



Informe Final
Convenio de Desempeño 2020
Desarrollo de sistema de predicción sinóptico de circulación
marina, Etapa VII.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Octubre 2021



Informe Final

Convenio de Desempeño 2020.
Desarrollo de sistema de predicción
sinóptico de circulación marina, Etapa VII.

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Octubre 2021

REQUIRENTE SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMPRESAS DE MENOR TAMAÑO

Subsecretaria de Economía y
Empresas de Menor Tamaño
Julio Pertuzé Salas

EJECUTOR INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Jefe División Investigación en Acuicultura
Leonardo Guzmán Méndez

Director Ejecutivo
Luis Parot Donoso

JEFE PROYECTO
Osvaldo Artal Arrieta

AUTORES
Osvaldo Artal Arrieta
Valentina Besoain Meneses
Cristian Ruiz Soto
Milton Salas Salas
Pedro Valdebenito Muñoz
Oliver Venegas Mella

ÍNDICE GENERAL

Resumen ejecutivo.....	8
1. Antecedentes.....	10
1.1 Contexto.....	10
1.2 Sistema de modelación operacional para la zona Sur-Austral, MOSA.....	11
2. Objetivos.....	15
2.1 Objetivo General.....	15
2.2 Objetivos Específicos.....	15
3. Metodología.....	16
3.1 Metodología objetivo específico 1: Evaluar el sistema operacional MOSA-CROCO con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.....	17
3.2 Metodología objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional MOSA-WRF con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.....	20
3.3 Metodología objetivo específico 3: Implementar un modelo biogeoquímico climatológico para las regiones de Los Lagos y Aysén.....	21
3.4 Metodología objetivo específico 4: Diagnosticar un modelo de pronóstico operacional para la región de Magallanes.....	25
4. Gestión del proyecto.....	31
4.1 Reuniones de coordinación con SUBPESCA.....	31
4.2 Reuniones técnico-académicas.....	31
4.3 Talleres de difusión y/o capacitación.....	35
4.4 Compra y mantenimiento de equipo:.....	37
4.5 Publicaciones científicas.....	37
4.6 Carta Gantt del proyecto.....	38
5. Resultados.....	39
5.1 Resultados objetivo específico 1: Evaluar el sistema operacional MOSA-CROCO con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.....	39
5.2 Resultados objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional MOSA-WRF con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.....	47
5.3 Resultados objetivo específico 3: Implementar un modelo biogeoquímico climatológico para las regiones de Los Lagos y Aysén.....	51
5.4 Resultados objetivo específico 4: Diagnosticar un modelo de pronóstico operacional para la región de Magallanes que contenga el seno Skyring.....	59
5.4.1 Evaluación de grilla MOSAMAG usando una simulación barotrópica.....	59
5.4.2 Evaluación de condición inicial y de borde.....	62
5.4.3 Diagnostico modelo operacional MOSAMAG.....	67
6. Discusión.....	71
6.1 Modelo operacional MOSA-CROCO.....	71
6.2 Modelo operacional MOSA-WRF.....	75
6.3 Modelo biogeoquímico.....	77
6.4 Modelo regional para la región de Magallanes.....	79

7. Conclusiones.....	82
Anexo A: Ecuaciones modelo hidrodinámico CROCO.....	84
Anexo B: Modelo operacional MOSA-WRF.....	86
Anexo C: Módulos Biogeoquímicos.....	91
Anexo D: Estadísticos principales para validación.....	94
Anexo E: Recursos computacionales.....	96
Referencias bibliográficas.....	98

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo del modelo operacional Sur-Austral, MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.....	12
Figura 2: Dominio y batimetría del modelo biogeoquímico.....	22
Figura 3: Dominio y batimetría utilizada para construir el modelo MOSAMAG.....	26
Figura 4: Campo vectorial y magnitud de viento cada 6 horas obtenidos de GFS para un día de pronóstico de MOSAMAG.....	29
Figura 5: Ubicación y series mensuales de caudales de agua dulce en MOSAMAG.....	30
Figura 6: (panel superior) Promedio diario de TSM para MOSA y datos satelitales AVHRR. (panel inferior) Diferencia entre AVHRR y series MOSA durante enero 2017 y julio 2021.	39
Figura 7: a) Coeficiente de correlación (r), b) Raíz del error cuadrático medio (rmse), c) sesgo (bias) entre promedios mensuales de TSM obtenidos de MOSA-CROCO y VIIRS durante enero 2017 y mayo 2021.....	41
Figura 8: Series de tiempo de temperatura medida por la boya i~mar y su punto más cercano en MOSA-CROCO entre noviembre 2018 y agosto 2020.....	42
Figura 9: a) Error medio absoluto, y b) cociente de las desviaciones estándar entre el producto mensual SMAP y los promedios mensuales de SSM de MOSA-CROCO durante enero 2017 y junio 2021.....	43
Figura 10: Series de tiempo de salinidad superficial medida por la boya i~mar y su punto más cercano en MOSA-CROCO entre enero de 2019 y agosto 2020.....	44
Figura 11: Componente zonal de corriente geostrófica calculada estacionalmente para el producto C3S (panel superior) y MOSA-CROCO (panel inferior) en el periodo 2017-2020.	45
Figura 12: Componente meridional de corriente geostrófica calculada estacionalmente para el producto C3S (panel superior) y MOSA-CROCO (panel inferior) en el periodo 2017-2020.....	45
Figura 13: Componente zonal y meridional de la corriente en canal Moraleda (73.51 °O, -44.66 °S), registrado por ADCP y extraída de MOSA-CROCO. El periodo de medición se realizó desde agosto de 2018 a marzo de 2019.....	46
Figura 14: Rendimiento del sistema MOSA-WRF durante el 20 Julio del 2018 y 14 Agosto del 2021.....	47
Figura 15: Promedios diarios de temperatura observada y simulada con MOSA-WRF, junto a su residual entre el 1 de Agosto del 2018 y el 1 de Agosto del 2021. (a) Cucao, y (b) Melinka.....	48
Figura 16: Presión atmosférica observada y simulada con MOSA-WRF entre el 1 de Agosto del 2018 y el 1 de Agosto del 2021. (a) Cucao, y (b) Melinka.....	49
Figura 17: Precipitación acumulada mensual observada y simulada con MOSA-WRF, entre el 1 de Agosto del 2018 y el 1 de Agosto del 2021. (a) Cucao, y (b) Melinka.....	49
Figura 18: Wavelet del vector complejo del viento (u+vi) en Melinka. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.....	50
Figura 19: Wavelet del vector complejo del viento (u+vi) en Melinka. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.....	51

Figura 20: Serie de tiempo promedio y desviación estándar modelada y observada de oxígeno disuelto a diferentes profundidades en la boca del Guafo.....52

Figura 21: Serie de tiempo promedio y desviación estándar modelada y observada de temperatura a diferentes profundidades en la boca del Guafo.....53

Figura 22: Promedio estacional de temperatura superficial del mar de la climatología de AVHRR (1998-2010) y de los módulos biogeoquímicos NPDZ y PISCES.....54

Figura 23: Promedio estacional de temperatura superficial del mar de la climatología de SMAP (2015-2021) y de los módulos biogeoquímicos NPDZ y PISCES.....55

Figura 24: Promedio estacional de temperatura superficial del mar de la climatología de MODIS (2003-2020) y de los módulos biogeoquímicos NPDZ y PISCES.....56

Figura 25: Promedio estacional de clorofila superficial del modelo PISCES original y de la simulación con modificación de parámetros.....57

Figura 26: Concentración de clorofila y oxígeno disuelto en la Boca del Guafo a 20, 70 y 105 m de profundidad. Las líneas azules corresponden al modelo original y las líneas rojas al modelo con cambios en las constantes de parametrización.....58

Figura 27: Concentración de oxígeno disuelto en la Boca del Guafo a 20, 70 y 105 m de profundidad. Las líneas azules corresponden al modelo original y las líneas rojas al modelo con la disminución de oxígeno en la frontera norte.....59

Figura 28: Posición de los mareógrafos, junto a la amplitud de los principales constituyentes armónicos y espectros de energía del nivel del mar utilizados como puntos de control en la evaluación del modelo barotrópico de MOSAMAG.....60

Figura 29: Series horarias del nivel del mar de los mareógrafos y MOSAMAG utilizados para evaluar modelo barotrópico. Incluyen coeficiente de correlación y RMS entre cada serie.....61

Figura 30: Campos de TSM mensuales 2019 obtenidos de imágenes satelitales VIIRS-SNPP y el producto de pronóstico global MercatorOcean.....63

Figura 31: Evaluación de TSM de la condición inicial de MercatorOcean utilizada en los pronósticos de prueba de MOSAMAG.....64

Figura 32: Diagrama Hovmoller de TSM mensual del año 2019 entre datos VIIRS-SNPP y MercatorOcean para el borde norte de MOSAMAG (50.5 °S).....65

Figura 33: Diagrama Hovmoller de TSM mensual del año 2019 entre datos VIIRS-SNPP y MercatorOcean para el borde oeste de MOSAMAG (78 °O).....65

Figura 34: Diagrama Hovmoller de TSM mensual del año 2019 entre datos VIIRS-SNPP y MercatorOcean para el borde sur de MOSAMAG (57 °S).....66

Figura 35: Diagrama Hovmoller de TSM mensual del año 2019 entre datos VIIRS-SNPP y MercatorOcean para el borde este de MOSAMAG (64 °E).....66

Figura 36: Diagrama conceptual de la operación diaria y los componentes de MOSAMAG.68

Figura 37: Evaluación preliminar de promedios diarios de TSM entre el producto AVHRR y los pronósticos realizados por MOSAMAG entre el 22 y 24 de agosto de 2021.....69

Figura 38: Evaluación preliminar de promedios diarios de SSM entre el producto SMAP y el pronóstico realizado por MOSAMAG el 24 de agosto de 2021.....70

Figura 39: Principales cambios efectuados en la configuración del modelo operacional MOSA.....71

Figura 40: Relación entre máscara tierra-agua de MOSA-CROCO (color negro) y MOSA-WRF (Gris) para a) Estuario Reloncaví, b) Fiordo Comau y c) Canal Jacaf-Puyuhuapi. Los puntos representan las ubicaciones de la grilla MOSA-WRF.....73

Figura 41: Mapa de la grilla de MOSA-WRF5km (panel izquierdo) y MOSA-WRF3km (panel derecho) junto a la elevación del terreno y la estación virtual extraída del dominio para Cucao.....75

Figura 42: Mapa de la grilla de MOSA-WRF5km (panel izquierdo) y MOSA-WRF3km (panel derecho) junto a la elevación del terreno y la estación virtual extraída del dominio para Melinka.....76

Figura 43: Niveles Eta para el modelo WRF-ARW que siguen el contorno del terreno. Fuente Skamarock et al. (2005).....87

Figura 44: Grilla arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atmósfera. Fuente Skamarock et al. (2005).....88

Figura 45: Esquema descriptivo con los componentes de WRF.....89

Figura 46: Esquema del modelo NPDZ.....91

Figura 47: Arquitectura del modelo PISCES extraído de Aumont y Bopp (2006). Este esquema muestra el modelo ecosistémico omitiendo el oxígeno y el sistema de carbonato.92

Índice de tablas

Tabla 1: Fuentes de información utilizadas para la validación del modelo operacional MOSA-CROCO.....	20
Tabla 2: Parámetros y porcentaje de modificación de los parámetros en el experimento de sensibilidad de PISCES con relación al valor del parámetro original.....	24
Tabla 3: Parámetros numéricos y características de la grilla utilizada en el modelo MOSAMAG.....	27
Tabla 4: Detalle anual del porcentaje de días del año pronosticados, índice de correlación (r) y raíz del error cuadrático medio (RMSE) para el modelo operacional MOSA-CROCO.	40
Tabla 5: Estadísticos aplicados a la serie de oxígeno disuelto de los modelos biogeoquímicos en relación a los datos del anclaje en la Boca del Guafo.....	51
Tabla 6: Estadísticos aplicados a la serie de temperatura de los modelos biogeoquímicos en relación a los datos del anclaje en la Boca del Guafo.....	53
Tabla 7: Porcentaje de variación promedio en la Boca del Guafo del experimento de sensibilidad bajo diferentes constantes de parametrización.....	58
Tabla 8: Especificaciones técnicas del servidor de alto rendimiento ubicado en Data Center IFOP en Viña del Mar.....	96
Tabla 9: Especificaciones técnicas servidor web para CHONOS ubicado en Data Center Viña del Mar.....	97

RESUMEN EJECUTIVO

En este informe se presenta el estado actual de los modelos operacionales de pronósticos oceanográficos y atmosféricos para la región de Los Lagos y Aysén, así como una evaluación de dos módulos biogeoquímicos para las mismas regiones y un modelo oceanográfico físico para la región de Magallanes. Estos modelos numéricos forman parte del sistema de modelación operacional para la zona Sur-Austral de Chile “MOSA”. MOSA es una herramienta robusta para análisis y predicción oceanográfica a corto plazo, cuyo propósito principal es generar información relevante para la gestión costera y la toma de decisiones ante emergencias ambientales y/o sanitarias. MOSA otorga información ambiental diaria con una proyección de 72 horas de variables meteorológicas-oceanográficas como temperatura del mar, salinidad, nivel del mar, corrientes marinas, temperatura del aire, humedad relativa, precipitación y dirección e intensidad de los vientos. Toda esta información es relevante para diferentes estudios, tales como: propagación de olas de calor, variabilidad estratificación de la columna de agua, flujos de agua dulce, dispersión de patógenos, vertidos de hidrocarburos, deriva de objetos flotantes, naufragios, etc. Además, en el largo plazo este sistema nos permite comprender de mejor manera la dinámica estuarina y la circulación costera en la región de Los Lagos y Aysén.

En la etapa actual del proyecto se evaluó el desempeño en la reproducción de los principales procesos oceanográficos de la zona del modelo oceanográfico operacional MOSA-CROCO (ex MOSA-ROMS). La evaluación del modelo atmosférico operacional MOSA-WRF fue actualizado con las información de las estaciones meteorológicas disponibles a la fecha. A su vez, implementamos y evaluamos dos modelos biogeoquímicos: NPZD y PISCES. Finalmente, se implementó un modelo físico de alta resolución (~1.5 km) para la región de Magallanes.

La principal novedad en la evaluación del modelo MOSA-CROCO fue realizar un análisis más profundo de las corrientes simuladas. Para esto, evaluamos el comportamiento estacional de las corrientes geostróficas en la zona oceánica del dominio y la variabilidad sinóptica de la corriente absoluta en un punto al interior del canal Moraleda. A su vez, se actualizaron los análisis de temperatura y salinidad superficial en todo el dominio con la información satelital disponible a la fecha. También se actualizaron los análisis sinópticos de temperatura y salinidad en el seno del Reloncaví. En términos generales, todos los análisis muestran un correcto desempeño del modelo.

En la etapa anterior del proyecto, los análisis de MOSA-WRF se centraron en la capacidad del modelo en reproducir adecuadamente los patrones de meso-escala y la variabilidad sinóptica de viento. En esta etapa, se incorporaron análisis del desempeño de la temperatura, presión atmosférica y precipitación del modelo. Todas las evaluaciones fueron

realizadas usando la información de las estaciones meteorológicas ubicadas en Cucao y Melinka. Al igual que MOSA-CROCO, el modelo presenta un buen ajuste para las variables atmosféricas.

Por otra parte, se continuó con los análisis de los modelos biogeoquímicos NPZD y PISCES. Ambos modelos biogeoquímicos simularon de manera similar la distribución espacial y estacional de la concentración de oxígeno. La gran diferencia entre ambos modelos se presentó en la variable de clorofila superficial, la cual fue mejor representada por el modelo PISCES. Si bien esto presenta un gran avance en el desarrollo de estos tipos de modelos, se observa que queda mucho trabajo para encontrar una configuración óptima para esta región. Se espera contar a futuro con un modelo biogeoquímico regional que sirva de aporte a la gestión de la acuicultura ante emergencias sanitarias o desastres ecológicos.

Finalmente, se continuó con la implementación y evaluación de un modelo físico de alta resolución para la región de Magallanes. Este modelo ha respondido de manera satisfactoria a las pruebas de estabilidad, manteniendo una batimetría que mantiene los rasgos relevantes de la zona. Por una parte, se evaluó la señal de marea mediante una configuración barotrópica del modelo. Por otra parte, se comenzó a simular diariamente pronósticos oceanográficos con un horizonte de 3 días, similar a como funciona MOSA-CROCO. A la fecha este modelo se encuentra estable desde el 1 de agosto del 2021, mostrando resultados coherentes y acordes al poco tiempo de ejecución. Cabe destacar que mantener este sistema operacional en el tiempo depende de la incorporación de nuevos recursos computacionales para el proyecto.

1. ANTECEDENTES

1.1 Contexto

El estudio de los sistemas costeros marinos de la zona sur de Chile ha aumentado durante los últimos 20 años, esto debido principalmente a los procesos de industrialización que se han llevado a cabo producto del auge de la salmonicultura (Buschmann et al., 2009). Estos procesos han presionado diversos aspectos sociales, económicos y ambientales, y a su vez, han elevado la necesidad de establecer límites ambientales del entorno natural (Olivares et al., 2015), lo cual obliga a tratar el tema desde un enfoque ecosistémico. Considerando solo el factor ambiental, nace la necesidad de mejorar la gestión y el control de las áreas de explotación marina. Dentro de este enfoque, el conocimiento medioambiental donde se encuentra inserta la industria es un eje principal para la planificación y gestión del territorio.

Los desafíos ambientales en la zona involucran a un amplio conjunto de actores presentes, que van desde zonas portuarias, pescadores artesanales, miticultores, salmoneros y/o operadores turísticos, entre otros. Por su parte, las floraciones de algas nocivas (FAN), documentadas en los años 70' en la región de Magallanes, han extendido su cobertura sistemáticamente en la región de Aysén (Muñoz et al., 1992) y en la región de los Lagos (Lembeye et al., 1998), incluyendo últimamente la región oceánica de Chiloé, presentando brotes masivos en Cucao, Faro Corona y Mar Brava, (Mardones et al., 2010). Estos eventos alzaron su punto máximo de agitación social el año 2016, generando una crisis medioambiental y económica en la pesca artesanal que desembocó en masivas protestas ciudadanas y el cierre de la isla por parte de los pescadores artesanales, exponiendo la necesidad de aumentar el conocimiento acerca de las condiciones ambientales que favorecen el crecimiento de esta especie (Roa, 2015). Por ejemplo, Ávila et al. (2015) estudió los factores abióticos que influyen en el crecimiento de la *Alexandrium catenella*.

A su vez la presencia de *Caligus rogercresseyi* (conocido como piojo de mar) y de esporádicos brotes de patógenos virales tales como el ISAv, causante entre 2007 y 2008 de la mayor crisis ambiental, económica y social de la industria, suponen una constante amenaza sobre la actividad acuícola, pesquera y el medioambiente (Mardones et al., 2009). Estos eventos han dejado en manifiesto carencias en la disponibilidad oportuna de información de calidad del sistema natural que contribuya a una mayor comprensión de la situación ambiental.

Por su parte la acuicultura a nivel global ha fijado su expansión hacia zonas más expuestas, motivada últimamente en parte por el colapso de la salmonicultura en Chile en 2008 (Holmer, 2010). Noruega ya ha comenzado diversos proyectos para migrar sus cultivos de salmónidos a zonas más alejadas de la costa, lo cual tiene sus ventajas tanto

para la industria como para el medioambiente, donde se espera mayor bienestar de los peces debido a una mayor calidad del agua con menos influencia de escorrentía terrestre, actividades costeras, y de residuos procedentes de la actividad antropogénica de la costa. Si bien en Chile aún se encuentra en fase de estudio sobre este último punto, las etapas de diseño a fin de garantizar una operación segura deben considerar herramientas operacionales cuantitativas que otorguen información relevante del estado del mar, tales como oleaje significativo, vientos, anomalías térmicas, flujos de oxígeno disuelto, entre otros.

1.2 Sistema de modelación operacional para la zona Sur-Austral, MOSA

En el año 2014 comienza el proyecto “Desarrollo de un sistema de predicción sinóptico de circulación marina para el apoyo de la acuicultura”, dando inicio a experimento único en oceanografía operacional en el sur de Chile. El objetivo principal de este proyecto es diseñar y comenzar la implementación de simulaciones tipo pronósticos para condiciones oceanográficas en un horizonte de 3 días. Desde un comienzo se establece un trabajo de cooperación con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción, quienes asesoran el trabajo realizado. De igual forma se generan convenios de cooperación con la Dirección Meteorológica de Chile que permitan acceder a modelos operacionales atmosféricos para la zona de estudio, elemento indispensable en estos sistemas, y un par de convenios con COPAS Sur-Austral (www.sur-austral.cl) y MUSELS (www.eula.cl/musels) para aumentar la cobertura de mediciones de variables en terreno. Como se menciona anteriormente, a partir de un modelo operacional podemos obtener 3 tipos de productos: modelos retrospectivos (*Hindcast*), modelos precisos para el estado actual del océano (*Nowcast*) y modelos que representen el estado futuro del océano a través de pronósticos (*Forecast*).

Para ello se construyó un marco conceptual donde se establece el diseño de un sistema operacional cuyo dominio comprende las regiones de Los Lagos y de Aysén en el sur de Chile. Este diagrama conceptual contiene todos los módulos que debiesen ser incorporados en el sistema (Fig. 1) y está compuesto por varios módulos que satisfacen distintas necesidades del modelo. En esta fase se implementará un modelo hidrodinámico que funcionará de manera acoplada con un modelo atmosférico basado en WRF (modelo atmosférico de código abierto), un sistema que extraiga condiciones iniciales y de borde de modelos globales (MERCATOR/GFS), y de manera experimental, se implementará un modelo hidrológico desacoplado que otorgue las descargas fluviales más importantes de la zona, mientras se evalúan sus resultados, se utilizarán datos climatológicos publicados por la Dirección General de Aguas (DGA).

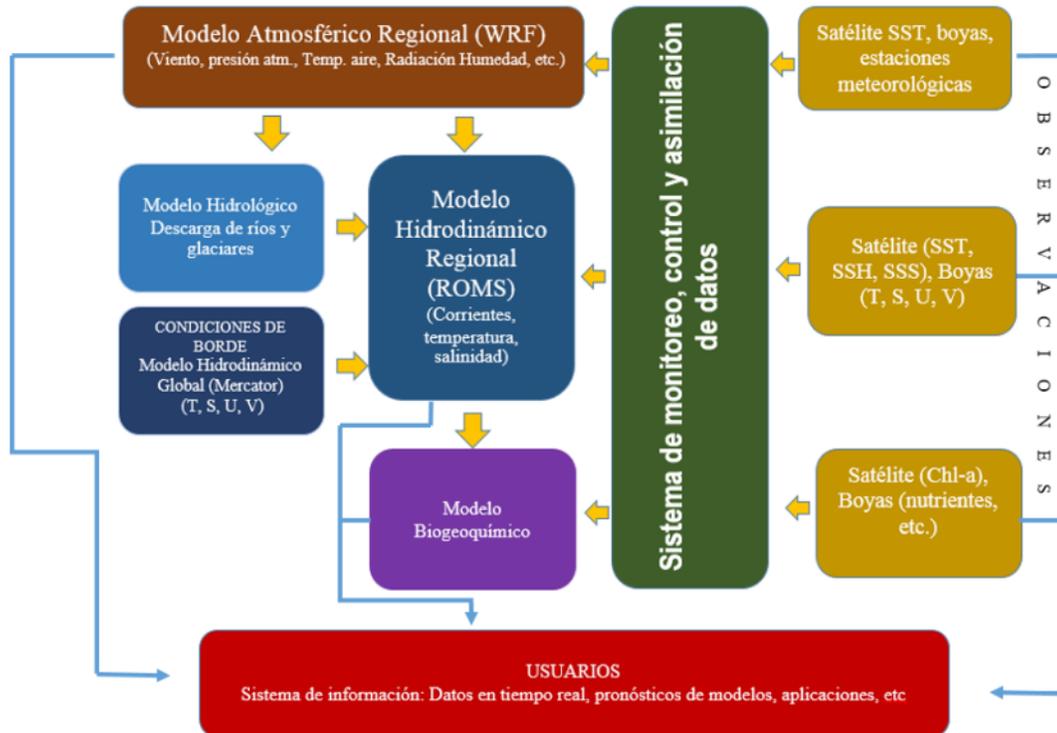


Figura 1: Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo del modelo operacional Sur-Austral, MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.

El desarrollo de este proyecto se encuentra dentro del marco de “Asesoría integral para pesca y acuicultura” (ASIPA) que es un convenio entre Subpesca, el Ministerio de Economía y el IFOP. Este proyecto 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 los modelos numéricos. En otras palabras, se busca mantener un sistema de predicción operacional para la zona sur austral de Chile para aplicaciones a problemáticas asociadas a la acuicultura. En informe actual aborda la etapa VII de este proyecto ejecutado entre los años 2020 y 2021.

- **Etapa I: 2014 – 2015:** En líneas generales, la primera etapa de este proyecto incluyó el diseño del sistema, además de la implementación del modelo hidrodinámico ROMS-AGRIF, denominado para los fines del proyecto como MOSA-ROMS (Modelo Operacional Sur-Austral). Su estructura operacional, esta integrado con información del modelo global oceanográfico MERCATOR-Ocean y con el pronóstico atmosférico Global Forecast System (GFS). Este modelo se evaluó preliminarmente con datos históricos. Todo esto acoplado a un sistema que permite visualizar los resultados en línea montados en el servidor web del proyecto (www.ifop.cl/chonos). También se incluyó un diagnóstico de información

oceanográfica disponible actualmente para su eventual uso y las perspectivas a corto plazo para generación de nuevos puntos de observación.

- **Etapa II: 2015 – 2016:** En esta etapa, el énfasis fue puesto en la calibración y evaluación del modelo para mejorar su calidad y disminuir los rangos de errores encontrados en la etapa previa y así tener un modelo lo más consistente posible. Para esto se realizó una evaluación de patrones oceanográficos generales del sistema a través de información de literatura científica y de observaciones recopiladas por el IFOP y otras instituciones. Además se evaluaron diseños de tecnologías de transmisión de datos en tiempo real en nuevos puntos de observación.
- **Etapa III: 2016 – 2017:** En esta etapa y luego del proceso de calibración del modelo en la etapa anterior, se generaron aplicaciones web, principalmente enfocadas a herramientas que permiten calcular el transporte de material disuelto o particulado, esto con el fin de conocer con antelación el posible transportes de materiales riesgosos asociado a la acuicultura (antibióticos, patógenos, etc.).
- **Etapa IV: 2017 – 2018:** En esta etapa se agregaron mejoras al modelo oceanográfico operacional MOSA-ROMS, se comenzó la implementación de un modelo atmosférico predictivo exclusivo para el modelo (MOSA-WRF), y se trabajó en la robustez del sistema de plataforma web “CHONOS” (www.ifop.cl/chonos).
- **Etapa V: 2018 – 2019:** En esta etapa se agregaron nuevas fuentes de agua dulce y se modificó la batimetría en ciertos lugares del modelo MOSA-ROMS. Además, se realizó un diagnóstico del modelo biogeoquímico NPZD.
- **Etapa VI: 2019 – 2020:** En esta etapa se agregaron y evaluaron cambios al modelo oceanográfico operacional MOSA-ROMS para mejorar su desempeño en la reproducción de los principales procesos oceanográficos de la zona. Desde octubre del 2019 se actualizó el modelo ROMS a su nueva versión CROCO. Las salidas del modelo MOSA-CROCO fueron implementadas como condiciones de borde para el modelo de dispersión de partículas PartiMOSA. El modelo operacional MOSA-WRF también fue evaluado. A su vez, se implementaron y evaluaron dos modelos biogeoquímicos: NPZD y PISCES. Finalmente, se realizó un diagnóstico a un modelo físico para la región de Magallanes.
- **Etapa VII: 2020 – 2021:** Corresponde a la etapa actual del proyecto. Durante esta etapa se evaluaron los modelos operacionales MOSA-CROCO y MOSA-WRF con la información ambiental disponible a la fecha. A su vez, se realizó una evaluación

de los modelos biogeoquímicos NPZD y PISCES. Finalmente, se realizó un diagnóstico del modelo físico operacional para la región de Magallanes.

Los resultados de cada una de las etapas del proyecto pueden ser consultadas en los respectivos informes técnicos previos. Estos informes pueden ser descargados desde la página web del IFOP (<http://www.ifop.cl>).

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

Mejoramiento, calibración y evaluación del sistema operacional oceanográfico regional para la zona Sur-Austral de Chile, MOSA-CROCO.

2.2 Objetivos Específicos

2.2.1 Evaluar el sistema operacional MOSA-CROCO con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

2.2.2 Evaluar el sistema operacional MOSA-WRF con observaciones meteorológicas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

2.2.3 Implementar un modelo biogeoquímico climatológico para las regiones de Los Lagos y Aysén.

2.2.4 Diagnosticar un modelo de pronóstico operacional para la región de Magallanes.

3. METODOLOGÍA

El modelo de pronóstico operacional Sur-Austral (MOSA, Ruiz et al., 2021) está basado en el modelo oceanográfico Coastal and Regional Ocean COmmunity model (CROCO, Debreu et al., 2012) y en el modelo atmosférico Weather Research Forecast (WRF, Skamarock et al., 2005). El modelo CROCO es desarrollada por el Institut de Recherche pour le Développement (IRD) en Francia. CROCO es un modelo de circulación oceánica hidrostático (y no hidrostático) que resuelve las ecuaciones primitivas de conservación de momento, energía y masa sobre una grilla rectangular estructurada (Anexo A). El modelo WRF tiene un módulo no hidrostático que permite el libre movimiento de las parcelas de aire en la columna de aire (Anexo B).

El dominio de MOSA-CROCO comprende las regiones de Los Lagos y Aysén, limitando entre el Seno Reloncaví por el norte y la Península de Taitao por el sur, incluyendo la costa continental oriental de la región comprendida, mientras que el borde occidental se ubica en los 79 °W. Los elementos horizontales en MOSA-CROCO tienen una resolución ~1 km. El modelo de elevación digital es construido con datos batimétricos de cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA), complementada con información del producto General Bathymetric Chart of the Oceans (GEBCO) y proyectos locales de mediciones multihaz.

Es necesario contar con información de las variables del sistema tanto horizontal como verticalmente para resolver las ecuaciones primitivas en cada paso de tiempo. Estas variables son velocidad de la corriente, temperatura, salinidad y nivel del mar. Este conjunto de variables con una cierta variabilidad temporal es lo que conocemos como condiciones de borde o de frontera. En nuestro caso particular, la información de estas variables es entregada al modelo con una variabilidad temporal diaria solo en los bordes abiertos del dominio. Los bordes abiertos son aquellos limites por los cuales existe un transporte de agua asociado. A su vez, a lo largo los bordes abiertos se utiliza una capa esponja de un ancho de 10 km, para evitar ruidos y generación de ondas ficticias producidas por reflexión de ondas en los bordes (Penven et al., 2006). Actualmente el modelo utiliza condiciones de borde interpoladas desde Mercator-Ocean y una condición inicial creada a partir del pronóstico generado el día anterior. De esta manera, MOSA-CROCO es capaz de construir estructuras termohalinas de largo plazo y de reproducir variabilidad estacional en las condiciones oceanográficas. En el caso de la onda de marea, esta fue amortiguada al comienzo de las pruebas del pronóstico operacional, para evitar grandes inestabilidades en el campo de presión. Actualmente se utilizan 10 armónicos de marea sin amortiguamiento. Estos datos son derivados desde el producto de modelación inversa de mareas barotrópicas TPXO7 (Egbert & Erofeeva, 2002).

Para el caso de la superficie libre del agua se necesita información atmosférica como el esfuerzo del viento, la radiación solar, flujos de calor de onda larga y onda corta, precipitación, y humedad. 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 relacionadas con el viento y los flujos de calor. Los campos de las variables atmosféricas actualmente son obtenidos del pronóstico operacional atmosféricos MOSA-WRF de 3 km de resolución espacial.

Un forzante relevante en el modelo es el aporte de fuentes de agua dulce al sistema, las cuales modifican la estructura de la pycnoclina en las zonas costeras y en la zona de fiordos. Este aporte cumple un rol fundamental en la circulación estuarina desarrollando flujos gravitacionales que transportan aguas de baja salinidad a la boca de los fiordos. Las fuentes de agua dulce son ingresadas como fuentes 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). Actualmente se utilizan 35 fuentes puntuales con un flujo con variabilidad mensual

Cabe destacar que desde el inicio de este proyecto hasta septiembre del 2019 MOSA estaba basado en el modelo ROMS-AGRIF (modelo antecesor de CROCO). Desde octubre 2019 se realizó formalmente el cambio al modelo CROCO. La principal razón por este cambio es que el modelo ROMS AGRIF ya no cuenta con soporte ni mejoras en sus códigos. Con esta actualización podemos acceder a las últimas mejoras tanto en el modelo físico como en los módulos biogeoquímicos.

3.1 Metodología objetivo específico 1: Evaluar el sistema operacional MOSA-CROCO con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

Las observaciones oceanográficas son una fuente de información fundamental para conocer el estado del océano, las cuales son utilizadas para definir patrones de circulación, variabilidad y procesos oceanográficos a diferentes escalas espacio-temporales, así como también juegan un rol importante en los sistemas de pronósticos operacionales, pues pueden ser utilizadas por modelos como condiciones de borde, calibración y/o evaluación. Esta información es recolectada a través de cruceros de investigación oceanográfica, instrumentos anclados, sumergibles, vehículos remolcados, flotadores y boyas derivadoras. Esta información es limitada en lugares remotos y/o con topografía compleja debido a los altos costos y problemas logísticos asociados a su obtención.

En el Instituto de Fomento Pesquero existe un constante esfuerzo en adquirir información observacional del océano, realizando campañas de mediciones de forma

periódica en el marco de diferentes proyectos desarrollados por el instituto. Desde la implementación del pronóstico operacional en 2017 hasta 2020 se desarrollaron campañas estacionales de mediciones puntuales dentro de los mares interiores de la región de Los Lagos y Aysén las cuales permitieron evaluar en la etapa anterior la capacidad del modelo en reproducir la estacionalidad de temperatura y salinidad en la columna de agua.

Por otro lado, los productos satelitales nos entregan información continua sobre las condiciones superficiales del océano. Por lo general, cubren todo el planeta con una resolución espacial que depende de cada producto. La información satelital procesada se construye a partir de una combinación de fuentes observacionales y sensores instalados en los satélites que miden la radiación electromagnética reflejada o emitida por la superficie del océano. En la Patagonia Chilena, la cobertura nubosa es una problemática para la construcción de información satelital, ya que limitan el porcentaje de información disponible en algunos instantes de tiempo y/o regiones. A su vez, los patrones espacio-temporales de los mares interiores y zonas costeras pueden ser afectados si la resolución del satélite es demasiado gruesa. Sin embargo, nos entregan información significativa que nos permite establecer una referencia de los procesos que gobiernan el dominio de estudio y llevar una continua verificación en el tiempo de las variables pronosticadas por el sistema de pronósticos operacional MOSA-CROCO.

Utilizando estas fuentes de información históricas se evalúa el desempeño del modelo operacional. Para el caso de la temperatura superficial del mar (TSM) se hace uso principalmente de dos fuentes: *VIIRS-SNNP* y *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*. *VIIRS – SNNP* es un producto satelital que corresponde a promedios mensuales desde 2012 hasta el presente y cuenta con una resolución espacial aproximada de 4 km. La información se encuentra disponible en <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/directaccess/VIIRS-SNPP/Mapped/Monthly/4km/sst/>. Para obtener una evaluación entre MOSA-CROCO y las imágenes satelitales de *VIIRS-SNNP* se llevó la información a la resolución de MOSA-CROCO (~1 km) a través de una interpolación lineal, cuidando que no exista inconsistencia con las zonas de tierra/agua después de aplicar este procedimiento.

Por otro lado, para visualizar y monitorear el desempeño diario de la temperatura superficial del mar (TSM) en todo el dominio de MOSA-CROCO, se utilizan los datos diarios de la fuente satelital *Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)*. Sistema construido por una combinación de información de diversas plataformas (océano y satelitales) con el fin de obtener la mejor interpolación posible a una resolución de 0.25°. Mediante la metodología *Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST)* desarrollada por la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica De Estados Unidos (NOAA). La fuente satelital está disponible en <https://www.ncei.noaa.gov/data/sea-surface-temperature-optimum-interpolation/>.

