

2024

INFORME FINAL

Sistema de Pronósticos
oceanográficos y Atmosféricos,
2023-2024.

Subsecretaría de Economía y EMT
Agosto, 2024.





INFORME FINAL

Convenio de Desempeño 2023

Sistema de pronósticos Oceanográficos y Atmosféricos,
2023-2024.

Subsecretaría de Economía y EMT / agosto 2024.

Requirente

**Subsecretaría de Economía y
Empresas de Menor Tamaño**

**Subsecretaria de Economía y
Empresas de Menor Tamaño**
Javiera Constanza Petersen Muga

Ejecutor

Instituto de Fomento Pesquero, IFOP

Director Ejecutivo
Gonzalo Pereira Puchy

Jefe División Investigación Acuicultura
Gastón Vidal Santana

Jefa Departamento de Medio ambiente (i)
Alejandra Oyadenel Pérez

Jefe de Proyecto
Cristian Ruiz Soto

Autores

*Valentina Besoain
Cristian Ruiz
Pedro Valdevenito
Oliver Venegas*



Índice

RESUMEN EJECUTIVO.....	8
1. Antecedentes.....	12
1.1 Contexto.....	12
1.2 Sistema de modelación operacional para la zona Sur-Austral, MOSA.....	13
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo general.....	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3. Metodología.....	19
3.1 Metodología objetivo específico 1:.....	21
3.2 Metodología objetivo específico 2:.....	30
3.3 Metodología objetivo específico 3:.....	31
3.4 Metodología objetivo específico 4:.....	35
4. Gestión del proyecto.....	43
4.1 Reuniones de coordinación con SUBPESCA.....	43
4.2 Reuniones técnico-académicas.....	44
4.3 Talleres de difusión y/o capacitación.....	47
4.4 Presentaciones en congresos/seminarios/talleres nacionales o internacionales	48
4.5 Publicaciones científicas.....	49
4.6 Compra y mantenimiento de equipo:.....	49
4.7 Carta Gantt del proyecto.....	50
5. Resultados.....	51
5.1 Resultados objetivo específico 1:.....	51
5.2 Resultados objetivo específico 2:.....	76
5.3 Resultados objetivo específico 3:.....	94
5.4 Resultados objetivo específico 4:.....	100
6. Discusión.....	116
6.1 Sistema operacional MOSA para las regiones de Chiloé-Aysén.....	116
6.2 Sistema operacional MOSA-WRF.....	119
6.3 Sistema operacional MOSA para la región de Magallanes.....	122
6.4 Modelo biogeoquímico MOSA-PISCES.....	125
6.5 Modelo oleaje MOSA-WW3.....	134
7. Conclusiones.....	140
Referencias bibliográficas.....	142
Anexo A: Ecuaciones modelo hidrodinámico CROCO.....	151
Anexo B: Modelo operacional MOSA-WRF.....	153
Anexo C: Estadísticos principales para validación.....	159
Anexo D: Módulo Biogeoquímico PISCES.....	161



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.....	14
Figura 2: Ubicación geográfica de las estaciones CTDO, mareógrafos y ADCP utilizados para la evaluación del modelo operacional MOSA-CROCO.....	23
Figura 3: mapa con la red de estaciones meteorológicas de IFOP. Para este estudio se utilizaron las estaciones de Marimeli y Cucao.....	28
Figura 4: Ubicación de los zonas y ubicación de las estaciones de muestreo que se utilizaron para el análisis.....	33
Figura 5: Grilla rectangular utilizada por el modelo WaveWatch III v6.07.1 para el dominio del Océano Pacífico.....	36
Figura 6: Grilla no-estructurada (izquierda) y batimetría (derecha) utilizada por el modelo WaveWatch III v6.07.1 para el dominio de la Región de Los Lagos y la Región de Aysén.....	37
Figura 7: Ubicación geográfica de los productos satelitales NOAA-CoastWatch dentro del dominio regional para los meses de enero y febrero del 2024: Sentinel-3A (3a), Sentinel-3B (3b), Sentinel-6 (6a), CryoSat-2 (c2), Jason3 (j3) y SARAL (sa).....	39
Figura 8: Batimetrías utilizadas para la evaluación de grillas computacionales, indicando la fuente de información, resolución de grilla y nomenclatura para comparación.....	41
Figura 9: Rendimiento del pronóstico MOSA-CROCO para el periodo operacional 2023-2024.....	52
Figura 10: a) Promedio diario, b) diferencia y c) primer modo de la componente principal de TSM pronosticada por MOSA-CROCO y producto satelital AVHRR, entre enero de 2017 y junio de 2024.....	53
Figura 11: Correlación, b) Raíz del error cuadrático medio y c) BIAS mensual entre la temperatura pronosticada por el modelo operacional MOSA-CROCO y el producto satelital.....	55
Figura 12: Transecta de temperatura (colores) y salinidad (Contornos) para las estaciones de medición del mapa (panel izquierdo) durante agosto de 2023. Mediciones de CTD (panel superior) y pronóstico MOSA (panel inferior).....	57
Figura 13: Transecta de temperatura (colores) y salinidad (Contornos) para las estaciones de medición del mapa (panel izquierdo) durante junio de 2023.	



Mediciones de CTD (panel superior) y pronóstico MOSA (panel inferior).....58

Figura 14: Diagramas T-S para a) agosto de 2023 y b) junio de 2024.
Observaciones de CTD (rojo) y pronóstico MOSA (azul).....59

Figura 15: Dispersión y ejes de máxima varianza en las componentes ortogonales de corriente. b) Espectro de frecuencia para la componente zonal modelada (azul) y observadas (rojo). Datos registrados en la boca del fiordo de Reloncaví entre el 12 de septiembre de 2022 y el 15 de octubre de 2023 (ver posición geográfica en Fig. XX)..... 60

Figura 16: Series de tiempo de elevación del nivel del mar, b) amplitud de los principales constituyentes de mareas y c) diagrama de dispersión entre las elevaciones del nivel del mar simulada y observada durante Septiembre del 2023, para las estaciones de Puerto Montt, Ancud, Castro, Melinka, Puerto Aguirre y Puerto Chacabuco..... 61

Figura 17: Rendimiento del sistema MOSA-WRF durante el periodo 2023 – 2024. 62

Figura 18: Correlación entre MOSA-WRF y ERA5 para el año 2023. El panel N°1 muestra la componente U del viento y el N.º 2 la componente V del viento. Los subplots a, b, c, y d, representan las estaciones del año para verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente..... 63

Figura 19: Correlación entre MOSA-WRF y ERA5 para el año 2023. El panel N°1 muestra la magnitud del viento y el N.º 2 la temperatura del aire a 2 metros. Los subplots a, b, c, y d, representan las estaciones del año para verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente..... 64

Figura 20: RMSE entre MOSA-WRF y ERA5 para el año 2023. El panel N°1 muestra la componente U del viento y el N.º 2 la componente V del viento. Los subplots a, b, c, y d, representan las estaciones del año para verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente..... 65

Figura 21: RMSE entre MOSA-WRF y ERA5 para el año 2023. El panel N°1 muestra la magnitud del viento y el N.º 2 la temperatura del aire a 2 metros. Los subplots a, b, c, y d, representan las estaciones del año para verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente..... 66

Figura 22: Evaluación del viento en la estación de Marimeli entre el 8/2/2023 y 31/12/2023. Panel a. corresponde a la magnitud y panel b. a la componente U del viento. Las líneas negras corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5. Los paneles inferiores muestran las rosas de viento correspondiente observado (c), MOSA-WRF (d.) y ERA5 (e)..... 67

Figura 23: Distribución estadística para los datos de magnitud del viento para la estación de Marimeli y percentil 99..... 69



Figura 24: Evaluación del viento en la estación de Marimeli entre el 28/10/2023 y 31/10/2023. Panel a. corresponde a la magnitud y panel b. a la componente U del viento. Las líneas azules corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5. Los paneles inferiores muestran las rosas de viento correspondiente observado (c), MOSA-WRF (d.) y ERA5 (e).....70

Figura 25: Evaluación del viento en la estación de Cucao entre el 28/10/2023 y 31/10/2023, para la magnitud (a) y la componente U del viento (b). Las líneas azules corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5. Los paneles inferiores muestran las rosas de viento correspondiente observado (c), MOSA-WRF (d.) y ERA5 (e)..... 71

Figura 26: Evaluación del viento en la estación de Marimeli entre el 7/6/2023 y /10/6/2023, para la magnitud (a) y la componente U del viento (b). Las líneas azules corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5. Los paneles inferiores muestran las rosas de viento correspondiente observado (c), MOSA-WRF (d.) y ERA5 (e)..... 73

Figura 27: Evaluación del viento en la estación de Cucao entre el 7/6/2023 y /10/6/2023, para la magnitud (a) y la componente U del viento (b). Las líneas azules corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5. Los paneles inferiores muestran las rosas de viento correspondiente observado (c), MOSA-WRF (d.) y ERA5 (e)..... 74

Figura 28: Evaluación de la temperatura entre el 19/4/2023 y 6/12/2023, para la Marimeli (a) y Cucao (b). Las líneas azules corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5..... 76

Figura 29: Rendimiento del sistema MOSA-MAG durante el periodo 2023 - 2024. 77

Figura 30: Promedio diario de TSM pronosticada por MOSA-MAG y producto satelital AVHRR, entre enero de 2022 y junio de 2024..... 79

Figura 31: Densidad espectral de datos horarios de TSM de MOSAMAG y de AVHRR. Los espectros se construyeron con 12 grados de libertad y un solapamiento del 20%..... 80

Figura 32: Distribución espacial del Coeficiente de relación de Pearson (R) entre datos mensuales de VIIRS y MOSAMAG..... 81

Figura 33: Distribución espacial del la raíz del Error cuadrático medio (RMSE) entre datos mensuales de VIIRS y MOSAMAG..... 82

Figura 34: Distribución espacial del sesgo medio (BIAS) entre datos mensuales de VIIRS y MOSAMAG..... 83

Figura 35: a) Correlación, b) Raíz del error cuadrático medio y c) BIAS mensual entre la temperatura pronosticada por el modelo operacional MOSA-MAG y el

producto satelital VIIRS.....	85
Figura 36: Mapa con las estaciones del muestreo del programa de Marea Roja, Fiordos de la división de Acuicultura, IFOP. Se divide en 3 las zonas (norte, centro y sur) para focalizar el análisis.....	87
Figura 37: Diagrama T-S estacionales entre datos de MOSA-MAG y datos de CTD del programa de Marea Roja, fiordos, zona norte.....	88
Figura 38: Diagrama T-S estacionales entre datos de MOSA-MAG y datos de CTD del programa de Marea Roja, fiordos, zona centro.....	90
Figura 39: Diagrama T-S estacionales entre datos de MOSA-MAG y datos de CTD del programa de Marea Roja, fiordos, zona sur.....	91
Figura 40: Dominio con la nueva grilla de MOSA-MAG, la cual incluye una nueva máscara y mejoras en la batimetría.....	93
Figura 41: Comparación de salinidad promedio estacional de salinidad observada y modelada en la capa de mezcla (panel superior) y bajo de la capa de mezcla (panel inferior), además en líneas punteadas se observan los límites del criterio de salinidad de los tipos de agua dulce (AD), agua modificada subantártica (AMSAA), agua subantártica (ASAA) y agua ecuatorial subsuperficial (AESS).....	95
Figura 42: Comparación de temperatura promedio estacional (°C) observada y modelada en la capa de mezcla (panel superior) y bajo de la capa de mezcla (panel inferior).....	96
Figura 43: Comparación de oxígeno disuelto promedio estacional (ml/l) observada y modelada en la capa de mezcla (panel superior) y bajo de la capa de mezcla (panel inferior).....	97
Figura 44: Comparación de nitrato promedio estacional (uM) observada y modelada en la capa de mezcla (panel superior) y bajo de la capa de mezcla (panel inferior).....	98
Figura 45: Comparación de clorofila satelital promedio de MODIS (mg/l) y clorofila del modelo.....	99
Figura 46: Comparación de series de tiempo de los días 1, 2 y 3 de diciembre de las 7 combinaciones de parametrizaciones físicas en la grilla no-estructurada versus los registros de la boya SHOA.....	102
Figura 47: Comparación de series de tiempo de los días 1, 2 y 3 de diciembre de las 7 combinaciones de parametrizaciones físicas en la grilla estructurada versus los registros de la boya SHOA.....	105
Figura 48: Comparación de gráficos de dispersión de Hs de los meses de enero y febrero del 2024, comparación entre datos satelitales NOAA-CoastWatch y	



modelo de oleaje WW3 con grilla estructurada. El gráfico de la izquierda (a) incluye todos los puntos comprendidos en el periodo temporal de análisis y a la derecha (b) sólo incluye los puntos que se encuentran dentro del Mar Interior de Chiloé..... 109

