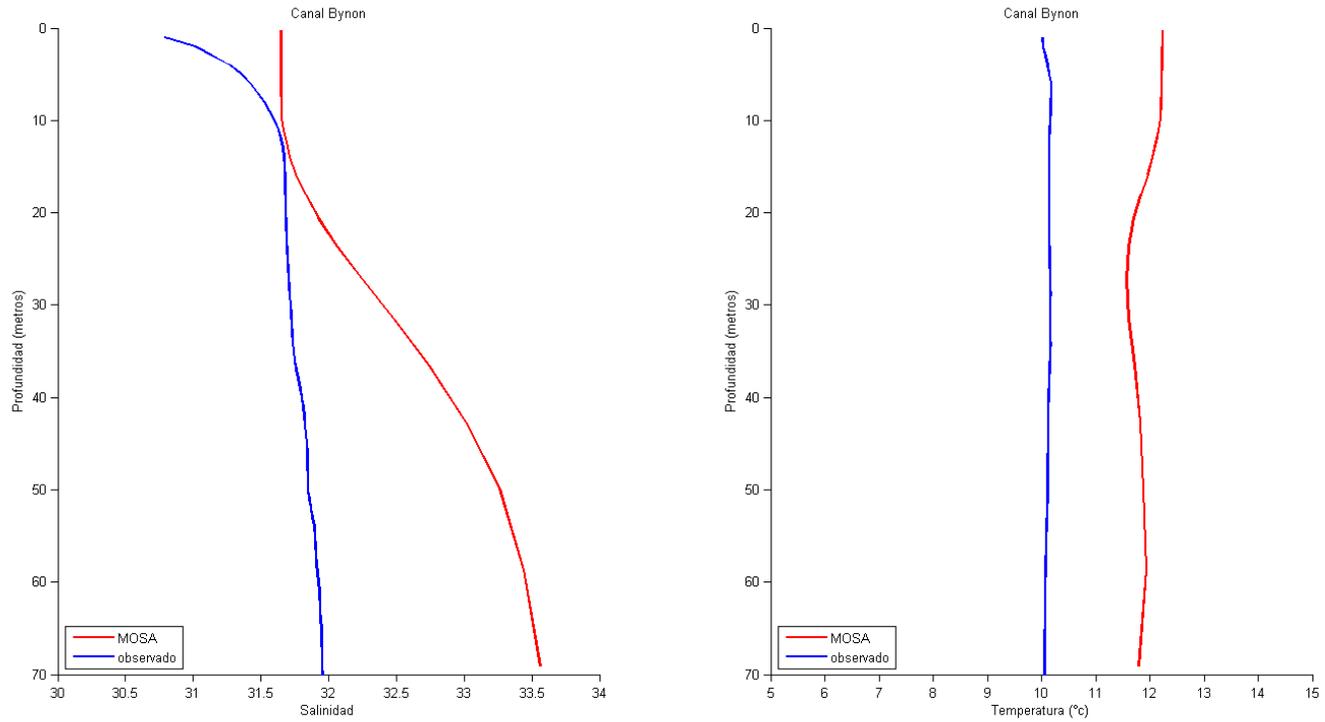


Figura 19. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Bynon, Archipiélago de Chonos, Región de Aysén.