En el caso de la salinidad superficial del mar se ha utilizado el producto grillado mensual *Soil Moisture Active Passive* (SMAP). Los archivos de datos SMAP corresponden a promedios mensuales y están disponibles desde el 1 de abril de 2015 hasta la fecha, con una extensión global y una resolución espacial de 0.25°. Sin embargo no cubren la zona del mar interior de Chiloé-Aysén, por lo que el análisis queda acotado a la región de mar abierto del dominio. La base de datos se encuentra disponible en <http://www.remss.com/missions/smap/>.

Para complementar el análisis se integró una boya oceanográfica ubicada en el seno de Reloncaví (41°38',183 Sur, 72°50',069 Oeste) que se encuentra a cargo del Centro i~mar de la Universidad de los Lagos, Puerto Montt. Los datos cuentan con información de variables meteorológicas y oceanográficas, tales como salinidad y temperatura superficial, entre otras. La información se transmite cada 1 hora y está disponible desde noviembre 2018 hasta agosto 2020 en el caso de los parámetros oceanográficos. La información se puede descargar directamente desde la página web del Centro COPAS Sur-Austral de la Universidad de Concepción, <http://www.cdom.cl/estaciones.php?estacion=RLCV&seccion=Oceano>.

Para evaluar el desempeño de las corrientes superficiales pronosticadas por MOSA se utilizó el producto *C3S altimeter sea level* <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/satellite-sea-level-global?tab=overview>. Este conjunto de datos incluye estimaciones de anomalías del nivel del mar junto con las correspondientes velocidades geostróficas. El producto presenta estimaciones globales diarias para una grilla cuadrículada de 0.25° x 0.25° de anomalías del nivel del mar basadas en mediciones de altimetría satelital. Actualmente está disponible desde 1993 hasta junio de 2020. Se calcularon promedios estacionales y posteriormente se interpoló a la grilla MOSA.

Adicionalmente se cuenta con datos de correntometría euleriana en la columna de agua a través de un anclaje ADCP realizado entre agosto de 2018 y marzo de 2019 instalado en canal Moraleda (-73.516° W, -44.666° S), el instrumento fue anclado a una profundidad de 70 m y registró información horaria de la velocidad de corriente, que posteriormente fue llevada a promedios diarios.

El resumen de las fuentes de información utilizadas para la evaluación se muestran en la Tabla 1. El desempeño del modelo operacional fue evaluado mediante una validación espacio-temporal de las variables pronosticadas entre 2017 y 2021. Las herramientas a utilizar constan principalmente de relaciones estadísticas entre bases de datos, las cuales permiten cuantificar la calidad del modelo (detalles de los estadísticos en Anexo D). Los resultados preliminares se presentan esquemáticamente mediante mapas y series de tiempo permitiendo una interpretación intuitiva. Las salidas del modelo operacional junto con

información de las principales variables pronosticadas se encuentran disponibles en el portal web del proyecto CHONOS (<http://chonos.ifop.cl>).

Tabla 1: Fuentes de información utilizadas para la validación del modelo operacional MOSA-CROCO.

Fuente	Variables	Resolución espacial	Resolución temporal	Periodo disponible
ADCP Corrientes	U,V	Columna de agua	Horaria	2018 – 2019
Boya Reloncaví Centro i-Mar	TSM, SSM	Puntual	Horaria	2017 – Ago 2020
AVHRR	TSM	0.25° x 0.25°	Diaria	1981 – Presente
VIIRS-SNPP	TSM	4 km	Mensual	2012 – Presente
SMAP	SSM	0.25° x 0.25°	Mensual	2015 – Presente
C3S	U, V (geostroficas)	0.25° x 0.25°	Diaria	1993 – 2020

3.2 Metodología objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional MOSA-WRF con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

El desempeño de MOSA-WRF fue evaluado utilizando las estaciones meteorológicas de Cucao y Melinka, dejando fuera al resto de estaciones que componen la red de monitoreo, ya que estas últimas experimentaron interrupciones en sus registros, principalmente por falta de mantenimiento. Este debido a las restricciones de movilidad implementadas producto de la pandemia de Covid-19. Sin embargo, durante los últimos meses se ha comenzado a retomar esta tarea, planificando la mantención y relocalización de algunos de estos equipos. Las variables propuestas para este análisis se basaron en la influencia que estas pudieran tener dentro del sistema hidrodinámico, recordando que MOSA-WRF juega un papel fundamental dentro de los forzantes de MOSA-CROCO. Estas variables fueron temperatura del aire a 2 metros, presión atmosférica en superficie, precipitación acumulada y vientos.

Para el caso de la temperatura, se compararon los promedios diarios calculando su diferencia, determinando si el modelo está subestimando (valores positivos) o sobrestimando (valores negativos) las observaciones, además del coeficiente de correlación de Pearson, este último estadístico también fue aplicado para la presión atmosférica. Por otro lado se compararon los valores acumulados mensuales de precipitación y finalmente se utilizó la Transformada de Wavelet (Torrence & Compo, 1998) sobre los vientos a 10 m usando el parámetro de “Morlet”. Esta herramienta matemática nos permite analizar la

evolución de periodicidades instantáneas tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia. La Transformada de Wavelet (TW) es particularmente útil para el análisis de señales no periódicas, ruidosas, intermitentes y transitorias. Su funcionamiento se basa en realizar un filtrado de la señal en el dominio del tiempo mediante filtros paso bajos y paso altos, logrando con esto la eliminación de ciertas componentes de alta o baja frecuencia de la señal y este proceso se repite, para las señales resultantes del proceso de filtrado anterior.

Para el caso de los vientos, se utilizó el vector complejo del viento ($U+Vi$), para comparar las salidas del modelo con los datos registrados, En primer lugar, fue necesario realizar un procesamiento de los datos observados, descomponiendo la dirección e intensidad del viento en componente zonal (U) y meridional (V) mediante la siguiente ecuación:

$$U = M \operatorname{sen}(\varphi + 180) \quad (1)$$

$$V = M \operatorname{cos}(\varphi + 180) \quad (2)$$

donde M y φ , corresponden a la magnitud y dirección del viento respectivamente. Fue necesario sumar 180° a la dirección del viento, ya que las estaciones están configuradas en convención meteorológica (dirección de donde vienen los vientos), a diferencia de las salidas del modelo que entrega los vientos en convención oceanográfica, es decir la dirección hacia donde los vientos se dirigen.

Los datos instantáneos de las estaciones meteorológicas fueron extraídos para cada hora, con el fin de facilitar la comparación con el modelo. El periodo de evaluación se estableció entre el 1 de agosto del 2018 y el 1 de agosto del 2021, comprendiendo 3 años de información. Para más información respecto a las estaciones restantes, se sugiere revisar los informes de las etapas V y VI de este mismo proyecto.

3.3 Metodología objetivo específico 3: Implementar un modelo biogeoquímico climatológico para las regiones de Los Lagos y Aysén.

El objetivo de esta actividad es poder contar en un futuro con un modelo biogeoquímico regional de baja resolución para comprender los efectos de la eutrofización costera en la dinámica de los ecosistemas marinos. A su vez, se busca que sea un modelo contingente que sirva como alerta temprana ante emergencias sanitarias como zonas anóxicas o floraciones de algas nocivas.

En las etapas V y VI de este proyecto se realizó un diagnóstico del modelo biogeoquímico más simple que se encuentra incorporado en CROCO, un modelo basado en

nutrientes, fitoplancton, zooplancton y detritus (NPZD). Además del modelo NPZD, CROCO cuenta con el modelo biogeoquímico *Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystems Studies* (PISCES, Aumont et al., 2015), ampliamente utilizado por la comunidad científica. PISCES es un modelo con 24 variables de estado que simula el ciclo del carbono, oxígeno y de los principales nutrientes que controlan el crecimiento del fitoplancton (PO_4^{3-} , NO_3^- , NH_4^+ , Si y Fe). A su vez, tiene dos tipos de fitoplancton (diatomeas y nanofitoplancton), dos clases de zooplancton (micro y mesozooplancton) y tres clases de variables no vivas (materia orgánica disuelta y materia orgánica particulada pequeña y grande). Mayores detalles de ambos módulos biogeoquímicos pueden encontrarse en el Anexo C.

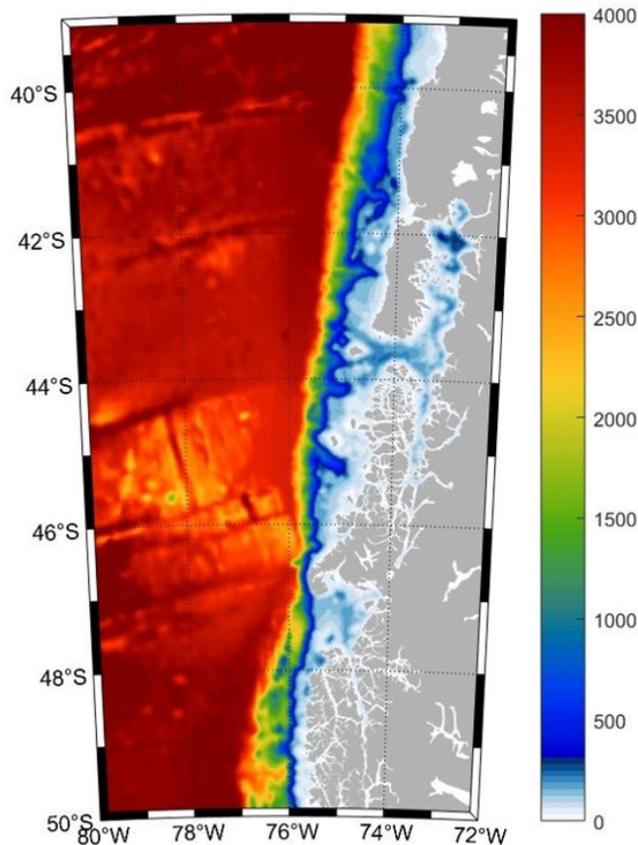


Figura 2: Dominio y batimetría del modelo biogeoquímico.

El dominio del modelo tiene una grilla regional que abarca desde la región de los Ríos hasta parte de la región de Magallanes (39 a 50 °S) con una resolución de ~3 km (Fig. 2). La batimetría fue construida a partir de datos batimétricos del producto global *General Bathymetric Chart of the Oceans* (GEBCO) para el océano abierto, complementada con datos batimétricos de cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) para la zona de fiordos y canales.

Las condiciones de borde de salinidad y temperatura del modelo fueron obtenidas de los promedios mensuales del producto Mercator-Ocean del año 2018. Las condiciones de marea fueron calculadas del producto TPXO7 (Egbert & Erofeeva, 2002). Los flujos de calor fueron obtenidos desde climatología mensual del producto *Comprehensive Ocean-Atmosphere Data Set* (COADS, Da Silva, 1994) y para las componentes del viento se utilizó una climatología diaria proveniente del producto satelital de la NASA *Quick Scatterometer* (QuikSCAT).

Para las condiciones iniciales y de borde de oxígeno y nutrientes en ambos modelos, se utilizaron interpolaciones de datos climatológicos del World Ocean Atlas 2009 (WOA, Levitus et al., 2010). Para las condiciones iniciales y de borde de clorofila se utilizó la climatología estacional del sensor *Sea-viewing Wide Field-of-view* (SeaWiFS), calculado a partir de información entre los años 1997 y 2008 (Hooker & McClain, 2000). Los datos de fitoplancton y zooplancton utilizados fueron derivados desde los datos interpolados de clorofila utilizando una relación de 0.5 y 0.2 para el fitoplancton y zooplancton, respectivamente.

En esta etapa evaluamos la temperatura y oxígeno disuelto de los resultados del año 10 de los modelos NPDZ y PISCES con el anclaje ubicado en la boca del Guafo (-73.758 °O; -43.589 °S), el cual registró información desde agosto del 2018 a febrero del 2020 a 20, 70 y 105 m de profundidad. Estos datos fueron filtrados con un filtro Lanczos para posteriormente calcular el promedio mensual y la desviación estándar. En cuanto a los datos del modelo se realizó un promedio zonal alrededor del punto de medición de un radio de 3 km (1 punto de grilla).

Además, evaluamos el patrón espacial superficial de temperatura, salinidad y clorofila de las estaciones verano (diciembre, enero y febrero), otoño (marzo, abril y mayo), invierno (junio, julio y agosto) y primavera (septiembre, octubre y noviembre). Para la temperatura superficial del mar se calculó el promedio estacional a partir de datos mensuales del radiómetro *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) de 1 km de resolución entre 1998 a 2010. En cuanto a la salinidad, se promediaron los datos mensuales del radiómetro *Soil Moisture Active Passive* (SMAP) de 36 km entre 2015 a 2021. Finalmente, para la clorofila se utilizaron datos del sensor *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) de 4 km de resolución, estos resultados fueron graficados con función logarítmica.

Por otra parte, con el modelo PISCES se realizaron dos experimentos de sensibilidad. Cada experimento fue diseñado para conocer la respuesta del modelo a diversas modificaciones. Estos experimentos corresponden a 1 año de simulación con el modelo ya

estabilizado numéricamente. En detalle corresponden al segundo semestre del año 8 y el primer semestre del año 9. Cada experimento se detalla a continuación.

Experimento S01

A través de este experimento, se modificaron parámetros del modelo PISCES. Los parámetros se modificaron con el fin de aumentar la concentración de clorofila y nitrato y disminuir la concentración de oxígeno. Los parámetros modificados se encuentran presentes en las ecuaciones de nanofitoplancton, diatomeas, microzooplancton, mesozooplancton, nitrato y oxígeno (Aumont et al., 2015). Algunos de estos parámetros son: máxima tasa de grazing (grazrat, grazrat2), excreción de fitoplancton (excret, excret2), mortalidad cuadrática de fitoplancton (wchl, wchld), mortalidad de fitoplancton (mprat, mprat2), tasa de nitrificación (nitrif), mortalidad de zooplancton (mzrat, mzrat2), tasa de remineralización de carbono orgánico disuelto (xremik) y tasa de remineralización de carbono orgánico particulado. Los valores usados en la simulación normal y en este experimento están resumidos en la Tabla 2.

Tabla 2: Parámetros y porcentaje de modificación de los parámetros en el experimento de sensibilidad de PISCES con relación al valor del parámetro original.

	Parámetro	Valor actual	Valor experimento	Porcentaje modificación
grazrat	Tasa máxima de pastoreo	4	3	-25%
grazrat2	Tasa máxima de pastoreo	0.7	0.525	-25%
excret	Tasa de exudación del fitoplancton	0.1	0.05	-50%
excret2	Tasa de exudación de diatomeas	0.1	0.05	-50%
wchl	Mortalidad cuadrática mínima del fitoplancton	0.01	0.0075	-25%
wchld	Mortalidad cuadrática máxima de diatomeas	0.02	0.015	-25%
mprat	Tasa de mortalidad del fitoplancton	0.03	0.015	-50%
mprat2	Tasa de mortalidad del fitoplancton	0.03	0.015	-50%
λ nitrif	Tasa de máxima nitrificación	0.025	0.05	100%

xremik	Tasa de remineralización de carbono orgánico disuelto	0.153	0.306	100%
xremip	Tasa de degradación de carbono orgánico particulado	1.2	0.24	-80%
mzrat	Mortalidad de zooplancton	0.004	0.006	50%
mzrat2	Mortalidad de zooplancton	0.012	0.024	100%

Experimento S02

Mediante este experimento se disminuyó a la mitad la concentración de oxígeno en la frontera norte, con el objetivo de disminuir su concentración hacia la zona sur del área de estudio ya que los resultados de la simulación hasta el momento, habían registrado altas concentraciones de oxígeno en comparación a los datos *in situ*.

3.4 Metodología objetivo específico 4: Diagnosticar un modelo de pronóstico operacional para la región de Magallanes.

En la etapa anterior del proyecto (etapa VI) trabajamos en la construcción de un modelo regional para la región de Magallanes. En este modelo se evaluaron los posibles forzantes y condiciones de borde para la zona de estudio, se realizó una estimación de los tiempos de computo y finalmente se realizó una evaluación de los resultados simulados con la información oceanográfica disponible. Durante la etapa actual del proyecto se continuará con la evaluación del modelo con el fin de diagnosticar la factibilidad técnica de un modelo totalmente operacional para la región de Magallanes.

Este diagnostico consiste en identificar las posibles brechas y limitaciones que podría presentar la puesta en marcha de este sistema, tomando en cuenta la cantidad de información *in situ* disponible, la capacidad de cálculo requerido y el grado de error o incertezas asociados a los pronósticos propiamente tal. A diferencia de las regiones de Los Lagos y de Aysén, en la región de Magallanes existe una mayor brecha de conocimiento sobre los procesos dinámicos, así como también existe una menor disponibilidad de datos de terreno. No obstante, el Instituto de Fomento Pesquero cuenta con algunos datos históricos de variables oceanográficas en la zona. Lamentablemente, debido a la crisis sanitaria producto de la pandemia por Covid, las campañas oceanográficas en la región han debido ser postergadas, por lo cual se utilizaremos datos satelitales de temperatura superficial del mar (TSM) para evaluar condiciones iniciales de simulaciones de pronósticos.

Debido a la extensión geográfica de la región se optó por la implementación de un modelo que cubra parcialmente la región. Este dominio abarca por el norte desde el estrecho Nelson (~51 °S), hasta el sur del archipiélago de Cabo de Hornos (~57 °S). A su vez, también contiene las salidas occidentales y orientales del estrecho de Magallanes, por lo que se debe abarcar condiciones de borde para los océanos Pacífico, Atlántico y Antártico, lo que implica un modelo con bordes abierto en los 4 puntos cardinales (Fig. 3a). La extensión del dominio contiene zonas de interés para futuros modelos anidados de mayor resolución espacial como el seno Otway, seno Skyring (Fig. 3b), Golfo Almirante Montt (Fig. 3c), estrecho de Magallanes, canal Beagle e Isla Navarino.

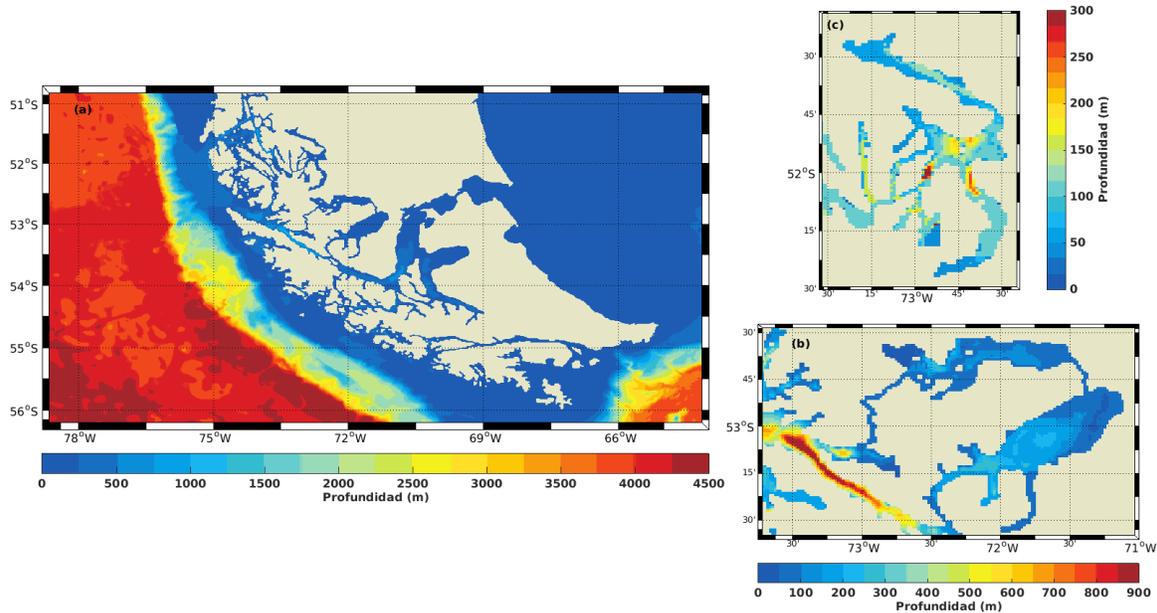


Figura 3: Dominio y batimetría utilizada para construir el modelo MOSAMAG.

Se ha dejado fuera la zona del Canal Messier, lo que implica una reducción considerable de elementos y complejidad al modelo. Este dominio (MOSAMAG en adelante) tiene una resolución horizontal que varía entre 1.1 km y 1.7 km. Si bien los elementos del modelo son rectangulares, esta variabilidad responde a la variación latitudinal de los paralelos, la cual se acentúa fuertemente en esta parte del hemisferio. La configuración de la máscara define el número de elementos horizontales que tendrá el modelo, donde solo se utilizan los puntos de agua para los cálculos. Las dimensiones horizontales de MOSAMAG son 814 elementos de longitud y 520 elementos de latitud. Cabe destacar que esta grilla permite describir las entradas de los grandes cuerpos de agua interiores presentes en la zona. La resolución mínima del modelo es de 1.1 km, por lo que los canales con angosturas menores a 1 km tuvieron que ser sobre-dimensionadas para poder ser representadas en el modelo.

En relación a la batimetría, inicialmente se generó una grilla con la fuente batimétrica Etopo 2, que es la misma que utiliza CROCO para la generación de grillas de manera predeterminada. Sin embargo, estos valores en la mayoría de los casos son altamente subestimados en las zonas costeras (solo en algunas excepciones son sobrestimados), conduciendo a perfiles poco realistas para la zona. De este modo, reemplazamos la batimetría por datos de la base mundial de datos batimétricos GEBCO_2020 (<https://www.gebco.net>) para la zona más oceánica y datos de sondas de las cartas náuticas del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada (SHOA) para las zonas interiores. Este último paso se realizó de forma manual, modificando píxel a píxel lo cual conlleva un trabajo largo y sinuoso que ha tomado gran parte del desarrollo del modelo. Notar que existen grandes zonas donde se ha debido suavizar fuertemente los perfiles batimétricos para obtener gradientes de profundidad pequeños y evitar errores numéricos. MOSAMAG usa 42 niveles verticales del tipo sigma, los cuales siguen la batimetría del dominio en base a parámetros lineales. Para la distribución de los niveles verticales, se usaron parámetros que buscan mantener una mayor resolución en superficie, y por ende una menor resolución en capas intermedias y profundas. La razón de esta configuración es que en capas superficiales y subsuperficiales ocurren los procesos de mezcla e intercambio más relevantes de la circulación. Un resumen de los parámetros del dominio son presentados en la Tabla 3.

Tabla 3: Parámetros numéricos y características de la grilla utilizada en el modelo MOSAMAG.

Dimensiones		Batimetría		Niveles verticales	
LLm	813	Profundidad máxima	5000	Theta_s	7
MMm	518	Profundidad costa	10	Theta_b	2.5
Mínima resolución	1.12 km	Profundidad mínima	10	hc	20
Máxima resolución	1.27 km	Gradiente máximo	0.33	Tipo transformada	2
Niveles verticales	42	# filtro profundo	1		
		# filtro hanning	2		

La estabilidad de esta grilla y la capacidad de reproducir constituyentes armónicos de marea se evaluó a través de una simulación en modo barotrópico (simulación 2-D forzado solo por mareas). Esta simulación utilizó los 10 principales constituyentes armónicos de

marea obtenidas del modelo global TPX07 (Egbert & Erofeeva, 2002). El periodo de simulación fue entre el 1 de enero y el 31 de marzo del 2020. Las salidas fueron contrastadas con series del nivel del mar de la red de mareógrafos del SHOA en las estaciones de Punta Arenas, San Gregorio, Caleta Meteoro y Puerto Williams (www.ioc-sealevelmonitoring.org/). Los datos de los mareógrafos fueron llevados a valores horarios (tomando el valor de la hora 00:00) para ser homologados con las salidas horarias obtenidas de MOSAMAG.

La condición inicial y las condiciones de borde utilizadas para la temperatura, salinidad y corrientes fueron obtenidas del modelo operacional global Mercator-Ocean (<https://marine.copernicus.eu>). Específicamente se utilizó el producto *Global Analysis Forecast Physics* 001-024 de una resolución espacial de $0.083^\circ \times 0.083^\circ$ (~ 9.5 km), y 50 niveles verticales entre 0 y 5500 m, el cual genera diariamente salinidad, temperatura del mar, corrientes, nivel del mar, entre otras variables con un pronóstico a 10 días. Para el caso de la condición inicial, MOSAMAG utilizó la condición pronosticada el día anterior, de este modo logramos conservar la estratificación obtenida con las descargas de ríos persistentes sobre el dominio. Solo para el primer día de pronóstico se utilizó una condición inicial interpolada desde Mercator-Ocean.

El campo de temperatura superficial del mar (TSM) fue evaluado con imágenes satelitales del producto *VIIRS-SNPP* (<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/VIIRS-SNPP/>), usando promedios mensuales del año 2019..A su vez, se usaron datos del producto *OISST-AVHRR* (<https://www.ncei.noaa.gov/data/sea-surface-temperature-optimum-interpolation/>) y datos mensuales de MODIS (<https://oceancolor.gsfc.nasa.gov/>) para evaluar una condición inicial usada en algunas simulaciones de prueba durante julio de 2020. Del mismo modo, las condiciones de borde de Mercator-Ocean fueron evaluadas en el dominio de MOSAMAG, junto con su variabilidad mensual a lo largo del año 2019.

Para el caso de la superficie libre del agua se necesita información atmosférica como el esfuerzo del viento, la radiación solar, flujos de calor de onda larga y onda corta, precipitación, y humedad. 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 y los flujos de calor.

Se usaron datos del modelo operacional *Global Forecast System (GFS)*, (<https://www.ncei.noaa.gov/products/weather-climate-models/global-forecast>) como condiciones de borde superficiales de flujos de calor, magnitud y dirección del viento. Este producto contiene pronósticos de variables atmosféricas cada 6 horas a una resolución de 0.25° (~25 km), con un horizonte de 10 días. La figura 4 presenta el campo vectorial de

viento y su magnitud cada 6 horas utilizado en el pronóstico de MOSAMAG para el día 21 de agosto del 2021.

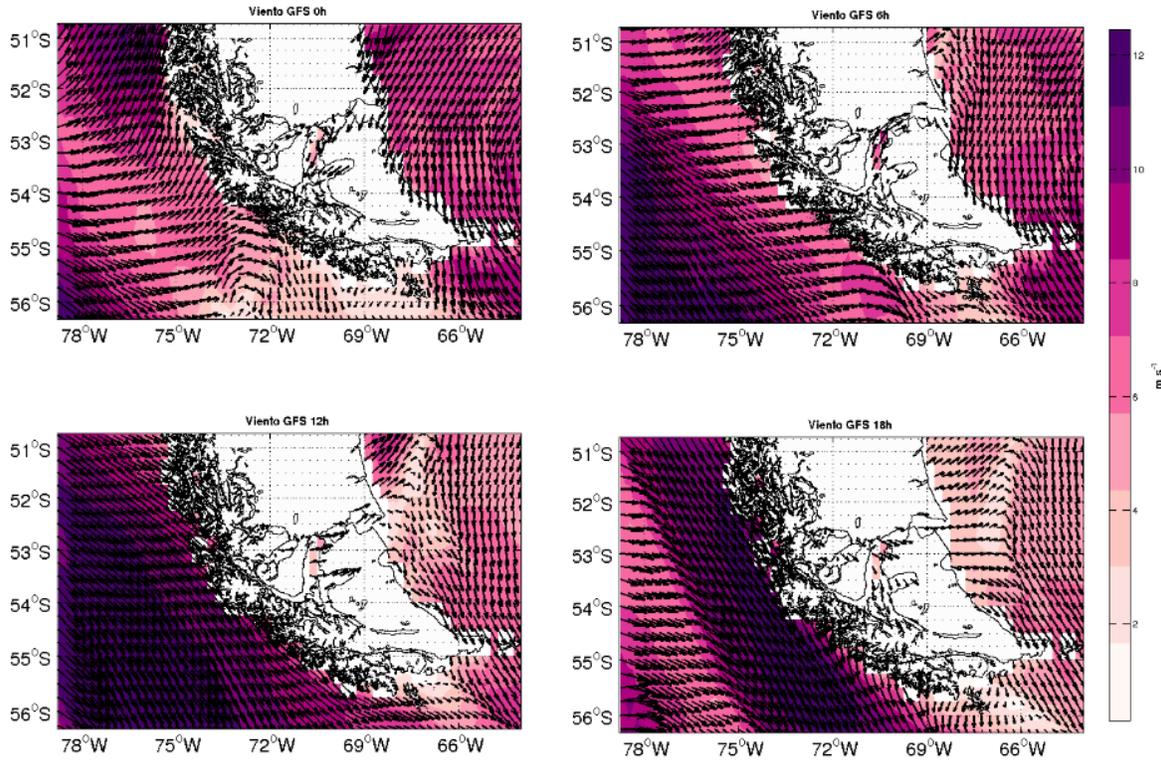


Figura 4: Campo vectorial y magnitud de viento cada 6 horas obtenidos de GFS para un día de pronóstico de MOSAMAG.

Por otra parte, la región costera de Magallanes se denomina como una región de influencia de agua dulce o ROFI (*Region Of Freshwater Influence*). ROFI consiste en una zona estuarina de gran escala, donde predominan flujos de alta boyantes provenientes de agua dulce de deshielo y ríos. El grado de estratificación del sistema (y por ende la circulación a gran escala) estará fuertemente modulado por la presencia de glaciares y campos de hielo. Por esta razón, utilizamos 25 caudales mensuales de descarga de agua dulce obtenidos del modelo de agua dulce FLOW (<http://chonos.ifop.cl/flow/>). FLOW está basada en el modelo hidrológico *Variable Infiltration Capacity* (VIC, Lian et al., 1994; Hamman et al., 2018) que cuenta con caudales diarios y descargas por deshielo de gran parte de las cuencas entre las regiones de Los Lagos y Magallanes durante 1980 y 2018.

La ubicación de las fuentes puntuales junto con sus valores de caudales mensuales utilizadas en el dominio de MOSAMAG se presentan en la figura 5. Notar que para no inducir una distorsión en la figura de las series, el caudal del río Serrano (fuente N°1 en el mapa) en el fiordo Ultima Esperanza dentro del Golfo Almirante Montt (GAM) se presenta por separado. El río Serrano, tiene caudales máximos cercanos a los $800 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, siendo la

mayor fuente de agua dulce ingresada al modelo. La dinámica del GAM es sumamente relevante, puesto que es la zona por donde se drena el sistema de lagos del parque Torres del Paine. Del mismo modo, la información presentada en FLOW indica una alta presencia de caudales menores en la zona, que combinados pueden ser altamente significativos, por lo que estos valores no serán considerados como definitivos entendiendo que podrían estar altamente subestimados. Una vez que MOSAMAG comience una operación regular y continua (ya sea diaria o semanal), las tareas de calibración y evaluación de este deberán poner énfasis en este punto. Sin embargo se debe tener en cuenta que el ingreso de caudales al modelo debe ser cauteloso y debe resguardar la estabilidad, puesto que el ingreso del volumen extra de agua presiona al modelo a mantener su conservación de masa en una zona de estrechos canales, lo que puede dar lugar a errores numéricos e inestabilidad numérica.

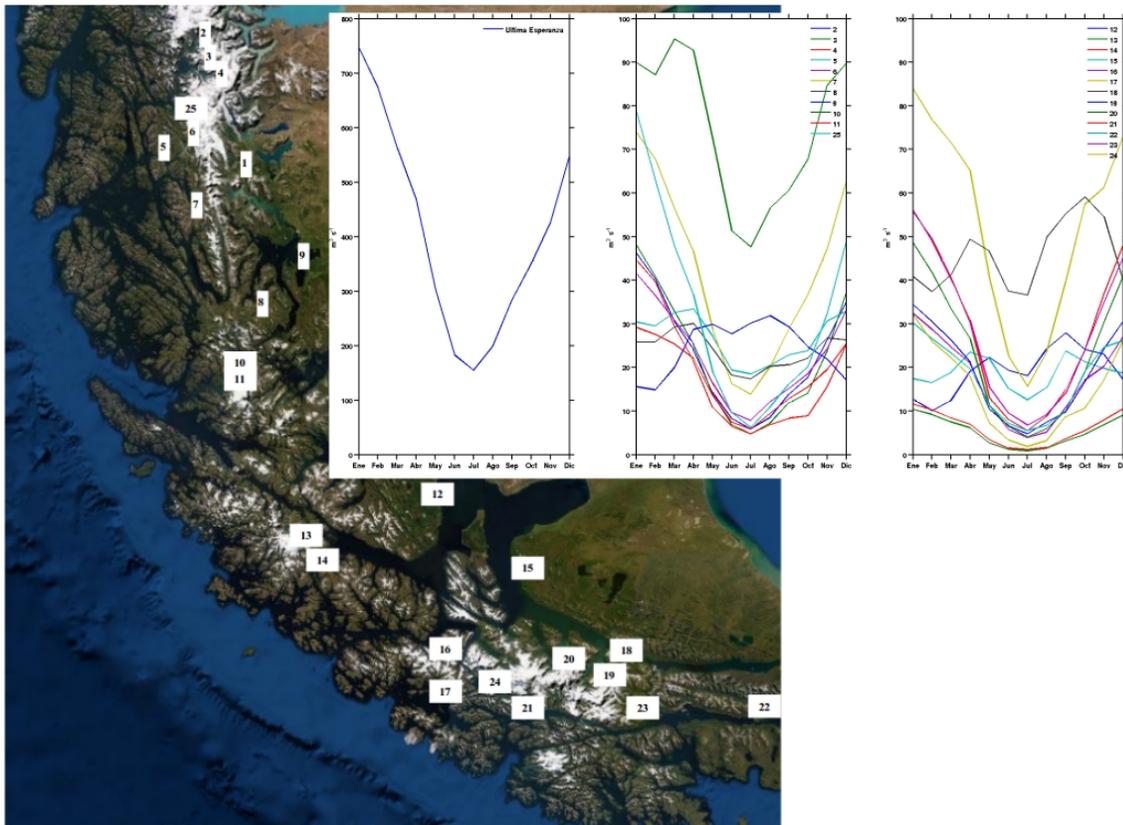


Figura 5: Ubicación y series mensuales de caudales de agua dulce en MOSAMAG.

4. GESTIÓN DEL PROYECTO

4.1 Reuniones de coordinación con SUBPESCA

Estas reuniones entre el ejecutor del proyecto (División Investigación en Acuicultura, IFOP) y la contra-parte técnica (Departamento de Acuicultura, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura) tienen como propósito reforzar y conducir el desarrollo del proyecto hacia los temas más relevantes que dieron origen a este estudio, es decir, 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 distintos medios como correo electrónico, telefonía y videoconferencias. La aplicación de esta modalidad de trabajo facilita la posterior colaboración ante requerimientos específicos que se generen en el desarrollo del proyecto.

4.2 Reuniones técnico-académicas

El proyecto contempla una serie de asesorías científicas, talleres cerrados y visitas entre IFOP, el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción y Meteodata. Estas reuniones son de carácter científico y están enfocadas a resolver problemas técnicos de la modelación y la operación del sistema.

Reunión 1

Se realizó una reunión técnica con el asesor técnico Dr. Mark Falvey y Andrés Arriagada en las oficinas de CTPA-Putemún en Castro durante los días 23 y 24 de Enero del 2020. En esta reunión se discutieron aspectos técnicos del portal web oceanográfico CHONOS y sobre las posibles mejoras a incorporar.

Fecha: 23 – 24 Enero, 2020.

Lugar: Centro Putemún, IFOP, Chiloé.

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Milton Salas (IFOP)
3. Elias Pinilla (IFOP)
4. Pablo Reche (IFOP)
5. Cristian Ruiz (IFOP)
6. Gabriel Soto (IFOP)
7. Mark Falvey (Meteodata)
8. Andres Arriagada (Meteodata)

Reunión 2

La colaboradora del proyecto, la Dra. Odette Vergara, visitó el centro Putemún para discutir los resultados preliminares de la modelación biogeoquímica y en asesor en los parámetros a mejorar para una mejor representación de las condiciones ambientales.

Fecha: 28 – 30 Enero, 2020.

Lugar: Centro Putemún, IFOP, Chiloé.

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Valentina Besoain (IFOP)
3. Gabriel Soto (IFOP)
4. Elias Pinilla (IFOP)
5. Odette Vergara (UdeC)

Reunión 3

Se realizó una reunión técnica con el asesor técnico Meteodata y personal de IFOP a través de videoconferencia el día 21 Julio del 2020. En esta reunión se discutieron los desarrollos y avances técnicos del portal web oceanográfico CHONOS.

Fecha: 21 Julio, 2020.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andrés Arriagada (Meteodata)
3. Mark Falvey (Meteodata)
4. Elias Pinilla (IFOP)
5. Gabriel Soto (IFOP)
6. Pedro Valdebenito (IFOP)

Reunión 4

Se realizó una reunión técnica con los asesores técnicos Dr. Andrés Sepúlveda y la Dra. Odette Vergara junto con personal de IFOP a través de videoconferencia el día 7 Agosto del 2020. En esta reunión se discutieron los desarrollos y avances técnicos del modelo biogeoquímico basado en el código PISCES.