Figura 49: Comparación de gráficos de dispersión de Hs de los meses de enero y febrero del 2024, comparación entre datos satelitales NOAA-CoastWatch y modelo de oleaje WW3 con grilla no-estructurada. El gráfico de la izquierda (a) incluye todos los puntos comprendidos en el periodo temporal de análisis y a la derecha (b) sólo incluye los puntos que se encuentran dentro del Mar Interior de Chiloé..... 109

Figura 50: Comparación de series de tiempo de los días 1, 2 y 3 de diciembre entre el modelo WW3 con grilla no estructurada (WW3N), WW3 con grilla estructurada (WW3E) y el producto distribuido por Copernicus Marine Service (MFWAM) versus los registros de la boya SHOA..... 112

Figura 51: Comparación de la altura significativa (Hs) promedio durante el día 2 de julio del año 2024 entre el modelo WW3 con grilla no estructurada (WW3N, primera fila), WW3 con grilla estructurada (WW3E, segunda fila), y el producto distribuido por Copernicus Marine Service (MFWAM, tercera fila)..... 113

Figura 52: Grilla no estructurada basada en triángulos del dominio del Mar Interior de Chiloé utilizada por el modelo operacional WW3..... 115

Figura 53: Principales cambios efectuados en la configuración del modelo operacional MOSA-CROCO a la fecha..... 117

Figura 54: Variación diaria del 2019 entre los datos observados (azul) y modelados (rojo) en la boya ubicada en el seno de Reloncavi del Centro i-mar de la Universidad de los Lagos..... 128

Figura 55: Precipitación acumulada mensual registrada en 2019 en estaciones meteorológicas del INIA y modelada por el modelo de reanálisis ERA5..... 129

Figura 56: Grilla arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atmósfera. Fuente Skamarock et al. (2005)..... 157



Índice de Tablas

Tabla 1: Características técnicas de los sensores instalados en el CTD AML.....	24
Tabla 2: Coordenadas geográficas de las estaciones del nivel del mar utilizadas para la validaci3n de las mareas pronosticadas por MOSA-CROCO.....	25
Tabla 3: Criterio de salinidad para definir las masas de aguas.....	34
Tabla 4: Parámetros estadísticos de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla no-estructurada.....	101
Tabla 5: Parámetros estadísticos de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla no-estructurada.....	103
Tabla 6: Parámetros estadísticos de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla no-estructurada.....	104
Tabla 7: Calificaci3n de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla estructurada.....	106
Tabla 8: Parámetros estadísticos de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla no-estructurada.....	111
Tabla 9: Calificaci3n de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla estructurada.....	111



RESUMEN EJECUTIVO

En este informe se presenta los avances del programa de Pronósticos Oceanográficos y Atmosféricos para la Patagonia chilena en su última etapa, el cual tiene como objetivo general implementar simulaciones que permitan conocer el estado actual y futuro del mar en escalas sinópticas, específicamente la temperatura, salinidad, corrientes y nivel del mar, además de las variables atmosféricas más relevantes como la dirección y magnitud del viento, precipitación, temperatura del aire y radiación entre otras. Los resultados presentados corresponden a las evaluaciones de los modelos actuales, así como también el desarrollo de modelación Biogeoquímica y la implementación de un modelo operacional de oleaje. Estos modelos numéricos forman parte del sistema de modelación operacional para la zona Sur-Austral de Chile, conocido como "MOSA", cuyos resultados se visualizan en la plataforma de información oceanográfica, CHONOS, la cual está destinada a generar información relevante para la gestión costera y la toma de decisiones ante emergencias ambientales y sanitarias. En su conjunto, MOSA proporciona información ambiental diaria con una proyección de 72 horas, la cual nos permite conocer en tiempo casi-real la evolución de eventos y procesos de gran escala tales como la propagación de olas de calor, variabilidad en la estratificación de la columna de agua, flujos de agua dulce, dispersión de patógenos, vertidos de hidrocarburos, deriva de objetos flotantes, naufragios, etc.

Las evaluaciones de MOSA-CROCO, modelo basado en los mares interiores de las regiones de Los Lagos y Aysén, presentan un modelo consistente, que permite reproducir procesos de gran y pequeña escala, tales como variabilidad estacional, estratificación, y en especial el denominado "freshening", el cual se refiere a la caída de la salinidad en zonas estuarinas principalmente impactadas por las descargas de agua dulce de origen glaciar, nival y/o pluviales. Las evaluaciones de la temperatura superficial del mar muestran un buen ajuste en comparación con datos observados, con altas correlaciones temporales, alcanzando valores de 0.9, mientras que el sesgo y el error exhiben una conducta estacional, aumentando en periodos cálidos. No obstante aún subestima la salinidad superficial, rasgo que se acentúa en verano. Esto se está trabajando a través de las mejoras de los flujos de agua dulce, los cuales próximamente pasaran a ser valores diarios, lo que impactará positivamente en la formación de estructuras termohalinas, especialmente en primavera y verano.

Por su parte el modelo de pronósticos atmosféricos de alta resolución MOSA-WRF, presentó un buen ajuste en la temperatura y el viento, comparado

con datos de estaciones meteorológicas, lo cual es relevante, debido a que es usado para forzar la superficie del modelo oceanográfico. Además, demostró una notable capacidad para reproducir y predecir eventos de viento extremo, superando en precisión al modelo europeo de reanálisis ERA5, lo cual puede tener importantes implicaciones en el contexto del cambio climático. Un modelo más preciso es crucial para anticipar y mitigar los impactos de estos eventos en un entorno donde el cambio climático está intensificando la frecuencia y severidad de fenómenos extremos. De igual modo, esto es particularmente relevante para la gestión de desastres, la planificación de respuestas rápidas y efectivas, donde la comprensión detallada de los patrones de viento es esencial para poder reproducir los procesos de mezcla en la columna de agua, especialmente en capas subsuperficiales.

Además se presenta el desarrollo de un modelo de pronósticos en la región de Magallanes, MOSA-MAG, el cual es una apuesta inédita que tiene un enorme valor al proporcionar información en tiempo casi real en una vasta región que carece de datos in situ. Sin embargo, las evaluaciones preliminares sugieren que el modelo aún requiere calibración y ajustes. La temperatura superficial mantiene un sesgo de -2°C , lo que indica que el modelo tiende a ser más frío que lo observado en gran parte de la columna de agua. Además, existe una carencia de fuentes confiables de agua dulce capaces de reproducir los aportes provenientes de los glaciares de marea. Estos aportes no solo ocurren a través del derretimiento superficial de los glaciares, que se drena como un flujo subglaciar, sino también a través de la formación de témpanos y el derretimiento submarino, que en algunos casos puede ser la componente principal del aporte de agua dulce en esta región. En la etapa actual se esperan diversos cambios en MOSA-MAG, entre ellos, una nueva grilla que contendrá una mejor representación de la batimetría, un modelo atmosférico de alta resolución especialmente construido para forzar el dominio de MOSA-MAG, y la mejoría de los aportes de agua dulce, en especial en la zona de Cordillera de Darwin.

Paralelamente, se ha trabajado en el desarrollo de un modelo biogeoquímico basado en PISCES, montado sobre el dominio de MOSA-CROCO, cubriendo los mares interiores de las regiones de Los Lagos y de Aysén a una resolución de 1 km. Si bien anteriormente se realizaron simulaciones con otros modelos biogeoquímicos, es PISCES el que demuestra ser el más completo, aunque a la vez es el más complejo de todos. En esta etapa se evaluó el oxígeno disuelto, clorofila y nitrato. Aunque el modelo logró capturar de manera aceptable la distribución de masas de agua en términos de salinidad, mostró inconsistencias significativas en la simulación de oxígeno disuelto y clorofila. El oxígeno disuelto

presentó discrepancias de hasta 2 ml/l respecto a los datos observados, sin variación significativa entre la capa de mezcla y la de fondo, lo que sugiere limitaciones tanto en el funcionamiento como en la implementación del modelo. La clorofila modelada también fue significativamente más baja que la observada, lo que indica una subestimación de la productividad primaria y, consecuentemente, de las concentraciones de oxígeno disuelto en la capa de mezcla. Estas discrepancias podrían estar relacionadas con un tiempo de estabilización (spin-up) insuficiente, de solo 3 meses, lo que no permite al sistema alcanzar un equilibrio dinámico adecuado. Se sugiere que un spin-up más prolongado, de al menos 5 años, junto con mejores condiciones iniciales, podría mejorar la precisión del modelo. En el futuro se planea utilizar datos del modelo biogeoquímico hindcast de Mercator para optimizar las simulaciones y lograr una representación más precisa de las concentraciones de oxígeno disuelto y clorofila en la capa de mezcla.

Finalmente en este informe también se presenta la implementación y evaluación del modelo de oleaje MOSA-WW3 para la región de Los Lagos y Aysén. El modelo mostró un buen desempeño en la representación de la altura de ola significativa, con un sesgo cercano a las mediciones de boyas, aunque se identificaron desafíos en la precisión de la dirección y el periodo del oleaje, que fueron sobrestimados en muchos casos. La validación del modelo se llevó a cabo utilizando mediciones de boyas y datos satelitales, revelando la necesidad de mejorar la cobertura de observaciones en el Mar interior de Chiloé, una zona crítica donde la disponibilidad de datos es limitada debido a la falta de boyas y la cobertura incompleta de los satélites. Además, se evaluaron diferentes grillas computacionales, encontrando que las grillas estructuradas con información de obstrucciones ofrecieron un mejor desempeño y menor costo computacional en comparación con las no estructuradas, lo que resalta la importancia de una adecuada selección de la grilla en la modelación de oleaje.

El desarrollo de un sistema de pronóstico de oleaje para el Mar interior de Chiloé es crucial, no solo para la seguridad y eficiencia operativa de las instalaciones marítimas, sino también para la planificación a largo plazo de infraestructuras y la gestión ambiental. A pesar de las limitaciones actuales en la disponibilidad de datos, la implementación de MOSA-WW3 representa un paso importante hacia la mejora de la precisión en la predicción del oleaje en la región. La integración de mejores datos iniciales, el aumento del tiempo de estabilización del modelo y la comparación de diferentes grillas no estructuradas con las estructuradas permitirán optimizar el sistema.

Este informe destaca los avances significativos en la implementación de modelos operacionales para la Patagonia chilena, enfocados en la simulación de



variables oceanográficas y atmosféricas, críticas para la gestión costera y la predicción de eventos extremos. Los modelos MOSA-CROCO y MOSA-WRF han mostrado un rendimiento sólido en la representación de procesos oceanográficos y atmosféricos, aunque persisten desafíos en la simulación de salinidad superficial y eventos de viento extremo. El desarrollo del modelo MOSA-MAG para la región de Magallanes y la implementación de MOSA-WW3 para el pronóstico de oleaje en Los Lagos y Aysén subrayan la importancia de continuar mejorando la precisión y cobertura de estos sistemas, mas aun en zonas de baja cobertura observacional, donde es de alto valor contar con información ambiental oportuna y operacional.