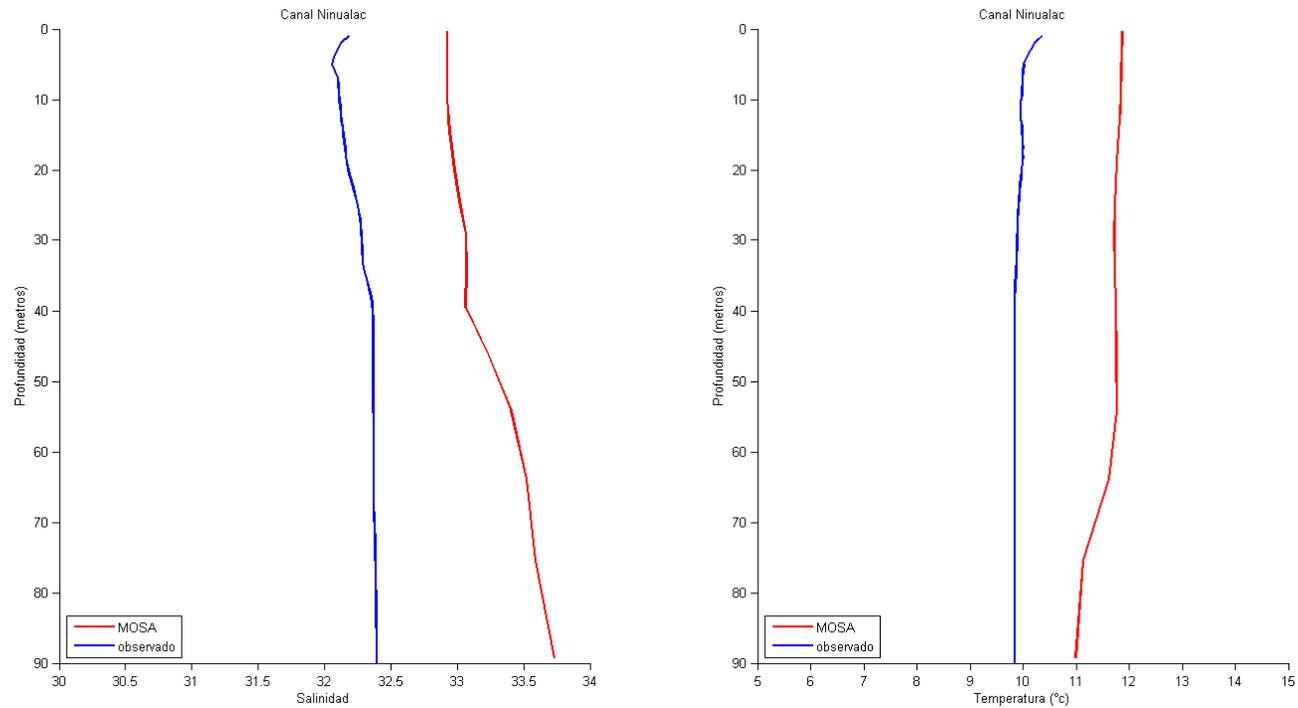


Figura 110. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Ninualac, Archipiélago de Chonos, Regi3n de Aysén.