Fecha: 7 Agosto, 2020.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andres Sepulveda (DGEO)
3. Odette Vergara (DGEO)
4. Elias Pinilla (IFOP)
5. Gabriel Soto (IFOP)
6. Valentina Besoain (IFOP)

Reunión 5

Se realizó una reunión técnica con el asesores técnico Dr. Andrés Sepúlveda a través de videoconferencia el día 17 de Agosto del 2020. En esta reunión el Dr. Sepúlveda mostró nuevas evaluaciones del modelo PISCES, las cuales fueron sugeridos en la reunión 4 (7 agosto 2020).

Fecha: 17 Agosto, 2020.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andres Sepulveda (DGEO)

Reunión 6

Se realizó una reunión técnica con los asesores técnicos Dr. Andrés Sepúlveda, Dra. Odette Vergara y Dr. Fabian Gomez y el personal de IFOP a través de videoconferencia el día 2 Octubre del 2020. En esta reunión se discutieron avances técnicos de los modelos biogeoquímicos.

Fecha: 2 Octubre, 2020.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andres Sepulveda (DGEO)
3. Odette Vergara (DGEO)
4. Fabian Gomez (UV, NOAA)
5. Elias Pinilla (IFOP)
6. Gabriel Soto (IFOP)
7. Valentina Besoain (IFOP)

Reunión 7

Se realizó una reunión técnica con el asesor técnico Meteodata y personal de IFOP a través de videoconferencia el día 28 de octubre del 2020. En esta reunión se discutieron los desarrollos y avances técnicos del portal web oceanográfico CHONOS.

Fecha: 28 Octubre, 2020.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andrés Arriagada (Meteodata)
3. Mark Falvey (Meteodata)
4. Luis Avello (IFOP)
5. Oliver Venegas (IFOP)
6. Cristian Ruiz (IFOP)
7. Pablo Reche (IFOP)

8. Paula Jarpa (Meteodata)
9. Pedro Valdebenito (IFOP)

Reunión 8

Se realizó una reunión técnica con el asesores técnico Dr. Andrés Sepúlveda a través de videoconferencia el día 16 de diciembre del 2020. En esta reunión el Dr. Sepúlveda mostró resultados de sensibilidad del modelo PISCES.

Fecha: 16 Diciembre, 2020.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andres Sepulveda (DGEO)

Reunión 9

Se realizó una reunión técnica con el asesores técnico Dr. Andrés Sepúlveda a través de videoconferencia el día 11 de Marzo del 2021. En esta reunión el Dr. Sepúlveda mostró las últimas novedades de la plataforma Parti-MOSA, la cual contiene respuesta al medio-ambiente. Parti-MOSA como se explico en la etapa anterior del proyecto, utiliza las salidas del modelo MOSA para realizar dispersión de partículas.

Fecha: 11 Marzo, 2021.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andres Sepulveda (DGEO)

Reunión 10

Se realizó una reunión técnica con el asesor técnico Meteodata y personal de IFOP a través de videoconferencia el día 23 de marzo del 2021. En esta reunión se discutieron los desarrollos y avances técnicos del portal web oceanográfico CHONOS.

Fecha: 23 Marzo, 2021.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andrés Arriagada (Meteodata)
3. Mark Falvey (Meteodata)
4. Luis Avello (IFOP)
5. Oliver Venegas (IFOP)
6. Cristian Ruiz (IFOP)
7. Pablo Reche (IFOP)

Reunión 11

Se realizó una reunión técnica con el asesores técnico Dr. Andrés Sepúlveda a través de videoconferencia el día 12 de Mayo del 2021. En esta reunión el Dr. Sepúlveda mostró los avances de modelación de oleaje para el mar interior de Chiloé.

Fecha: 12 Mayo, 2021.

Lugar: Google Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andres Sepulveda (DGEO)
3. Elias Pinilla (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)

4.3 Talleres de difusión y/o capacitación

El proyecto contempla la realización de talleres de difusión sobre el estado de avance del modelo operacional MOSA, así como también de sus productos asociados. También se incluyen capacitaciones de la plataforma web CHONOS. Estos talleres pueden ser abierto a la comunidad o cerrados a la discusión académica exclusivamente con diversos especialistas en modelación y oceanografía en Chile.

Taller difusión 1

El Laboratorio Nacional de Computación de Alto Rendimiento (NLHPC) realizó el Primer Encuentro de Científicos usuarios de HPC de Chile, con el fin de fomentar la colaboración de la comunidad científica del país en torno a proyectos multi e interdisciplinarios. En este seminario participó el Dr. Osvaldo Artal, mostró un resumen de los desarrollos realizados por IFOP en materia de modelación oceanográfica y atmosférica.

Fecha: 14 de octubre, 2020.

Lugar: Zoom

Expositor IFOP: Osvaldo Artal

Taller difusión 2

El II Taller de Sistemas de Observación del Océano fue realizado durante los días 26 y 27 de Noviembre del 2020. Este taller fue organizado por el centro I-Mar de la Universidad de Los Lagos y el Comité Oceanográfico Nacional CONA y se realizó de manera virtual. En este taller participó el Dr. Osvaldo Artal con una presentación titulada: “Sistema de observación y pronóstico oceanográfico para la zona sur-austral de Chile, CHONOS”.

Fecha: 26 y 27 de noviembre, 2020.

Lugar: Zoom

Expositor IFOP: Osvaldo Artal

Taller difusión 3

El jueves 4 de febrero del 2021 se realizó un taller de difusión con los principales resultados de los proyectos de oceanografía de la División de Acuicultura. El taller se efectuó de manera telemática a través de la plataforma Google-Meet con el nombre “Oceanografía y Modelación Numérica en Fiordos y Canales de la Patagonia”. En el taller se presentaron las perspectivas de los modelos operacionales en la zona Sur-Austral de Chile, así como los avances en modelación biogeoquímica y en sistemas de monitoreo en línea.

Fecha: 4 de febrero, 2021.

Lugar: Google-Meet

Expositores:

1. Leonardo Guzman (IFOP)
2. Susana Giglio (Subpesca)
3. Heraldo Contreras (IFOP)
4. Cristian Ruiz (IFOP)
5. Valentina Besoain (IFOP)
6. Osvaldo Artal (IFOP)

Taller capacitación 1

El martes 20 de abril del 2021 se realizó un taller de capacitación en el uso de las diferentes herramientas alojadas en el sitio web CHONOS. Esta capacitación fue solicitada por Carlos Navarro, Jefe (S) departamento salud animal del Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura. En el taller se presentaron en detalle el funcionamiento, alcances y limitantes de todas las herramientas disponibles. Los expositores fueron Osvaldo Artal y Pablo Reche de IFOP-Putemún.

Fecha: 20 de abril, 2021.

Lugar: Google-Meet

Expositores:

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Pablo Reche (IFOP)
3. Elias Pinilla (IFOP)
4. Carlos Navarro (Sernapesca)
5. Personal técnico de Sernapesca.

4.4 Compra y mantenimiento de equipo:

En este proyecto se ha buscado contar con alternativas para montar puntos de observación en línea para conocer el grado de error que tiene el modelo operacional MOSA u otros modelos numéricos derivados de este en la zona. A su vez, se busca que el sistema operacional sea estable en el tiempo. En esta búsqueda se han realizado las siguientes actividades al respecto:

1. **Mantenimiento e instalación de estaciones meteorológicas:** Desde la etapa V de este proyecto IFOP ha adquirido estaciones meteorológicas con la capacidad de transmisión de información en tiempo real. A la fecha se cuentan con 12 estaciones meteorológicas, de las cuales 5 estaciones se encuentran transmitiendo totalmente operativas, 2 estaciones están listas para ser instaladas y 5 estaciones presentan fallas, por lo que deben ser enviadas a servicio técnico.
2. **Servidor de almacenamiento:** Durante la etapa anterior de este proyecto se adquirió un servidor de almacenamiento (Anexo D). Durante la ejecución de este proyecto se lograron respaldar todos los años de simulación del modelo operacional MOSA, tanto las salidas del modelo CROCO (antes ROMS) y WRF. Además se adquirieron 6 nuevos discos duros de 8 TB para ser conectados en configuración RAID 1, es decir, como sistema espejo de respaldo.
3. **Ampliación Sistema de Computo:** Debido a la creciente demanda y la evolución natural del sistema integrado de información es necesario aumentar el poder computacional existente. Actualmente se está cotizando estas alternativas para ser acopladas al servidor MOSA ubicado en las instalaciones del IFOP en Viña del Mar.
4. **Continuación Convenio Colaboración FCFM – NLHPC – IFOP.** El objetivo del presente convenio fue establecer una relación de colaboración mutua duradera entre las partes, en el campo de la modelación oceanográfica y atmosférica de alta resolución, basada en la igualdad, en la reciprocidad y el beneficio mutuo. IFOP actualmente utiliza a través del acceso remoto, la capacidad de cómputo del súper-computador administrado por el NLHPC para desarrollo numérico.

4.5 Publicaciones científicas.

- Ruiz, C., Artal, O., Pinilla, E., & Sepúlveda, H. H. (2021). Stratification and mixing in the Chilean Inland Sea using an operational model. *Ocean Modelling*, 158, 101750.
- Reche, P., Artal, O., Pinilla, E., Ruiz, C., Venegas, O., Arriagada, A., & Falvey, M. (2021). CHONOS: Oceanographic information website for Chilean Patagonia. *Ocean & Coastal Management*, 208, 105634.

4.6 Carta Gantt del proyecto

El proyecto tiene una duración total de 20 meses, comenzando en enero del 2020 y finalizando en agosto del 2021.

Actividades	E20	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E21	F	M	A	M	J	J	A
1. Evaluación MOSA-ROMS v/s observaciones								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
2. Evaluación MOSA-WRF v/s observaciones								X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
3. Implementación modelo operacional Magallanes	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X				
4. Evaluación modelo Magallanes.											X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
5. Implementación modelo PISCES.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			
6. Evaluación modelos PISCES											X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
7. Taller difusión									X											
8. Reuniones de coordinación								X												X
9. Documento de avance 1									X											
10. Documento de avance 2																X				
11. Informe final																				X

5. RESULTADOS

5.1 Resultados objetivo específico 1: Evaluar el sistema operacional MOSA-CROCO con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

El modelo operacional entrega información de variables como temperatura, salinidad y corrientes en la columna de agua, lamentablemente en la actualidad existe escasa información oceanográfica y nula en tiempo real que permita hacer una completa verificación de estas variables en la columna de agua. Sin embargo dentro de la superficie que integra el dominio MOSA-CROCO existen productos satelitales que, si bien presentan algún rango de incertidumbre, entregan información significativa de la superficie del océano. Estas fuentes de información continua nos han permitido llevar un seguimiento de la habilidad del modelo a lo largo de su periodo de desarrollo, logrando monitorear los principales cambios y evaluar el desempeño espacio-temporal de las variables pronosticadas. En esta etapa, utilizamos los datos grillados de los productos satelitales AVHRR y VIRRS para monitorear la temperatura superficial del mar (TSM), SMAP para la salinidad superficial (SSM) y el producto C3S para el análisis de corrientes geostróficas.

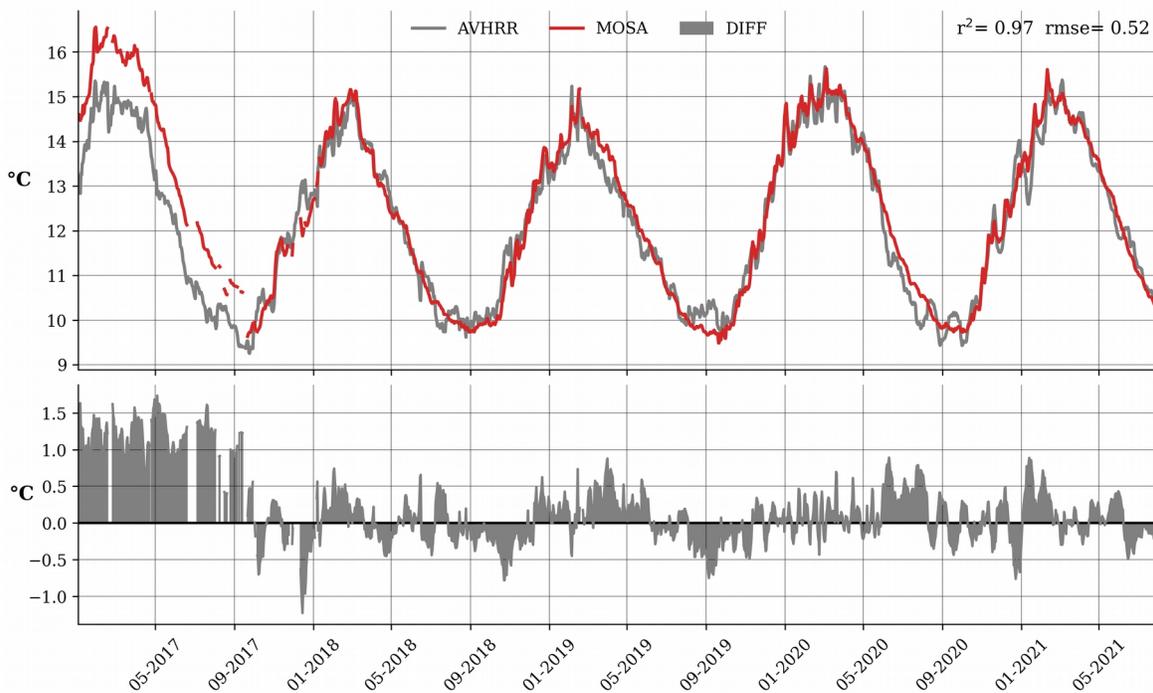


Figura 6: (panel superior) Promedio diario de TSM para MOSA y datos satelitales AVHRR. (panel inferior) Diferencia entre AVHRR y series MOSA durante enero 2017 y julio 2021.

La variación temporal de TSM se ha verificado mediante la comparación del pronóstico con el producto satelital AVHRR. Para ambas bases de datos se calculan los promedios diarios y su diferencia para todo el dominio desde enero de 2017 hasta julio de 2021. Se puede observar que se mantiene un alto ajuste entre ambas series con una correlación que actualmente alcanza 0.97 (R^2) y un error cuadrático medio de 0.52 (rmse), para todo el periodo (Fig. 6). Se observa un mayor ajuste entre las series a partir de septiembre de 2017, disminuyendo el sesgo en aproximadamente 1 °C entre satélite y modelo.

Durante el último año el modelo mantuvo una correlación de 0.99 y un error entorno a 0.3 °C. Si bien se ha logrado mantener una alta relación lineal durante todo el periodo es en la amplitud donde se han notado los mayores cambios, manteniendo un error por debajo de 0.35° desde 2018 (Tabla 4). Esto refleja la estabilidad del sistema operacional y la capacidad del modelo de reproducir de manera óptima la variabilidad estacional de la temperatura superficial, tanto en fase como en amplitud.

Tabla 4: Detalle anual del porcentaje de días del año pronosticados, índice de correlación (r) y raíz del error cuadrático medio (RMSE) para el modelo operacional MOSA-CROCO.

Año de operación	% de días del año pronosticados	r	RMSE
2017	80.27	0.957	1.04
2018	99.17	0.987	0.28
2019	98.35	0.988	0.3
2020	100	0.99	0.32
2021 (a la fecha)	100	0.98	0.29

Por otra parte, se construyeron promedios mensuales con los valores diarios de MOSA-CROCO para comparar con datos mensuales de VIIRS y así determinar cambios en la variabilidad espacial y como es el desempeño del modelo a lo largo de las regiones de Los Lagos y de Aysén. El pronóstico de temperatura superficial se mantiene presentando un alto ajuste, con un mejor desempeño en mar abierto donde se han mantenido correlaciones por sobre 0.9 (Fig. 7a). Como es de esperar, la calidad del pronóstico continúa con una menor habilidad hacia el mar interior de Chiloé-Aysén, debido en parte a la complejidad de simular el sistema por las características conocidas de la zona y a la resolución de las imágenes satelitales que no representan adecuadamente la región. Sin embargo, las correlaciones son suficientemente significativas donde actualmente alcanzan valores entre 0.8 y 0.9, logrando reproducir la variabilidad estacional de la temperatura (Fig. 7a). Por otra parte, el rmse y el sesgo presentan un patrón espacial similar. Por lo general el error se mantiene por debajo de 1 °C en todo el dominio, salvo por algunos máximos locales

presentes en el mar interior de Chiloé-Aysén, particularmente en la zona del canal Moraleda, Isla Tranqui y Seno de Reloncaví, donde se observan valores aproximados de 1.3 °C (Fig. 7b). Mientras que el sesgo alcanza un máximo de ~1 °C en el sector del paso Desertores (Fig. 7c) y valores mínimos casi nulos en mar abierto, que evidencian una mejor calidad del pronóstico en esta parte de la región.

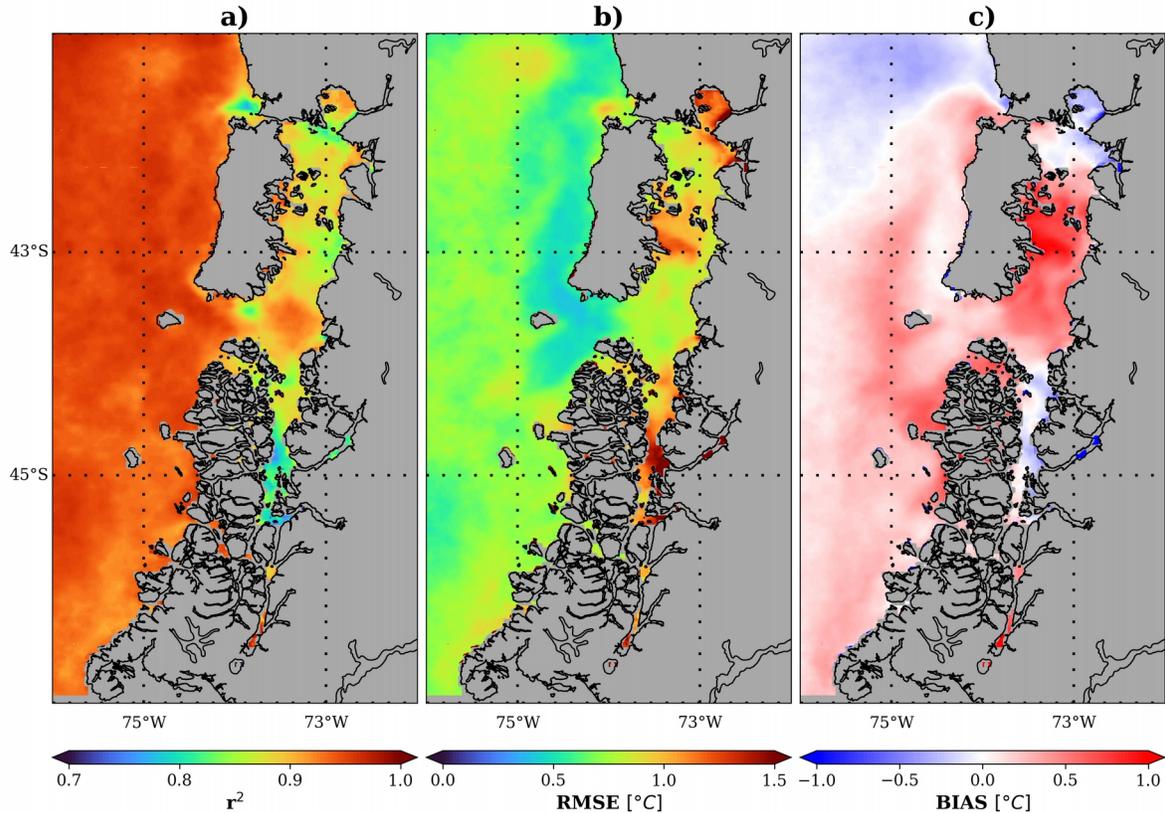


Figura 7: a) Coeficiente de correlación (r), b) Raíz del error cuadrático medio (rmse), c) sesgo (bias) entre promedios mensuales de TSM obtenidos de MOSA-CROCO y VIIRS durante enero 2017 y mayo 2021.

El análisis de la temperatura superficial de MOSA-CROCO fue complementado con información de una serie de tiempo extraída de la boya oceanográfica i~mar. Este instrumento ubicado en el seno de Reloncaví es prácticamente la única fuente de información oceanográfica que ha operado en tiempo real dentro del dominio MOSA. El sistema se mantuvo registrando información de temperatura desde 2018 hasta agosto de 2020 y actualmente se encuentra en mantención de sensores. Esta información puntual permite comparar el pronóstico del modelo a una resolución de escala sinóptica. Para esto se calcularon promedios diarios de temperatura en la boya y se compararon con las simulaciones del punto más cercano extraído del dominio MOSA-CROCO. Se puede observar que durante todo el periodo la temperatura exhibe un alto ajuste con un coeficiente de correlación que alcanza los 0.94 y un error cuadrático medio de 0,88 °C (Fig. 8). Los

estadísticos describen la habilidad del modelo de simular la variabilidad sinóptica de la temperatura en la ubicación de la boya, sin embargo resulta evidente la limitada capacidad para alcanzar las amplitudes térmicas a una resolución diaria, situación que se ve mejorada desde septiembre de 2020, periodo que coincide con la incorporación del nuevo forzante atmosférico.

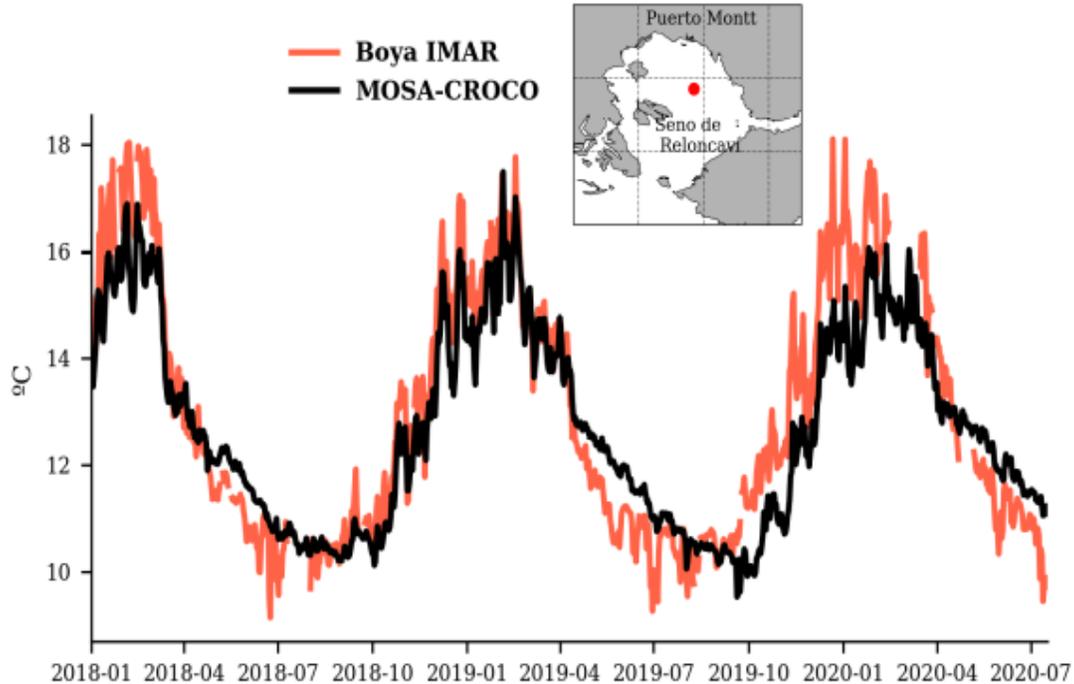


Figura 8: Series de tiempo de temperatura medida por la boya i~mar y su punto más cercano en MOSA-CROCO entre noviembre 2018 y agosto 2020

Por otro lado, la salinidad es una variable particularmente difícil de monitorear por satélites debido a la alta resolución requerida y a la alta frecuencia de nubosidad en algunas zonas. El producto satelital SMAP tiene una resolución espacial de ~ 25 km que no cubre los mares interiores de Chiloé-Aysén lo cual propicia un incremento del error en las zonas más cercanas a la costa. Para determinar la capacidad de MOSA de reproducir de manera óptima la salinidad superficial se ha estado utilizando la base de datos mensual, acotando el análisis a la zona de mar abierto del dominio. Esta información es contrastada con promedios mensuales de SSM para el pronóstico de 1 día de MOSA-CROCO durante enero de 2017 y junio de 2021. Se observa que el mayor error se ha mantenido en el sector oriental del dominio alcanzando valores de ~ 1 PSU, sin embargo en torno a 77°O el error medio ha disminuido aproximadamente 0.1 PSU en relación a los años anteriores (Fig. 9a). El cociente entre la desviación estándar simulada y modelada es ~ 1 en toda la región, lo que se traduce en una capacidad óptima del modelo en reproducir la amplitud de SSM, especialmente en la región costera entre $45 - 46^\circ\text{S}$ (Fig. 9b). Aunque esta información

presenta un alto grado de incertidumbre nos ha permitido obtener una mirada sobre la distribución de salinidad superficial estacional en la zona oceánica del modelo, donde es más complejo tener mediciones en terreno.

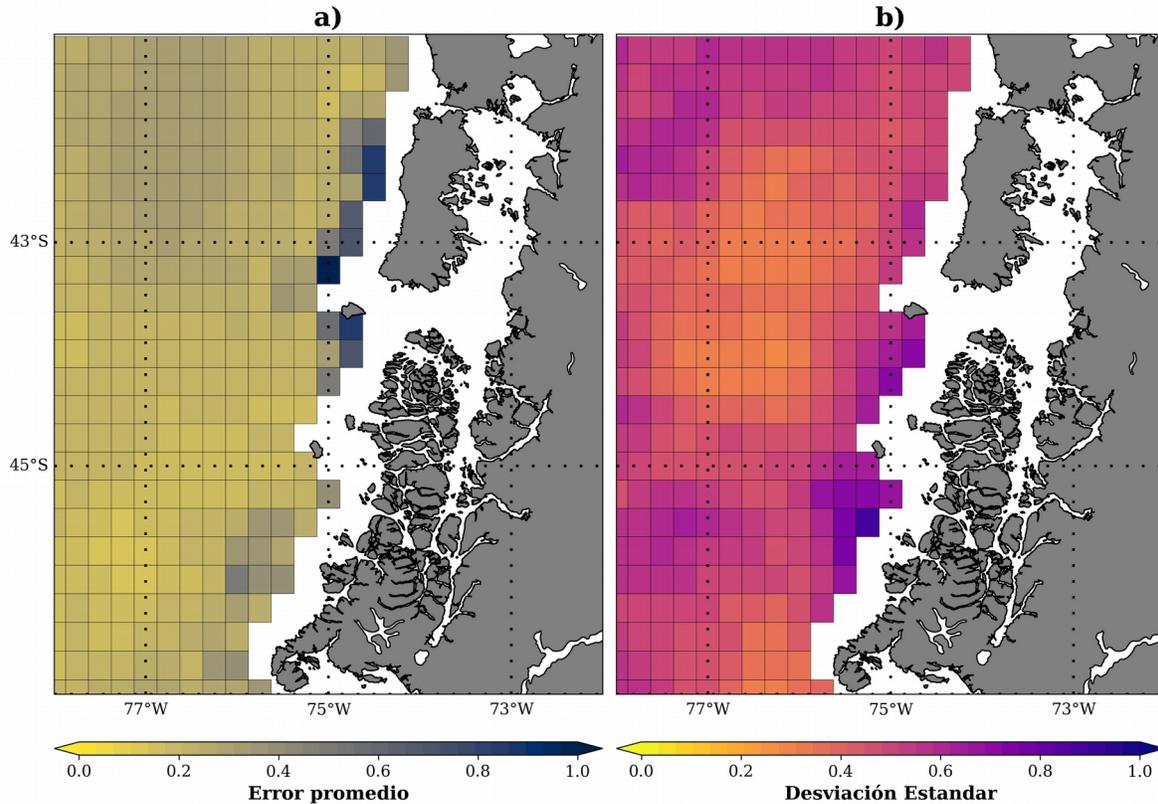


Figura 9: a) Error medio absoluto, y b) cociente de las desviaciones estándar entre el producto mensual SMAP y los promedios mensuales de SSM de MOSA-CROCO durante enero 2017 y junio 2021.

Al igual que en el caso de la temperatura se utiliza la información extraída de la boya oceanográfica del centro i~mar para evaluar la salinidad superficial simulada por MOSA-CROCO en el seno de Reloncaví. La información es acotada entre enero de 2019 y agosto de 2020, periodo en que se puede observar los cambios en el número de aportes de agua dulce ingresados al sistema, la integración de la nueva versión del modelo oceanográfico (CROCO) y los cambios en la batimetría de la región. La complejidad de reproducir la salinidad se ve reflejada al evaluar el modelo en una escala sinóptica. Sin embargo, cabe destacar que los cambios mencionados se ven reflejados en el modelo a partir de septiembre del 2019. El modelo es capaz de reproducir cierta señal de variabilidad en la zona con un coeficiente de correlación de ~ 0.5 y una diferencia en la amplitud de 3.75 PSU como promedio (Fig. 10). El importante aporte de agua dulce realizado por el río Puelo, la geomorfología del seno Reloncaví y otros procesos locales juegan un rol importante en la variabilidad y dinámica del océano en esta zona, de modo que en IFOP se siguen aplicando

constantes esfuerzos para avanzar en la comprensión y mejoramiento de la modelación a esta escala.

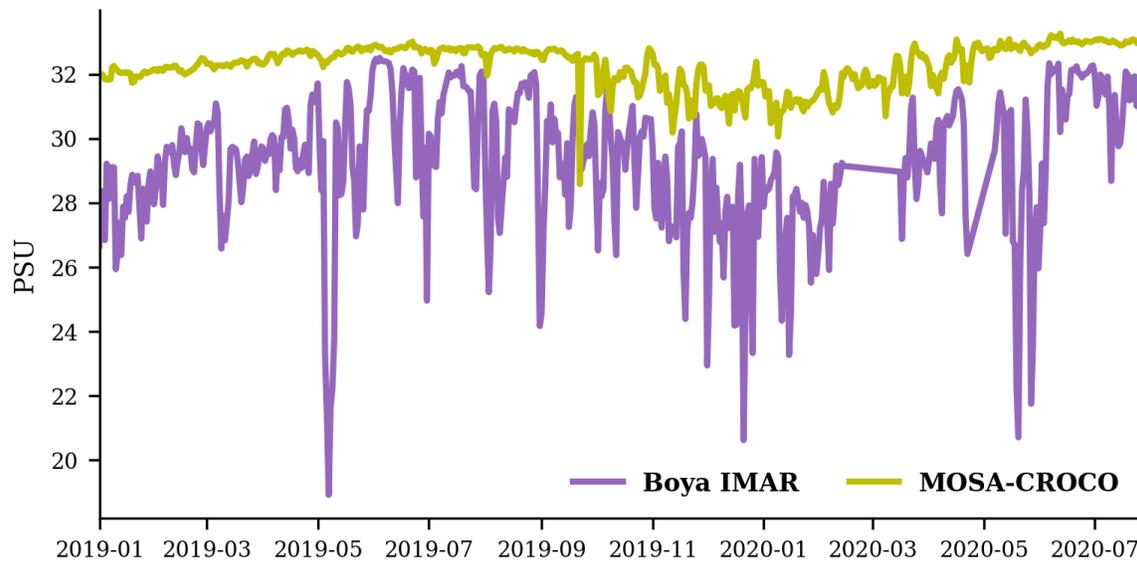


Figura 10: Series de tiempo de salinidad superficial medida por la boya i-mar y su punto más cercano en MOSA-CROCO entre enero de 2019 y agosto 2020.

De igual manera, la dirección e intensidad de las corrientes son variables particularmente difícil de pronosticar, ya que presentan un alto grado de variabilidad local y de alta frecuencia, especialmente en zonas de topografía compleja como en la zona de fiordos australes. Su alta variabilidad responde a una serie de procesos que ocurren a distintas escalas temporales y espaciales, resultantes en parte de una combinación entre la señal de marea, el efecto del viento, cambios en las propiedades físicas de las masas de agua y anomalías del nivel del mar asociadas a los gradientes de presión. Esta última componente, denominada corriente geostrofica, resulta más relevante en océano abierto donde los gradientes de presión modulan gran parte de la señal. La capacidad de MOSA-CROCO de reproducir este componente de la corriente fue verificada utilizando el producto satelital C3S, el cual suministra información diaria de las anomalías del nivel del mar y de ambas componentes geostroficas. Se puede observar en las componentes zonal y meridional de la corriente geostrofica una alta variabilidad espacial característica de esta región. Por su parte, el producto satelital evidencia un marcado patrón estacional que se hace más evidente en el caso de la componente meridional, modulada en gran parte por la presencia y estacionalidad del anticiclón del Pacífico Sur. Esta señal es reproducida por el modelo de tal manera que la corriente a lo largo de la costa se intensifica durante las temporada de verano y se debilita hacia los meses de invierno (Fig. 12). Esta banda latitudinal se mantiene a lo largo de la costa con una mejor representatividad durante la temporada de verano e invierno por el modelo. En ambos casos MOSA-CROCO es capaz de reproducir

los patrones de corriente geostrófica en mar abierto, sin embargo se evidencia una pequeña diferencia en la intensidad de las corrientes, especialmente en el caso de la componente zonal (Fig. 11). Esta diferencia de amplitud se sugiere por la presencia de la señal de marea que está presente en el modelo operacional y no así en el producto satelital.

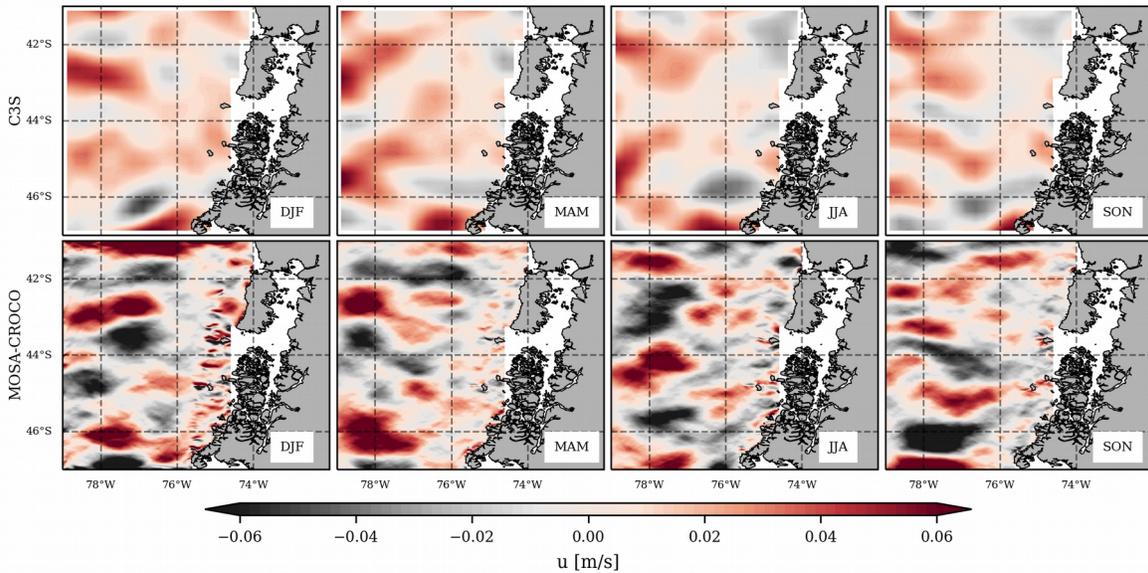


Figura 11: Componente zonal de corriente geostrófica calculada estacionalmente para el producto C3S (panel superior) y MOSA-CROCO (panel inferior) en el periodo 2017-2020.