Estas herramientas permite posicionar al Insituto de mejor forma para enfrentar los desafíos en un contexto de cambio climático y garantizar una gestión más efectiva de los recursos marinos en la zona sur-austral de Chile.

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 salmicultura 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 deben considerar herramientas operacionales cuantitativas que otorguen información relevante del estado del mar, tales como oleaje significativo, vientos, anomalías térmicas, flujos de oxígeno disuelto, etc., a fin de garantizar una operación segura.

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. Además, se estableció un convenio con el centro 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). El sistema de predicción sinóptico fue nombrado como “Modelo Operacional Sur-Austral” (MOSA). El diseño conceptual inicial de este sistema diseñado en el año 2014 se muestra en la Figura 1. Este diagrama conceptual contenía los módulos que pensábamos en ese momento que podrían ser incorporados al sistema y estaba compuesto por varios módulos o modelos que satisfacían distintas necesidades del modelo en esa fecha. Este esquema propone usar el modelo hidrodinámico de circulación regional ROMS con condiciones de borde desde el modelo atmosférico WRF, un modelo hidrológico y

un modelo global Mercator-Ocean. A partir de este modelo hidrodinámico se podría acoplar un modelo biogeoquímico. Además se consideraba un gran volumen de datos para la confección de un sistema de monitoreo, control y asimilación de datos.

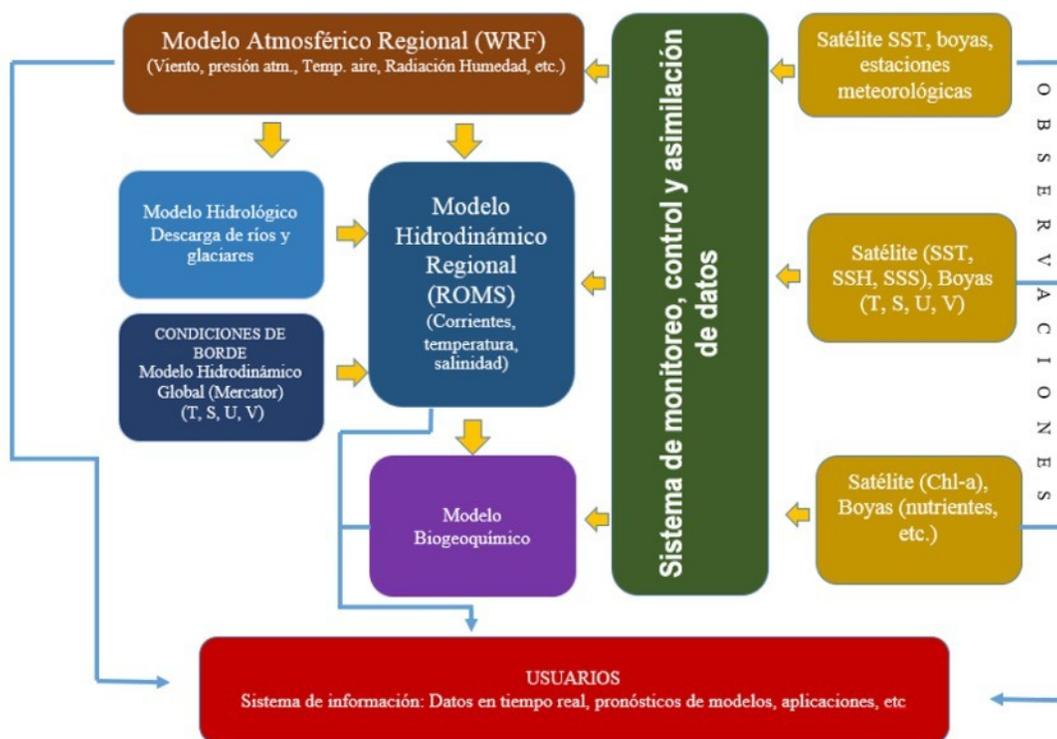


Figura 1: Modelo conceptual propuesto para el desarrollo a largo plazo del modelo operacional Sur-Austral, MOSA, el cual incluye todos los elementos contemplados en etapas futuras de desarrollo.



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. A continuación describiremos a grandes rasgos los principales actividades desarrolladas en cada etapa del proyecto y como estas fueron ejecutadas en función del esquema conceptual.

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. 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 CHONOS (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”.

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 Parti-MOSA. 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): 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.

Etapa VIII (2021 – 2022): Durante esta etapa se realizó la evaluación de los modelos MOSA-CROCO y MOSA-WRF para las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes con la información ambiental disponible a la fecha. A su vez, se continuaron con las mejoras y evaluaciones de los modelos biogeoquímicos NPZD, PISCES y FENNEL. Finalmente, se mejoró la batimetría en la zona de Aysén, Comau y canal Moraleda dentro del modelo MOSA-CROCO.

Etapa IX (2022 – 2023): Durante esta etapa se realizó la evaluación de los modelos operacionales MOSA-CROCO y MOSA-WRF para las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes con la información ambiental disponible a la fecha. A su vez, se implementó un modelo biogeoquímico para la región de Los Lagos y Aysén del año 2018 usando el modelo PISCES. Finalmente, se diagnosticó e implementó un modelo de oleaje operacional (MOSA-WW3) para la región de Los Lagos y Aysén.



Etapa X (2023 – 2024): Corresponde a la etapa actual del proyecto. Los objetivos de esta etapa son mencionados en la siguiente sección.

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 pagina web del IFOP (<https://www.ifop.cl/busqueda-de-informes/>).



2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

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

2.2 Objetivos específicos

- 2.2.1. Actualizar la evaluación del sistema operacional MOSA con las últimas observaciones oceanográficas y meteorológicas disponibles en el mar interior de Chiloé y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.
- 2.2.2 Calibrar y evaluar el modelo MOSA para la región de Magallanes y la Antártica Chilena con observaciones oceanográficas históricas.
- 2.2.3 Ampliar el atlas biogeoquímico para las regiones de Los Lagos y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo a los años 2019-2020.
- 2.2.4 Calibrar y validar el modelo de oleaje para el mar interior de Chiloé y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

3. Metodología

El sistema operacional de pronósticos actualmente incorpora dos categorías de modelos: modelos oceanográficos y modelos atmosféricos. Estos últimos se utilizan para aplicar condiciones de contorno en la superficie de los modelos oceánicos. Actualmente estos sistemas están basados en los modelos Coastal and Regional Ocean COmmunity model (CROCO, Debreu et al., 2012) y Weather Research Forecast (WRF, Skamarock et al., 2005) para la parte oceanográfica y atmosférica, respectivamente. El modelo CROCO es desarrollado 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). En términos generales nos referiremos como MOSA-CROCO cuando se refiera netamente al modelo oceanográfico o MOSA-WRF cuando es exclusivo al modelo atmosférico.

Para el funcionamiento diario, MOSA-CROCO utiliza condiciones de borde atmosféricas del modelo MOSA-WRF e información de caudales de los principales ríos de la Patagonia del modelo hidrológico FLOW. Así mismo, MOSA-CROCO está siendo usado como condiciones de borde para un modelo biogeoquímico y un modelo de dispersión de partículas (Parti-MOSA). En otra línea, con la información de MOSA-CROCO y MOSA-WRF se está diseñando e implementando un modelo5 de predicción de oleaje.

Cabe destacar que desde el inicio de este proyecto (enero del 2014) hasta septiembre del 2019 MOSA estaba basado en el modelo Regional Ocean Model System (ROMS) versión AGRIF (modelo antecesor de CROCO). Desde octubre 2019, MOSA utiliza el modelo CROCO, debido al fin del soporte y mejoras de los códigos del modelo ROMS-AGRIF. Con esta actualización podemos acceder a los últimos cambios y actualizaciones del modelo físico, así como también a los diferentes módulos complementarios como por ejemplo los modelos biogeoquímicos. En el presente informe nos referiremos a 2 dominios del modelo MOSA-CROCO. El primero corresponde a las regiones de Los Lagos y de Aysén, el cual lleva funcionando operativo desde el 2014 a la fecha (desde el 2018 con resultados más confiables). El segundo corresponde al modelo para la región de Magallanes, el cual su desarrollo comenzó el 2019 y las pruebas operacionales durante el 2021. Ambos modelos tienen una resolución espacial aproximada de 1



km y utilizan un modelo de elevación digital 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.

Por otra parte, es necesario contar con información de las variables del sistema tanto horizontal como verticalmente para resolver las ecuaciones primitivas del modelo 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 límites 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 tanto el modelo para las regiones de Los Lagos y Aysén, como el modelo para la región de Magallanes utilizan condiciones de borde interpoladas desde el producto 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 para el modelo MOSA-CROCO de las regiones de Los Lagos y Aysén. En el caso del modelo para Magallanes, se está usando la información del modelo Global Forecast System (GFS, Kalnay et al., 1996).

Finalmente, mencionar que un forzante relevante en los modelos de la Patagonia es el aporte de agua dulce al sistema. Estos caudales modifican la estructura de la pycnoclina en las zonas costeras y en la zona de fiordos, cumpliendo un rol fundamental en la circulación estuarina dado que desarrollan flujos gravitacionales que transportan aguas de baja salinidad desde la cabeza a la boca de los fiordos. Actualmente, se utilizan 35 fuentes puntuales de agua dulce para el dominio de Chiloé-Aysén y 25 fuentes para el dominio de Magallanes, ambos con flujos con variabilidad diaria obtenidos desde el modelo hidrológico FLOW.

Además de los modelos oceanográficos y atmosféricos se está trabajando en la implementación de un modelo operacional de oleaje y en modelación Biogeoquímica, ambos focalizados en los mares interiores de la región de Los Lagos y de Aysén.

3.1 Metodología objetivo específico 1:

Actualizar la evaluación del sistema operacional MOSA con las últimas observaciones oceanográficas y meteorológicas disponibles en el mar interior de Chiloé y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

3.1.1 MOSA-CROCO

Los modelos numéricos permiten simular y predecir las condiciones físicas del océano y su variación en el tiempo en el corto plazo, mediante la utilización de parametrizaciones que resuelven las ecuaciones primitivas que describen estas condiciones. Para mejorar su precisión y evaluar estos modelos se utilizan datos observacionales, tanto satelitales como in situ. A lo largo del desarrollo de MOSA-CROCO se han utilizado productos satelitales y campañas de monitoreo ejecutadas por IFOP para evaluar el desempeño del pronóstico operacional. Los productos satelitales, disponibles casi en tiempo real, han permitido llevar un monitoreo continuo de la capacidad del modelo en reproducir la estacionalidad de la temperatura superficial y evidenciar cómo se ha ido ajustando a lo largo del desarrollo del sistema. Sin embargo, debido a la resolución espacial y la alta cobertura nubosa presente en la región estos productos presentan una limitación en su capacidad de observar la variabilidad dentro del mar interior de Chiloé, principalmente en procesos de escala local que ocurren en el interior de los fiordos y canales presentes en la región. Es por este motivo, que de manera



complementaria se ha contado con informaci3n recolectada mediante instrumentaci3n oceanogr3fica en las campa1as de monitoreo realizadas por IFOP en el marco del proyecto “Monitoreo y Modelaci3n de la Variabilidad Espacial y Temporal de Procesos Oceanogr3ficos en Canales y Fiordos Australes”, el cual se enmarca en el convenio de desempe1o entre el Ministerio de Econom3a, Subpesca e IFOP que se suscribe anualmente. Estos registros contienen informaci3n de temperatura y salinidad a lo largo de la columna de agua, lo que permite observar la presencia de las distintas masas de agua y su reproducibilidad por el modelo. Adem3s MOSA-CROCO estima proyecciones de la altura del nivel del mar y la din3mica de las corrientes, variables que son evaluadas con mare3grafos del Servicio Hidrogr3fico y Oceanogr3fico de la Armada (SHOA) y con instrumentos que miden la intensidad y direcci3n de la corriente (ADCP) instalados por IFOP en el marco del mismo proyecto mencionado anteriormente.