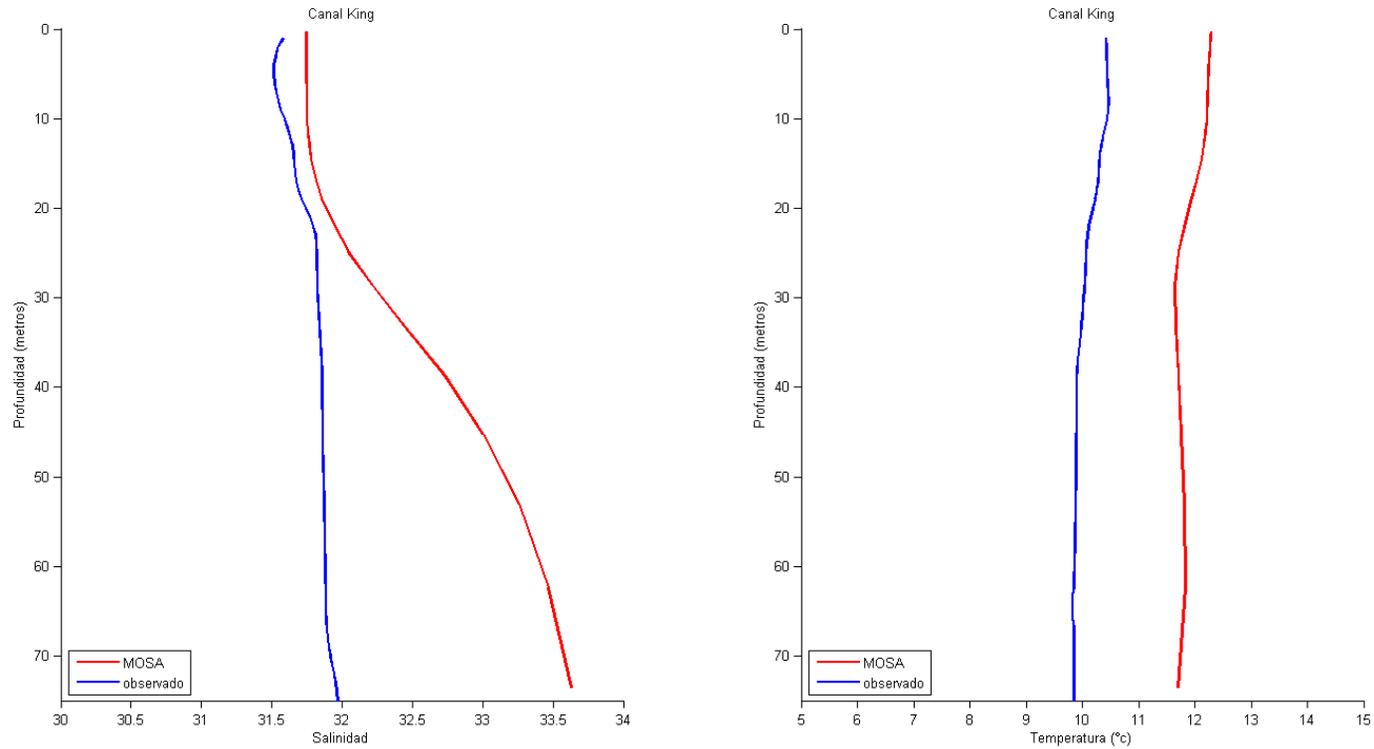


Figura I11. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal King, Archipiélago de Chonos, Región de Aysén.

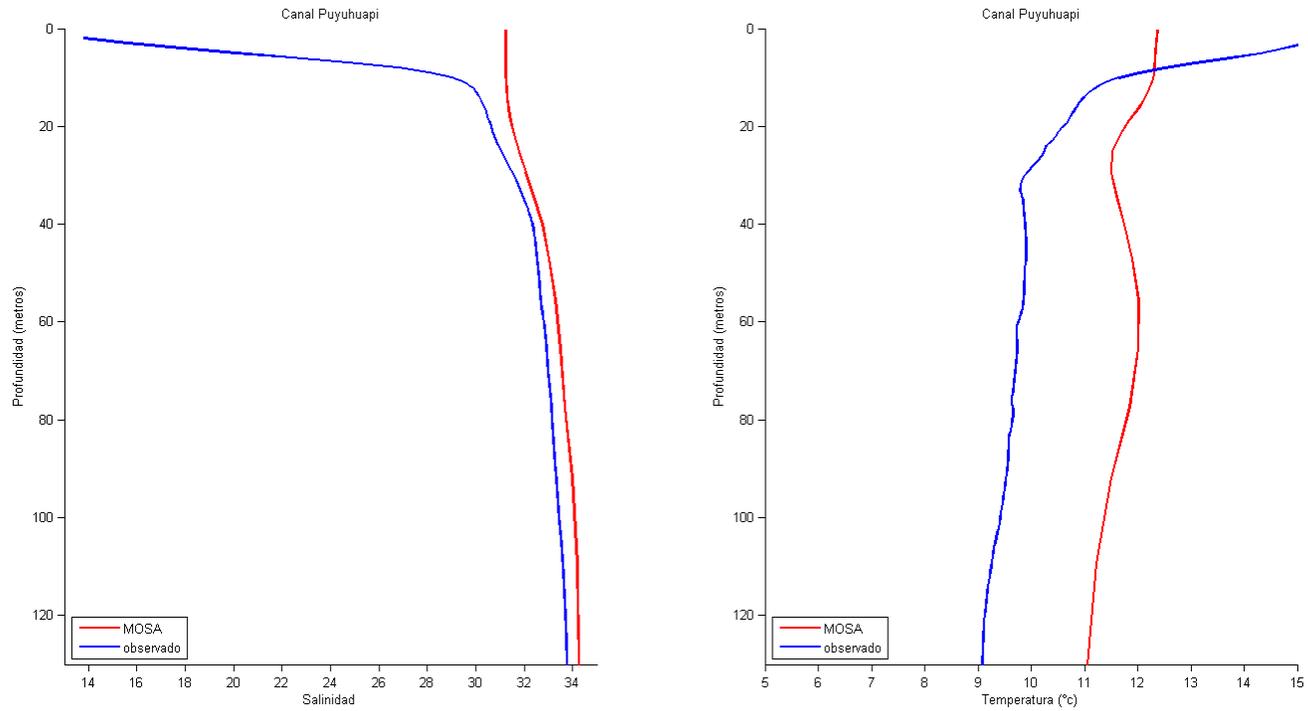


Figura 112. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Puyuhuapi, Regi3n de Ays3n.