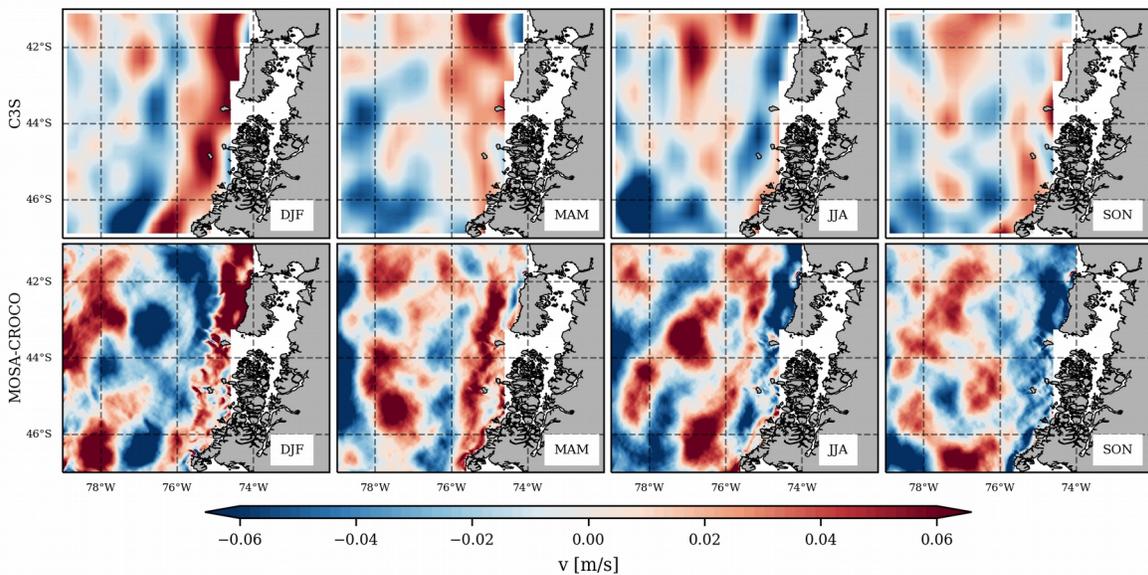


Figura 12: Componente meridional de corriente geostrófica calculada estacionalmente para el producto C3S (panel superior) y MOSA-CROCO (panel inferior) en el periodo 2017-2020.

De manera complementaria se analizó la corriente total extraída de un ADCP anclado durante las campañas de medición realizadas por IFOP en la localidad del canal Moraleda (73.51 °O, 44.66 °S). Este instrumento registró información de los primeros 65 m durante agosto de 2018 y marzo de 2019. Los datos fueron llevados a promedios diarios para compararlos con la velocidad de corriente pronosticada por MOSA-CROCO para las mismas profundidades registradas por el anclaje. En el panel superior se puede observar la componente meridional, la cual muestra principalmente una corriente positiva, en los primeros 40 m que viaja hacia el norte y una corriente que ingresa por debajo. Esta circulación del tipo estuarina en el canal Moraleda se puede observar claramente en el patrón simulado por el modelo operacional, especialmente a partir de septiembre de 2018, periodo que coincide con la introducción de nuevas fuentes de agua dulce a la configuración del modelo. Una situación similar se puede observar en el panel inferior, donde la componente zonal viaja principalmente hacia el oeste en toda la columna, siendo el modelo capaz de reproducir esta señal en gran parte del periodo registrado. Sin embargo, las mayores diferencias se pueden observar en los primeros 5 metros para ambas componentes (Fig. 13). La capa somera presenta una mayor variabilidad que resulta compleja de pronosticar a esta escala.

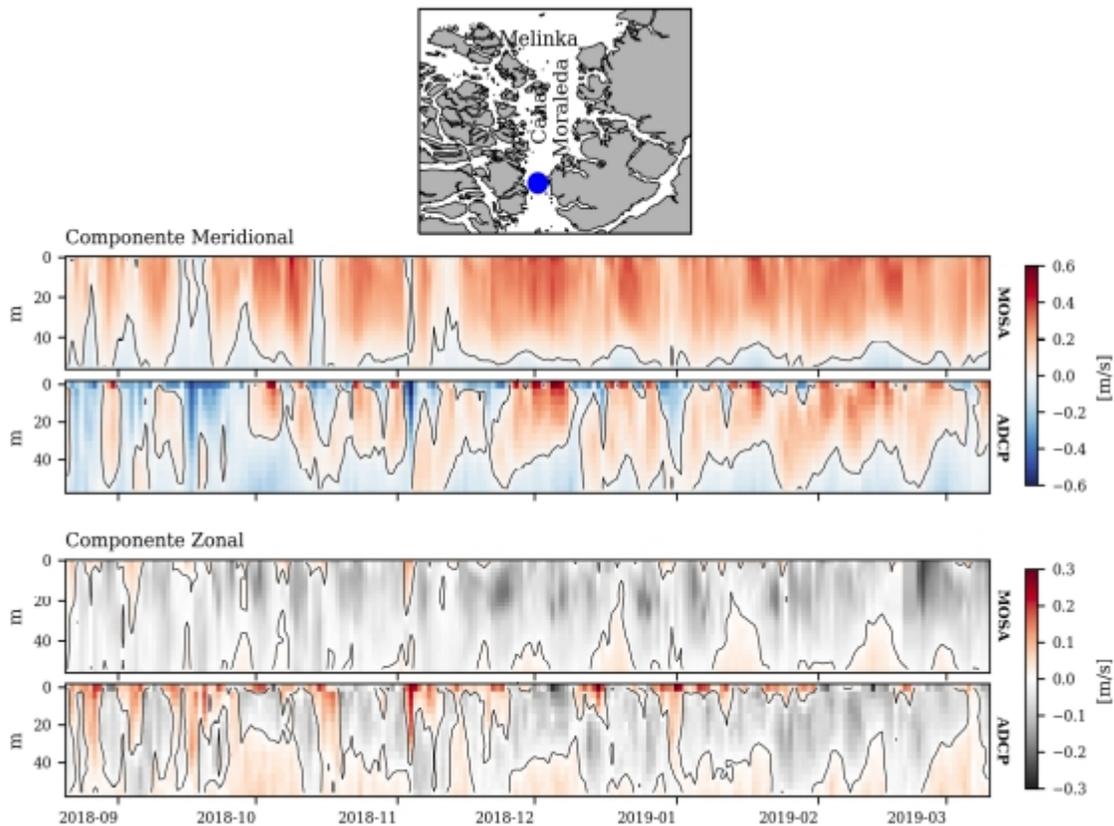


Figura 13: Componente zonal y meridional de la corriente en canal Moraleda (73.51 °O, -44.66 °S), registrado por ADCP y extraída de MOSA-CROCO. El periodo de medición se realizó desde agosto de 2018 a marzo de 2019.

5.2 Resultados objetivo específico 2: Evaluar el sistema operacional MOSA-WRF con observaciones oceanográficas históricas en el mar interior de Chiloé y Aysén.

MOSA-WRF se encuentra operativo desde el 20 de Julio del año 2018. La figura 14 muestra el rendimiento de MOSA-WRF hasta el 14 de agosto de 2021, indicando en color azul si el pronóstico fue exitoso y con un espacio en blanco si el sistema se cayó por algún motivo. El color gris indica inexistencia de MOSA-WRF. Se puede observar que el sistema se ha mantenido estable en el tiempo, presentando un 98.58% de efectividad, experimentando solo en 16 ocasiones pronósticos defectuosos o incompletos de un total de 1127. Estos fracasos principalmente se atribuyen a problemas de estabilidad numérica, propios de un sistema de esta naturaleza y en ocasiones puntuales, a fallas relacionadas con los servidores internacionales de dónde se descargan las condiciones de borde atmosféricas, GFS. Cabe destacar que en el transcurso del tiempo han ido disminuyendo considerablemente los pronósticos fallidos.

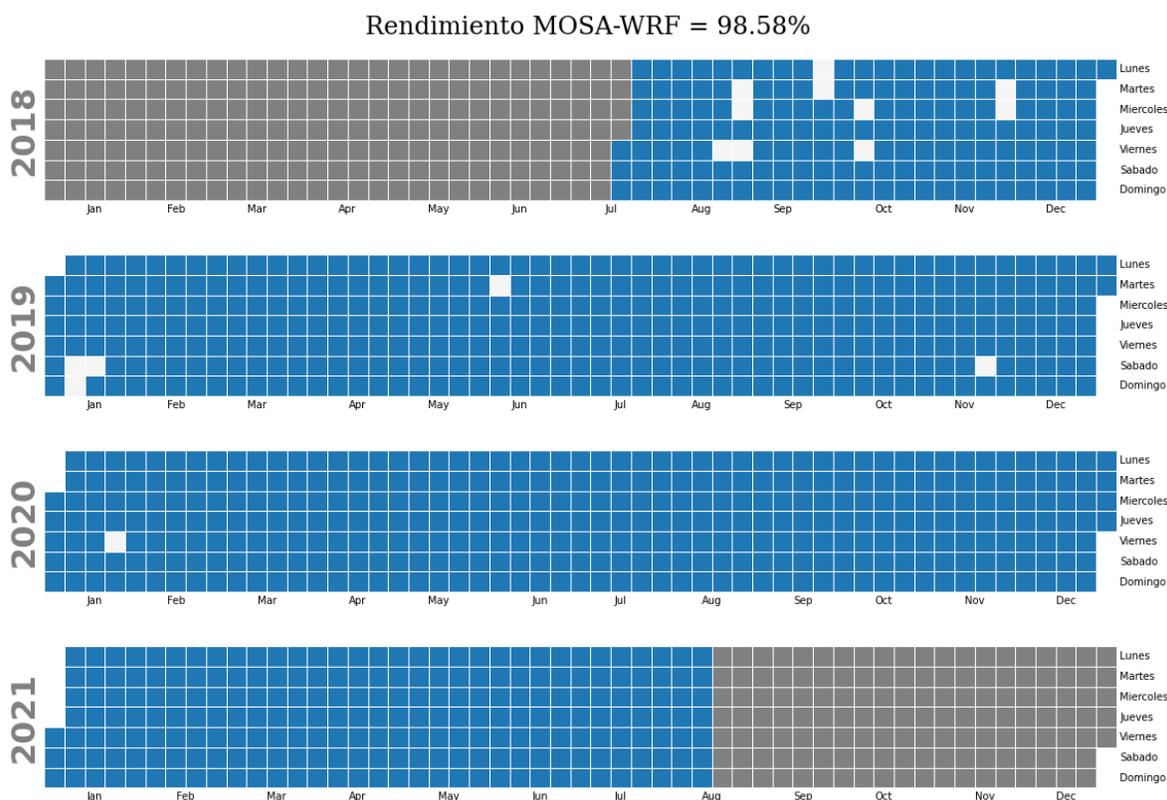


Figura 14: Rendimiento del sistema MOSA-WRF durante el 20 Julio del 2018 y 14 Agosto del 2021.

Una de las variables estudiadas en esta etapa del proyecto fue la temperatura del aire a 2 metros de altura a través de promedios diarios. El periodo se muestra dividido en dos, considerando el paso de la versión antigua de 5 km de resolución espacial a la versión

actual de 3 km (1 Septiembre 2020). En términos generales, se puede apreciar una alta correlación en las estaciones de Cucao y Melinka con valores de 0.88 y 0.94 respectivamente. A su vez, es destacable el buen desempeño del modelo en la reproducción de los ciclos diarios y el ciclo anual. Específicamente en Cucao se observa un importante ajuste luego de mejorar la resolución espacial (Fig. 15a), considerando diferencias cercanas a 5 °C por sobre lo observado en los meses más fríos previos al cambio (mayo, junio y julio). Por otro lado, en los meses de verano se observa una subestimación del mismo orden de magnitud, particularmente para los valores extremos. No obstante, junto con el aumento de resolución, este error disminuyó manteniendo una subestimación generalizada por debajo de los 2 °C y en ocasiones puntuales, experimentando una sobrestimación de los datos. En la estación de Melinka se observa un comportamiento constante en el tiempo, donde se destaca una subestimación sistemática de la temperatura simulada que se intensifica en los meses de verano y que disminuye en los meses de invierno (Fig. 15b).

Promedios diarios - Temperatura del aire a 2 metros

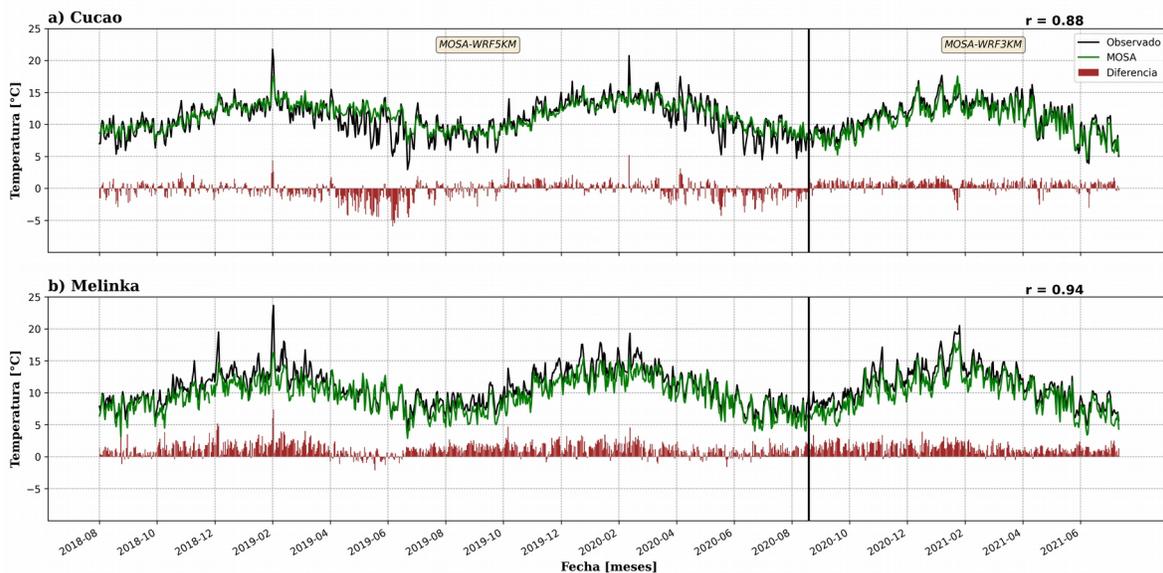


Figura 15: Promedios diarios de temperatura observada y simulada con MOSA-WRF, junto a su residual entre el 1 de Agosto del 2018 y el 1 de Agosto del 2021. (a) Cucao, y (b) Melinka.

La presión atmosférica muestra un buen ajuste entre los registrado por las estaciones meteorológicas y los pronósticos realizados por MOSA-WRF. En la estación de Cucao se obtuvo un valor de correlación de 0.98 (Fig. 16a), mientras que en Melinka este valor fue de 0.97 (Fig. 16b). El cambio de resolución provocó un mejor ajuste en el promedio para el caso de Cucao, sin embargo para Melinka se observó un leve desajuste en el sesgo con respecto a las observaciones. Estos resultados serán comentados con mayor detalle en la siguiente sección.

Presión atmosférica

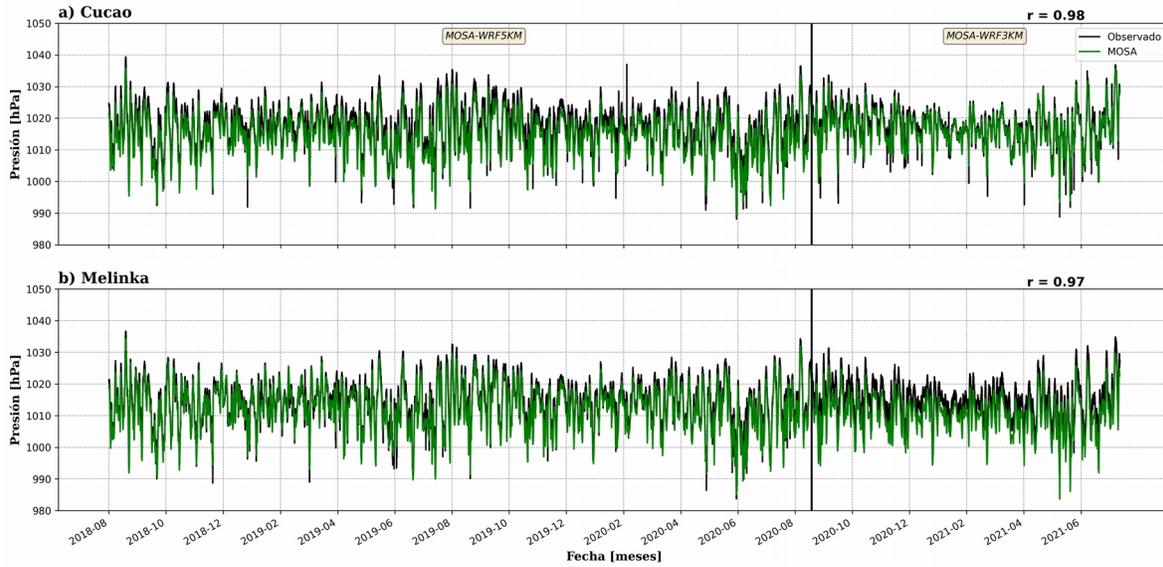


Figura 16: Presión atmosférica observada y simulada con MOSA-WRF entre el 1 de Agosto del 2018 y el 1 de Agosto del 2021. (a) Cucao, y (b) Melinka.

Precipitación acumulada mensual

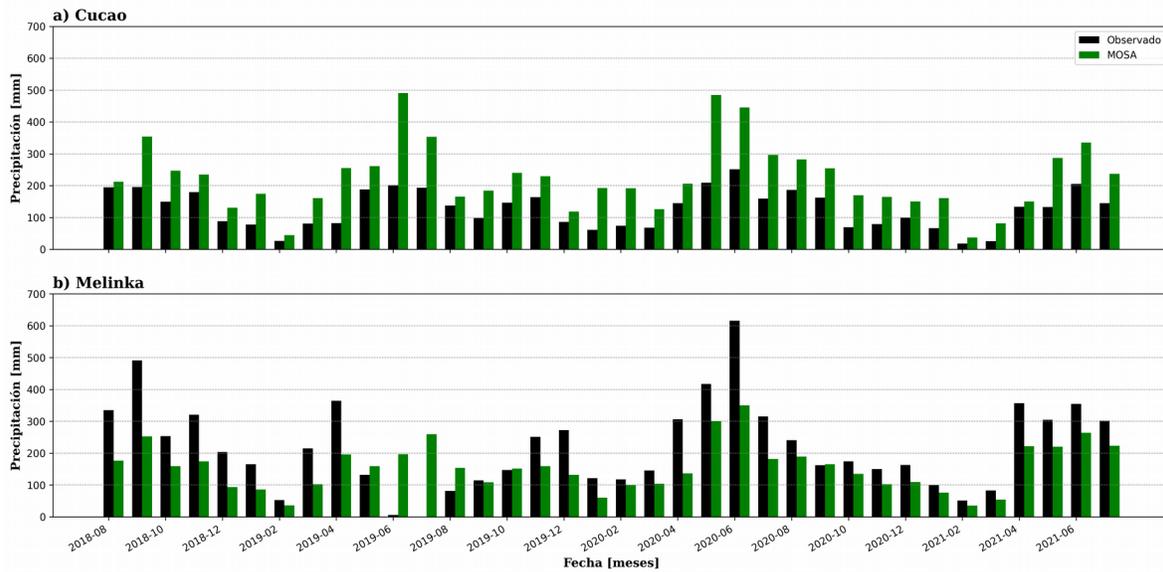


Figura 17: Precipitación acumulada mensual observada y simulada con MOSA-WRF, entre el 1 de Agosto del 2018 y el 1 de Agosto del 2021. (a) Cucao, y (b) Melinka.

Para el caso de la precipitación MOSA-WRF mostró un correcto desempeño en su comportamiento anual, resolviendo el ciclo con mayor cantidad de agua caída en los meses de invierno y una disminución en época estival. No obstante el modelo tiende a sobrestimar los valores en Cucao mostrando un mayor error en los meses de invierno, llegando a duplicar los valores registrados por la estación (Fig. 17a). Por el contrario, en Melinka se

resolvió una subestimación sistemática, que de igual manera se hace más notoria en los meses invernales, alcanzando valores cercanos a la mitad de los registrados (Fig. 17b). Cabe destacar que entre junio y agosto de 2019, el pluviómetro en Melinka no midió correctamente ya que por algún motivo desconocido, este se inclinó perdiendo la capacidad de registrar información.

Finalmente, se realizó una evaluación de los vientos de MOSA-WRF mediante un análisis de ondeleta (wavelet), en donde se puede apreciar que el modelo logró representar el patrón temporal durante el tiempo de operación del sistema en la estación de Cucao. Se identifica una banda de energía significativa para los periodos entre 4 y 8 días y entre 16 y 32 días, el cual logra resolver su mayor intensidad entre los meses de mayo y septiembre de 2019 (Fig. 18). Este primer periodo y en donde se observa la máximos valores de energía, hace referencia a procesos de escala sinóptica, los cuales se traducen al ingreso de sistemas frontales, presentes con amplia frecuencia en esta zona, principalmente en la estación invernal. Por otro lado el segundo máximo de energía que se destaca, es entre los periodos de 16 y 32 días correspondientes a procesos de escala intra-estacional. Además se observa uno banda de energía de menor potencia para el periodo de 1 día asociado al ciclo diario del viento, posiblemente asociado a procesos costeros como brisa marina.

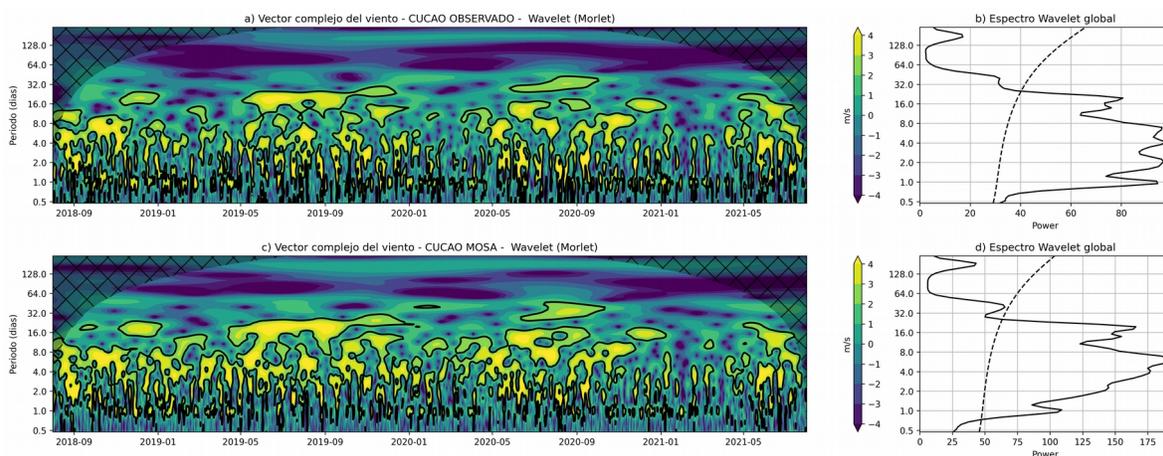


Figura 18: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Melinka. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.

Por último en Melinka, el sistema MOSA-WRF muestran resultados acorde con los datos observados, resolviendo de buena manera las bandas de máxima energía, correspondientes a procesos de escala sinóptica e intra-estacional, a lo largo de todo el periodo que lleva en ejecución MOSA-WRF (Fig. 19). Así mismo, en el modelo se observa una banda de energía significativa asociada a variabilidad diaria, aunque con una menor intensidad de lo observado por los sensores atmosféricos.

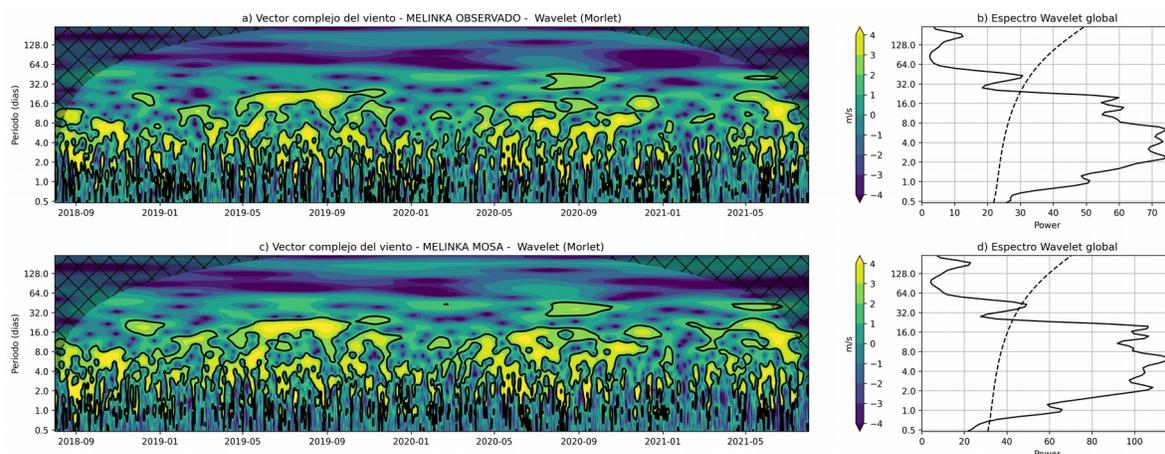


Figura 19: Wavelet del vector complejo del viento ($u+vi$) en Melinka. (panel superior) Estación meteorológica (panel inferior) MOSA-WRF.

5.3 Resultados objetivo específico 3: Implementar un modelo biogeoquímico climatológico para las regiones de Los Lagos y Aysén.

El oxígeno disuelto del anclaje ubicado en la boca del Guafo varió entre 2.5 a 5.5 mL L⁻¹ a diferencia de lo registrado por ambos modelos que variaron en promedio entre 4.5 y 6.5 mL L⁻¹. En general, los modelos sobre-estimaron los valores de oxígeno disuelto con un valor de sesgo mayor a 1 (Tabla 5). Está sobre-estimación aumentó en profundidad.

Tabla 5: Estadísticos aplicados a la serie de oxígeno disuelto de los modelos biogeoquímicos en relación a los datos del anclaje en la Boca del Guafo.

Profundidad	Modelo	Correlación	Desviación estándar	RMSE	Sesgo
20 m	NPZD	0.28	0.16	1.80	1.57
	PISCES	0.56	0.28	1.75	1.57
70 m	NPZD	0.77	0.14	2.08	1.92
	PISCES	0.77	0.26	1.99	1.86
105 m	NPZD	0.29	0.26	2.25	2.17
	PISCES	0.38	0.13	2.36	2.28

En general, el oxígeno disuelto observado en todas las profundidades registró una tendencia a aumentar gradualmente desde enero a junio. Entre junio y septiembre la tendencia del oxígeno fue a aumentar levemente, para comenzar a disminuir entre octubre y diciembre. Cabe destacar que durante el mes de noviembre la disminución del oxígeno disuelto es abrupta. A grandes rasgos, los modelos solo pudieron replicar las tendencias observadas desde abril a noviembre (Fig. 20). En términos comparativos entre modelos, se observa que el modelo PISCES registró una concentración mayor de oxígeno (0.1 mL L⁻¹),

una mayor correlación y valores más bajos de RMSE en comparación con el modelo NPZD.

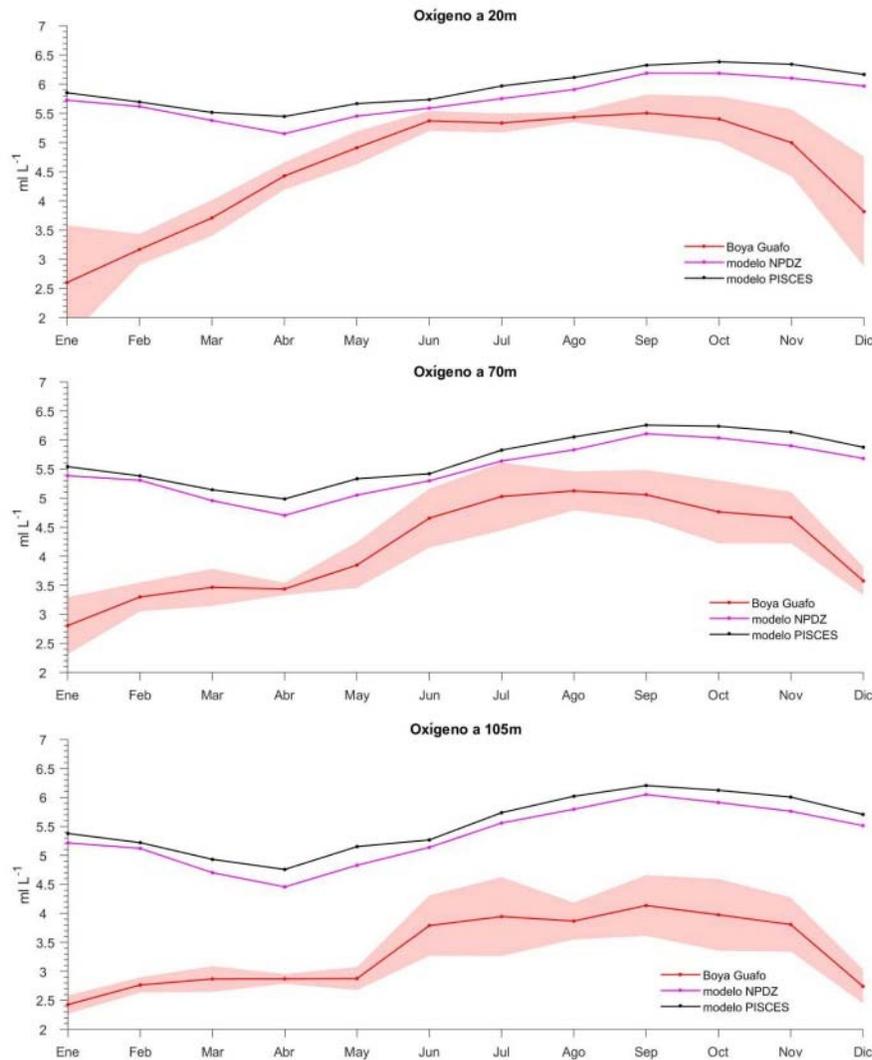


Figura 20: Serie de tiempo promedio y desviación estándar modelada y observada de oxígeno disuelto a diferentes profundidades en la boca del Guafo.

La temperatura observada a 20 m mostró una tendencia a la disminución desde enero a octubre y un aumento a partir de noviembre. En cuanto a los modelos, estos solo reprodujeron la tendencia observada a partir del mes de mayo, sin embargo, desde junio los datos modelados tiene un buen ajuste con lo observado (Fig. 21). Las temperaturas observadas a las profundidades de 70 y 105 m mostraron una tendencia a disminuir a partir de junio. Los modelos fueron capaces de reproducir esta disminución, aunque fue más gradual que la observada. En general, los estadísticos calculados indican leves diferencias entre ambos módulos biogeoquímicos, con un desempeño levemente mejor de PISCES en comparación con NPZD (Tabla 6).

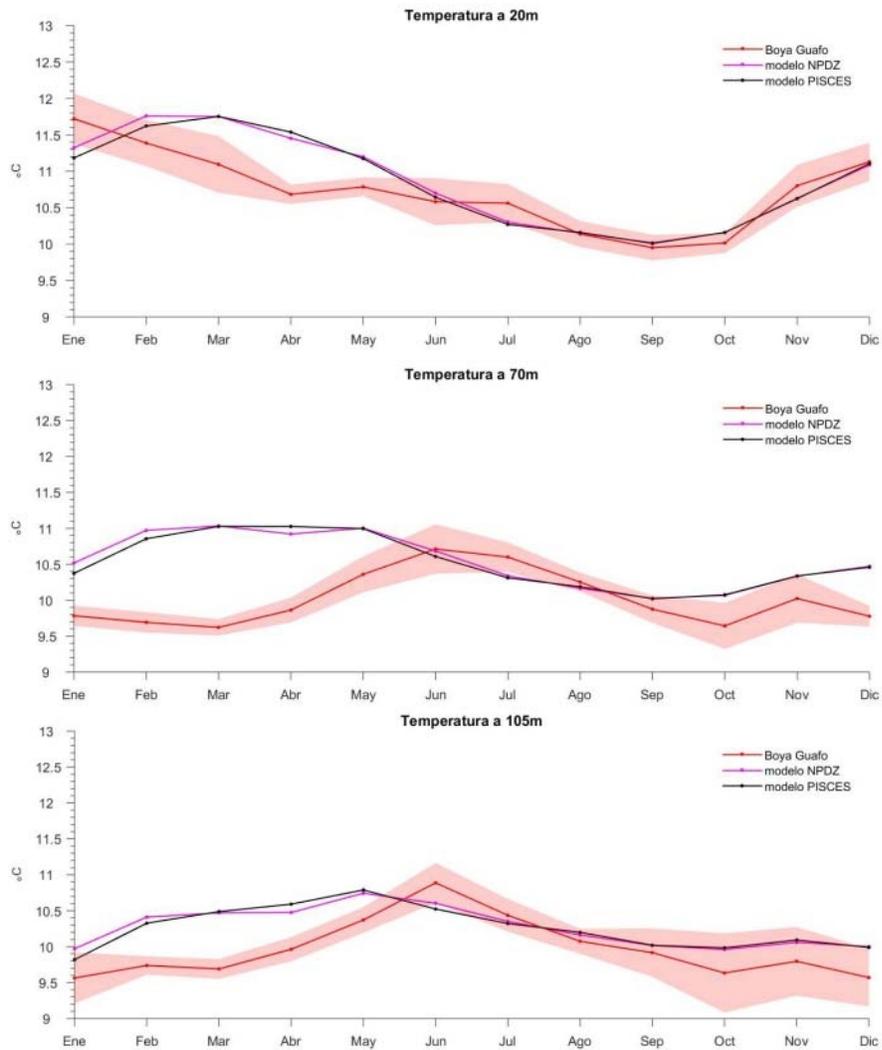


Figura 21: Serie de tiempo promedio y desviación estándar modelada y observada de temperatura a diferentes profundidades en la boca del Guafo.

Tabla 6: Estadísticos aplicados a la serie de temperatura de los modelos biogeoquímicos en relación a los datos del anclaje en la Boca del Guafo

Profundidad	Modelo	Correlación	Desviación estándar	RMSE	Sesgo
20 m	NPZD	0.85	1.82	1.92	1.43
	PISCES	0.86	1.95	1.99	1.40
70 m	NPZD	0.29	0.76	1.17	0.93
	PISCES	0.35	0.84	1.07	0.76
105 m	NPZD	0.80	0.29	0.41	0.31
	PISCES	0.64	0.37	0.39	0.20

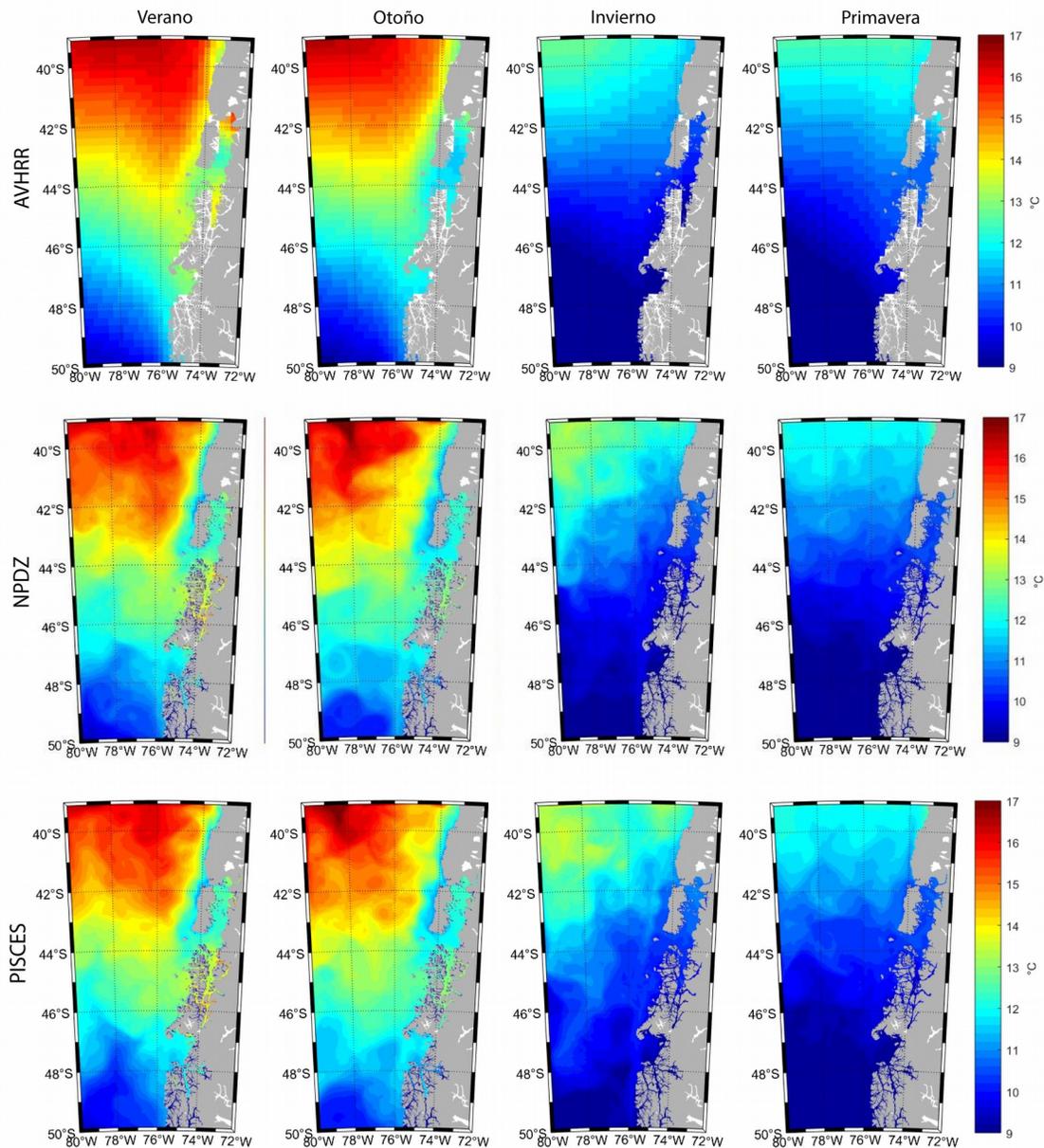


Figura 22: Promedio estacional de temperatura superficial del mar de la climatología de AVHRR (1998-2010) y de los módulos biogeoquímicos NPDZ y PISCES.