Para evaluar la temperatura superficial del mar (TSM) se utiliza el producto satelital Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR). AVHRR es una base de datos construida por una combinaci3n de informaci3n de diversas plataformas (oc3ano y satelitales) con el fin de obtener la mejor interpolaci3n posible a una resoluci3n de 0.25°, usando la metodolog3a Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (OISST) desarrollada por la Oficina Nacional de Administraci3n Oce3nica y Atmosf3rica de Estados Unidos (NOAA) (Huang et al., 2020). La fuente satelital est3 disponible en <https://www.ncei.noaa.gov/data/sea-surface-temperature-optimum-interpolation/>.

La temperatura y salinidad en la columna de agua es evaluada mediante mediciones puntuales realizadas por un CTDO. La resoluci3n temporal de captura de datos fue de 8 Hz, es decir tiene la capacidad de registrar 8 datos por segundo hasta una profundidad de 500 metros. Los datos obtenidos del CTDO pasaron primeramente por un control de calidad, eliminando registros fuera de rango. Una vez cumplido esta etapa del proceso, se realizaron promedios cada 1 metro de todas las variables. Las caracter3sticas t3cnicas de los sensores se pueden encontrar en la Tabla 1. Geogr3ficamente las estaciones cubren un transecto orientado de Norte a Sur a lo largo del mar interior de Chilo3 (Figura 2).

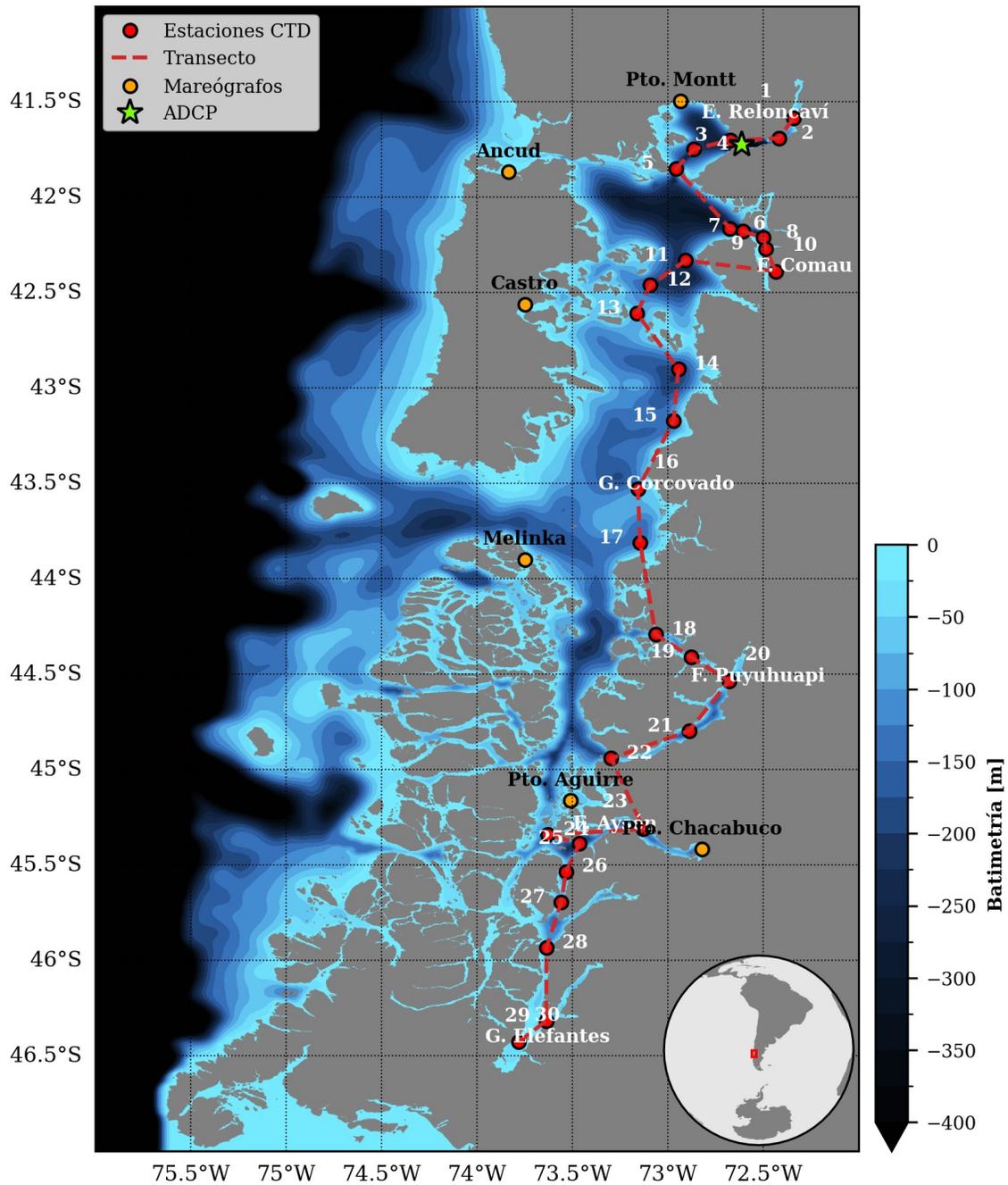


Figura 2: Ubicaci3n geogr3fica de las estaciones CTDO, mare3grafos y ADCP utilizados para la evaluaci3n del modelo operacional MOSA-CROCO.

Tabla 1: Características técnicas de los sensores instalados en el CTD AML.

Equipo	Sensores	Rango de medición	Resolución de los sensores
CTD AML Metrec-XL	Presión	0-500 dbar	0,05%
	Temperatura	-2° a 32°C	±0,005°C
	Conductividad	0-90 mS/cm	±0,01 mS/cm

La validación de las corrientes presenta desafíos considerables debido a la escasez de información, la complejidad de las mediciones, el alto costo y la dificultad de acceso a los fiordos y canales. Por esta razón las corrientes se evalúan mediante mediciones puntuales realizadas en distintos fiordos y canales. En las etapas anteriores se evaluaron mediciones en el Fiordo Comau y Boca del Guafo, para la región de Los Lagos y en Canal Moraleda y Canal Costa, para la región de Aysén. En esta etapa se han utilizado mediciones puntuales registradas en la boca del fiordo de Reloncaví (72.61052°O, -41.7321°S) (Figura 2) por un instrumento ADCP RDI de 300 kHz, instalado a 100 m de profundidad. Las observaciones fueron realizadas entre el 12 de septiembre de 2022 y el 15 de octubre de 2023 con una frecuencia horaria y se configuraron 25 celdas cada 4 metros.

La base de datos utilizada para evaluar la altura del nivel del mar fue extraída desde la plataforma del sistema de observación global del océano (GLOSS, <https://ioc-sealevelmonitoring.org/>, VLIZ 2024). Este centro de datos se encarga de la recopilación y distribución de datos de alta frecuencia del nivel del mar en tiempo real, la mayoría de las estaciones proporcionan valores cada minuto y se actualizan cada 5 minutos. Los datos son sometidos a procesamiento adicionales necesarios para calcular el nivel medio del mar (MSL) a largo plazo en promedios horarios, diarios, mensuales y anuales. Los datos extraídos corresponden a valores horarios para el periodo de septiembre de 2023, debido a la importancia de la amplitud de marea en esta época del año. Se descargaron un total de 6 estaciones (Figura 1) las cuales miden el nivel del mar en el MIC (Tabla 2) y se compararon el pronóstico operacional del modelo MOSA-CROCO.

Tabla 2: Coordenadas geográficas de las estaciones del nivel del mar utilizadas para la validación de las mareas pronosticadas por MOSA-CROCO.

Estación	Longitud (°O)	Latitud (°S)
Puerto Montt	-72.93124	-41.494739
Ancud	-73.833057	-41.867399
Castro	-73.758181	-42.560894
Melinka	-73.748199	-43.898463
Puerto Aguirre	-73.5074	-45.16168
Puerto Chacabuco	-72.820045	-45.417076

Análisis previos revelaron que al construir productos medios para los pronósticos a 24, 48 y 72 horas los campos estimados no cambian de manera significativa, por esta razón los análisis de la evaluación son operados sobre el producto construido a partir de un promedio de las primeras 24 h en el caso de la temperatura y salinidad, y proyecciones horarias para la evaluación de las corrientes y la altura del nivel del mar. En el presente objetivo se presenta la evaluación temporal de la temperatura superficial entre los años 2017 y 2024, de la salinidad y temperatura en la columna de agua en el último periodo, corrientes en el fiordo de Reloncaví y la altura del nivel del mar en el dominio de MOSA. La metodología utilizada se basa en determinar la calidad del modelo mediante estadísticos de validación (Wilks, 2011), los cuales comparan la información observada con la pronosticada, más detalles en la sección de anexos. Los resultados se presentan esquemáticamente mediante series de tiempo y gráficas que permiten una interpretación intuitiva.

Las salidas del modelo operacional de la última semana junto con información de las principales variables pronosticadas se encuentran disponibles en el sitio web del proyecto MOSA (<https://chonos.ifop.cl/mosa/index/>) dentro del sistema de observación oceanográfica CHONOS.

3.1.2 MOSA-WRF

3.1.2.1 Evaluación espacial con ERA5

Este objetivo evaluó el desempeño del pronóstico atmosférico MOSA-WRF en relación a los vientos superficiales (10m) y la temperatura del aire (2m), variables cruciales para la dinámica del medio marino. En primer lugar, se comparó las salidas de MOSA-WRF con el conjunto de datos global ERA5 (Hersbach et al., 2018b), un reanálisis atmosférico de alta calidad desarrollado por el Centro Europeo de Predicción de Mediano Plazo (ECMWF). Este producto global combina datos modelados con observaciones a través de la técnica de asimilación de datos, proporcionando resultados precisos y ampliamente utilizados por la comunidad científica. Este conjunto de datos, con resolución espacial de 0.25° y datos horarios desde 1979 hasta la actualidad, cubre hasta 80 km de altitud (137 niveles). La mayor densidad de niveles verticales en las capas inferiores permite capturar con mayor detalle los procesos meteorológicos cercanos a la superficie. ERA5 ha sido utilizado en diversos estudios en la Patagonia Occidental, demostrando su utilidad para la investigación en la región (Vasquez, et al. 2023, Gómez, et al. 2022). El conjunto de datos está disponible para descarga en el Climate Data Store (CDS):

<https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=form>

Se analizaron la magnitud y las componentes zonal (U), meridional (V) del viento, además de la temperatura del aire de MOSA-WRF y ERA5 en el dominio de MOSA durante un año (1 de enero al 31 de diciembre de 2023). Para una mejor comprensión de las variaciones estacionales, el análisis se dividió en cuatro períodos: verano (efm), otoño (amj), invierno (jas) y primavera (ond).

Para una evaluación punto a punto, se igualaron las resoluciones espaciales y temporales de MOSA-WRF y ERA5. Se interpoló la resolución más fina de MOSA-WRF (3km) a la resolución de ERA5 (0.25°~ 25km), delimitando el área de estudio a la zona continental entre los 41.25° y 47.25° de latitud sur y los 71.5° y 77° de longitud oeste. Las salidas de ambos modelos se analizaron a una resolución temporal horaria.