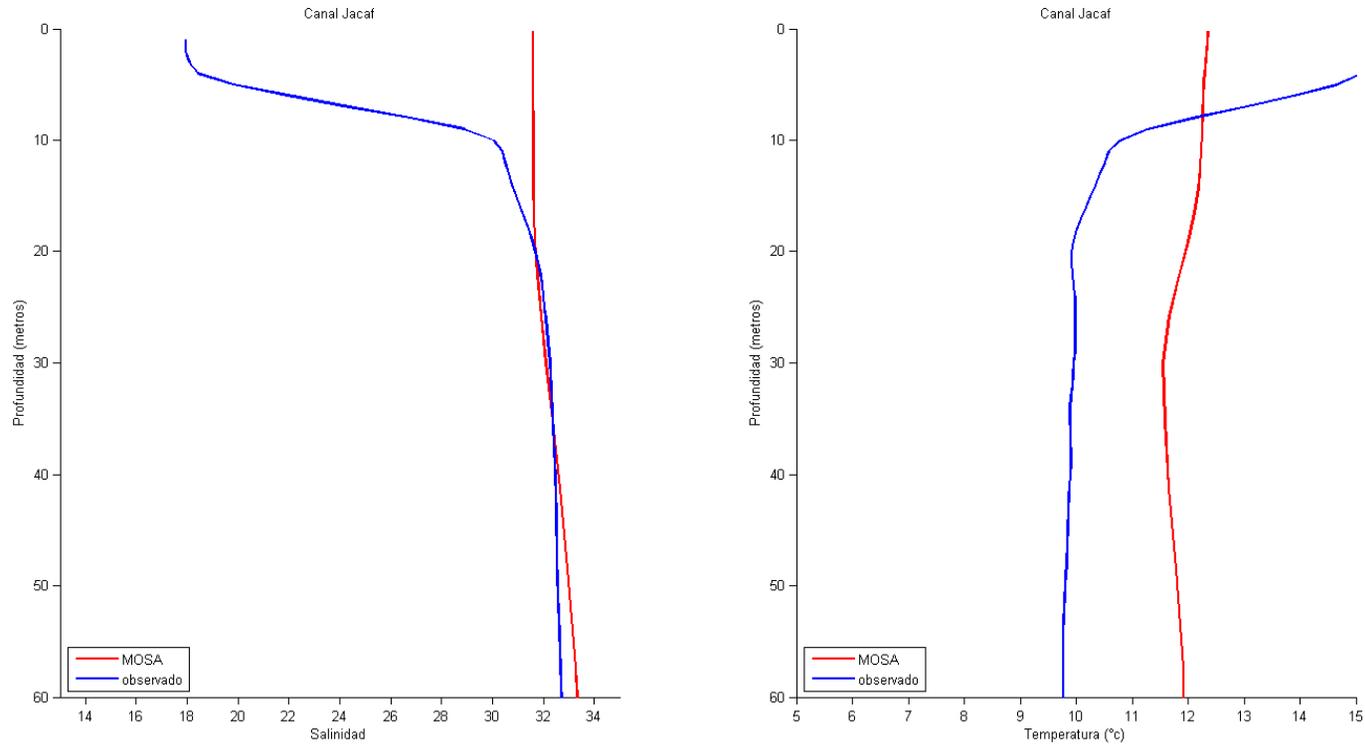


Figura 113. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Jacaf, Regi3n de Ays3n.