La temperatura satelital mostró un núcleo de altas temperaturas al noroeste del dominio en verano y otoño con una variabilidad que tiende a disminuir en intensidad y cobertura espacial durante las otras estaciones. Ambos modelos fueron capaces de reproducir este patrón, sin embargo, durante invierno las temperaturas fueron mayores y en primavera fueron menores a los observados en el producto satelital (Fig. 22). Por otra parte en el sector suroeste del dominio, también se apreció durante el verano y otoño un núcleo caracterizado por bajas temperaturas. Esta estructura tendió a aumentar su cobertura espacial hacia el norte, registrando la mayor cobertura durante invierno y primavera.

Ambos modelos fueron capaces de reproducir este patrón. En cuanto a las zonas interiores de Chiloé y Aysén, se observó una subestimación de temperatura por parte de ambos modelos en el seno de Reloncaví en casi todas las estaciones del año excepto en invierno donde se registró una sobrestimación del modelo. En líneas generales, ambos modelos tienen un buen desempeño y solo se observan sutiles diferencias entre ambos, lo cual es esperable dado que las parametrizaciones físicas utilizadas son las mismas para ambos modelos.

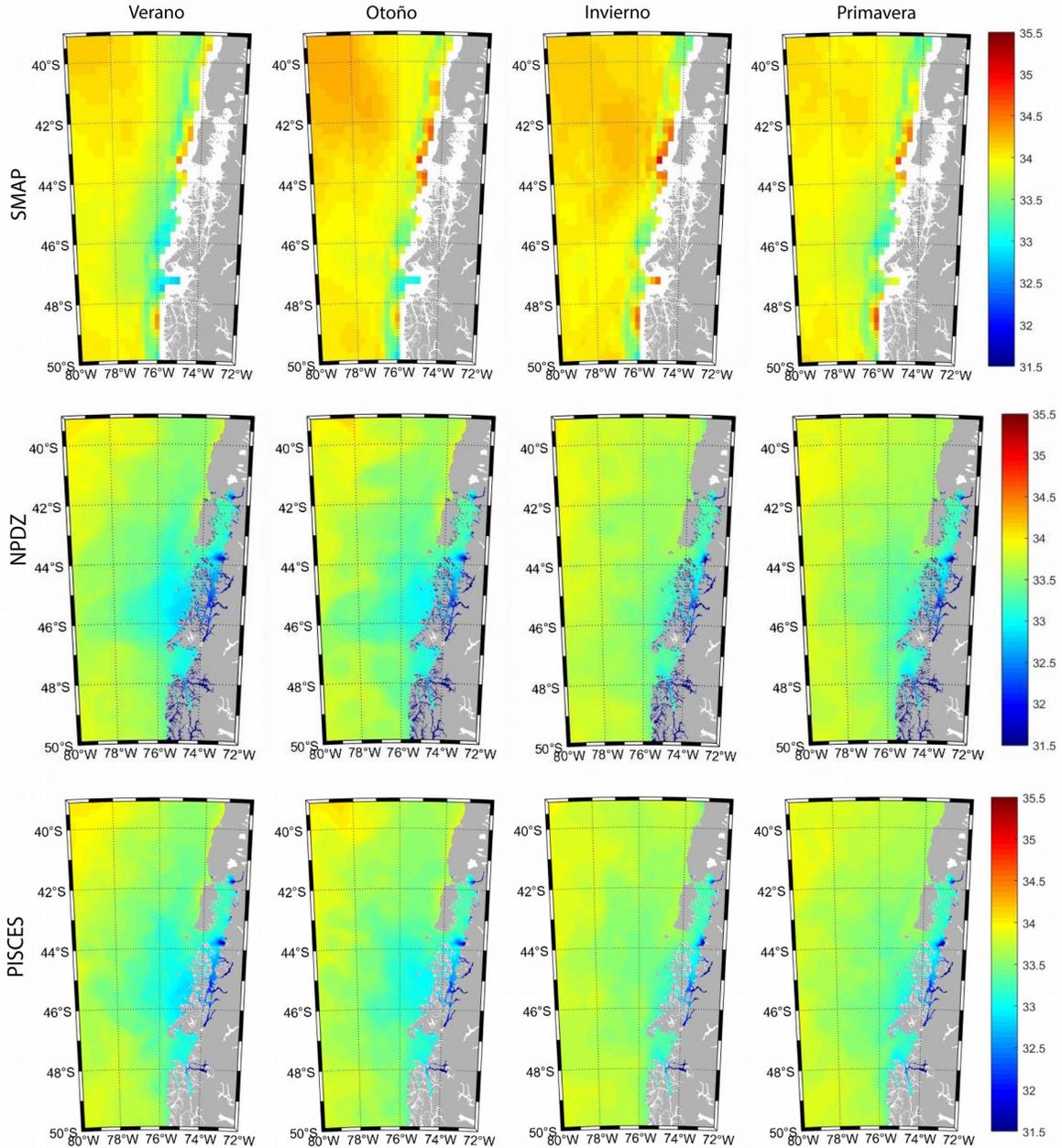


Figura 23: Promedio estacional de temperatura superficial del mar de la climatología de SMAP (2015-2021) y de los módulos biogeoquímicos NPDZ y PISCES.

La salinidad superficial satelital estacional registró un núcleo en el sector oceánico a 40 °S con altos valores de salinidad (~34.5 psu). Sin embargo esta estructura fue variando en salinidad y cobertura, registrando los valores más altos de salinidad durante otoño e invierno y menores valores durante verano con una cobertura hasta los 42 °S. En cuanto a la zona costera, los datos satelitales registraron a largo de toda la isla de Chiloé los mayores valores de salinidad. En ambos modelos, esta estructura solo es reproducida en verano y otoño (Fig. 23). A su vez, los valores de salinidad son menores en el modelo en comparación con el satélite. Al igual que la temperatura, las diferencias entre ambos modelos son sutiles y difíciles de observar a simple vista.

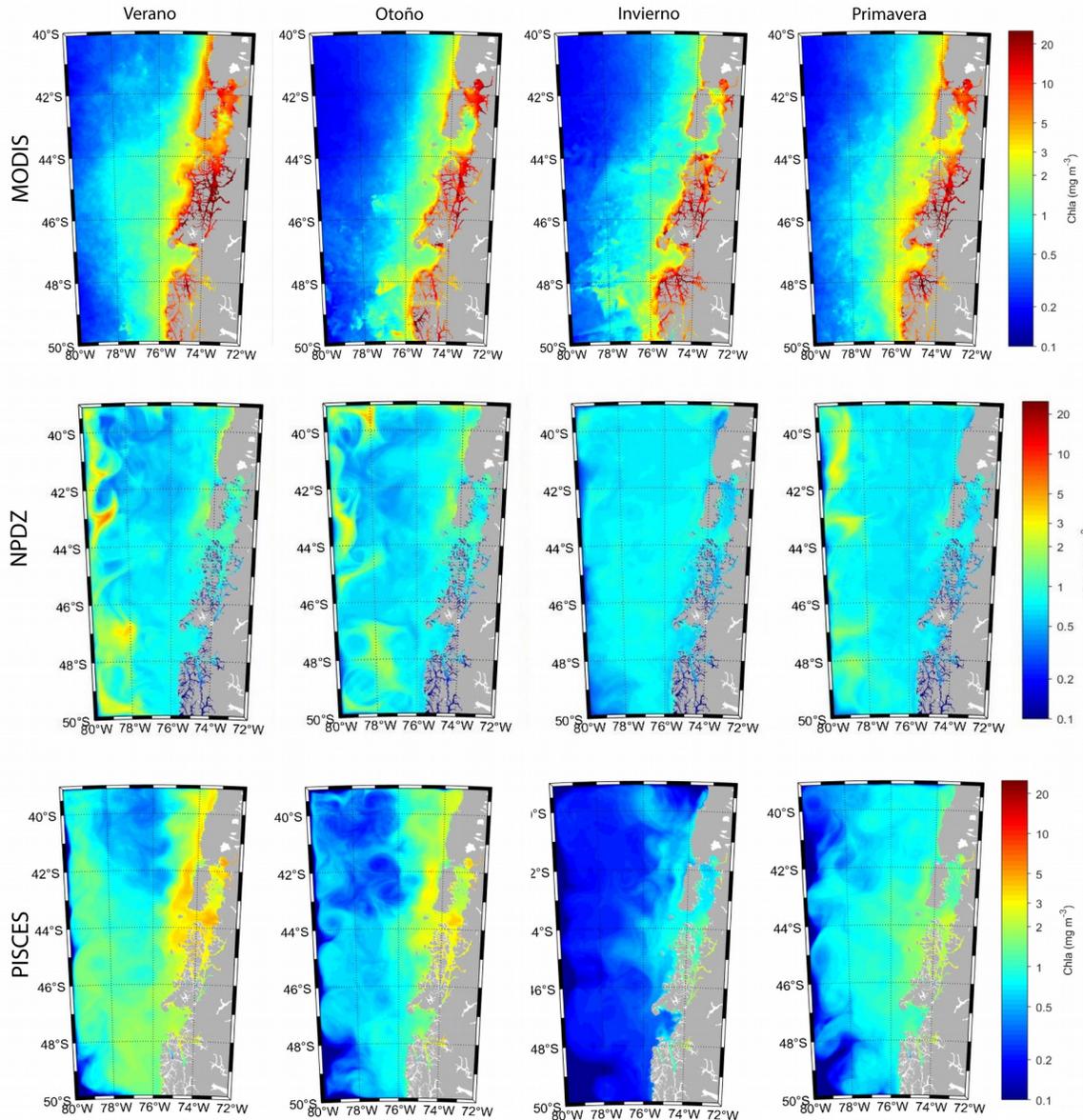


Figura 24: Promedio estacional de temperatura superficial del mar de la climatología de MODIS (2003-2020) y de los módulos biogeoquímicos NPDZ y PISCES.

La clorofila superficial observada registró un gradiente de aumento de clorofila hacia la costa, donde las mayores concentraciones se ubicaron en el seno de Reloncavi, canal Moraleda y en la zona de canales interiores de Magallanes norte. En cuanto a la clorofila modelada, el modelo PISCES pudo reproducir el patrón descrito, sin embargo con valores de concentración menores al observado en MODIS. Por otra parte el modelo NDPZ, no fue capaz de reproducir el patrón (Fig. 24).

Experimento sensibilidad 1: Cambio en los parámetros de PISCES

Las mayores concentraciones de clorofila superficial en el modelo PISCES se registraron en las estaciones de verano y otoño en la zona del seno de Reloncaví y en la costa oceánica de la isla de Chiloé, donde los máximos valores fueron de $\sim 4 \text{ mg m}^{-3}$. Este mismo patrón se observó en el experimento, sin embargo los máximos fueron de $\sim 6.6 \text{ mg m}^{-3}$ (Fig. 25). En general, se observó en las zonas costeras una clorofila superficial mayor al modelo base con una diferencia de 2.5 mg m^{-3} en las zonas con máximas concentraciones de clorofila. Por otra parte, en la zona oceánica también se observó un aumento de concentración en el experimento con un valor promedio de 0.5 mg m^{-3} .

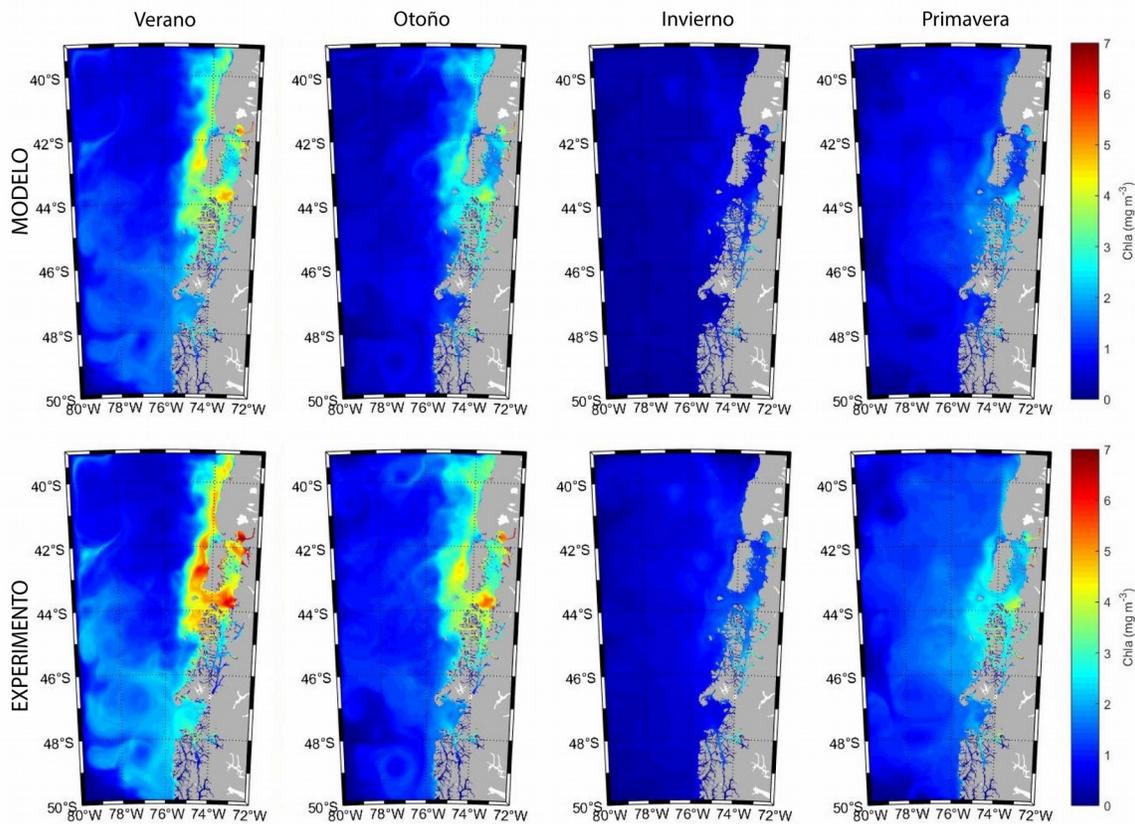


Figura 25: Promedio estacional de clorofila superficial del modelo PISCES original y de la simulación con modificación de parámetros.

En la boca del Guafo, las concentraciones de clorofila del experimento fueron mayores a lo observado en el modelo sin modificaciones, sin embargo, estas diferencias fueron disminuyendo en profundidad (Fig. 26). Las máximas diferencias por profundidad fueron de 1.0, 0.8 y 0.7 mg m⁻³ para los 20, 70 y 105 m todas registradas en marzo y abril. En cuanto al contenido de oxígeno disuelto, este disminuyó en el experimento en comparación al modelo, donde las diferencias fueron aumentando a mayores profundidades, las máximas diferencias por profundidad fueron de 0.2, 0.2 y 0.3 mL L⁻¹ a 20, 70 y 105 m de profundidad todas registradas en el mes de febrero.

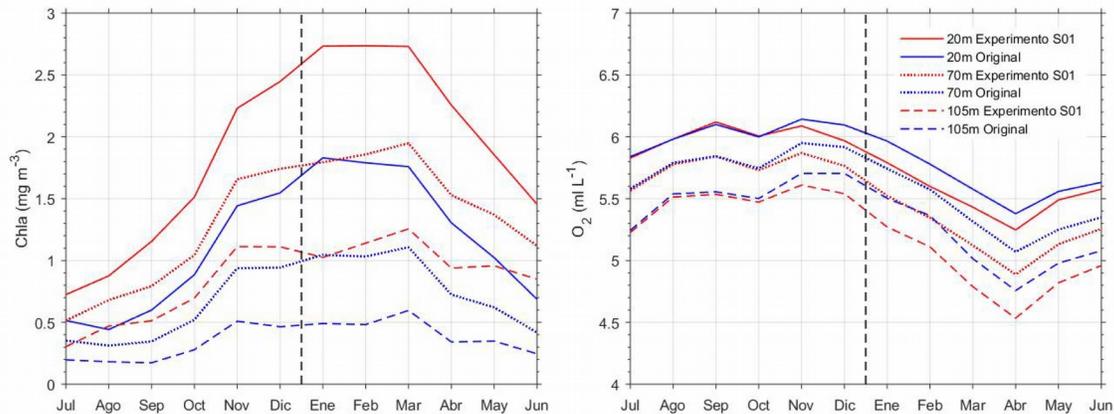


Figura 26: Concentración de clorofila y oxígeno disuelto en la Boca del Guafo a 20, 70 y 105 m de profundidad. Las líneas azules corresponden al modelo original y las líneas rojas al modelo con cambios en las constantes de parametrización

En la boca del Guafo todas las variables del experimento registraron variaciones respecto al modelo sin modificar, sin embargo en algunas variables las modificaciones de los parámetros del experimento registraron una mayor fluctuación respecto del modelo. Estas variaciones se muestran en la Tabla 7. Se observó que los macro-nutrientes fósforo, amonio y nitrato (2, 1 y 1% promedio para las tres profundidades) fueron las variables que menos variaron en el experimento a diferencia de lo registrado por el hierro (50%).

Tabla 7: Porcentaje de variación promedio en la Boca del Guafo del experimento de sensibilidad bajo diferentes constantes de parametrización

Profundidad	POC	CHL	FE	DOC	O2	PO4	NH4	NO3
20 m	408.9	69.9	-51.5	-27.4	-1.3	1.4	-3.1	-1.9
70 m	753.0	98.4	-50.2	-22.0	-2.0	1.9	1.0	-0.6
105 m	1113.0	147.2	-48.4	-15.8	-2.5	2.1	5.1	0.4

Experimento sensibilidad 2: Disminución oxígeno frontera norte

En la boca del Guafo, las concentraciones de oxígeno disuelto del experimento variaron a partir del mes de febrero del año 9 en comparación con los resultados del modelo (Fig. 27). La diferencia entre ambos resultados fue de $\sim 0.01 \text{ mL L}^{-1}$ con un aumento progresivo con el paso de tiempo hasta registrarse la máxima diferencia en el mes de junio del año 9 con 0.10, 0.14 y 0.18 mL L^{-1} a 20, 70 y 105 m de profundidad. Es importante notar que a pesar de las diferencias observadas, la tendencia del oxígeno disuelto fue igual entre los resultados del experimento y sin experimento en la boca del Guafo.

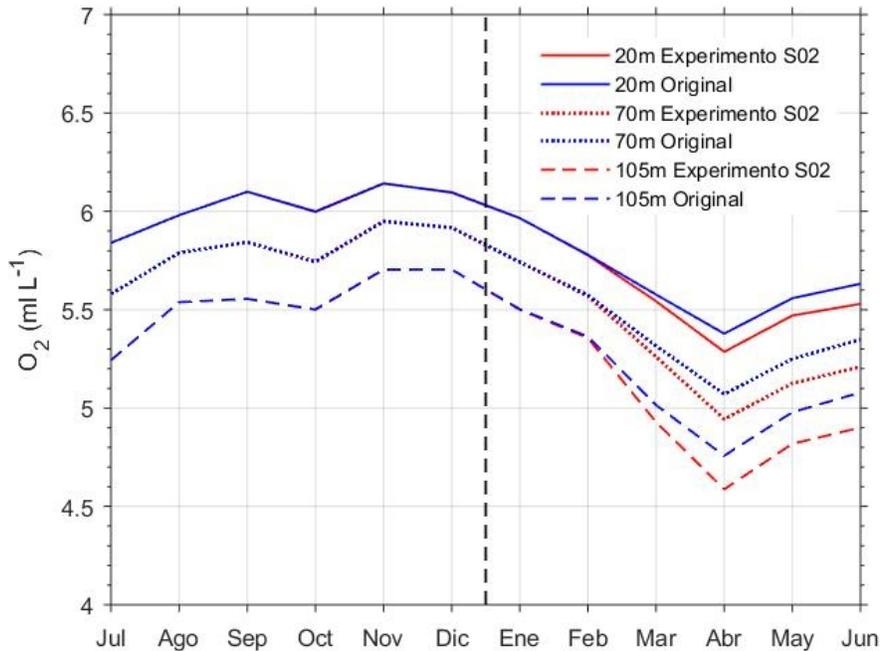


Figura 27: Concentración de oxígeno disuelto en la Boca del Guafo a 20, 70 y 105 m de profundidad. Las líneas azules corresponden al modelo original y las líneas rojas al modelo con la disminución de oxígeno en la frontera norte.

5.4 Resultados objetivo específico 4: Diagnosticar un modelo de pronóstico operacional para la región de Magallanes que contenga el seno Skyring.

5.4.1 Evaluación de grilla MOSAMAG usando una simulación barotrópica.

Se realizó una evaluación de la estabilidad y la capacidad de reproducir constituyentes armónicos del modelo MOSAMAG. En la figura 28 se observan las series modeladas y

observadas en los puntos de control utilizados. En general, estas series muestran un buen grado de ajuste, presentando altas correlaciones, siendo la mayor en Puerto Williams con un 91.96 % y un error de 0.2 m (Fig. 29). La menor correlación se obtuvo en la estación San Gregorio (la cual presenta la mayor amplitud), con un valor de 72.27 % y un error de 0.7 m. Análogamente, la estación de Punta Arenas tiene un valor de correlación de 87.29 % y Caleta Meteoro un valor de 89.17 % con un 0.4 y 0.2 m de error, respectivamente.

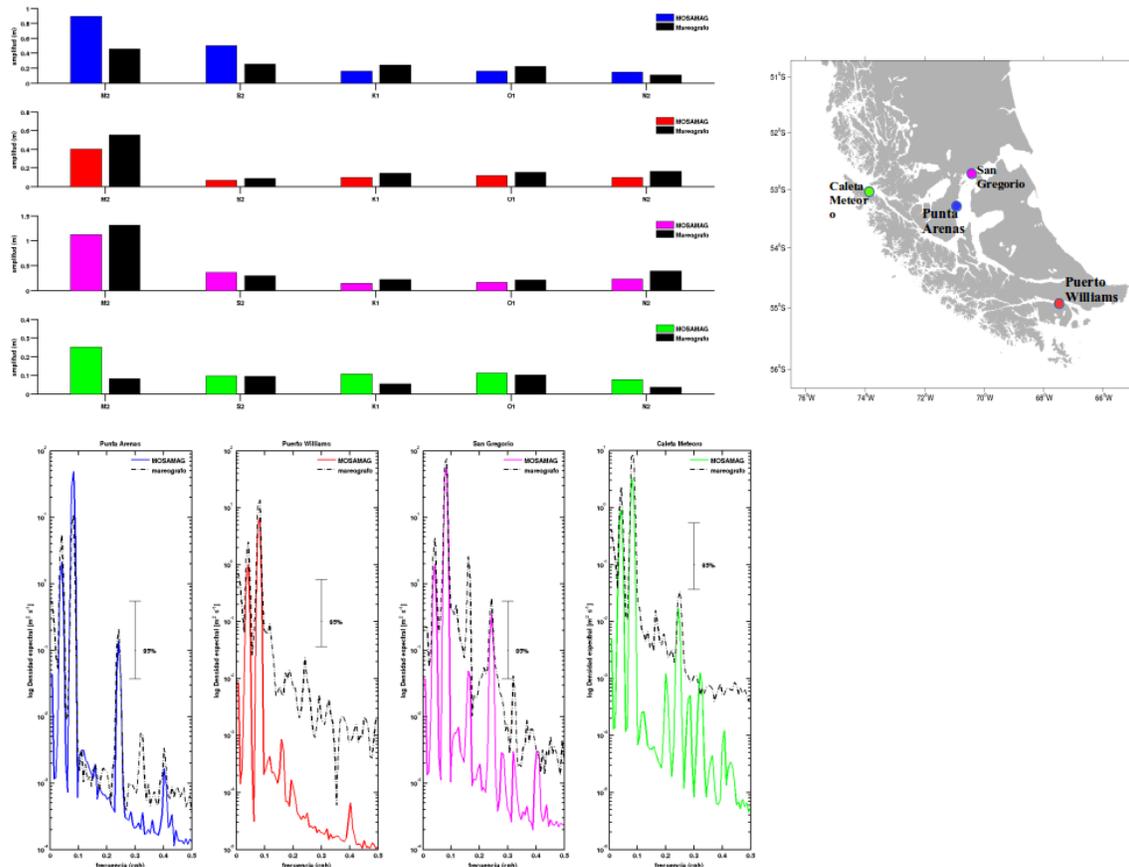


Figura 28: Posición de los mareógrafos, junto a la amplitud de los principales constituyentes armónicos y espectros de energía del nivel del mar utilizados como puntos de control en la evaluación del modelo barotrópico de MOSAMAG.

Tanto a las series modeladas como observadas se les realizó un análisis de armónicos de marea, para conocer la estructura espectral de la señal. Para la evaluación nos centraremos en los 5 constituyentes de marea más significativos para esta zona de estudio. Estos constituyentes de marea corresponden a las componentes semi-diurnas M_2 (12.42 horas), S_2 (12 horas) y N_2 (12.66 horas) y a las componentes diurnas K_1 (23.93 horas) y O_1 (25.85 horas), donde se concentra más del 90% de la energía observada. M_2 es el armónico de marea de mayor amplitud (y energía) en todos los casos observados reforzando el carácter semi-diurno de la marea en esta parte del Estrecho de Magallanes, con la

excepción de la estación en Caleta Meteoró donde es el armónico S_2 (Fig. 28). Estos constituyentes nos indican que en general a excepción de M_2 , el resto de los constituyentes presentan amplitudes similares entre lo observado y modelado en todos los casos siendo el modelo el que presenta una menor amplitud. El caso de Punta Arenas y Caleta Meteoró el modelo parece sobrestimar la amplitud no solo de M_2 , sino también del resto de los constituyentes.

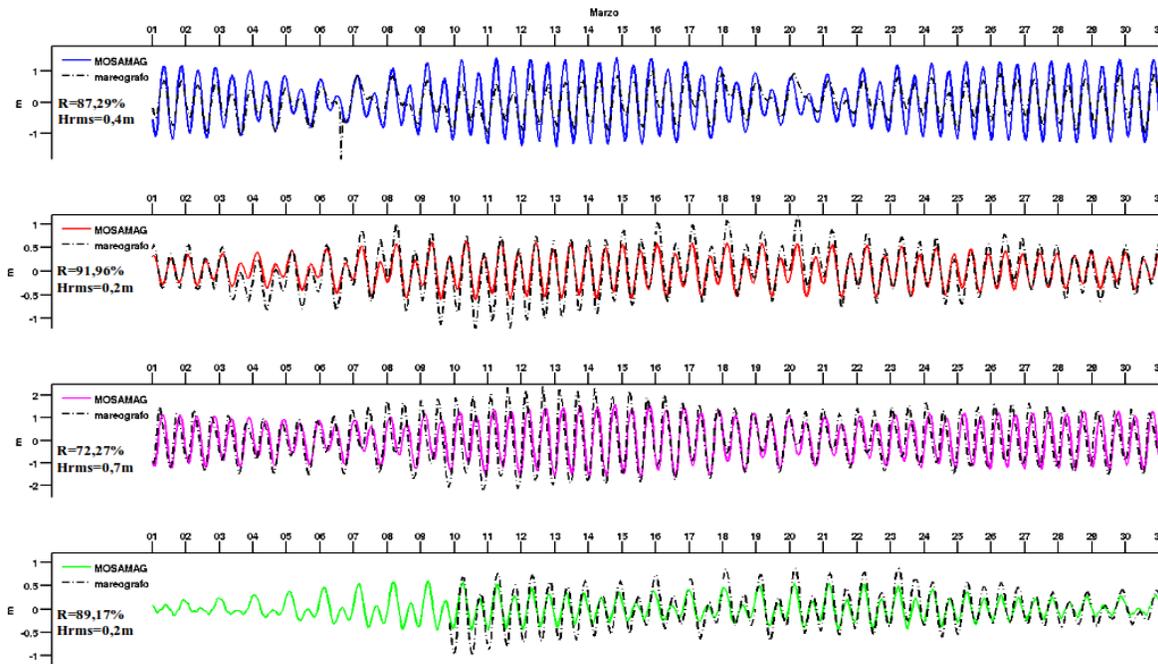


Figura 29: Series horarias del nivel del mar de los mareógrafos y MOSAMAG utilizados para evaluar modelo barotrópico. Incluyen coeficiente de correlación y RMS entre cada serie.

Para observar la distribución de la energía en el dominio de la frecuencia, calcularemos la potencia espectral de la amplitud de nivel del mar en cada estación utilizando los espectros presentados en la figura 28. Los espectros confirman la preferencia de las constituyentes semi-diurnas en la zona (0.833 cph), aunque también dan cuenta de máximos diurnos a escalas horarias (0.0417 cph), los que son casi comparables a semi-diurnos en Caleta Meteoró y Puerto Williams. Punta Arenas es la estación con el mejor ajuste. En bajas frecuencias, se observa el desarrollo de constituyentes someras de marea en todos los casos excepto en caleta Meteoró. Las salidas del modelo MOSAMAG muestran a excepción de Punta Arenas que las series fuera de las bandas semi-diurnas y diurnas presentan un déficit de energía, dando cuenta de una excesiva disipación de esta en estos puntos de referencia. Cabe destacar que Caleta Meteoró es un punto cerca del borde occidental del Estrecho de Magallanes, donde la onda marea comienza a sentir el fondo, mientras Puerto Williams está inserto en el canal Beagle, el cual se conecta entre los océanos Pacífico y Atlántico.

5.4.2 Evaluación de condición inicial y de borde.

Las condiciones iniciales y de borde utilizadas para la temperatura, salinidad y corrientes fueron obtenidas del modelo operacional global Mercator-Ocean. Este producto fue evaluado con datos satelitales de TSM del producto VIIRS-SNPP, y muestra que el modelo global es capaz de reproducir la variabilidad estacional en gran parte del dominio (Fig. 30), aunque tiende a presentarse más frío en invierno en las zonas interiores del estrecho. Debido a su resolución no parece adecuado incorporarlo como un análisis más detallado de las zonas interiores del estrecho de Magallanes. A su vez, condiciones iniciales construidas con MercatorOcean utilizadas en simulaciones de pruebas el 2 de julio de 2020 fueron evaluadas a través de diferencias entre datos de TSM de OISST-AVHRR y datos mensuales de MODIS. En general, los datos de MODIS muestran que el modelo es más frío, no obstante, hay que considerar que estos corresponden a datos promedio de junio, mientras que la simulación corresponde a la condición inicial interpolada desde Mercator-Ocean para el día 3 de julio (Fig. 31). También se observan diferencias positivas especialmente en el Golfo Almirante Montt y en la entrada occidental del estrecho de Magallanes. Por otra parte, las diferencias realizadas entre Mercator-Ocean y los datos OISST-AVHRR presentan un buen ajuste dentro del estrecho de Magallanes y cuerpos interiores (Golfo Almirante Montt, Senos Skyring y Ottway, aunque fuera de estos el modelo se observa más cálido. A medida que el modelo logre alcanzar su equilibrio numérico y vaya adquiriendo una mejor representación de los aportes de agua dulce se espera que mejore la calidad y desempeño de las diferentes variables oceanográficas. Por el momento, resulta lo suficientemente ajustado a los patrones de variabilidad de TSM para ser considerado como una buena condición inicial.

Del mismo producto de Mercator-Ocean, se obtienen las condiciones de borde para MOSAMAG, las cuales, en su modo operacional, deben ser descargadas diariamente para construir los pronósticos oceanográficos. Utilizando el mismo conjunto de datos satelitales de TSM de VIIRS para el año 2019, se evaluó su variabilidad mensual a través de los bordes del dominio de MOSAMAG mediante diagramas de Hovmuller. Estos diagramas presentados para el borde norte (Fig. 32), occidental (Fig. 33), sur (Fig. 34) y oriental (Fig. 35), presentan en general un buen ajuste con lo observado, dando cuenta de la reproducción de patrones estacionales latitudinales y longitudinales según el caso. Uno de los aspectos críticos del dominio a destacar es su borde sur, el cual colinda con la Antártica y esta fuertemente influenciado por el frente antártico, donde logramos observar un buen ajuste con lo observado. Lo anterior nos permite tener un razonable nivel de confianza en el producto y su capacidad para alimentar MOSAMAG a modo operacional.

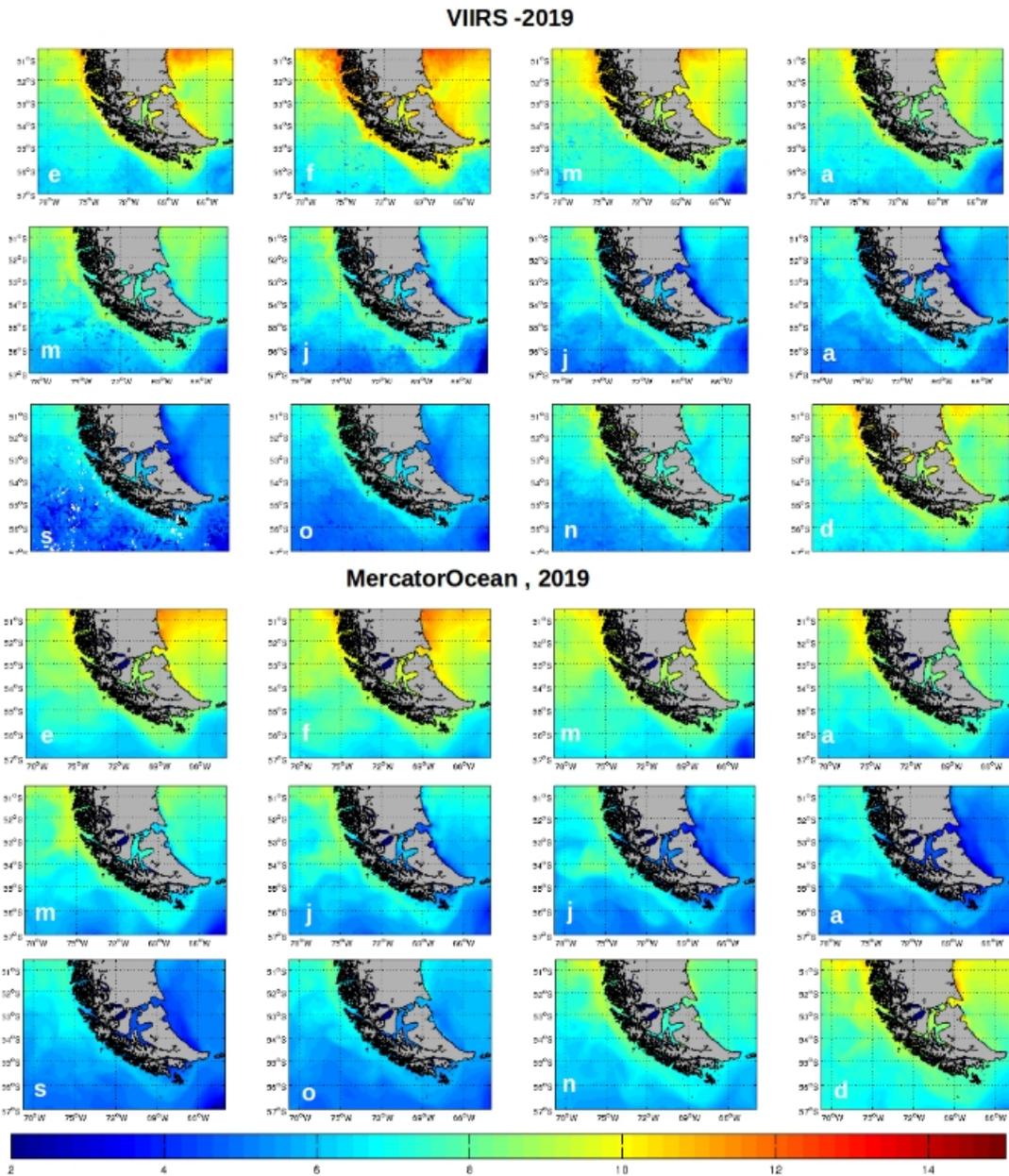


Figura 30: Campos de TSM mensuales 2019 obtenidos de imágenes satelitales VIIRS-SNPP y el producto de pronóstico global MercatorOcean.