3.1.2.2 Evaluación con observaciones:

Para complementar el análisis con ERA5, se compararon las salidas de ambos modelos con datos de estaciones meteorológicas, implementadas en etapas previas del proyecto (Figura 3). Se seleccionaron las estaciones de Marimeli y Cucao para evaluar el desempeño de los modelos en zonas con características topográficas contrastantes:

- **Marimeli:** Ubicada en el fiordo de Reloncaví, una zona con topografía compleja que genera procesos locales, especialmente en la circulación del viento.
- **Cucao:** Situada en una zona con topografía abierta y fuerte influencia oceánica.

Para cada modelo, se extrajeron series de tiempo de las componentes zonal (U), meridional (V) y temperatura del aire del punto de grilla más cercano a la ubicación de la estación. Se calculó la magnitud y dirección del viento a partir de estas series. Con respecto a las estaciones se extrajeron las variables magnitud y dirección del viento, con las que se obtuvo las componentes ortogonales del viento (U y V), además de la temperatura del aire, considerando series de tiempo con resolución temporal horarias.

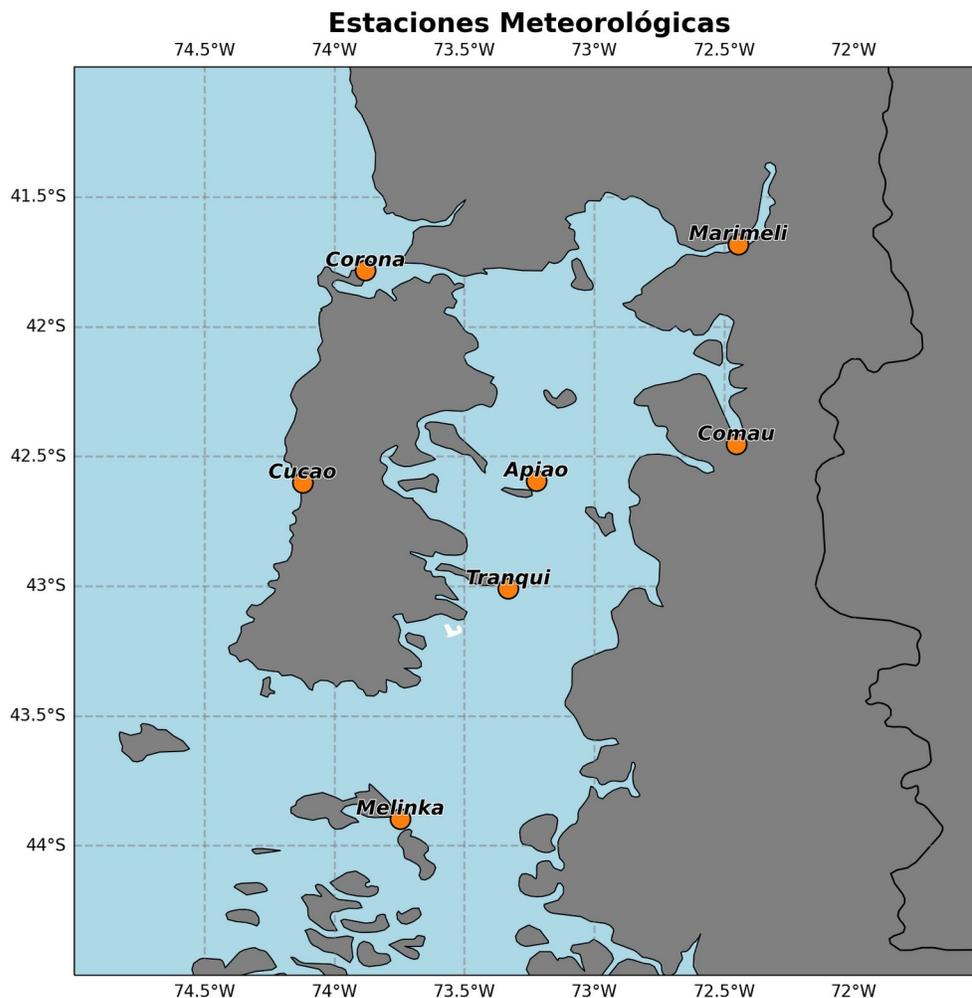


Figura 3: mapa con la red de estaciones meteorológicas de IFOP. Para este estudio se utilizaron las estaciones de Marimeli y Cucao.

Para evaluar el viento, se midió la capacidad de los modelos para representar eventos extremos. Para ello, se seleccionaron como referencia los registros con alta magnitud en la estación de Marimeli, debido a su ubicación en una zona con topografía irregular. Se definió un umbral basado en el percentil 99 (P99) de la magnitud del viento en la estación Marimeli, durante el período 8/2/2023 – 31/12/2023 (período de datos de la estación). Este umbral representa el valor que se excede solo el 1% del tiempo, permitiendo identificar eventos extremos de viento, los cuales podrían estar relacionados con tendencias de cambio climático (Gastineau, et al. 2009).



Se identificaron los dos eventos más intensos por encima del umbral P99 y se establecieron ventanas de tiempo para analizar la magnitud y la componente U del viento (dirección del fiordo) en ambas estaciones. Se utilizaron rosas de viento para evaluar su dirección. Además se evaluó el periodo completo para la temperatura del aire a 2 metros. Se utilizaron los siguientes estadísticos para evaluar diferentes aspectos del desempeño de MOSA-WRF, tanto para la evaluación espacial con ERA5, como con las observaciones (para mas información ver Anexo C):

- **Coefficiente de correlación de Pearson (r):** Mide la fuerza y dirección de la relación lineal entre las señales del modelo y las observaciones.
- **Error de sesgo (bias):** Indica la diferencia sistemática entre las salidas del modelo y las observaciones.
- **Error de amplitud:** Evalúa la diferencia en la variabilidad de las señales del modelo y las observaciones.
- **Raíz del error cuadrático medio (RMSE):** Mide la magnitud promedio de los errores.

3.2 Metodología objetivo específico 2:

Calibrar y evaluar el modelo MOSA para la región de Magallanes y la Antártica Chilena con observaciones oceanográficas históricas.

Entre las etapas anteriores de este proyecto (2019 - 2021) se ha trabajado en la construcción de un modelo oceanográfico estable para la región de Magallanes. A la fecha, se ha avanzado en la construcción de una batimetría equilibrada entre los aspectos topográficos y la estabilidad numérica del modelo. A su vez, se han evaluado los posibles forzantes y condiciones de borde para la zona de estudio. Así mismo, se realizó un diagnóstico de los recursos computacionales necesarios y los tiempos de cómputo involucrados para la ejecución de este modelo de manera operacional. El objetivo de MOSA-MAG es tener un modelo operacional que sea capaz de generar pronósticos a un horizonte a definir para la región de Magallanes, además de resolver los principales procesos oceanográficos que presenta esta región, en especial las zonas de mares interiores. 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.

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. Se consideró que la extensión del dominio debe contener zonas de interés para futuros modelos anidados de mayor resolución espacial como el seno Ottway, seno Skyring y Golfo Almirante Montt, estrecho de Magallanes, Canal Beagle e Isla Navarino.

Para evaluar el desempeño del MOSA-MAG, se utilizaron los datos de temperatura superficial del radiómetro VIIRS (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite). Al igual que el dominio de Magallanes, se utilizó el producto de promedios mensuales, los cuales fueron comparados con promedios mensuales del modelo entre enero de 2022 y junio de 2024 descargados desde <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/directaccess/VIIRS-SNPP/>. Paralelamente se utilizaron datos diarios del producto de TSM satelital AVHRR para evaluar la

evolución diaria del campo de TSM y poder mostrar los resultados del modelo en el mismo periodo de simulación (enero 2022 y julio 2024). Además, para evaluar la distribución de temperatura y salinidad se utilizaron perfiles de CTD obtenidos a partir del programa de monitoreo de Marea Roja fiordos, realizados por el Centro de Algas Nocivas, CREAN, perteneciente a la División de Acuicultura de IFOP. Estos valiosos datos permiten obtener una mirada estacional de las masas de agua presentes en la región, aunque suelen ser estaciones costeras y someras, donde numerosas veces el modelo no está bien definido debido a su resolución.

Junto con la evaluación del campo de masa, también se presenta una nueva grilla denominada mag_20c, la cual incluye cambios en la máscara, así como también en la batimetría. Esta grilla ha sido recientemente puesta a prueba para evaluar su estabilidad, donde se espera que en el transcurso de los siguientes meses sea implementada en el modelo oficial.

3.3 Metodología objetivo específico 3:

Ampliar el atlas biogeoquímico para las regiones de Los Lagos y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo a los años 2019-2020.

En esta etapa del proyecto, el objetivo fue implementar un atlas biogeoquímico para los años 2019 y 2020 en la región de Chiloé y Aysén, es por ello que se continuó con la simulación tipo hindcast (simulaciones históricas) realizada en la etapa previa, la cual abarcó el año 2018.

Para realizar las simulaciones de los años 2018, 2019 y 2020, se empleó el modelo Pelagic Interaction Scheme for Carbon and Ecosystem Studies (sigla en inglés PISCES) (Aumont et al., 2015; Aumont & Bopp, 2006), el cual se caracteriza por su complejidad intermedia. PISCES ha sido utilizado en estudios globales, regionales y en zonas de surgencias para entender los ciclos biogeoquímicos marinos, como el ciclo del oxígeno (eg., Buchanan & Tagliabue (2021), entre otros.

Este modelo simula la productividad marina y los ciclos biogeoquímicos del carbono y los principales nutrientes. Tiene tres compartimentos no vivos (materia orgánica disuelta semilábil, pequeñas y grandes partículas que sedimentan), cuatro compartimentos vivos representados por dos clases de tamaño de fitoplancton (nanofitoplancton y diatomeas), y dos clases de zooplancton (microzooplancton y mezooplancton). Paralelamente el modelo simula las concentraciones de oxígeno disuelto (O_2) manejado por la advección, intercambio océano-atmósfera, producción por fotosíntesis y consumo por respiración del plancton y la remineralización de la materia orgánica. Además de los nutrientes



como nitrógeno (NO_3), amonio (NH_4), fosfato (PO_4), silicato (Si), hierro (Fe), carbono orgánico disuelto (DOC) y carbono inorgánico disuelto (DIC). Asimismo, los nutrientes ingresan al océano desde tres fuentes externas: deposición atmosférica, ríos y sedimentos. Sin embargo, debido a su capacidad para simular 24 variables, este modelo implica un alto costo computacional, aproximadamente cuatro veces más que NPDZ (por sus siglas en inglés), el cual es un modelo capaz de simular seis variables biogeoquímicas, como un modelo simple de nutriente-fitoplancton-zooplancton-detritus.

Para las simulaciones del 2019 y 2020, se han realizado mejoras en las fuentes y el método de descarga de agua dulce en el modelo. Anteriormente, la descarga de agua dulce se distribuía de forma exponencial en toda la columna de agua, con el mayor aporte en las capas superficiales. Sin embargo, en la actualidad, la descarga de agua dulce se ha restringido a las primeras 20 capas verticales de la columna de agua. Adicionalmente, se ampliaron considerablemente las fuentes de los ríos con el fin de mejorar la precisión de la simulación, para lo cual se utilizaron datos diarios del modelo de agua dulce FLOW (www.chonos.ifop.cl/flow/) .

En resumen, la configuración para las simulaciones se en la última grilla estable del modelo operacional MOSA-CROCO (croco_grd_PAN_v11b.nc), con 42 niveles verticales. Mientras que los forzantes atmosféricos se tomaron del reanálisis horario de ERA5; se utilizaron datos del modelo global TPX07 para inducir las mareas en los bordes. Las condiciones de borde de las variables hidrodinámicas (temperatura, salinidad y corrientes) se obtuvieron de datos diarios del producto GLORYS12V1 de Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) con resolución de $1/12^\circ$, mientras que para las variables biogeoquímicas se emplearon datos diarios del modelo global biogeoquímico hindcast de Mercator-Ocean GLOBAL_MULTIYEAR_BGC_001_029, el cual cuenta con una resolución de $1/4^\circ$. Para las condiciones iniciales se utilizaron los resultados obtenidos de la simulación realizada en la etapa anterior.