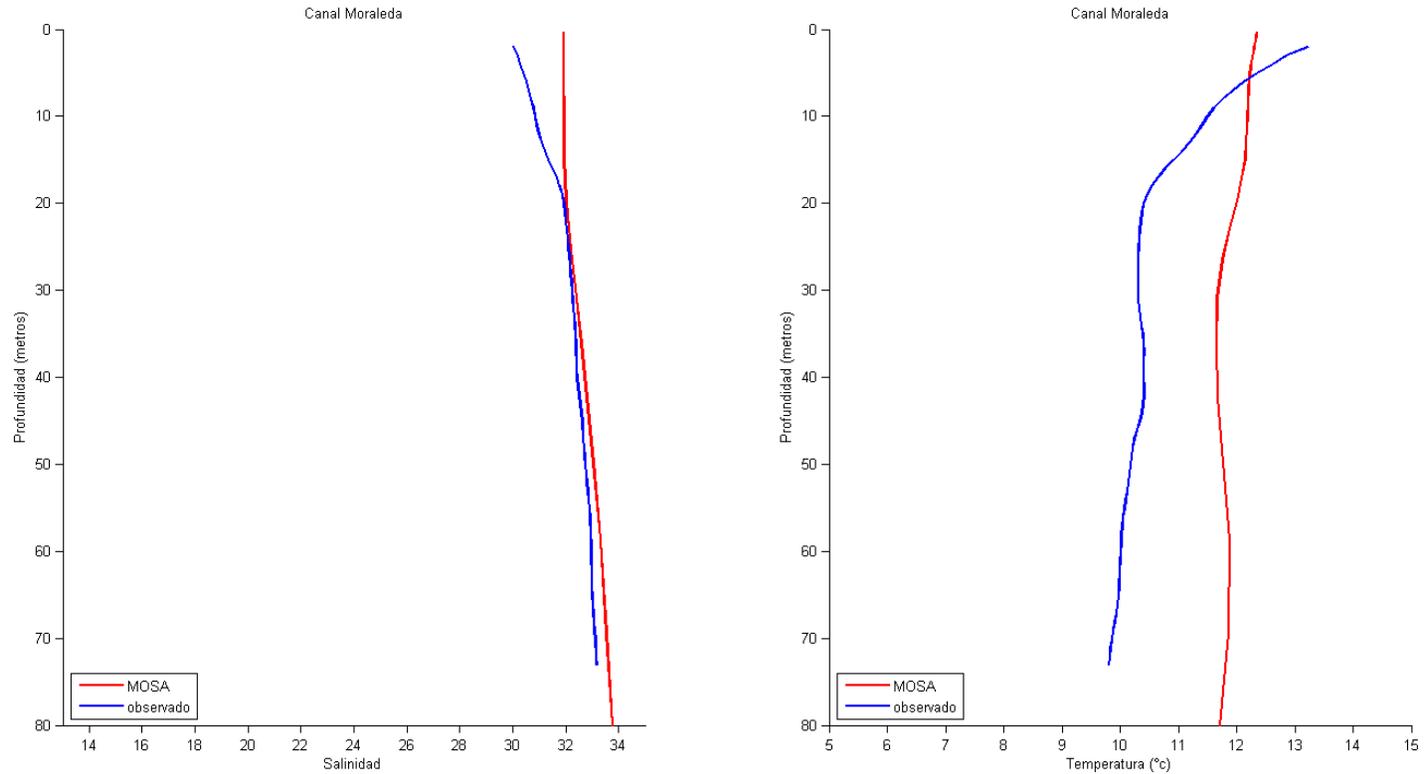


Figura 114. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Moraleda, Regi3n de Ays3n.