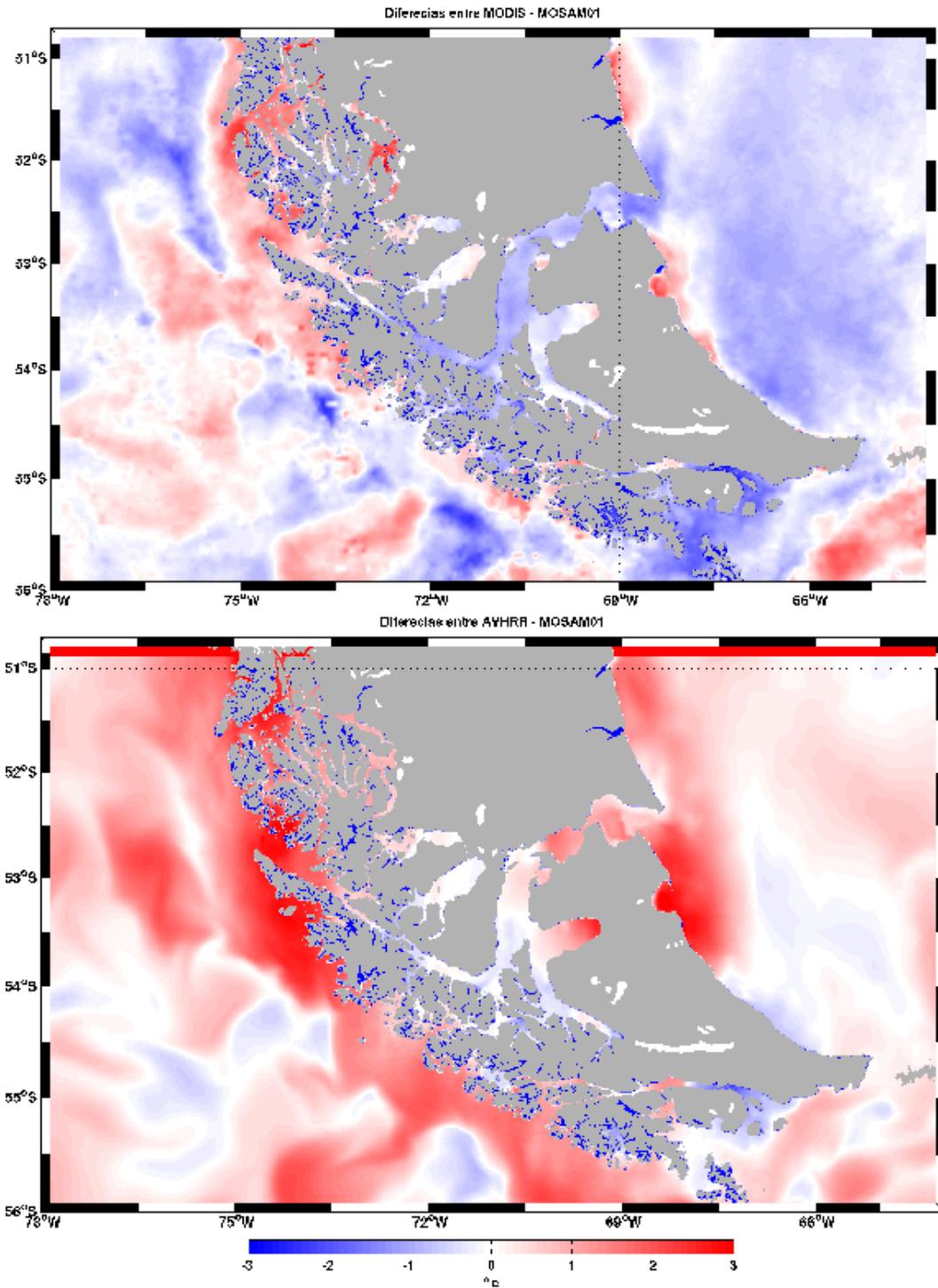


Figura 31: Evaluaci3n de TSM de la condici3n inicial de MercatorOcean utilizada en los pron3sticos de prueba de MOSAMAG.

BORDE NORTE

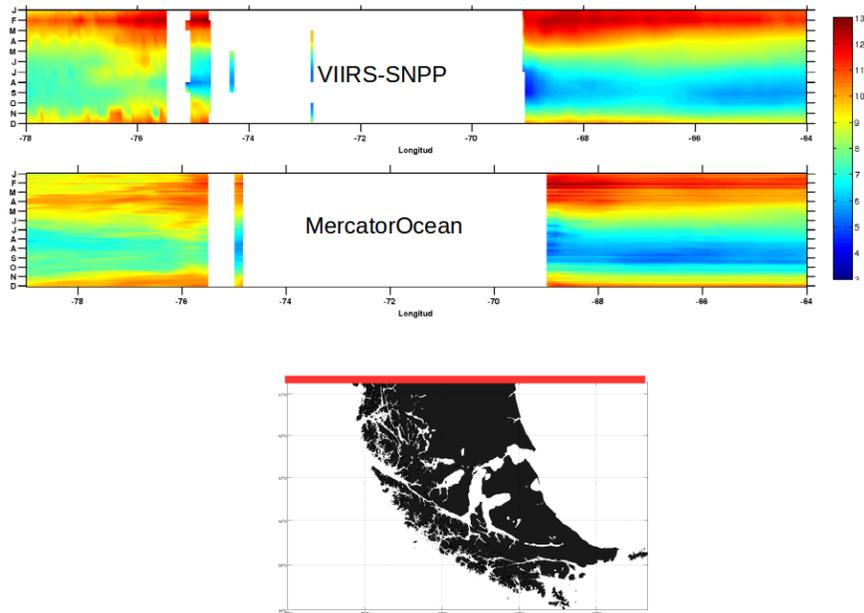


Figura 32: Diagrama Hovmoller de TSM mensual del año 2019 entre datos VIIRS-SNPP y MercatorOcean para el borde norte de MOSAMAG (50.5 °S).

BORDE OCCIDENTAL

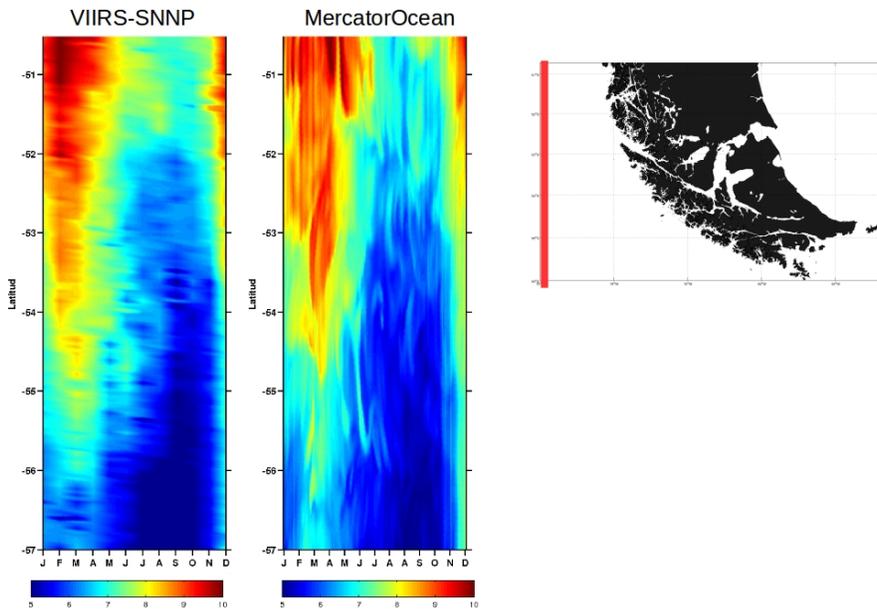


Figura 33: Diagrama Hovmoller de TSM mensual del año 2019 entre datos VIIRS-SNPP y MercatorOcean para el borde oeste de MOSAMAG (78 °O).

BORDE SUR

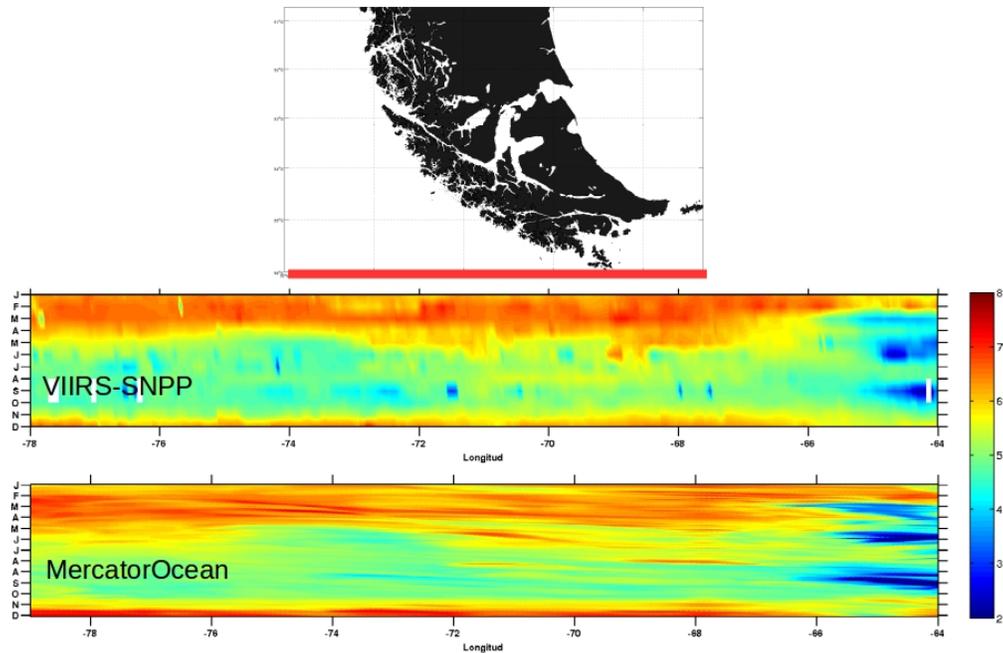


Figura 34: Diagrama Hovmoller de TSM mensual del año 2019 entre datos VIIRS-SNPP y MercatorOcean para el borde sur de MOSAMAG (57 °S).

BORDE ORIENTAL

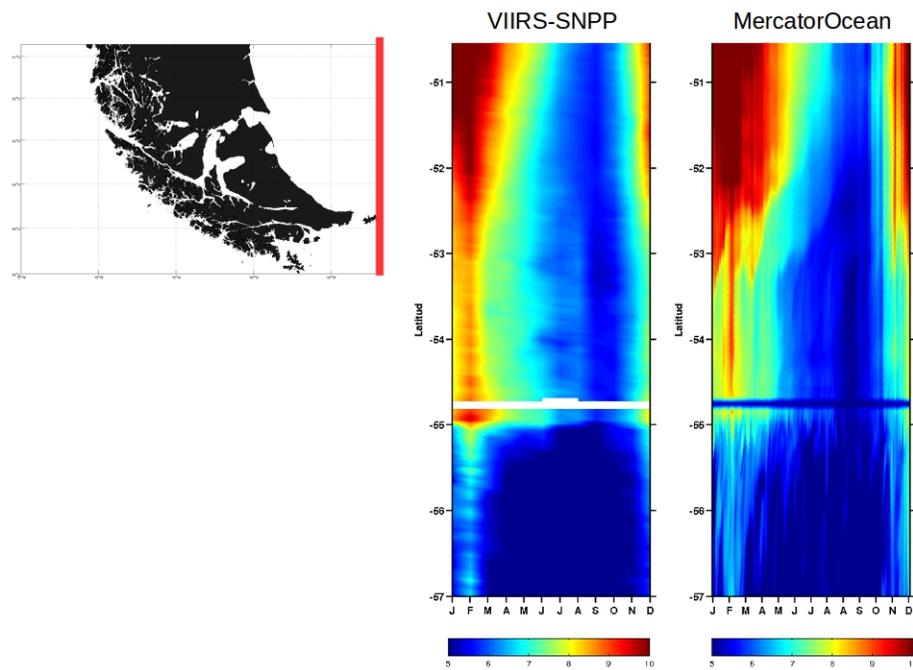


Figura 35: Diagrama Hovmoller de TSM mensual del año 2019 entre datos VIIRS-SNPP y MercatorOcean para el borde este de MOSAMAG (64 °E).

5.4.3 Diagnostico modelo operacional MOSAMAG

El objetivo final de la construcción de MOSAMAG es tener un modelo operacional que sea capaz de generar pronósticos a un horizonte a definir para la región de Magallanes, que sea capaz de resolver los principales procesos oceanográficos que presenta esta región con su compleja topografía. A lo largo de esta etapa del proyecto, así como en la parte anterior se han realizado numerosas pruebas para probar diferentes aspectos que componen un modelo de pronósticos. En las secciones previas hemos presentado como se ha ido construyendo paso a paso las diferentes partes del modelo. A continuación, mostraremos como integraremos los diversos componentes numéricos para que el modelo pueda funcionar de manera operacional, junto con una pequeña evaluación del desempeño del pronóstico en un tiempo acotado.

MOSAMAG fue configurado para simular 3 días de pronósticos oceanográficos, resolviendo las ecuaciones primitivas de Navier-Stokes (Anexo A) cada 20 segundos. MOSAMAG registra información de las variables oceanográficas físicas de temperatura, salinidad, corrientes y nivel del mar. Las salidas numéricas son almacenadas en una frecuencia horaria (archivos con un tamaño de 5.5 GB comprimido) y en forma de promedios diarios (archivos con un tamaño de 265 MB comprimido). El modelo se ejecuta en un servidor de alto rendimiento ubicado en un *DataCenter* de IFOP en Viña del Mar (Anexo E). Cada simulación de pronóstico utiliza 2 nodos de calculo con 24 núcleos de procesamiento cada uno. El modelo es paralelizado utilizando una configuración de memoria distribuida tipo MPI, dividiendo el dominio y asignando un procesador (núcleo) para calcular a cada uno de los 48 pequeños sub-dominios divididos. Notar que en este mismo servidor es donde se ejecutan y funcionan diariamente los otros modelos operacionales de MOSA, por lo que la capacidad de este queda limitada al utilizar este modelo, no haciendo posible su uso para un modelo de mayor horizonte temporal o para futuros anidados de mayor resolución espacial.

El modelo conceptual de la operación diaria de MOSAMAG se puede resumir en 5 pasos (Fig. 36):

1. **Inicialización del modelo:** Consiste en activar las rutinas que comienzan a generar los directorios de trabajo y las variables de entorno para cada pronóstico. Este proceso se considera instantáneo.
2. **Descarga de datos y creación condiciones de borde:** Se obtienen los datos de modelos globales para la creación de condiciones de bordes hidrodinámicas y atmosféricas. Por una parte se descargan los datos del modelo Mercator-Ocean el cual contiene información en la columna de agua de temperatura, salinidad, y corrientes diarias. El tiempo aproximado para este proceso es de 2 horas 30

- minutos. A su vez, se descargan los datos atmosféricos de GFS, el cual contiene información de temperatura del aire, precipitación, radiación y dirección e intensidad de vientos. El tiempo aproximado para este proceso es de 20 minutos.
3. **Incorporación de datos estáticos:** En este paso se agregan las fuentes de agua dulce al archivo de configuración del pronóstico diario. Este proceso se considera instantáneo.
 4. **Inicio de simulación:** Una vez generado todos los archivos necesarios, se ejecuta el modelo numérico CROCO para la región de Magallanes. El tiempo de simular 3 días de pronóstico con almacenamiento de variable a una frecuencia horaria es de aproximadamente 4 horas con 50 minutos.
 5. **Almacenamiento y visualización de resultados:** Este proceso aún no se ha incorporado como un respaldo automático de la información ni en visualizar en el sitio web CHONOS. Las salidas del modelo generadas diariamente, incluidos los archivos de condiciones de borde pesan aproximadamente 8 GB comprimidos.

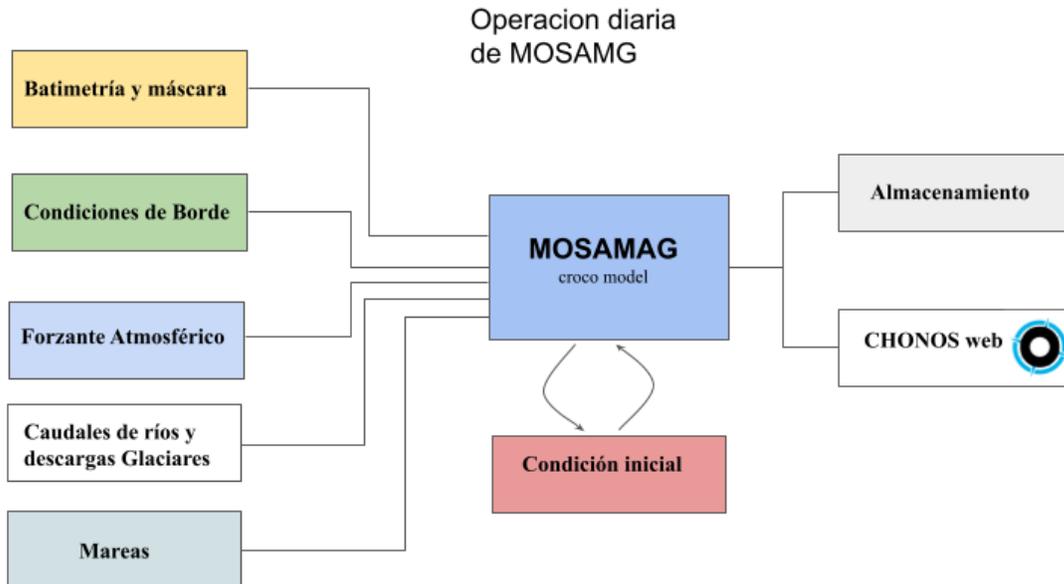


Figura 36: Diagrama conceptual de la operación diaria y los componentes de MOSAMAG.

A modo de evaluar y tener una aproximación de la calidad de los pronósticos oceanográficos generados, se presentan resultados del promedio diario de TSM pronosticados de MOSAMAG para los días 22, 23 y 24 de agosto de 2021 junto a campos de TSM diarios obtenidos del producto satelital AVHRR. En estos resultados, observamos un alto grado de ajuste en la temperatura entre lo pronosticado y lo observado (Fig. 37). También se observa una distribución coherente de los patrones regionales de distribución de

temperatura. No obstante, los productos satelitales en general no son capaces de alcanzar una resolución suficiente en los mares interiores de la región.

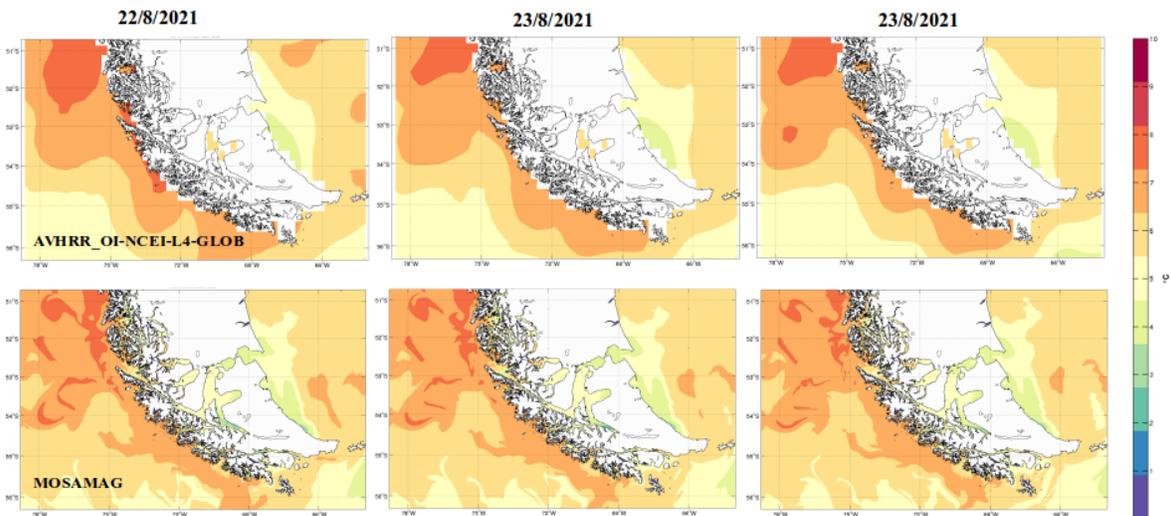


Figura 37: Evaluación preliminar de promedios diarios de TSM entre el producto AVHRR y los pronósticos realizados por MOSAMAG entre el 22 y 24 de agosto de 2021.

También se comparó la distribución de la salinidad modelada en el dominio a través del producto satelital SMAP. Este producto de una resolución espacial de 0.25° (~ 25 km) aún se encuentra en desarrollo. Aunque este satélite tiene una menor frecuencia cíclica que otros productos satelitales, nos provee una visión general pero valiosa de la conducta del sistema regional a gran escala, considerando el impacto de las aguas continentales sobre el mar adyacente. En este caso, presentamos el promedio de 8 días entre el 11 y 19 de agosto del 2021 de SMAP y el promedio diario de MOSAMAG el 20 de agosto del mismo año. De manera general, se observa que los valores de salinidad en las zonas oceánicas de MOSAMAG parecieran estar acorde a lo esperable (Fig. 38).

En resumen, MOSAMAG ha comenzado a generar pronósticos de manera interrumpida desde el 31 de Julio del 2021, donde se ha presentado estable y con resultados coherentes a lo esperado. Está configurado para iniciarse todos los días a las 6:45 am, terminando a las 14:30 am en horario GMT. Por ahora los resultados no se están enviando al sitio web CHONOS. Se espera que en la etapa siguiente del proyecto (iniciada este año) se pueda trabajar en evaluaciones más profundas del modelo, pues se espera contar con un tiempo de simulación mayor y a su vez contar con datos de campañas oceanográficas de IFOP en la región, especialmente en las zonas de seno Skyring y Ottway, como también en el estrecho de Magallanes (pendientes por la pandemia COVID) y así realizar calibraciones en su física y configuración a modo de lograr una calidad aceptable y suficiente, sin sacrificar su estabilidad.

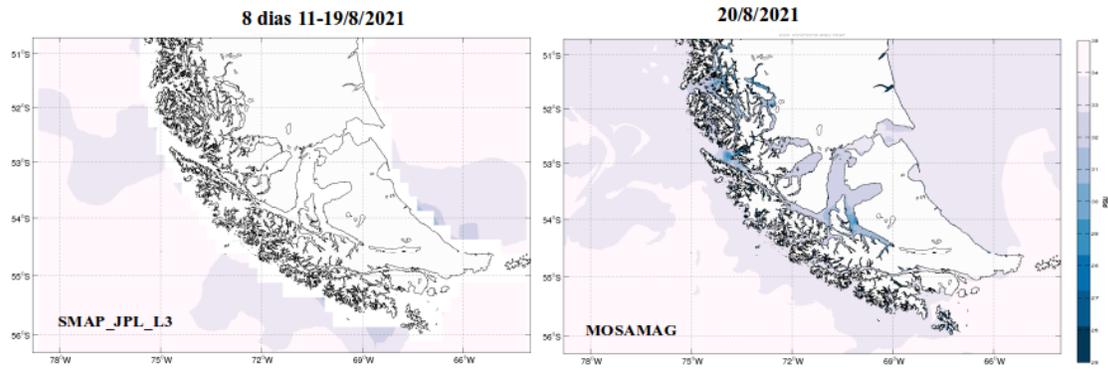


Figura 38: Evaluación preliminar de promedios diarios de SSM entre el producto SMAP y el pronóstico realizado por MOSAMAG el 24 de agosto de 2021.

6. DISCUSIÓN

6.1 Modelo operacional MOSA-CROCO.

Desde el comienzo del programa de “Desarrollo de sistema de predicción Sinóptico”, se ha puesto esfuerzo en la constante mejora del sistema operacional MOSA, evolucionando hacia un modelo estable y confiable en el tiempo. El modelo operacional MOSA-CROCO se mantiene funcionando desde 2017 hasta la fecha. Parte de su oficio es generar pronósticos diarios a 3 días de condiciones oceanográficas del mar interior de las regiones de Los Lagos y de Aysén. Destaca por su estabilidad de operación contando actualmente con la totalidad de los días de 2021 pronosticados con éxito, asegurando información continua en el tiempo. A lo largo de estos primeros 5 años de desarrollo el sistema se ha sometido constantemente a mejoras y cambios en su estructura, a modo de mejorar su calidad y precisión. Durante los primeros años el foco estuvo puesto en crear un modelo que sea altamente estable, sacrificando en parte su calidad, pero a medida que ha pasado el tiempo, y los recursos humanos y computacionales detrás del proyecto han ido en aumento, se ha podido trabajar en aspectos más amplios para mejorar su calidad. Dentro de los principales cambios, destacan el aumento y cambio de configuración de los niveles verticales tipo sigma, pasando de 32 a 42 niveles, la incorporación de nuevas fuentes de agua dulce, ajustes a la máscara y mejoras en la batimetría (Fig. 39). Estas actualizaciones se ven reflejadas en significativos cambios observados particularmente a finales de 2017 donde se evidencia un mayor ajuste en la señal diaria de temperatura media y 2019 donde destaca la incorporación de la nueva versión del modelo oceánico ROMS-AGRIF, CROCO “Coastal and Regional Ocean Community model” asegurando el soporte del software.

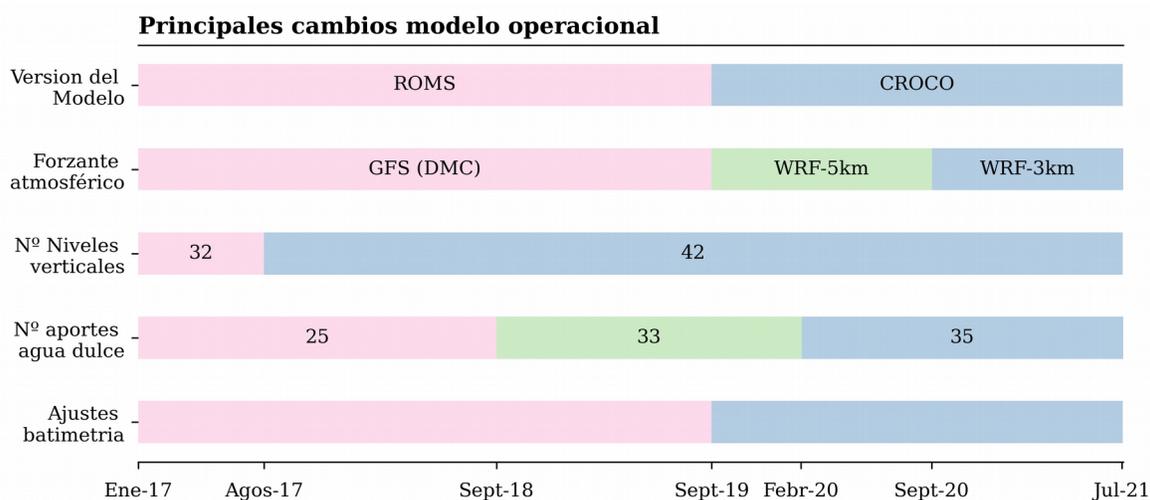


Figura 39: Principales cambios efectuados en la configuración del modelo operacional MOSA.

A lo largo del periodo operacional MOSA-CROCO ha integrado distintos forzantes o condiciones de bordes a sus pronósticos. Particularmente debido al alto impacto que genera la atmósfera sobre el océano, especialmente en su superficie, es que se requiere contar con un forzante atmosférico de calidad, capaz de reproducir los patrones atmosféricos regionales. Es por esto que sumado a los cambios ya mencionados anteriormente, como el número de aportes de agua dulce o los cambios en la batimetría, el forzante atmosférico utilizado por el modelo también ha presentado cambios a lo largo de su desarrollo. En la primera etapa de implementación el modelo operacional integró como forzante los campos atmosféricos pronosticados por la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), construidos en base al Sistema de Pronóstico Global (GFS). Debido a su baja resolución espacial y la incapacidad de reproducir patrones de viento locales se opta por el desarrollo de MOSA-WRF, modelo atmosférico regional y operacional con resolución espacial de 5 km y un dominio que cubre el dominio de MOSA-CROCO. MOSA-WRF se ha mantenido operando de manera estable. Durante esta etapa de desarrollo se ha mejorado dicho forzante integrando una grilla de alta resolución, la cual permite resolver la dinámica atmosférica de la región en ubicaciones espaciadas geográficamente por 3 km. Al incorporar el nuevo forzante al modelo oceanográfico resulta evidente el aumento de puntos de grilla que resuelven la dinámica atmosférica sobre la superficie del océano (Fig. 40). A su vez, se define de mejor manera la geografía local y los fiordos que abarcan una menor superficie, logrando un mejor acople entre ambos modelos. Esta mejora en la consistencia tierra-agua permite al modelo oceanográfico interpolar los campos atmosféricos considerando una mayor cantidad de información relacionada y en contacto con la superficie del océano.

Un objetivo permanente de este proyecto es evaluar el desempeño del modelo hidrodinámico operacional MOSA-CROCO. Las evaluaciones han mostrado en general una mejora continúa en la calidad de estos. En las primeras etapas se realizaron evaluaciones satisfactorias del nivel del mar, lo cual generó un modelo base estable para seguir calibrando y poner la atención en mejorar el campo de masa y de corrientes. Es necesario considerar que la zona de fiordos y canales del sur de Chile se caracteriza por ser una zona estuarina de gran escala, donde convergen aguas de origen oceánico con aguas de origen continental, las que se distinguen por su baja salinidad, lo que al mezclarse modifica la estructura vertical de la circulación, derivando en un patrón de circulación gravitacional o estuarina, (agua de baja densidad fluyendo sobre aguas más densas a través de un gradiente de presión). Para lograr que el modelo desarrolle estos patrones, es necesario ingresar los flujos de los ríos presentes en la zona, como también el agua producto de los deshielos y rangos de valores consistentes con la precipitación de la zona. Al monitorear la variabilidad superficial de los mares interior de Chiloé y Aysén notamos que el modelo operacional es capaz de reproducir los patrones espaciales estacionalmente, tanto en temperatura como en salinidad. En términos generales el dominio se mantiene respondiendo de buena manera a los cambios sinópticos en temperatura, sin embargo presenta una menor habilidad en términos de salinidad.

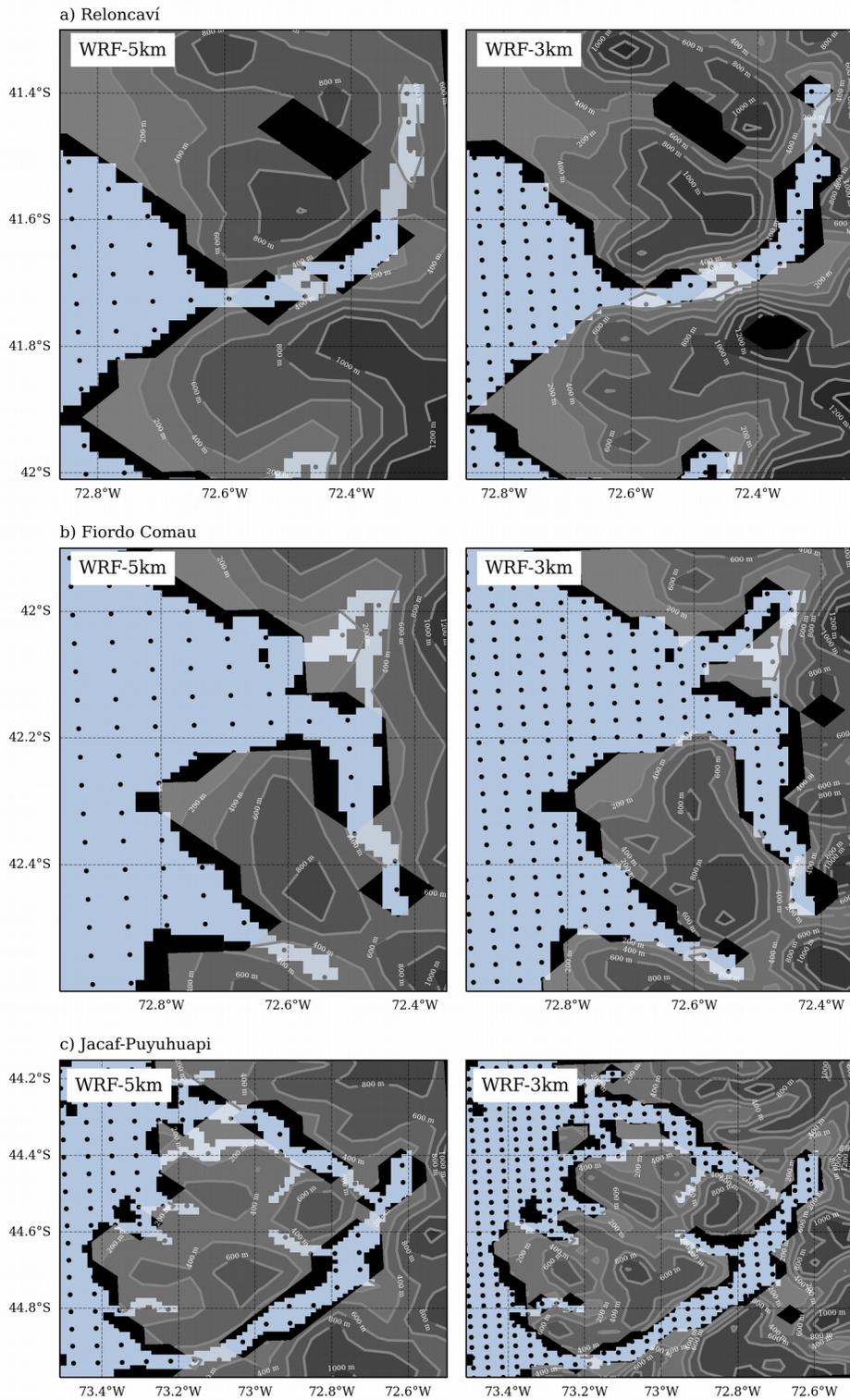


Figura 40: Relación entre máscara tierra-agua de MOSA-CROCO (color negro) y MOSA-WRF (Gris) para a) Estuario Reloncaví, b) Fiordo Comau y c) Canal Jacaf-Puyuhuapi. Los puntos representan las ubicaciones de la grilla MOSA-WRF.

Debido al carácter operacional del modelo, se debe mantener siempre un equilibrio entre la calidad de las simulaciones y la estabilidad del modelo. Por este motivo, un factor importante a mencionar es que se debe tener precaución al introducir cambios bruscos o valores extremos en los aportes de agua dulce con el fin de evitar inestabilidades numéricas en el gradiente de presión que hagan fallar la operatividad de MOSA-CROCO. Nosotros priorizamos que el modelo “siempre esté operativo”. Esto nos lleva a ser bastante rigurosos con los cambios a realizar, por lo que se ha optado por un ingreso gradual de datos de ríos, a medida que se tiene información disponible. En esta etapa, modificamos algunos valores de flujo mensual medio en base a los resultados numéricos de nuestro modelo hidrológico FLOW. De este modo, MOSA-CROCO ahora funciona con 35 fuentes de agua dulce que representan los principales ríos en el dominio, además del ingreso por deshielo del Campo de Hielo Norte, en la Laguna San Rafael. De todos modos, en base a la información de FLOW se agregaran nuevas fuentes puntuales de agua dulce en la siguiente etapa del proyecto, siempre que el modelo se mantenga estable y se asegure su funcionamiento en el tiempo.

Un punto relevante a considerar durante la ejecución de este proyecto fue la suspensión o retrasos de cruceros oceanográficos en la zona del mar interior de Chiloé y Aysén producto de la pandemia del Covid-19. Este proyecto en particular no considera mediciones en terreno, pero si utiliza esta información de otros proyectos del convenio de desempeño. Por este motivo, en esta oportunidad el análisis del desempeño del modelo se centró principalmente en mediciones satelitales. Además, en esta etapa profundizamos un los análisis de corrientes oceánicas, agregando un análisis regional de corrientes geostroficadas y un análisis puntual de la variabilidad sinóptica del modelo.