Para evaluar la habilidad del modelo, se compararon sus resultados con los datos de CTDO y los muestreos de clorofila y nitrato (NO_3) recolectados en 2019 y 2020. Se extrajo el punto más cercano y correspondiente al mismo día en que se realizó el muestreo. Los datos de CTDO se obtuvieron del crucero Patagonia Norte, inserto en los proyectos de oceanografía, así como de muestreos de los programas de Marea Roja y Seguimiento Ambiental, todos pertenecientes a la División de Acuicultura de IFOP.

Utilizando los datos de CTDO, se calculó la profundidad de la base de la

capa de mezcla mediante la ubicación del valor máximo de la frecuencia de boyantes (Brunt-Väisälä). Además, los datos se subdividieron espacialmente en cinco dominios: la cuenca norte del mar interior de Chiloé (**CnMIC**), la cuenca sur del mar interior de Chiloé (**CsMIC**), Guafo, Moraleda y la costa de Chiloé (Figura 4). En cada dominio, se calculó el promedio estacional de los datos tanto en la capa de mezcla registrada en los datos de CTDO.

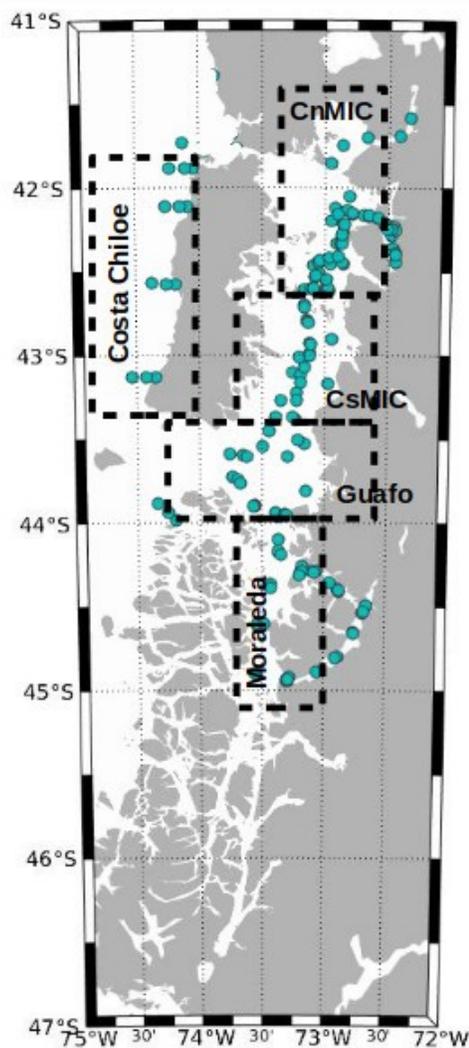


Figura 4: Ubicación de las zonas y ubicación de las estaciones de muestreo que se utilizaron para el análisis.

Con la finalidad de determinar las masas de aguas se utilizó el criterio de salinidad descrito por [Sievers and Silva \(2008\)](#), el cual se muestra en la Tabla 3 .

Tabla 3: Criterio de salinidad para definir las masas de aguas.

Masa de agua	Rango de Salinidad
Agua Dulce (AD)	0 – 31
Modificada Subantártica (MASAA)	31 -33
Agua Superficial Subantártica (ASAA)	33 -33.8
Agua Ecuatorial SubSuperficial (AESS)	> 33.8

Para determinar la clorofila satelital, se utilizaron datos diarios del satélite MODIS con una resolución de 4 km. Posteriormente, los datos se agruparon según las distintas zonas previamente determinadas y se promediaron estacionalmente. Para el promedio estacional, se consideraron los siguientes periodos: verano (enero, febrero y marzo), otoño (abril, mayo y junio), invierno (julio, agosto y septiembre) y primavera (octubre, noviembre y diciembre). No se incluyeron los píxeles que tuvieran datos disponibles para menos del 10% del periodo o que presentaran concentraciones superiores a 20 mg/l.

Para calcular el valor promedio del modelo, los datos diarios superficiales de clorofila del modelo se interpolaron utilizando la malla de los datos de MODIS. Posteriormente, se siguió el mismo procedimiento que para los datos de clorofila satelital, promediando estacionalmente según las zonas determinadas y considerando los mismos píxeles que se obtuvieron de MODIS.

3.4 Metodología objetivo específico 4:

Calibrar y validar el modelo de oleaje para el mar interior de Chiloé y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

El sistema de pronóstico de oleaje enfocado en el Mar Interior de Chile (X y XI Región) se desarrolla mediante el uso del modelo de oleaje de tercera generación WaveWatch III (WW3) versión 6.07.1 (WW3DG, 2019). Para esto, se emplea el anidamiento de dos dominios enfocados en el Océano Pacífico y en las Regiones de Los Lagos y de Aysén. El primer modelo, de larga escala, se realiza bajo el propósito de forzar con energía proveniente del océano el borde oeste del modelo regional. Este último, considera la propagación de dicha energía, la generación de oleaje de carácter local y la interacción con la particular confección costera de los alrededores de la Isla Grande de Chiloé. Cabe destacar, que el entorno del modelo de ambos dominios está configurado para ser ejecutado diariamente un servidor de pruebas y se está trabajando en la puesta en marcha del modelo en el servidor MOSA.

3.4.1 Configuración del modelo

El cálculo de la generación y propagación del oleaje del Océano Pacífico se resuelve sobre una grilla rectangular regular de $0.5 \times 0.5^\circ$ de resolución que abarca entre longitudes 70°W y 140°E , y entre latitudes 65°N y 65°S . La información batimétrica se obtiene de ETOPO1 para generar un dominio computacional de 109881 nodos (421×261). En cada nodo se particiona la energía del oleaje en espectros de 29 frecuencias y 24 direcciones. Las frecuencias comienzan desde 0.035 Hz con un incremento de 1.1 Hz y las direcciones varían desde los 7.5° con un incremento de 15° . El paso de tiempo global es de 2700 s , los pasos de tiempo para la propagación espacial e infraespectral son de 900 s , y la integración de términos fuente se realiza cada 20 [s] . Los pronósticos oceánicos son forzados cada 3 hrs mediante las componentes zonales y meridionales de la velocidad del viento a 10 msnm desde GFS de la NOAA.

El dominio en torno al Mar Interior de Chiloé usa como fuente los datos batimétricos GEBCO y abarca desde 72.3°W a 75.9°W en longitud y desde 40.9°S a 46.9°S en latitud. Los cálculos son realizados sobre una grilla no estructurada basada en triángulos con 17414 nodos y 26625 elementos, cuya resolución alcanza hasta 500 [m] en algunas zonas (Figura 5). En este caso los espectros direccionales están discretizados en 32 frecuencias comenzando desde

0.0373 Hz con un factor de incremento de 1.1 Hz y 24 direcciones posibles con un factor de incremento de 15 °. En los pasos de tiempo del modelo se utiliza 200 s para el global, 100 s para la propagaci3n espacial, 50[s] para la propagaci3n infraespectral y 10 s para la integraci3n de t3rminos fuentes. El anidamiento con modelo del Oci3no Pacífico se lleva a cabo mediante la extracci3n de datos espectrales en 10 puntos que coinciden con el borde oeste del dominio regional. Los puntos se extraen cada 30[*min*] y est3n espaciados cada 0.5 ° en torno a la longitud 76 °W entre latitudes 41.5 °S y 46 °S. En cuanto a las forzantes atmosféricas se emplean resultados del modelo MOSA-WRF de 3 km de resoluci3n para forzar el modelo de oleaje. Para ello, se consideran las componentes zonales y meridionales de la velocidad del viento a 10msnm extraídas cada 1hr.

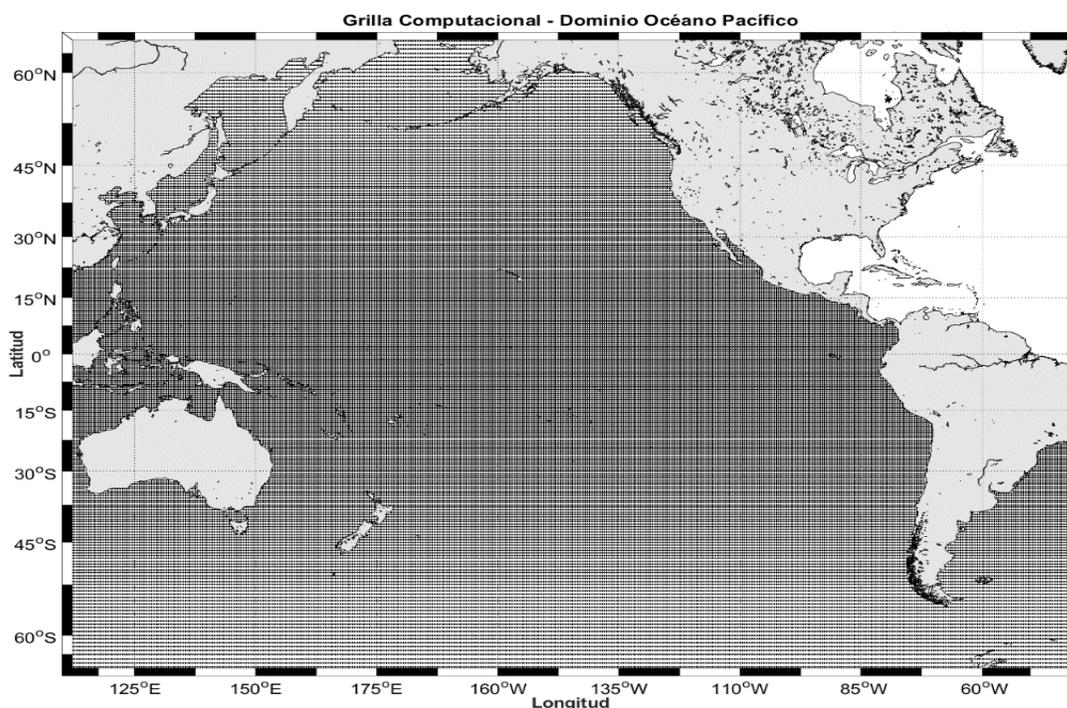


Figura 5: Grilla rectangular utilizada por el modelo WaveWatch III v6.07.1 para el dominio del Oci3no Pacífico.