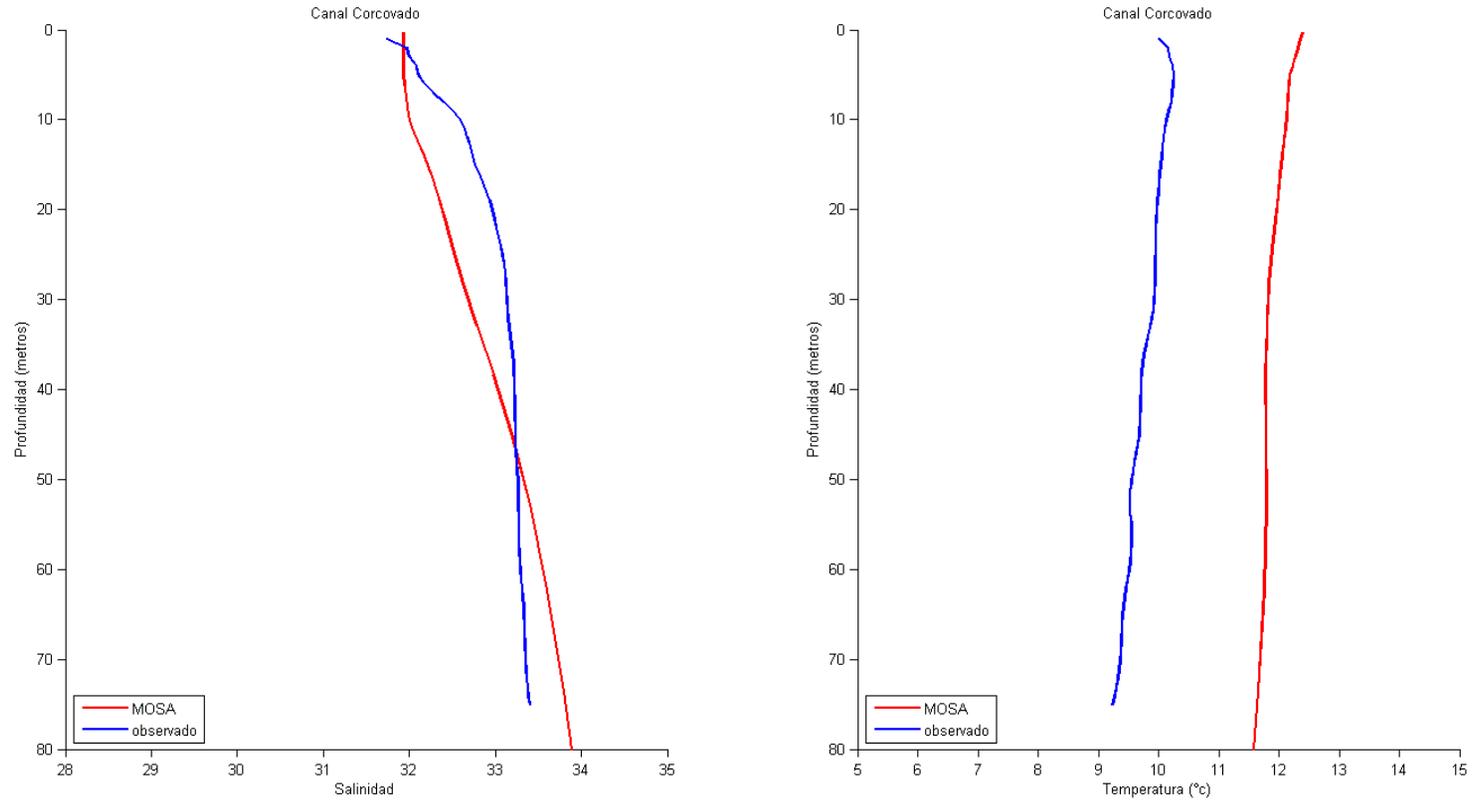


Figura I15. Perfiles de salinidad (izquierda) y temperatura (derecha), de datos obtenidos por CTD (azul) y pronosticado por MOSA (rojo), en el Canal Corcovado, Mar interior de Chiloé, Región de Los Lagos.

TABLAS



Tabla I1.
Posiciones de los mareógrafos utilizados en la evaluación del nivel del mar
en el dominio Chiloé Aysén de MOSA.

Lugar	Latitud	Longitud
Puerto Montt	-41.48	-72.96
Ancud	-41.87	-73.83
Castro	-42.48	-73.76
Melinka	-43.89	-73.74

Tabla I2.
Posiciones de estaciones de CTD utilizadas en la evaluación del campo de masa
en el dominio de Chiloé Aysén de MOSA.

Lugar	Latitud	Longitud
Ninualac	-45.02	-74.1
Bynon	-44.76	-74.04
King	-44.58	-74.07
Puyuhuapi	-44.66	-72.73
Jacaf	-44.42	-72.81
Moraleta	-44.15	-73.35
Corcovado	-43.44	-73.45

**Tabla I3.**

Porcentaje de energía potencial (**PE**) de los constituyentes semidiurno M2 y S2 del nivel de mar observado y pronosticado en el dominio Chiloé Aysén de MOSA.

Lugar	Observado		Simulado	
	M2	S2	M2	S2
Puerto Montt	72.57	20.18	82.18	13.88
Ancud	72.45	15.82	62.06	8.12
Castro	73.16	19.22	82.23	13.3
Melinka	72.9	15.59	80.56	10.18

Tabla I4.

Valores de correlación (R %), error cuadrático medio (RMS), error medio absoluto (MAE) y desviación estándar (BIAS) entre el nivel del mar observado y pronosticado en el dominio Chiloé Aysén de MOSA.

Lugar	R (%)	RMS (m)	MAE (m)	BIAS (m)
Puerto Montt	0.8981	1.04	0.83	0.02
Ancud	0.7951	0.34	0.25	0.03
Castro	0.9185	0.74	0.59	0.01
Melinka	0.8887	0.31	0.23	-0.03

Tabla I5.

Valores de correlación (R %), error cuadrático medio (RMS), error medio absoluto (MAE) y desviación estándar (BIAS) de la constituyente **M2** en la series observada y pronosticada en el dominio Chiloé Aysén de MOSA.

Lugar	R (%)	RMS (m)	MAE (m)	BIAS (m)
Puerto Montt	0.99	0.72	0.64	0.02
Ancud	0.99	0.17	0.15	0.02
Castro	0.98	0.5	0.44	-0.02
Melinka	0.95	0.19	0.15	-0.04



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO

Sección Ediciones y Producción

Almte. Manuel Blanco Encalada 839

Fono 56-32-2151500

Valparaíso, Chile

www.ifop.cl



www.ifop.cl