En el caso de las corrientes geostroficadas simuladas en mar abierto muestran una cierta coherencia al comparar los patrones espaciales, principalmente con la componente meridional. El modelo es capaz de reproducir adecuadamente la variabilidad estacional observada. Por otra parte, la evaluación de las corrientes en el presente informe muestran una buena correlación con los datos de ADCP en el canal Moraleda. Si bien se observa una sobre-estimación de la intensidad del flujo, la mayor densidad de las mediciones se ajustan de manera correcta en toda la columna de agua.

Finalmente, hay que destacar el enorme esfuerzo desarrollado en mantener operativo el sistema y en lograr disminuir gradualmente los errores en las diferentes variables oceanográficas. Al comienzo la mirada estaba centrada en procesos regionales, pero con el paso del tiempo el modelo ha mostrado un gran desempeño en reproducir procesos locales e incluso procesos de escala sinóptica, situación que motiva a seguir avanzando hacia la comprensión de los procesos oceanográficos que gobiernan los mares de la regiones de Los Lagos y de Aysén.

6.2 Modelo operacional MOSA-WRF

En el caso de MOSA-WRF, podemos evidenciar que el modelo ha logrado un alto grado de estabilidad, alcanzando una operatividad de más de 3 años, con un rendimiento del ~98%. Los pocos fallos que se han experimentado, se dieron en etapas iniciales del proyecto, principalmente debido a problemas relacionados con los servidores desde donde se descarga la información global que alimenta las condiciones de borde del modelo. Sin embargo, este obstáculo fue superado mediante la búsqueda exitosa de un forzante alternativo, CFS, en el caso de que GFS no estuviera disponible y de esta manera lograr continuidad en la operatividad de MOSA-WRF. En ocasiones puntuales, el sistema también se vio interrumpido producto de fallas en la red interna de IFOP-Putemún. Estos problemas fueron mitigados al migrar el sistema al nuevo *DataCenter* de IFOP ubicado en la ciudad de Viña del mar, el cual nos entrega mayor estabilidad y eficiencia a la hora de procesar y enviar información a los servidores en donde se aloja la plataforma interactiva de visualización CHONOS. Con estas mejoras el rendimiento de MOSA-WRF a progresado notablemente en esta última etapa.

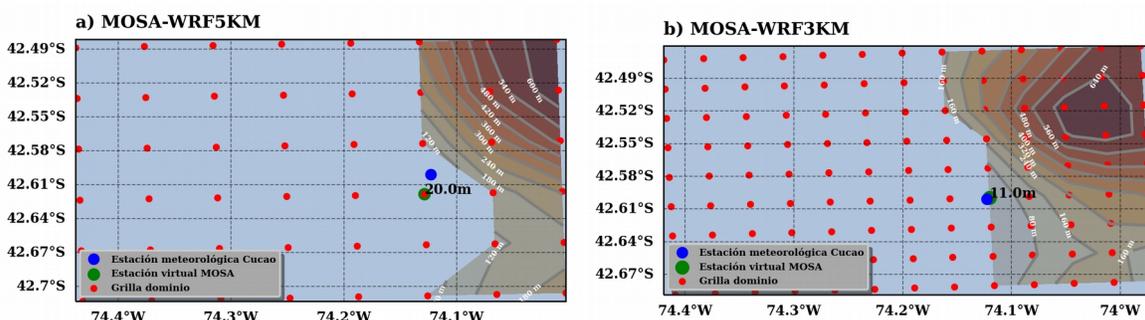


Figura 41: Mapa de la grilla de MOSA-WRF5km (panel izquierdo) y MOSA-WRF3km (panel derecho) junto a la elevación del terreno y la estación virtual extraída del dominio para Cucao.

En términos de sus resultados, MOSA-WRF ha logrado resolver de manera aceptable la variabilidad de los distintos parámetros estudiados a lo largo del periodo que lleva activo. En el caso de la temperatura y la presión atmosférica se evidenció un destacado comportamiento en términos de sus fases, mostrando elevados valores de correlación. Además, el modelo fue capaz de resolver la oscilación diaria y anual de la temperatura notando un mejor ajuste en la estación de Cucao, con respecto a su amplitud, luego de la actualización de MOSA-WRF. De igual manera la presión atmosférica también ha experimentado un mejor desempeño en términos del error de sesgo, luego de este proceso. La mejora en el ajuste en la temperatura se atribuye al aumento de resolución y por lo tanto una mejor definición de la línea de costa (Fig. 41). Esto permite resolver de manera más realista la posición de la estación, la que era representada sobre agua en la versión anterior y por lo tanto entregando una oscilación menor producto de la capacidad calorífica mas

elevada del agua con respecto a la tierra. Por otro lado el ajuste en la presión hace relación a la mejor definición de la topografía entregando una altura del terreno más acorde a la realidad y por consiguiente un mejor resultado en la presión atmosférica. En el caso de Melinka, la oscilación térmica se mantuvo constante, puesto que tanto en la primera versión como en esta nueva versión, la posición de la estación entregada por el modelo se resolvió sobre tierra. Por otro lado, también se aprecia que el cambio en la presión atmosférica tiene directa relación con la modificación en la altura del terreno producto de la mayor resolución (Fig. 42).

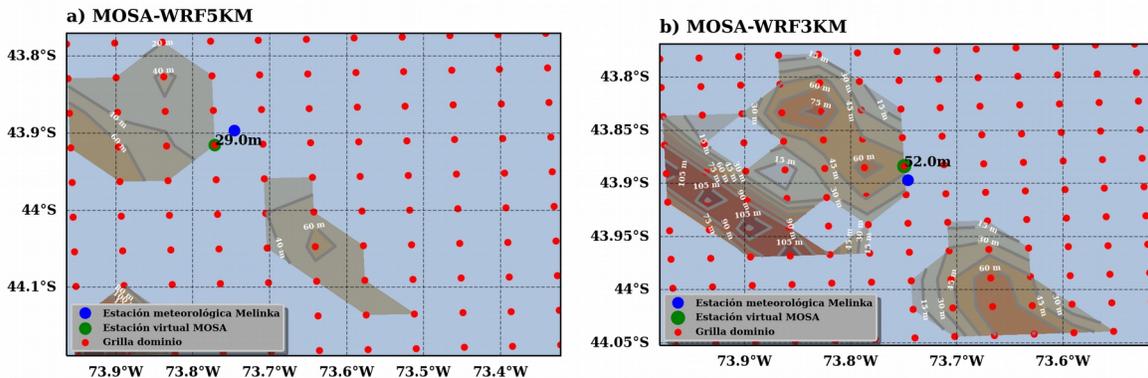


Figura 42: Mapa de la grilla de MOSA-WRF5km (panel izquierdo) y MOSA-WRF3km (panel derecho) junto a la elevación del terreno y la estación virtual extraída del dominio para Melinka.

En la precipitación se observó una variabilidad estacional acorde con la información observada. Sin embargo, en la estación de Cucao el modelo experimentó una sobrestimación sistemática de las observaciones. Este error se cree está relacionada con la instalación de este instrumento, el cual quedó a gran altura y expuesto a la dinámica atmosférica proveniente del océano Pacífico, la cual provoca, en periodos de tormenta, lluvia con una fuerte componente horizontal, imposibilitando al instrumento medir la totalidad del agua caída. No así en Melinka, donde se observa una subestimación de la precipitación por parte del modelo.

En el caso de la variabilidad del viento fue resuelta de manera correcta a lo largo del periodo de estudio. Esta variable juega un rol fundamental en el sistema hidrodinámico ya que es uno de los principales forzantes de la superficie del océano y por lo tanto toma vital relevancia a la hora de evaluar el pronóstico atmosférico. En esta oportunidad se utilizó el método de la Transformada de Wavelet para identificar las periodicidades más importantes de la circulación del viento. Para el caso de Cucao y Melinka el modelo obtuvo una importante aproximación a las observaciones, reproduciendo de buena manera las bandas de frecuencia de mayor energía para las distintas escalas temporales, tales como escala diaria, sinóptica e inter-estacional.

Finalmente, hay que recordar que la evaluación de modelo operacional MOSA-WRF depende de la información obtenida del sistema de monitoreo en tiempo real que administra IFOP. Por esta razón, una de las tareas pendientes para la próxima etapa del proyecto es relocalizar y reactivar las estaciones meteorológicas que presentaron fallas llevándolas a terrenos en donde se puedan medir de manera más representativa la dinámica atmosférica por sobre la escala diaria en términos temporales. Además, es necesario contar a corto plazo con un plan de mantención y calibración de todas estas estaciones con el fin de mantener el sistema de monitoreo operativo y estable en el tiempo. La información generada por las estaciones meteorológicas en tiempo casi real pueden ser observadas en la plataforma de CHONOS (<http://chonos.ifop.cl/met/>).

6.3 Modelo biogeoquímico.

Los modelos biogeoquímicos implementados en este informe tienen distintas características y filosofías en sus aproximaciones a los diferentes procesos ambientales. Por un lado, el modelo NPDZ se caracteriza por ser un modelo simple con 4 componentes o variables y 16 parametrizaciones, mientras que el modelo PISCES es un modelo de una complejidad alta que cuenta con 24 variables de estado y más de 60 parametrizaciones. Estas diferencias afectan los tiempos de cómputos, por ejemplo, simular 1 año climatológico en nuestro servidor de alto rendimiento tarda 5 días con el modelo NPDZ y 20 días con el modelo PISCES. Es por lo anterior, que resulta destacable el desempeño del modelo NPDZ en la variable de oxígeno disuelto, ya que en la evaluación que se realizó en la boca del Guafo, los resultados fueron similares a los obtenidos por el modelo PISCES. Si bien es cierto que los modelos sobrestimaron las concentraciones de oxígeno, en los meses de junio a septiembre ambos reprodujeron de buena manera la tendencia de leve aumento de niveles de oxígeno.

La similitud en los resultados de oxígeno disuelto de ambos modelos durante invierno en la boca del Guafo y las bajas concentraciones de clorofila superficial que ambos registraron, indicarían por una parte que los procesos biológicos principalmente de producción primaria están subestimados y que en la boca del Guafo, en algunas estaciones del año los procesos biológicos tendrían mayor relevancia que los procesos físicos (e.g advección) en la distribución de oxígeno disuelto. En este sentido, el experimento S01, que principalmente disminuyó la predación del zooplancton y la mortalidad del fitoplancton, además de aumentar la mortalidad del zooplancton, provocaron que la clorofila aumentará pudiendo replicar de mejor manera el patrón estacional de los datos observados, con esta mejora junto al aumento de la tasa de nitrificación y remineralización del carbono orgánico disuelto, además de la disminución de la degradación de carbono orgánico particulado provocaron que en general el oxígeno disuelto disminuyera, replicando lo señalado en noviembre donde la tendencia de disminución del oxígeno observado fue notablemente

abrupta. Por otra parte, a pesar de los prometedores resultados de este experimento, la modificación de los parámetros también provocó variaciones en otras variables que se deberían evaluar en el futuro, además de simular otros años, para conocer si la modificación de estos parámetros permiten un sistema sostenible en el tiempo.

En cuanto al experimento S02, que tenía como finalidad disminuir las concentraciones de oxígeno a través de la reducción en la mitad de las condiciones de borde norte, este logró bajar las concentraciones de oxígeno disuelto en la boca del Guafo, pero solo a partir de febrero, es decir, a los 7 meses de simulación del modelo. Esto significa que existe un tiempo de desplazamiento a considerar, para que las aguas con bajas concentraciones logren ser advectadas hasta la zona de Chiloé. Por este motivo, este experimento se debería realizar por un tiempo mayor, sin embargo el modelo PISCES tiene un gran costo computación, por lo tanto para esta prueba sería más recomendable utilizar el modelo NPDZ, ya que el objetivo de este experimento es darle mayor relevancia a la advección de agua oceánicas pobres en oxígeno por sobre procesos biológicos.

Por lo tanto, en la comparación entre el desempeño de ambos modelos biogeoquímicos, el modelo PISCES en general presentó un mejor desempeño, sin embargo, debido a su bajo computo el modelo NPDZ, podría ser utilizado para pruebas largas de condiciones de borde y así construir o mejorar condiciones iniciales de las variables de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto, ya que en estas tres variables ambos modelos no presentaron diferencias significativas.

Un punto relevante que se observó en las evaluaciones de los modelos fue el hecho de comparar resultados climatológicos con series de datos que tienen menos de 2 años de registro. En este sentido los productos satelitales cobran bastante importancia al tener un registro de datos más largos y continuo, dando a los promedios estacionales una mayor robustez estadística. No obstante, la clorofila es una variable que presenta una alta variabilidad interanual y tendencias variables en las concentraciones promedios de los últimos 20 años. Por ejemplo, Marrari et al., (2017) analizaron las concentraciones satelitales de clorofila de los sensores SeaWiFS (1997-2006) y MODIS (2002-2017) desde la zona norte de Perú al sur de Chile, determinando un incremento en las concentraciones de clorofila durante los últimos 20 años y mencionando un enfriamiento persistente de las aguas superficiales en la zona comprendida entre los 40 y 50 °S. Marrari et al., (2017) sugieren que este aumento de la clorofila superficial se debería al aumento de la surgencia costera asociado al cambio climático. Por lo tanto, la tendencia al incremento de la clorofila superficial en la zona de estudio, explican en parte, que los datos observados sean superior a los datos calculados por los modelos, ya que los datos climatológicos observados se calcularon con datos obtenidos entre los años 2003 al 2020, en cambio para forzar el modelo se utilizaron datos obtenidos entre los años 1997 al 2008. Como manera de disminuir la incertidumbre de esta variable y además poder utilizar en las evaluaciones

datos observacionales de corto periodo, se sugiere en el futuro realizar simulaciones que modelen un periodo específico de tiempo.

6.4 Modelo regional para la región de Magallanes.

En la etapa VI de este proyecto se inició el diseño y evaluación de un modelo basado en CROCO (versión actual de Roms-Agrif) en la región de Magallanes, buscando obtener un diagnóstico confiable sobre su factibilidad de implementación en esta región. Los pasos para su implementación fueron similares a los realizados en el pasado con el modelo de pronóstico operacional MOSA-CROCO para las regiones de Los Lagos y de Aysén. Para ello, lo primero fue abordar las barreras que podemos encontrar en este objetivo. A diferencia de las regiones de Los Lagos y de Aysén, donde actualmente opera el modelo de pronósticos MOSA-CROCO, en la región de Magallanes existe una mayor incertidumbre sobre los procesos dinámicos y su variabilidad en la zona. El modelado y la predicción de los océanos costeros es un desafío importante para la comunidad científica debido a la dinámica específica y rica de esas regiones, y causa de los diversos acoplamientos con la atmósfera inferior e intercambios con la regiones cercanas a la costa y mar adentro (Schiller & Brassington, 2011).

Aunque se han realizado diversos estudios que han abordado la hidrodinámica de la región, generalmente se opta por enfoques altamente locales, o sobre la incidencia de las propiedades conservativas del agua sobre organismos específicos, considerando que la región posee una importante industria pesquera y una creciente salmonicultura. Estos estudios generalmente son acotados espacial y temporalmente en alguno de los micro sistemas presentes en la región. No obstante, existen estudios que han englobado una mirada regional sobre procesos en la zona cuyos trabajos identifican patrones hidrográficos y de propagación de marea en la zona (Calvete & Silva, 2002; Salinas et al., 2004), así como también algunos estudios basados en modelos numéricos (Aiken, 2008; Brun et al., 2020). No obstante, se carece de herramientas que permitan conocer la evolución sinóptica del sistema. Es ahí donde recae el valor de la iniciativa del proyecto, donde un modelo operacional en la zona puede lograr un aporte considerable al conocimiento de los procesos presentes, como también de permitir adelantar escenarios críticos ambientales, haciendo de MOSAMAG una herramienta potencialmente valiosa.

Los resultados a la fecha muestran que es posible generar pronósticos oceanográficos a un horizonte de 3 días con el modelo MOSAMAG de 1.5 km de resolución horizontal, el cual incluye temperatura, salinidad y corrientes. El tiempo total del pronóstico es de ~8 horas considerando los tiempos de descarga de datos y de simulación en un servidor de alto rendimiento. A su vez, el modelo operacional global Mercator-Ocean se presenta como una opción válida para forzar los bordes del modelo, y podría ayudar a la construcción de una condición inicial, que podría ser modificada eventualmente. Sin embargo, con las

capacidades de computo actuales, la implementación de MOSAMAG supone una exigencia crítica a los servidores disponibles, los cuales deben asegurar el funcionamiento diario de los modelos de pronósticos operacionales disponibles en el portal web CHONOS. Por lo que se sugiere aumentar la capacidad de computo para la correcta implementación de este modelo en la región de Magallanes y a su vez, permita desarrollar a futuro modelos anidados de mayor resolución en áreas específicas como lo son el Seno Skyring o el golfo Almirante Montt. Estas zonas al día de hoy se presentan como sistemas altamente frágiles y fuertemente influenciados por masas glaciares de los cuales se dispone de escasa información oceanográfica.

Sin embargo, aún cuando la componente operativa del modelo pueda llevarse a cabo, todavía existen grandes brechas en la disponibilidad de datos *in situ*, los cuales son cruciales para el ejercicio de la modelación. Esto es una materia sensible en el desarrollo de este proyecto debido a la poca disponibilidad de información oceanográfica en la zona. Esta información permite conocer la dinámica de la zona, lo cual ayuda a mejorar la aproximación con la cual se construye el modelo, para luego ayudar a su calibración y posterior evaluación. En el caso de los modelos operacionales, se hace altamente deseable contar con monitoreos que otorguen datos en tiempo (casi) real, con los cuales se pueda evaluar la magnitud diaria de los errores del modelo. Finalmente, la existencia de estos datos podrían permitir realizar asimilación de datos en el modelo, lo cual permite mejorar las condiciones iniciales del pronóstico (Flather, 2000). No obstante, esto conlleva un aumento de los recursos necesarios, tanto en capital humano avanzado como en la capacidad de computo requerida.

A su vez, se espera que la incorporaciones persistentes de flujos de agua dulce obtenidos del modelo numérico hidrológico de alta resolución FLOW pueda aportar a una mejora considerablemente de las condiciones iniciales. Este aporte de agua dulce tiene un efecto en el flujo baroclínico que conducen la circulación en regiones dinámicamente complejas de influencia del agua dulce (ROFI) y corrientes costeras (O’dea et al., 2012). Hay que tener en consideración que el ingreso de volumen extra al modelo podría generar una pérdida de la estabilidad en el modelo, aunque por el momento no ha sido observado después de casi un mes de simulaciones.

En resumen, se cuenta con un modelo regional de pronósticos para la región de Magallanes de ~1.5 km de resolución espacial, que incorpora los cuerpos de agua interiores más relevantes de la región, como son el Golfo Almirante Montt, y los senos Skyring y Otway. Este modelo, denominado MOSAMAG, se encuentra en etapas iniciales de desarrollo, pero ya ha demostrado ser numéricamente estable, y sus principales resultados podrían estar disponible en el portal web CHONOS en un futuro. Sin embargo, aún quedan desafíos pendientes en cuanto a las capacidades de computo disponibles y a la calidad de los resultados, lo cual será abordado en la etapa siguiente a través de un enfoque centrado

en la evaluación, evolución y calibración de MOSAMAG. También se hace hincapié en la falta de datos de monitoreo disponibles, lo cual podría dificultar su eventual implementación.

7. CONCLUSIONES

El presente informe entrega los desarrollos, avances y evaluaciones del sistema de pronósticos operacionales oceanográficos y atmosféricos para la Patagonia de Chile conocido como MOSA. Este proyecto se inicia el 2015 manteniéndose operativo hasta la actualidad. Este sistema actualmente puede ser separado en las componentes MOSA-CROCO para los pronósticos oceanográficos y MOSA-WRF para los pronósticos atmosféricos. A ambos modelos operacionales se le han efectuado mejoras y calibraciones durante los últimos años, con una estabilidad actual que ha asegurado contar con información oceanográfica y atmosférica de manera continua en el tiempo.

Se ha evaluado el desempeño del modelo operacional MOSA-CROCO mediante una validación espacio-temporal de las variables pronosticadas entre 2017 y 2021. Los resultados reflejan que a lo largo del periodo pronosticado el modelo ha ido mejorando el ajuste de la temperatura superficial alcanzando hoy en día una correlación por sobre 0.95 en el dominio. En términos espaciales, el modelo ha mantenido su habilidad de reproducir de manera óptima la variabilidad estacional de la temperatura superficial, tanto en fase como en amplitud, manteniendo un mayor ajuste en el sector de mar abierto disminuyendo gradualmente hacia mar interior, sin embargo con correlaciones suficientemente significativas de entre 0.8 y 0.9. De igual manera, se nota un alto ajuste en la variabilidad estacional de la salinidad superficial en mar abierto. A su vez el pronóstico es capaz de reproducir de manera aceptable la variabilidad sinóptica de la temperatura superficial y muestra una respuesta en salinidad a las mejoras realizadas en la configuración del modelo, al menos en el sector puntual del seno de Reloncaví. Se observó una relación significativa en la temperatura superficial, con un índice de correlación de 0.9 y una raíz del error cuadrático medio inferior a 1.3 °C. Finalmente, las componentes de la corriente evaluadas en el canal Moraleda muestran una coherencia en la estructura vertical y en la circulación estuarina entre el modelo y un ADCP en la zona. En términos espaciales, la corriente geostrofica es bien representada por el modelo operacional. Ambos componentes geostrofos responden a la variabilidad estacional observada en el producto satelital, especialmente la componente meridional.

En el caso de MOSA-WRF se logró observar un alto rendimiento y estabilidad operativa, dejando atrás las simulaciones fallidas. En términos atmosféricos, se observa un buen desempeño de las diferentes variables meteorológicas al comparar con las mediciones de las estaciones meteorológicas en la localidad de Cucao y Melinka. La temperatura muestra una buena correlación (> 0.88) con un buen ajuste de la variabilidad estacional y diaria. La presión atmosférica también tuvo un buen desempeño con coeficientes de correlación mayores a 0.97. En el caso de la precipitación se observó una sobre-estimación del agua caída en la estación de Cucao y una subestimación en la estación de Melinka. De

todos modos, el modelo logra resolver la variabilidad estacional con mayor precipitación en invierno y menor precipitación en verano. La variabilidad del viento también fue resuelta de manera correcta, reproduciendo de buena manera las escalas diaria, sinóptica e inter-estacional. En términos logísticos, se enfocarán los esfuerzos en seguir mejorando nuestra red de monitoreo atmosférico para el Sur-Austral chileno, llevando a cabo todas las mantenciones pendientes y sumando nuevos equipos.

En el caso de los modelos biogeoquímicos, la implementación tanto del modelo NPZD como PISCES resultó exitosa. Dado las variables y parámetros que calculan ambos modelos existen diferencias significativas en los tiempos de computo, siendo PISCES 4 veces mayor. Esto mismo ocurre con el tamaño de las salidas generadas por ambos modelos. En términos de calidad y desempeño de las variables simuladas, ambos modelos registraron resultados similares en las variables de temperatura, salinidad y oxígeno disuelto. En cuanto a la clorofila superficial, esta fue mejor representada por el modelo PISCES al comparar con datos de MODIS. En términos generales, parece que el desempeño de PISCES es mejor que NPZD, pero que se deben profundizar en las condiciones de borde y en los valores de las diferentes parametrizaciones para obtener mejores resultados. A su vez, dado la gran variabilidad de las variables biogeoquímicas se sugiere realizar una simulación de un período conocido para una mejor validación de ambos productos.

Por otra parte, se ha implementado un modelo regional para la región de Magallanes basado en el modelo oceanográfico CROCO denominado MOSAMAG. Este modelo lleva cerca de un mes simulando pronósticos oceanográficos con un horizonte de 3 días de forma diaria y sin interrupciones hasta el momento de la elaboración de este informe. MOSAMAG tiene una resolución horizontal de ~1.5 km y 42 niveles verticales. Los análisis de sensibilidad de la batimetría mostraron correlaciones y errores aceptables indicando que el modelo reproduce la señal de marea de manera correcta y estable. Los pronósticos realizados durante el mes de agosto mostraron en la zona oceánica un patrón de distribución y magnitud de temperatura (salinidad) superficial comparable con los datos satelitales disponibles. En términos numéricos, el modelo tarda aproximadamente 8 horas en generar un pronóstico guardando datos horarios de temperatura, salinidad, corrientes y nivel del mar, lo que sumado a MOSA-CROCO para las regiones de Los Lagos y de Aysén significa usar el servidor HPC destinado a este propósito a su máxima capacidad. Por lo tanto, existe la necesidad de aumentar los recursos computacionales para continuar con el desarrollo de los modelos operacionales en estas regiones.

Finalmente, hay que mencionar que las salidas de los modelos operacionales MOSA-CROCO, MOSA-WRF, el modelo hidrológico FLOW y las mediciones en tiempo casi real de las estaciones meteorológicas del IFOP pueden ser visualizadas en el sitio web CHONOS (<http://chonos.ifop.cl>).

ANEXO A: ECUACIONES MODELO HIDRODINÁMICO CROCO

El movimiento de una partícula en el océano es descrita por las ecuaciones de Navier-Stokes. Estas se resuelven por medio de métodos numéricos en cada elemento del dominio.

1. **Balance hidrostático de momento vertical.** $H/L \ll 1$. El largo de un océano (~ 5000 km) 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:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (3)$$

donde P es la presión hidrostática, ρ es la densidad del agua, g es la aceleración de gravedad y z es la profundidad del agua.

2. **Ecuación de continuidad.** Campo de masa no divergente. Se asume que el agua de mar es incompresible en toda su columna.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

donde u , v , w son las componentes zonales, meridionales y verticales de la velocidad y x , y , z son los ejes cartesianos.

3. **Aproximación de Boussinesq.** Los gradientes horizontales de densidad son constantes

$$\rho = \rho_0 = cte \quad (5)$$

4. **Ecuación de estado.** La densidad el agua se estima en función de la temperatura, la salinidad y la presión, bajo la ecuación de estado.

$$\vec{u} \cdot \nabla (-H) = w \quad (6)$$

5. **Conservación de momento horizontal.**

$$K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| u}{\rho_0}; K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| v}{\rho_0}; \quad (7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla v + fu = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \nabla_h (K_{Mh} \cdot \nabla_h v) + \frac{\partial}{\partial z} K_{Mv} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (8)$$

6. Ecuaciones conservativas de trazadores temperatura y salinidad

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla_h (K_{Th} \cdot \nabla_h T) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (9)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla S = \nabla_h (K_{Sh} \cdot \nabla_h S) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Sv} \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (10)$$

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

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = w \quad \text{Condición cinemática}$$

$$K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\tau_x}{\rho_0}; K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\tau_y}{\rho_0}; \quad \text{Esfuerzo del viento}$$

$$K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{Q}{\rho_0 C_p} \quad \text{Flujo de calor}$$

$$K_{Sv} \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{S(E-P)}{\rho_0} \quad \text{Flujo de sal}$$

Las condiciones de borde verticales en el fondo ($z = -H$) son:

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

$$K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| u}{\rho_0}; K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| v}{\rho_0}; \quad \text{Fricción de fondo}$$

$$K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} = 0 \quad \text{Flujo de calor}$$

$$K_{Sv} \frac{\partial S}{\partial z} = 0 \quad \text{Flujo de sal}$$

ANEXO B: MODELO OPERACIONAL MOSA-WRF

El modelo Weather Research and Forecast (WRF) es un sistema numérico de simulación atmosférica diseñado a finales de la década de 1990. Su propósito principal fue satisfacer las necesidades de investigación y predicción operativa de la atmósfera. Este fue desarrollado gracias al esfuerzo en conjunto entre el National Center for Atmospheric Research (NCAR), el National Centers for Environmental Prediction (NCEP), el Forecast Systems Laboratory (FSL), el Air Force Weather Agency (AFWA), el Naval Research Laboratory, La Universidad de Oklahoma, y la Federal Aviation Administration (FAA).

Dentro de las principales características de este modelo se tiene que es no-hidroestáticos, es decir, las fuerzas de los gradientes de presión y gravedad no se encuentran equilibradas, permitiendo la libre trayectoria de las parcelas de aire en la componente vertical. De igual manera existe la opción para activar el módulo hidrostático. Posee un sistema de coordenadas Eulerianas (Skamarock et al., 2005) en donde el observador se encuentra en un punto fijo con respecto al movimiento del fluido. Cuenta con un módulo de asimilación de datos, y una arquitectura de software que favorece la computación paralela y la extensibilidad del sistema. Finalmente el modelo ofrece una amplia gama de aplicaciones meteorológicas a través de escalas de decenas de metros a miles de kilómetros.

WRF ofrece dos núcleos dinámicos para el cálculo de las ecuaciones que gobiernan la atmósfera, estos son: el Advanced Research WRF (ARW), y el Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM). Para el caso de MOSA-WRF, este se basó en el núcleo WRF-ARW desarrollado principalmente por NCAR, siendo la continuación del modelo atmosférico MM5. Este núcleo integra las ecuaciones de Euler no hidrostáticas compresibles (Skamarock et al., 2005) y se formulan usando una coordenada vertical de presión hidrostática que sigue al terreno, denotada por η y definida como:

$$\eta = \frac{P_h - P_{ht}}{\mu} \quad (11)$$

donde $\mu = P_{hs} - P_{ht}$, P_h es el componente hidrostático de la presión, y P_{hs} y P_{ht} se refieren a valores entre la superficie y los límites superiores, respectivamente. La definición de coordenadas (11) propuesta por Laprise (1992), es la coordenada σ tradicional utilizada en muchos modelos atmosféricos hidrostáticos. η varía desde un valor de 1 en la superficie hasta 0 en el límite superior del dominio del modelo (Fig. 43). Esta coordenada vertical también se conoce como coordenada vertical de masa.

Como $\mu(x,y)$ representa la masa por unidad de área dentro de la columna en el dominio del modelo en (x, y) las variables de forma de flujo apropiadas son:

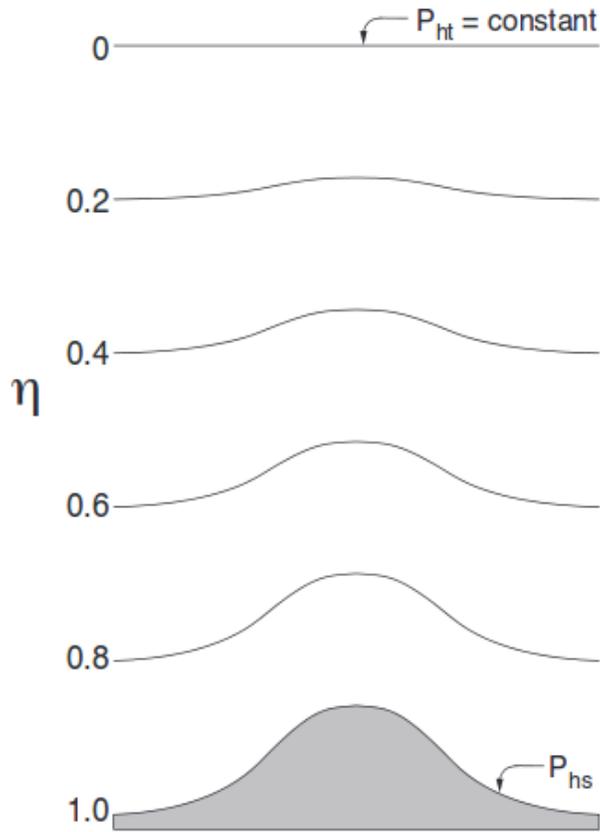


Figura 43: Niveles Eta para el modelo WRF-ARW que siguen el contorno del terreno. Fuente Skamarock et al. (2005)

$$V = \mu v = (U, V, W), \Omega = \mu \eta', \Theta = \mu \theta \quad (12)$$

donde $v = (u, v, w)$ son las velocidades en las dirección horizontal y vertical, respectivamente. $\omega = \eta'$ es la velocidad vertical y θ es la temperatura potencial. También aparecen en las ecuaciones primitivas de ARW las variables no-conservativas $\phi = gz$ (el geopotencial), p (presión) y $\alpha = 1 / \rho$ (la densidad inversa). Usando las variables definidas anteriormente, las ecuaciones de Euler se pueden escribir como:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot Vu) - \partial_x(p\phi_\eta) + \partial_x(p\phi_x) = F_U \quad (13)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot Vv) - \partial_y(p\phi_\eta) + \partial_y(p\phi_y) = F_V \quad (14)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot Vw) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_W \quad (15)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V\theta) = F_\Theta \quad (16)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0 \quad (17)$$

$$\partial_t \phi + \mu^{-1}[(V \cdot \nabla_\phi) - gW] = 0 \quad (18)$$

Junto con la relación de diagnóstico para la densidad inversa:

$$\partial_{\eta} \phi = -\alpha \mu \tag{19}$$

y la ecuación de estado

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^{\gamma} \tag{20}$$

Entre (13) - (20), los subíndices x, y y η denotan diferenciación,

$$\nabla \cdot V_a = \partial_x (U a) + \partial_y (V a) + \partial_{\eta} (\Omega a) \tag{21}$$

y

$$V \cdot \nabla_a = U \partial_x a + V \partial_y a + \Omega \partial_{\eta} a \tag{22}$$

donde a representa una variable genérica. $\gamma = cp/cv = 1.4$ es la relación de las capacidades caloríficas para el aire seco, R_d es la constante de gas para aire seco, y p_0 es una presión de referencia (típicamente 105 Pascales). Los términos del lado derecho F_U , F_V , F_W y F_{Θ} representan términos forzados que surgen de la física del modelo, la mezcla turbulenta, las proyecciones esféricas y la rotación de la Tierra.

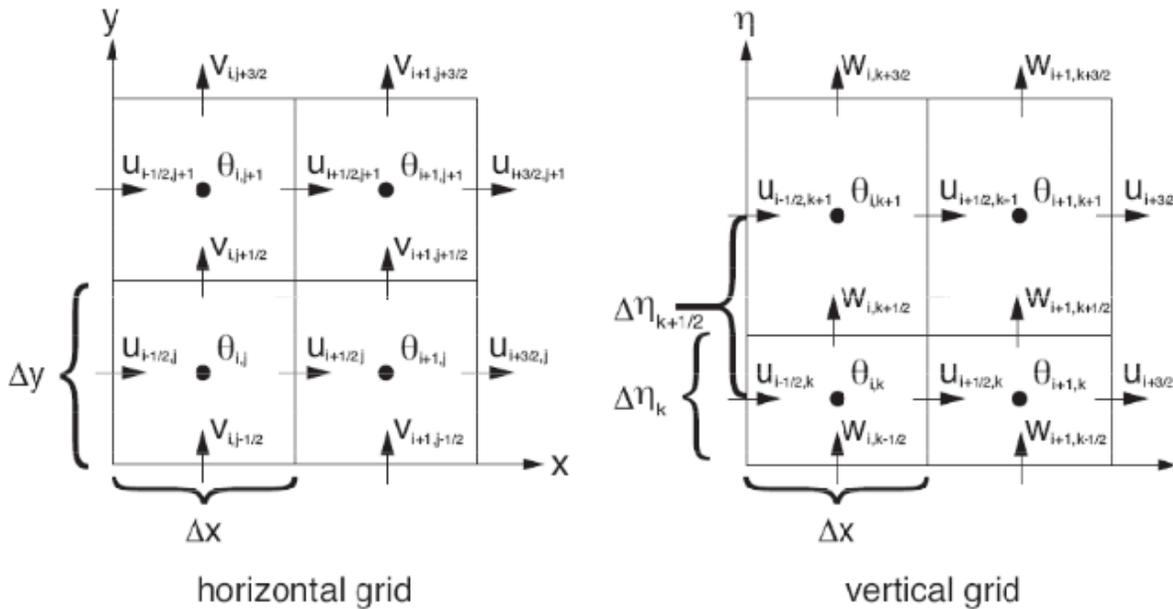


Figura 44: Grilla arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atmósfera. Fuente Skamarock et al. (2005).

Por otro lado, la discretización espacial en el núcleo ARW esta dada por la grilla Arakawa-C (Fig. 44), en dónde las componentes de la velocidad horizontal (U y V) y vertical (W) se resuelven en el centro de cada lado de las cuadrículas, dejando en el medio de cada cuadrícula las variables termodinámicas, de masa y escalares.

Por otro lado, el correcto funcionamiento de MOSA-WRF comienza con la descarga del forzante atmosférico, al rededor de las 3:00 am, mientras MOSA-ROMS da inicio a sus procesos. Esta información es esencial para lograr una simulación atmosférica exitosa. En esta versión se utilizaron los productos del modelo global de predicción atmosférica “Global Forecast System” (GFS). Estos pronósticos tienen una frecuencia temporal de 6 horas y una resolución horizontal de 0.25° distribuidos en 32 niveles verticales. Estos modelos son de libre acceso y se encuentran disponibles en <ftp://ftpprd.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/gfs/prod> (revisado 25 de abril, 2018). Este proceso tarda alrededor de 1 hora 40 minutos con una velocidad de descarga de ~ 500 kbps.