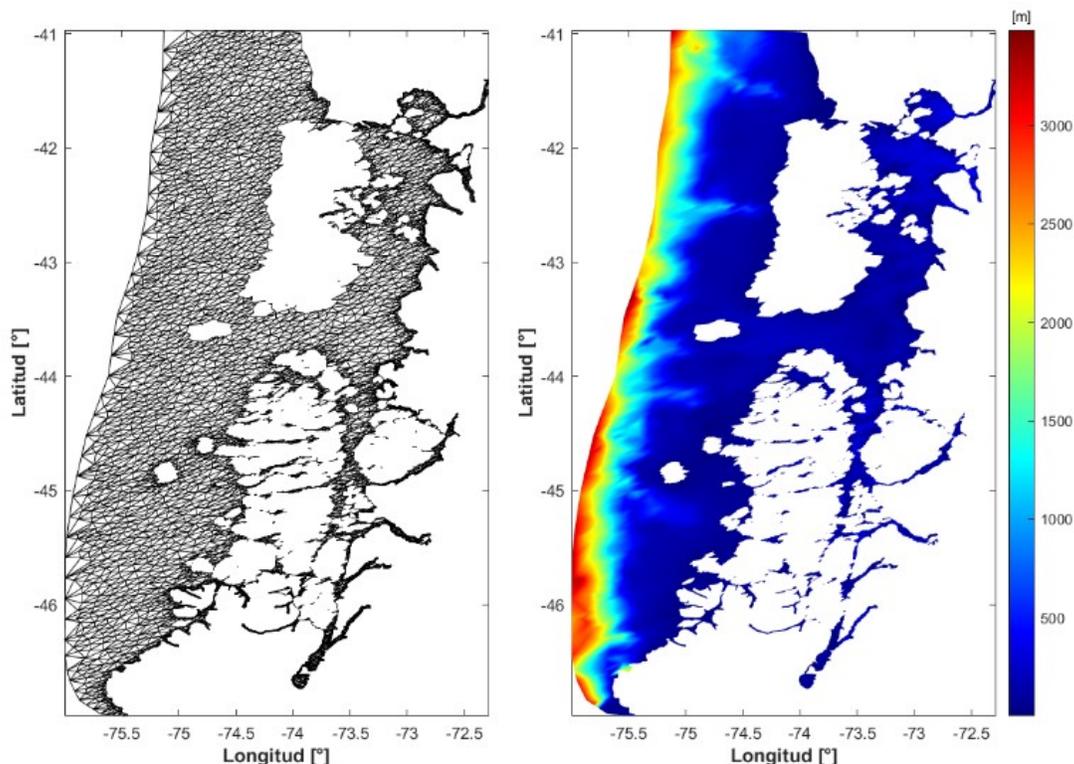


Figura 6: Grilla no-estructurada (izquierda) y batimetría (derecha) utilizada por el modelo WaveWatch III v6.07.1 para el dominio de la Región de Los Lagos y la Región de Aysén

3.4.2 Datos para evaluar los resultados del modelo

Los resultados de las simulaciones de oleaje fueron contrastados con observaciones instrumentales, realizadas aproximadamente en la posición 42.771°S y 73.244°W a una profundidad de 184 m. Las mediciones de oleaje fueron efectuadas mediante una boya WatchKeeper del SHOA. La información es registrada en intervalos horarios y contiene datos de altura de ola significativa, periodo peak, dirección media, temperatura del agua, presión atmosférica, temperatura del aire, velocidad del viento y dirección del viento. Se utilizaron los registros de los días 1, 2 y 3 de diciembre del 2023. Cabe destacar, que los datos descargados corresponden a series de tiempo transmitidas en tiempo real sin control de calidad.

También se utilizaron productos satelitales NOAA-CoastWatch basados en las mediciones realizadas por las campañas Jason2 (j2), Jason3 (j3), Sentinel-3A (3a), Sentinel-3B (3B), Sentinel-6 (6a), CryoSat-2 (c2) y SARAL (sa). Información de altura significativa de ola, velocidad del viento superficial y anomalías de la altura de superficie marina están disponible desde el 2016/09 hasta el presente para todos los satélites, menos para el j2 que termina el 2019/10/01. Se interpolaron los resultados de campos de parámetros de resumen de WW3 para obtener alturas de ola en los recorridos satelitales. En la Figura 7 se muestra la posición de extracción de datos por parte de los satélites durante los meses de enero y febrero del 2024.

Además, se comparó el sistema operacional Meteo-France que está basado en el modelo de oleaje de tercera generación MFWAM (Meteo France Wave Model). Este modelo tiene $1/12^\circ$ de resolución espacial, utiliza batimetría ETOPO2/NOAA y es forzado cada 3 horas con vientos de pronósticos desde el modelo IFS-ECMWF (Integrated Forecasting System - European Center for Medium Range Weather Forecasts). Su producto está disponible en intervalos de 3 hr y cuenta con campos de parámetros de ola espectrales, destacando la altura de ola significativa, periodo medio, periodo peak, dirección media, dirección peak, entre otras variables. Diariamente se proporcionan pronósticos de oleaje de 10 días y se almacena la información después de realizar técnicas de asimilación de datos mediante información satelital. Se descargaron campos del reanálisis para el periodo del 01/12/2023 coincidente con el periodo obtenido desde la boya SHOA y para el periodo entre 26/06/2024 hasta el 02/07/2024. Se decide emplear los productos de MFWAM debido a que es otro sistema operacional de oleaje, cuyos datos son de libre acceso.

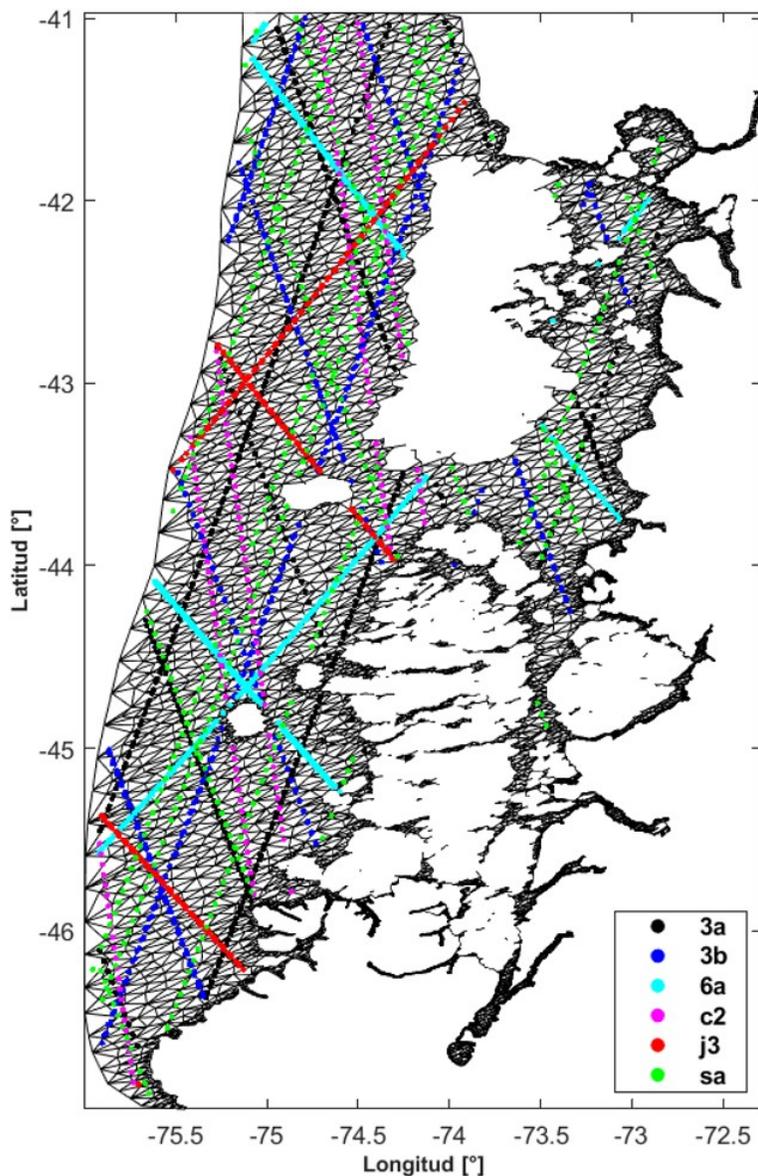


Figura 7: Ubicaci3n geogr3fica de los productos satelitales NOAA-CoastWatch dentro del dominio regional para los meses de enero y febrero del 2024: Sentinel-3A (3a), Sentinel-3B (3b), Sentinel-6 (6a), CryoSat-2 (c2), Jason3 (j3) y SARAL (sa).

3.4.3 Evaluación del desempeño

La evaluación del desempeño de las simulaciones numéricas de oleaje se llevó a cabo mediante parámetros estadísticos. Se utiliza el coeficiente de correlación (R), el error medio (BIAS) y la raíz del error cuadrático medio (RMSD). Además, con el fin de facilitar la comparación entre los distintos casos se utiliza la metodología expuesta en Beyá et al., (2017). Ésta corresponde a la asignación de una puntuación de rendimiento de criterios múltiples para seleccionar la configuración óptima. Se comienza con la normalización de los estadísticos teniendo como referencia el valor máximo y mínimo entre los casos a evaluar. Posteriormente se pondera cada estadístico normalizado y se suman para obtener una calificación (MPSe), en este caso se utiliza la misma importancia para cada estadístico (0.3333 o 33.33%). Finalmente, se pondera el MPSe de cada variable simulada y se suman para obtener la calificación definitiva (MPS), en este caso se utiliza la misma importancia para cada variable (0.3333 o 33.33%). Cabe destacar que las calificaciones varían entre 0 y 1.

3.4.4 Comparación de Grillas computacionales

La evaluación de las grillas computacionales del modelo operacional se basa en la comparación de 5 casos (ver Figura 8).

- G1: grilla no estructurada de resolución variable alcanzando hasta 500 m en algunas zonas, elaborada a partir de datos GEBCO de 15° de resolución. La grilla cuenta con 17414 nodos, 26625 elementos y se demora aproximadamente 800 s en ejecutar 3 días de simulación.
- G2: grilla estructurada de 0.025 ° de resolución, elaborada a partir de Etopo1 de 1 minuto, (~ 1.85 km) de resolución. Su confección resultó en una malla de 38801 nodos de cómputo (161x241), la cual se demora aproximadamente 400 s en realizar 3 días de simulación.
- G3: grilla estructurada de 0.025 ° de resolución, elaborada a partir de Etopo1 de 1° ~ 1.85 km) de resolución, pero sin considerar los datos de obstrucciones.
- G4: grilla estructurada de 0.025 ° de resolución, elaborada a partir de la batimetría utilizada por MOSA-CROCO de 1.2 km de resolución. Al igual que G2 tiene 38801 nodos de cómputo (161x241) y se demora alrededor de 400 s en la ejecución de 3 días de simulación.

- G5: grilla estructurada de 0.0125° de resoluci3n, elaborada a partir de la batimetría utilizada por MOSA-CROCO de 1.2 km de resoluci3n. Su confecci3n result3 en una malla de 154401 nodos de c3mputo (321×481), la cual se demora aproximadamente 2400 s en realizar 3 días de simulaci3n. Cabe destacar que solamente en este caso se tuvo que disminuir los pasos de tiempo debido a inestabilidades num3ricas. Se utiliz3 100 s para el global, 50 s para la propagaci3n espacial, 50 s para la propagaci3n infraespectral y 10 s para la integraci3n de t3rminos fuentes.

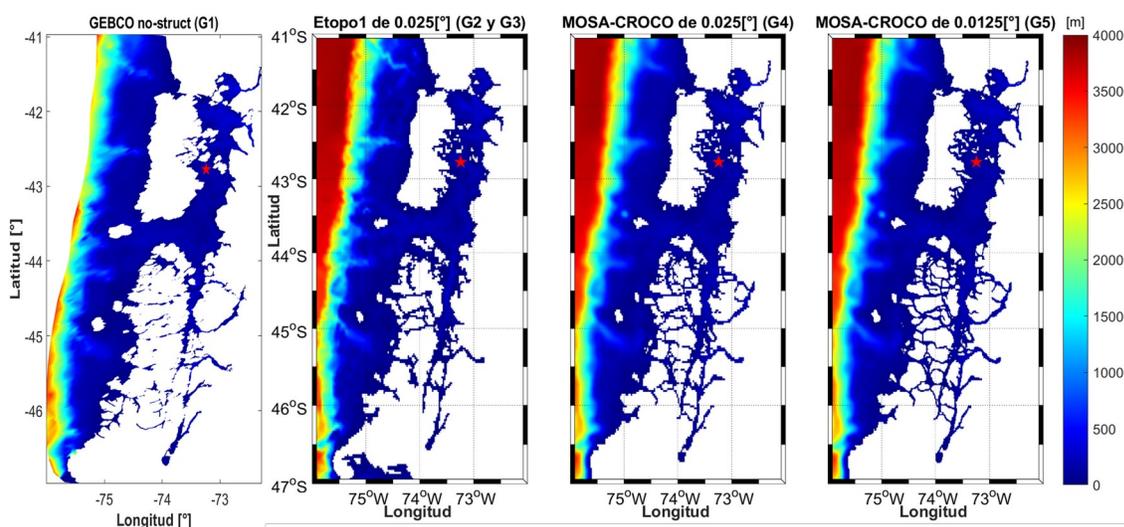


Figura 8: Batimetrías utilizadas para la evaluaci3n de grillas computacionales, indicando la fuente de informaci3n, resoluci3n de grilla y nomenclatura para comparaci3n.