Posterior a esto, se procede a ejecutar los códigos de pre-procesamiento de WRF (ungib.exe y metgrid.exe) que son los encargados de desempaquetar e interpolar horizontalmente la información meteorológica proveniente de los forzantes globales y las variables geográficas incluidas en los códigos de WRF. Este método tarda 10 minutos aproximadamente.

Luego se interpola la información de entrada (meteorológica y geográfica) en los distintos niveles verticales especificados en la configuración del modelo (real.exe), para finalmente correr el código con el cual se ejecuta el pronóstico (wrf.exe). Este procedimiento tiene una duración aproximada de 90 minutos. El siguiente esquema muestra los principales pasos y códigos que se ejecutan para llevar a cabo una simulación (en este caso un pronóstico atmosférico).

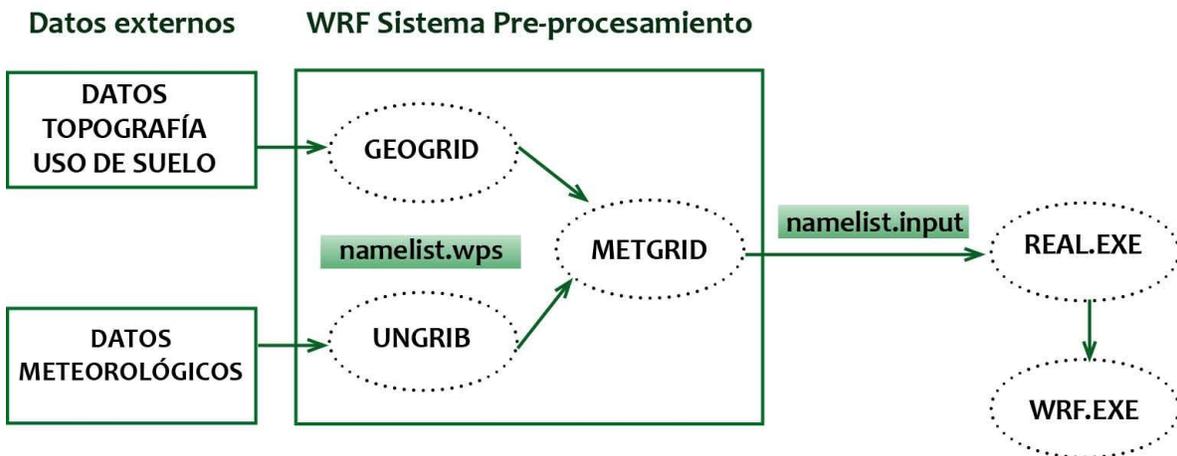


Figura 45: Esquema descriptivo con los componentes de WRF.

Luego de finalizar cada pronóstico, los archivos de salida son trabajados para otorgarles un formato establecido previamente, para luego ser incorporados como forzante atmosférico en MOSA-ROMS. Este procedimiento consiste en extraer solo los campos superficiales de las variables utilizadas para forzar el sistema de modelación hidrodinámico; estos son los flujos de calor, humedad y radiación, las componentes horizontales del viento y campos de presión atmosférica y presión de la columna de aire reducida al nivel del mar, también información de precipitación y por último, es fundamental considerar las variables de estado, tales como la temperatura de la superficie del mar, temperatura del aire y humedad relativa a 2 metros de la superficie.

Posterior a este procedimiento, se respaldan las salidas diarias de los pronósticos, junto a sus condiciones iniciales, utilizando alrededor de 6.5 gb de almacenamiento. Cabe destacar que los pronósticos son forzados con las condiciones creadas en el pronóstico del día anterior y en caso de que no exista, se busca hasta 3 días atrás. Esto nos permite reproducir variabilidad de escala mayor, como regímenes estacionales y/o anuales.

ANEXO C: MÓDULOS BIOGEOQUÍMICOS

Modelo NPZD

El modelo NPZD es un modelo biogeoquímico simple basado en el desarrollo de Fasham et al. (1990). Este tipo de modelo de red trófica consiste en un pequeño número de compartimientos donde la diversidad de organismos y especies individuales son reemplazadas por variables genéricas como ‘fitoplancton’ o ‘zooplancton’. Por lo tanto el modelo contiene cuatro variables de estado: nitrógeno inorgánico disuelto o nitrato (NO₃), fitoplancton (P), zooplancton (Z) y detritus (D). La interacción entre las variables de estado se resume en la Figura 46.

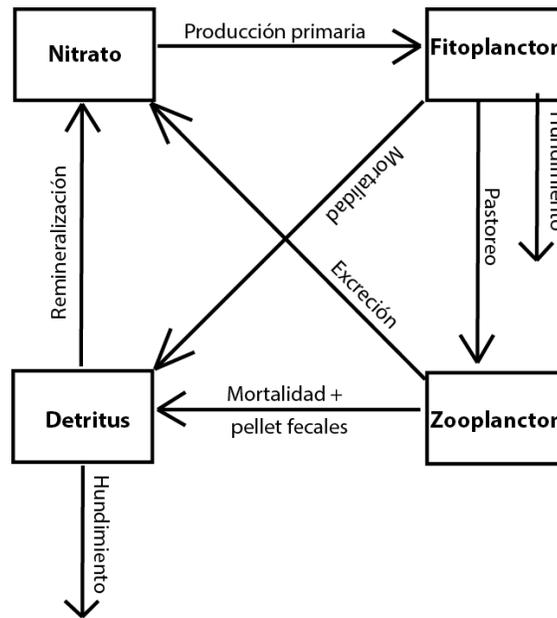


Figura 46: Esquema del modelo NPZD.

Es importante notar que el contenido de oxígeno en la columna de agua es el resultado del siguiente balance de masa, donde varios procesos de producción y consumo son considerados.

$$\frac{dO_2}{dt} = \text{Producción Primaria} - (\text{Respiración} + \text{Remineralización}) \dots \pm (\text{Intercambio océano-atmósfera}) \quad (23)$$

Por lo tanto la concentración de oxígeno está dada por el oxígeno producido durante el proceso de producción primaria, es decir durante el crecimiento del fitoplancton y los procesos que consumen O₂. En los procesos de respiración del zooplancton y de remineralización del detritus, las bacterias utilizan oxígeno como primer oxidante. El

intercambio océano-atmósfera puede ser una pérdida o ganancia de oxígeno, ya que depende de la solubilidad del O₂ en el agua de mar para la salinidad y temperatura de ese momento.

Modelo PISCES

El modelo biogeoquímico Pelagic Interactive Scheme for Carbon and Ecosystem Studies (PISCES, Aumont et al., 2003; Aumont y Bopp, 2006; Aumont et al., 2015) simula los ciclos de carbono, oxígeno y los principales nutrientes que controlan el crecimiento del fitoplancton (PO₄³⁻, NO₃⁻, NH₄⁺, Si, Fe). En este modelo el crecimiento del fitoplancton depende de las concentraciones externas de nutrientes. PISCES incluye dos clases de fitoplancton (diatomeas y nanofitoplancton) y dos clases de zooplancton (micro y mesozooplancton). Este modelo incorpora tres compartimentos "no vivos", estos son: materia orgánica disuelta semilábil, pequeñas partículas que se hunden y grandes partículas que se hunden. A continuación se presenta un esquema general que representa la arquitectura del modelo PISCES (Fig. 47)

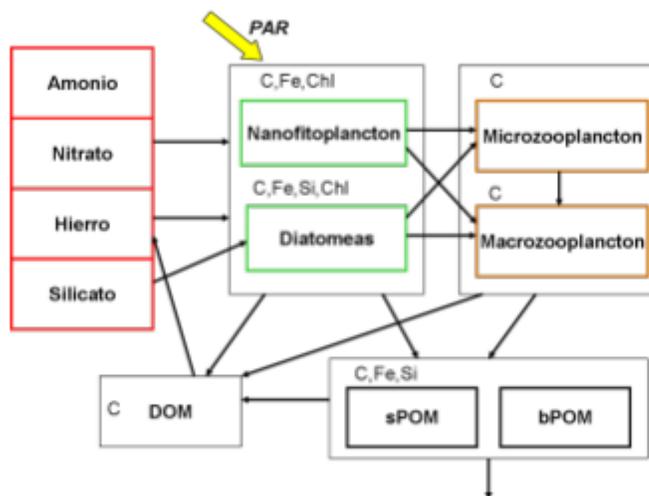


Figura 47: Arquitectura del modelo PISCES extraído de Aumont y Bopp (2006). Este esquema muestra el modelo ecosistémico omitiendo el oxígeno y el sistema de carbonato.

PISCES cuenta con 24 compartimentos y más de 60 parámetros (Aumont y Bopp, 2006), los cuales están especialmente configurados para ROMS a través de una lista disponible para su modificación (namelist.trc.sms). Cabe destacar que la nueva versión de ROMS, CROCO (<https://www.croco-ocean.org>), contiene la versión actual de PISCES (Aumont et al., 2015) en la cual han aumentado el número de parámetros e incorporado cambios a los nutrientes modelados, a los compartimentos de fito y zooplancton y a la materia orgánica disuelta y particulada, entre otros. La implementación de PISCES en la

zona sur-austral de Chile, podría ayudar a resolver problemáticas tan relevantes como aquellas relacionadas con la marea roja, la eutrofización, la disponibilidad de nutrientes y luz para el crecimiento del fitoplancton y la alcalinidad de la columna de agua.

Los trabajos que conjugan modelación biofísica en Chile, se encuentran restringidos particularmente a la zona centro (Concepción y Golfo de Arauco; Baird et al., 2007), a la zona centro-sur (30-40 °S; Gómez et al., 2017, Vergara et al., 2017, Pizarro-Koch et al., 2019) y a la zona norte del Sistema de Corrientes de Humboldt (Perú; Espinoza-Morriberón et al., 2017; 2019). Esto es una limitación para ajustar los coeficientes y parámetros de PISCES. Después de una revisión bibliográfica solo se encontraron 8 parámetros biogeoquímicos para Chile. Los otros parámetros fueron ajustados de la siguiente forma: 9 valores tomados del sistema de surgencia de Perú (Albert et al., 2010) y el resto a valores del trabajo de Kane et al. (2010), los cuales son valores estándar del modelo PISCES.

Los parámetros recopilados para las costas de Chile son los siguientes:

1. Máxima tasa de pastoreo del zooplancton (Bottjer y Morales, 2005).
2. Tasa de remineralización de carbono orgánico disuelto (Pantoja et al., 2004).
3. Tasa de remineralización del carbono orgánico particulado (Pantoja et al., 2006; Cuevas et al., 2004).
4. Tasa de exudación del mesozooplancton (Pérez-Aragón et al., 2011).
5. Tasa de mortalidad del zooplancton (Yáñez et al., 2012).
6. Tasa de nitrificación (Fernández y Farías., 2012).
7. Tasa de excreción de materia orgánica disuelta (González et al., 2007).

ANEXO D: ESTADÍSTICOS PRINCIPALES PARA VALIDACIÓN

Para llevar a cabo la validación de un modelo numérico se deben comparar dos señales: La simulada (Y) y la observada (O), para un numero N de valores, por lo tanto, los índices utilizados en este estudio se pueden definir de la siguiente manera:

Error de Sesgo: El error de sesgo, también conocido por bias, nos indica un error sistemático que esté ocurriendo sobre el modelo, tendiendo a la sub-estimación si el valor es negativo, o sobre-estimación si es positivo. Su valor se obtiene mediante la sumatoria de las diferencias entre los valores simulados y observaciones, dividido por el largo de la serie (Pielke, 1984).

$$SESGO_{yx} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y_k - X_k) \quad (24)$$

Coefficiente de correlación de Pearson: El coeficiente de correlación de Pearson es una medida que nos advierte como covarían los resultados simulados con respecto a los observados. En otras palabras nos entrega cual es la fase que existe entre ellos. Se define como el cociente entre la covarianza de lo modelado (Y) y observado (X) y el producto de las desviaciones estándar (s_y y s_x) para cada variable. El coeficiente de correlación se define como r_{yx} .

$$r_{yx} = \frac{COV_{yx}}{s_y s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})(X_k - \bar{X})}{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y}) \sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})} \quad (25)$$

- Si $r = 1$, existe una correlación positiva perfecta, es decir si la variable observada aumenta, la simulada también lo debe hacer con la misma magnitud y viceversa.
- Si $0 < r < 1$, existe una correlación positiva, mientras más se acerca a 1 la correlación será mayor, lo contrario ocurre si se aproxima a 0.
- Si $r = 0$, no existe alguna relación lineal entre la simulación y la observación.
- Si $-1 < r < 0$, existe una correlación negativa, y al igual que el segundo ítem, mientras más se acerca a -1 la correlación negativa será mayor.
- Si $r = -1$, existe una correlación negativa perfecta, esto quiere decir si la observación aumenta, la simulación disminuye con la misma magnitud y viceversa.

Cociente entre las desviaciones estándar: Este índice nos permite resolver si el modelo está sobre-estimando o sub-estimando la amplitud de los datos. Consiste en el cociente entre la desviación estándar de los datos modelados y la desviación estándar de los

datos observados. Si el valor es > 1 hay una sobre-estimación, si el valor está entre 0 y 1 presenta una sub-estimación. Si el valor es $= 1$ quiere decir que la amplitud de los resultados simulados es la misma que la de los datos observados.

$$COCIENTE_{s_x s_y} = \frac{s_y}{s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})}{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})} \quad (26)$$

Error medio absoluto: Este error conocido como MAE (por sus siglas en ingles), nos da la medida del valor absoluto de las diferencias en promedio entre los valores pronosticados y los observados (Stauffer y Seaman, 1990). Se define mediante la siguiente ecuación.

$$MAE = \frac{\sum_{k=1}^N |Y_k - X_k|}{N} \quad (27)$$

Raíz del error cuadrático medio (RMSE): También conocido por RMSE (por sus siglas en ingles) y al igual que el MAE, este es una medida de uso frecuente para comparar errores de pronóstico de diferentes modelos. Cuanto menor es el valor RMSE, mejor es la capacidad predictiva de un modelo en términos de su desviación absoluta. Sin embargo, la presencia de pocos errores grandes puede dar como resultado un mayor valor de RMSE (Willmott and Matsuura, 2005).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{(Y_k - X_k)^2}{N}} \quad (28)$$

ANEXO E: RECURSOS COMPUTACIONALES

Debido a que se debe asegurar la continuidad operacional de los modelos MOSA-ROMS y MOSA-WRF, estos fueron instalados y configurados en un servidor de alto rendimiento ubicado en el *Data Center* de IFOP en Viña del Mar con los estándares establecidos en las normas internacionales ANSI / TIA / EIA-942. Las especificaciones técnicas de este equipo son resumidos en la Tabla 8.

Tabla 8: Especificaciones técnicas del servidor de alto rendimiento ubicado en *Data Center IFOP en Viña del Mar*.

Nodo líder – Dell PowerEdge R640	Nodos computo (4 unidades) – SGI C1110–RP6 .	Switch Dell Networking S4128f-ON de última generación
2 procesadores Intel Xeon Gold 5118 2.3G, 12C/24T, 10.4GT/s, 16M Cache, Turbo, HT (105W) DDR4-2400	2 procesadores Intel Xeon Gold 5118 2.3G, 12C/24T, 10.4GT/s, 16M Cache, Turbo, HT (105W) DDR4-2400	28 puertos fijos SFP+ de 10 GbE (1/10 GbE)
128 GB RAM • 8 x 16GB RDIMM, 2666MT/s, Dual Rank	64 GB RAM • 4 x 16GB RDIMM, 2666MT/s, Dual Rank	2 puertos QSFP28 10/25/40/50/100 GbE
10 x 1TB 7.2K RPM NLSAS 12Gbps 512n 2.5in Hot-plug Hard Drive	4 x 1TB 7.2K RPM NLSAS 12Gbps 512n 2.5in Hot-plug Hard Drive	Capacidad de la estructura del switch (dúplex completo): 960 Gbps
2 Fuentes de poder redundantes (1+1) 750W Hot Swap	2 Fuentes de poder redundantes (1+1) 750W Hot Swap	
• Broadcom 57416 2 Port 10Gb Base-T + 5720 2 Port 1Gb Base-T, rNDC (conexión LAN) • Broadcom 57412 Dual Port 10Gb, SFP+, PCIe Adapter, Low Profile (Conexión entre servidores a través de switch S4128f)	• Broadcom 57416 2 Port 10Gb Base-T + 5720 2 Port 1Gb Base-T, rNDC (conexión LAN) • Broadcom 57412 Dual Port 10Gb, SFP+, PCIe Adapter, Low Profile (Conexión entre servidores a través de switch S4128f)	

Por otra parte, para el sistema de información oceanográfica CHONOS, utiliza un servidor web con las siguientes características técnicas (Tabla 9):

Tabla 9: Especificaciones técnicas servidor web para CHONOS ubicado en Data Center Viña del Mar.

PowerEdge R640 Server
(2) Intel Xeon Silver 4116 2.1G, 12C/24T, 9.6 GT/s, 16.5 M Cache, Turbo, HT (85W) DDR4-2400 (338-BLUT)
(8) 16GB RDIM, 2666 MT/s, Dual Rank (370-ADND)
8 Standar Fans for R640 (384-BBQJ)
IDRAC9, Enterprise (385-BBKT)
(2) 3.84TB SSD SATA Read Intensive 6Gbps 512n 2.5in Hot-plug Drive, PM863a, 1 DWPD, 7008 TBW (400-ASGL)
Broadcom 5719 QP 1 Gb Network Interface Card, Low Profile (540-BBDF)
Broadcom 57416 2 Port 10 Gb Base-T + 5720 2 Port 1 Gb Base-T, rNDC (540-BBUK)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aiken, C. M. (2008). Barotropic tides of the Chilean Inland Sea and their sensitivity to basin geometry. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(C8).
- Albert, A., Echevin, V., Lévy, M., & Aumont, O. (2010). Impact of nearshore wind stress curl on coastal circulation and primary productivity in the Peru upwelling system. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 115(C12).
- Albretsen, J. (2011). NorKyst-800 report no. 1: User manual and technical descriptions. *Fisken og havet*.
- Antonov, J. I., R. A. Locarnini, T. P. Boyer, A. V. Mishonov, and H. E. Garcia, 2006. World Ocean Atlas 2005, Volume 2: Salinity. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 62, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182 pp.
- Arakawa, A., & Lamb, V. R. (1981). A potential enstrophy and energy conserving scheme for the shallow water equations. *Monthly Weather Review*, 109(1), 18-36.
- Asplin, L., Boxaspen, K., & Sandvik, A. D. (2004). Modelled distribution of salmon lice in a Norwegian fjord. ICES.
- Atlas, R. (1997). Atmospheric observations and experiments to assess their usefulness in data assimilation (gtSpecial Issue>Data assimilation in meteorology and oceanography: Theory and practice). *Journal of the Meteorological Society of Japan. Ser. II*, 75(1B), 111-130.
- Aumont, O., Éthé, C., Tagliabue, A., Bopp, L., & Gehlen, M. (2015). PISCES-v2: an ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. *Geoscientific Model Development Discussions*, 8(2).
- Aumont, O., & Bopp, L. (2006). Globalizing results from ocean in situ iron fertilization studies. *Global Biogeochemical Cycles*, 20(2).
- Avila, M., De Zarate, C., Clement, A., Carbonell, P., & Pérez, F. (2015). Efecto de factores abióticos en el crecimiento vegetativo de *Alexandrium catenella* proveniente de quistes en laboratorio. *Revista de biología marina y oceanografía*, 50, 177-185.
- Baird, M. E., Leth, O. and J. F. Middleton. 2007. Biological response to circulation driven by mean summertime winds off central Chile: A numerical model study. *J. Geophys. Res.* 112, C07031, doi:10.1029/2006JC003655.
- Bravo, S. (2010). The reproductive output of sea lice *Caligus rogercresseyi* under controlled conditions. *Experimental parasitology*, 125(1), 51-54.

- Bottjer, D., and C. E. Morales. 2005. Microzooplankton grazing in a coastal embayment off Concepción, Chile, (~36°S) during non-upwelling conditions. *Journal of Plankton Research* (27) 4: 383, 391.
- Boyer, T., Locarnini, R. A., Baranova, O., Garcia, H. E., Mishonov, A. V., Paver, C., ... & Zweng, M. (2018). The World Ocean Atlas 2018: Improvements and Uses of Climatological Mean Fields. *AGUFM, 2018*, OS13D-1506.
- Brun, A. A., Ramirez, N., Pizarro, O., & Piola, A. R. (2020). The role of the Magellan Strait on the southwest South Atlantic shelf. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 106661.
- Buschmann, A. H., Cabello, F., Young, K., Carvajal, J., Varela, D. A., & Henríquez, L. (2009). Salmon aquaculture and coastal ecosystem health in Chile: analysis of regulations, environmental impacts and bioremediation systems. *Ocean & Coastal Management*, 52(5), 243-249.
- Calvete, C. (2002). Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre el golfo de Penas y el estrecho de Magallanes (Crucero Cimar-Fiordo 2). *Revista Ciencia y Tecnología del Mar*, 25, 1.
- Chassignet, E. P., & Verron, J. (1998). Ocean Modeling and Parameterization, vol. 516 of Mathematical and Physical Sciences.
- Cuevas, L.A., Daneri, G., Jacob, B. and P. Montero 2004. Microbial abundance and activity in the seasonal upwelling area off Concepción (~36°S), central Chile: a comparison of upwelling and non-upwelling conditions. *Deep-Sea Research II*, 51: 2427–2440.
- Dagestad, K.-F., Röhrs, J., Breivik, Ø., and Ådlandsvik, B.: OpenDrift v1.0: a generic framework for trajectory modelling, *Geosci. Model Dev.*, 11, 1405-1420, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018>, 2018.
- Da Silva, A. M., Young, C. C., & Levitus, S. (1994). Atlas of surface marine data 1994, Vol. 4: Anomalies of fresh water fluxes. *NOAA Atlas, NESDIS*, 9.
- Debreu, L., Marchesiello, P., Penven, P., & Cambon, G. (2012). Two-way nesting in split-explicit ocean models: algorithms, implementation and validation. *Ocean Modelling*, 49, 1-21.
- Drévilion, M., Bourdallé-Badie, R., Derval, C., Lellouche, J. M., Rémy, E., Tranchant, B., ... & Garric, G. (2008). The GODAE/Mercator-Ocean global ocean forecasting system: results, applications and prospects. *Journal of Operational Oceanography*, 1(1), 51-57.
- Egbert, G. D., & Erofeeva, S. Y. (2002). Efficient inverse modeling of barotropic ocean tides. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 19(2), 183-204.

- Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Ledesma, J., Vásquez, L., Graco, M. (2017). Impacts of El Niño events on the Peruvian upwelling system productivity. *J. Geophys. Res. Oceans*, 122: 5423–5444. doi:10.1002/2016JC012439.
- Espinoza-Morriberón, D., Echevin, V., Colas, F., Tam, J., Gutierrez, D., Graco, M., Ledesma, J., Quispe-Ccalluari, C. 2019. Oxygen Variability During ENSO in the Tropical South Eastern Pacific. *Front. Mar. Sci.* 5:526. doi: 10.3389/fmars.2018.00526.
- Flather, R. A. (2000). Existing operational oceanography. *Coastal Engineering*, 41(1-3), 13-40.
- Fernández, C., and L. Farías. 2012. Assimilation and regeneration of inorganic nitrogen in a coastal upwelling system: ammonium and nitrate utilization. *Mar. Ecol. Progr. Ser.*, 451: 1-14.
- Garavelli, L., Colas, F., Verley, P., Kaplan, D. M., Yannicelli, B., & Lett, C. (2016). Influence of biological factors on connectivity patterns for *Concholepas concholepas* (loco) in Chile. *PloS one*, 11(1), e0146418.
- Glibert, P.M., Allen, J.I., Bouwman, L., Brown, C., Flynn, K.J., Lewitus, A. & Madden, C.J. 2010. Modeling of HABs and eutrophication: status, advances, challenges *J. Mar. Syst.*, 83, pp.262- 275.
- Glasgow, H. B., Burkholder, J. M., Reed, R. E., Lewitus, A. J., & Kleinman, J. E. (2004). Real-time remote monitoring of water quality: a review of current applications, and advancements in sensor, telemetry, and computing technologies. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 300(1-2), 409-448.
- Gómez, F. A., Spitz, Y. H., Batchelder, H. P. and M. A. Correa-Ramirez 2017. Intraseasonal patterns in coastal plankton biomass off central Chile derived from satellite observations and a biochemical model. *Journal of Marine Systems*, 174: 108-118.
- González, H.E., Menschel, E., Aparicio, C., Barría, C., 2007. Spatial and temporal variability of microplankton and detritus, and their export to the shelf sediments in the upwelling area off Concepción, Chile (36°S), during 2002– 2005. *Prog. Oceanogr.* 75, 435–451.
- González, L., & Carvajal, J. (2003). Life cycle of *Caligus rogercresseyi*, (Copepoda: Caligidae) parasite of Chilean reared salmonids. *Aquaculture*, 220(1-4), 101-117.
- Hamman, J. J., Nijssen, B., Bohn, T. J., Gergel, D. R., & Mao, Y. (2018). The Variable Infiltration Capacity model version 5 (VIC-5): infrastructure improvements for new applications and reproducibility. *Geoscientific Model Development (Online)*, 11(8).
- Hooker, S. B., & McClain, C. R. (2000). The calibration and validation of SeaWiFS data. *Progress in Oceanography*, 45(3-4), 427-465.

- Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: perspectives, concerns and research needs. *Aquaculture Environment Interactions*, 1(1), 57-70.
- IOC, SCOR y IAPSO. 2010. The international thermodynamic equation of seawater. 2010: Calculation and use of thermodynamic properties, Intergov. Oceanogr. Comm. Manuals Guid. No. 56, (June), 196pp.
- Kane, A., Moulin, C., Thiria, S., Bopp, L., Berrada, M., Tagliabue, A., ... & Badran, F. (2011). Improving the parameters of a global ocean biogeochemical model via variational assimilation of in situ data at five time series stations. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 116(C6).
- Laprise, R. (1992). The Euler equations of motion with hydrostatic pressure as an independent variable. *Monthly weather review*, 120(1), 197-207.
- Lembeye, G., Marcos, N., Sfeir, A., Molinet, C., Jara, F., Clément, A., & Rojas, X. (1998). Seguimiento de la toxicidad en recursos pesqueros de importancia comercial en la X y XI región. *Informe Final Proyecto FIP*, 97, 49-86.
- Letelier, J., Soto-Mardones, L., Salinas, S., Osuna, P., López, D., Sepúlveda, H. H., ... & Rodrigo, C. (2011). Variabilidad del viento, oleaje y corrientes en la región norte de los fiordos Patagónicos de Chile. *Revista de biología marina y oceanografía*, 46(3), 363-377.
- Levitus, S., Locarnini, R. A., Boyer, T. P., Mishonov, A. V., Antonov, J. I., Garcia, H. E., ... & Seidov, D. (2010). World ocean atlas 2009.
- Li, J. G. (2008). Upstream nonoscillatory advection schemes. *Monthly Weather Review*, 136(12), 4709-4729
- Liang, X., Lettenmaier, D. P., Wood, E. F., & Burges, S. J. (1994). A simple hydrologically based model of land surface water and energy fluxes for general circulation models. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 99(D7), 14415-14428.
- Locarnini, R. A., A. V. Mishonov, J. I. Antonov, T. P. Boyer, and H. E. Garcia, 2006. World Ocean Atlas 2005, Volume 1: Temperature. S. Levitus, Ed. NOAA Atlas NESDIS 61, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C., 182 pp.
- Mardones, F. O., Perez, A. M., & Carpenter, T. E. (2009). Epidemiologic investigation of the re-emergence of infectious salmon anemia virus in Chile. *Diseases of aquatic organisms*, 84(2), 105-114.
- Mardones, J., Clément, A., Rojas, X., & Aparicio, C. (2010). Alexandrium catenella during 2009 in Chilean waters, and recent expansion to coastal ocean. *Harmful Algae News*, 41, 8-9.

- Marín, V. H., & Campuzano, F. J. (2008). Un modelo hidrodinámico barotrópico para los fiordos australes de Chile entre los 41 °S y los 46 °S. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 31(2), 125-136.
- Marrari M, Piola AR, Valla D (2017) Variability and 20-year trends in satellite-derived surface chlorophyll concentrations in large marine ecosystems around South and Western Central America. *Front Mar Sci* 4:372.
- Moore, A. M., Arango, H. G., Di Lorenzo, E., Cornuelle, B. D., Miller, A. J., & Neilson, D. J. (2004). A comprehensive ocean prediction and analysis system based on the tangent linear and adjoint of a regional ocean model. *Ocean Modelling*, 7(1-2), 227-258.
- Muñoz, P., Avaria, S., Sievers, H., & Prado, R. (1992). Presencia de dinoflagelados tóxicos del género *Dinophysis* en el Seno Aysén, Chile. *Revista de Biología Marina*, 27 (2), 187-212.
- O'dea, E. J., Arnold, A. K., Edwards, K. P., Furner, R., Hyder, P., Martin, M. J., ... & Liu, H. (2012). An operational ocean forecast system incorporating NEMO and SST data assimilation for the tidally driven European North-West shelf. *Journal of Operational Oceanography*, 5(1), 3-17.
- Oke, P. R., Allen, J. S., Miller, R. N., Egbert, G. D., & Kosro, P. M. (2002). Assimilation of surface velocity data into a primitive equation coastal ocean model. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 107(C9), 5-1.
- Olivares, G., Sepulveda, H. H., & Yannicelli, B. (2015). Definition of sanitary boundaries to prevent ISA spread between salmon farms in Southern Chile based on numerical simulations of currents. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 158, 31-39.
- Paduan, J. D., & Shulman, I. (2004). HF radar data assimilation in the Monterey Bay area. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C7).
- Pantoja, S., Sepúlveda, J. H. E. González. 2004. Decomposition of sinking proteinaceous material during fall in oxygen minimum zone off northern Chile. *Deep-Sea Res. I* 51: 55-70.
- Pantoja, S. 2006. Biogeochemistry of the OMZ of Chile. *Gayana* 70: 62-67.
- Pettinger, L. R. (1971). Field data collection: An essential element in remote sensing applications.
- Penven, P., Debreu, L., Marchesiello, P., & McWilliams, J. C. (2006). Evaluation and application of the ROMS 1-way embedding procedure to the central California upwelling system. *Ocean Modelling*, 12(1-2), 157-187.
- Pérez-Aragón, M., Fernández, C., Escribano, R. 2011. Nitrogen excretion by mesozooplankton in a coastal upwelling area: Seasonal trends and implications for

biological production. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 406: 116–124.

- Pérez-Santos, I., Mayorga N., Silva N., Castillo M., Montero P., Schneider W., Pizarro O., Ramírez N., Igor G., Daneri G., Valle-Levinson A., Navarro E. & Mesa A. 2017. Determinación de la presencia natural de aguas con bajo contenido de oxígeno disuelto, en zonas utilizadas para el cultivo de salmones. Zona Nortpatagónica Chilena. Proyecto del fondo de investigación pesquera y de acuicultura.
- Pielke, R. A., & Pielke, R. A. (1984). *Mesoscale meteorological modelling*. Academic press.
- Pinardi, N., & Coppini, G. (2010). Preface "Operational oceanography in the Mediterranean Sea: the second stage of development". *Ocean Science*, 6(1), 263-267.
- Pizarro Koch, M., Pizarro, O., Dewitte, B., Montes, I., Ramos, M., Paulmier, A., & Garçon, V. (2019). Seasonal Variability of the Southern Tip of the Oxygen Minimum Zone in the Eastern South Pacific (30°–38° S): A Modeling Study. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 124(12), 8574-8604.
- Rabalais, N.N., Turner, R. E., Díaz, R. J. & Justic, D. 2009. Global change and eutrophication of coastal waters, *ICES Journal of Marine Science*, Volume 66, Issue 7, pp.1528–1537.
- Ravichandran, M. (2011). In-Situ Ocean Observing System. In *Operational oceanography in the 21st century* (pp. 55-90). Springer, Dordrecht.
- Roa, V. (2015). Aprendizaje y cambio en políticas a partir de crisis en industrias basadas en recursos naturales: caso de la crisis sanitaria del ISA en la industria del salmón en Chile. In *6to Encuentro Anual Sociedad Chilena de Políticas Públicas*. Facultad de Gobierno Universidad del Desarrollo, Santiago, Chile.
- Rodrigo, C. (2006). Topografía submarina en canales de la Patagonia norte. *Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a Cabo de Hornos*, 19-23.
- Salinas, S., Contreras, M., & Fierro, J. (2004). Propagación de la onda de marea en el estrecho de Magallanes. *Ciencia y Tecnología del Mar*, 27(2), 5-20.
- Schiller, A., & Brassington, G. B. (Eds.). (2011). *Operational oceanography in the 21st century*. Springer Science & Business Media.
- Schneider, W., Pérez-Santos, I., Ross, L., Bravo, L., Seguel, R., & Hernández, F. (2014). On the hydrography of Puyuhuapi Channel, Chilean Patagonia. *Progress in oceanography*, 129, 8-18.

- Sepúlveda, H.H, Marchesiello, P., Zhijin, L. “Oceanic data assimilation study in northern Chile: use of a 3DVAR method.” *Latin American Journal of Aquatic Research*, 41(3), 570-575, 2013.
- Shchepetkin, A. F., & McWilliams, J. C. (2003). A method for computing horizontal pressure gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C3).
- Sievers, H. & Silva, N. 2008. Water masses and circulation in austral Chilean channels and fjords. *Progress in the Oceanographic Knowledge of Chilean Interior Waters, from Puerto Montt to Cape Horn*, Comité Oceanográfico Nacional – Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 53–58.
- Silva, N. & Vargas, C. A. 2014. Hypoxia in Chilean Patagonian fjords, *Prog. Oceanogr.*, 129, 62–74, 2014.
- Silva, N., Calvete, C. & Sievers, H. 1998. Masas de agua y circulación general para algunos canales australes chilenos entre Puerto Montt y laguna San Rafael (Crucero CIMAR-Fiordo 1). *Cienc. Tecnol. Mar*, 21: 17-48.
- Skamarock, W. C., Klemp, J. B., Dudhia, J., Gill, D. O., Barker, D. M., Wang, W., & Powers, J. G. (2005). *A description of the advanced research WRF version 2* (No. NCAR/TN-468+ STR). National Center For Atmospheric Research Boulder Co Mesoscale and Microscale Meteorology Div.
- Stauffer, D. R., & Seaman, N. L. (1990). Use of four-dimensional data assimilation in a limited-area mesoscale model. Part I: Experiments with synoptic-scale data. *Monthly Weather Review*, 118(6), 1250-1277.
- Sweby, P. K. (1984). High resolution schemes using flux limiters for hyperbolic conservation laws. *SIAM journal on numerical analysis*, 21(5), 995-1011.
- Teillet, P. M., Gauthier, R. P., Chichagov, A., & Fedosejevs, G. (2002). Towards integrated Earth sensing: Advanced technologies for in situ sensing in the context of Earth observation. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 28(6), 713-718.
- Torrence, C., & Compo, G. P. (1998). A practical guide to wavelet analysis. *Bulletin of the American Meteorological society*, 79(1), 61-78.
- Trenberth, K. E. (2008). Necesidades de observación para la predicción y adaptación climáticas. *Boletín de la OMM*, 57(1), 17-21.
- Vergara, O., Echevín V., Sepúlveda, H. H., Quiñones, R. 2017. Controlling factors of the seasonal variability of productivity in the Southern Humboldt Current System (30°-40°S): A biophysical modeling approach. *Continental Shelf Research*, 148:89-103.

- Willmott, C. J., & Matsuura, K. (2005). Advantages of the mean absolute error (MAE) over the root mean square error (RMSE) in assessing average model performance. *Climate research*, 30(1), 79-82.
- Yáñez, S., Hidalgo, P., Escribano, E. 2012. Natural mortality of *Paracalanus indicus* (Copepoda: Calanoida) in coastal upwelling areas associated with oxygen minimum zone in the Humboldt Current system: implications for the passive carbon flux. *Revista de Biología Marina y Oceanografía*, 47: 295-310
- Zhang, S., Harrison, M. J., Rosati, A., & Wittenberg, A. (2007). System design and evaluation of coupled ensemble data assimilation for global oceanic climate studies. *Monthly Weather Review*, 135(10), 3541-3564.



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