3.4.5 Parametrizaciones físicas

La evaluaci3n de las parametrizaciones físicas se basa en la comparaci3n de distintos t3rminos fuente y sumidero relacionadas al crecimiento y disipaci3n de energía debido al viento. Por un lado, se varía entre los paquetes de condiciones físicas ST2, ST3, ST4 y ST6, los cuales cuentan con una serie de formulaciones, parámetros y coeficientes para representar las interacciones oleaje-atm3sfera y oleaje-oc3ano (dominado por rotura de ola) Por otro lado, se consideran distintas maneras de calcular el estr3s del viento sobre el oleaje seg3n las opciones FLX0, FLX2, FLX3 y FLX4.



Actualmente, las simulaciones del modelo operacional de oleaje se realizan bajo la compilación de los switch ST6 y FLX2. El análisis de sensibilidad se realiza sobre 2 grillas computacionales, la grilla no estructurada (P) y la grilla elaborada sobre Etopo1 de 0.025 ° de resolución que utiliza obstrucciones (E). De esta manera, los casos a evaluar son los siguientes:

- ST6FLX2
- ST6FLX3
- ST4FLX0
- ST3FLX0
- ST2FLX3
- ST2FLX2
- ST6FLX4

Por consiguiente, se evaluaron 7 casos de parametrizaciones físicas para la grilla no estructurada (P1, P2, P3, P4, P5, P6 Y P7) y la estructurada basada en Etopo1 (E1, E2, E3, E4, E5, E6 Y E7). Cabe destacar que existen combinaciones de parametrizaciones que no se permitieron por compilación y se listan a continuación:

- ST2FLX0
- ST2FLX4
- ST3FLX2
- ST3FLX3
- ST3FLX4
- ST4FLX2
- ST4FLX3
- ST4FLX4
- ST6FLX0



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 contraparte técnica (Departamento de Acuicultura, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura) tienen como propósito reforzar y conducir el desarrollo del proyecto hacia los temas más relevantes que dieron origen a este estudio, es decir, metodologías y grado de avance de las principales actividades asociadas al proyecto.

Reunión coordinación 1

Fecha: 12 Abril, 2023.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)

Reunión coordinación 2

Fecha: 17 Mayo, 2023.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)

Reunión coordinación 3

Fecha: 17 Julio, 2023.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)

Reunión coordinación 4

Fecha: 28 Julio, 2023.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Osvaldo Artal (IFOP)
3. Pablo Reche (IFOP)
4. Gabriel Soto (IFOP)



Reunion de Cordinacion 5

Fecha: 10 Junio, 2024.

Lugar: Google Meet

1. Susana Giglio (Subpesca)
2. Cristian Ruiz (IFOP)
3. Valentina Besoain (IFOP)

4.2 Reuniones técnico-académicas

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

Reunión 1

Se realizó una reunión técnica presencial con asesor Dr. Mark Falvey en las instalaciones de Meteodata en Santiago los días 19 y 20 de Enero. En estas reuniones, se analizaron los diferentes aspectos técnicos actuales y en el corto plazo del sistema de observación CHONOS. Dentro de las temas abordados, y en lo que respecta a este proyecto se analizaron las herramientas de MOSA y Parti-MOSA.

Fecha: 19 y 20 Enero, 2023.

Lugar: Oficina de Meteodata. (Domeyko 1864, Santiago, Región Metropolitana)

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Mark Falvey (Meteodata)

Reunión 2

Se realizó una reunión con investigador Dr. Ricardo Giesecke del Instituto de Ciencias Marinas y Limnológicas de la Universidad Austral de Chile a través de Google- Meet el día 24 de Marzo. En esta reunión, se analizaron las diferentes líneas de colaboración de estudios oceanográficos en la Región de Magallanes.

Fecha: 24 Marzo, 2023.

Lugar: Google-Meet



1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Ricardo Giesecke (Universidad Austral de Chile)

Reunión 3

Se realizó una reunión técnica presencial con asesor Dr. Andrés Sepúlveda en las instalaciones del departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción el día 30 de Marzo. En esta reunión, se analizó el estado de avance de modelación de oleaje para las regiones de Los Lagos y Aysén.

Fecha: 30 Marzo, 2023.

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andrés Sepúlveda (DGEO)

Reunión 4

Se realizó una reunión con investigadora Dra. Vera Oerder de la Universidad de Concepción a través de Google-Meet el día 11 de Abril. En esta reunión, se analizaron las diferentes líneas de colaboración con respecto a modelación atmosférica en la Patagonia Chilena.

Fecha: 11 Abril, 2023.

Lugar: Google-Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Oliver Venegas (IFOP)
3. Vera Oerder (Universidad de Concepción)

Reunión 5

Se realizó una reunión con investigadora Dra. Andrea Piñones de la Universidad Austral de Chile a través de Google-Meet el día 18 de Abril. En esta reunión, se analizaron las diferentes líneas de colaboración con respecto a modelación biofísica en la región de Magallanes.

Fecha: 18 Abril, 2023.

Lugar: Google-Meet



1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Andrea Piñones (Universidad Austral)
3. Valentina Bernald (Universidad Austral)

Reunión 6

Se realizaron una serie de reuniones técnicas y traspaso tecnologico de manera presencial con asesor Dr. Andrés Sepúlveda en las instalaciones del departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción entre los días 18 y 23 de Junio. En estas reuniones, se analizó el estado de avance de modelación de oleaje para las regiones de Los Lagos y Aysén.

Fecha: 18-23 Junio, 2023.

Lugar: Departamento de Geofísica, Universidad de Concepción

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Pablo Reche (IFOP)
3. Andrés Sepúlveda (DGEO)

Reunión 7

Se realizó una reunión con investigadora Dra. Vera Oerder de la Universidad de Concepción a través de Google-Meet el día 2 de Agosto. En esta reunión, se analizaron los avances y colaboraciones con respecto a modelación atmosférica en la Patagonia Chilena.

Fecha: 2 Agosto, 2023.

Lugar: Google-Meet

1. Osvaldo Artal (IFOP)
2. Oliver Venegas (IFOP)
3. Vera Oerder (Universidad de Concepción)



Reunion 8

Reunión con el asesor Dr. Andres Sepulveda, para conocer el estado de la aseoria y conocer los resultados y desafíos presentes en el desarrollo de MOSA-WW3 y mejoras en el código de PartiMosa.

Fecha: 18 Marzo, 2024.

Lugar: Google-Meet

1. Cristian Ruiz (IFOP)
2. Andres Sepulveda (Universidad de Concepción)
3. Sergio Bahamondez (Universidad de Concepción)

Reunión 9

Reunión con el asesor de desarrollo del portal CHONOS, Meteodata, para analizar la implementación de los nuevos desarrollos en el portal.

Fecha: 20 Marzo, 2024.

Lugar: Google-Meet

1. Mark Falvey (Meteodata)
2. Andres Arriagada (Meteodata)
3. Pablo Reche (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.



4.3.1 Taller difusión

El Taller de difusión de resultados de este proyecto se realizara el viernes 27 de Septiembre en Puerto Montt.

4.3.2 Taller de transferencia de desarrollo de modelo de oleaje

Entre los días 4 y 5 de junio 2024, se realizo una capacitación a personal de IFOP por parte del asesor Dr. Andres Sepulveda y Sergio Bahaamondez en las dependencias de la Universidad de Concepcion con el objetivo de transferir el desarrollo realizado del modelo de oleaje MOSA-WW3. La capacitación se centro en conocer los fundamentos de oleaje, familiarización con el modelo WaveWatch III, configuración de modelo, grillas y parametrizaciones. Además se abordó parcialmente la configuración para realizar modelaciones operacionales.

Lugar: Universidad de Concepcion, Concepcion.

Fecha: 4-5 de junio, 2024.

Asistentes: Andrés Sepulveda (Universidad de Concepción), Sergio Bahamondez (Universidad de Concepción), Oliver Venegas(IFOP), Javiera San Martin (IFOP), Cristian Ruiz (IFOP).

4.4 Presentaciones en congresos/seminarios/talleres nacionales o internacionales

2023. Osvaldo Artal. Un modelo Lagrangeano para la gestión costera de la Patagonia Chilena: Desarrollo y Perspectivas. Ciclo de charlas CONA. Dinámica Océano- Atmósfera (GT-DOCA). Online, 17 de Abril del 2023.

2023. Osvaldo Artal. Herramientas Numéricas para la gestión de la costa en la Patagonia Chilena. Ciclo de charlas Facultad de Ingeniería Civil, Universidad de Concepción. 22 de Junio del 2023.

2023. Osvaldo Artal. Uso del sistema de información oceanográfica CHONOS. Mar de Chile zona norte y sur. Seminario Internacional: Desafíos Normativos y Ambientales para la Acuicultura de Zonas Expuestas o de Alta Energía, Puerto Varas, 4 – 5 de Julio del 2023.

2023. Osvaldo Artal. Sistemas de observación en tiempo real, campañas históricas y desafíos en modelación. Seminario interno CEQUA-IFOP. Punta Arenas, 25 de Julio del 2023.



2023. Cristian Ruiz. Modelación en la zona de Magallanes: Estado actual y próximos desafíos. Seminario interno CEQUA-IFOP. Punta Arenas, 25 de Julio del 2023.

2024. Cristian Ruiz. Frontal advance patterns of tidewater glaciers in the Cordillera Darwin Icefield. Presentación VI Congreso de la Sociedad de la Criósfera, SOCHICRI, 22 al 24 de mayo, Punta Arenas.

4.5 Publicaciones científicas.

Giesecke, R., Galbán-Malagón, C., Salamanca, M., Chandia, C., **Ruiz, C.**, Bahamondes, S., & Astorga-Gallano, D. (2024). Automated FerryBox monitoring reveals the first recorded river induced crude oil seep transport to the Strait of Magellan in southern Patagonia. Science of The Total Environment, 170706.

4.6 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 14 estaciones meteorológicas, de las cuales 9 estaciones se encuentran transmitiendo totalmente operativas, 2 estaciones están listas para ser instaladas y 2 estaciones se encuentran en bodega con fallas, por lo que deben ser enviadas a servicio técnico, y 1 estación fue dada de baja.

2. 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.



4.7 Carta Gantt del proyecto

El proyecto tiene una duración total de 20 meses, comenzando en enero del 2023 y finalizando en agosto del 2024.

Actividades	E23	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D	E24	F	M	A	M	J	J	A
1.Evaluación MOSA-CROCO v/s observaciones	x	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										
3. Ampliación biogeoquímico								x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
4. Evaluación modelo de oleaje					x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x				
5. Taller difusión									x							x				
6. Reuniones de coordinación																				x
7. Documento de avance 1								x												
8. Documento de avance 2																x				
9. Informe final																				x

5. Resultados

5.1 Resultados objetivo específico 1:

Actualizar la evaluación del sistema operacional MOSA con las últimas observaciones oceanográficas y meteorológicas disponibles en el mar interior de Chiloé y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

5.1.1 MOSA-CROCO

La escasez de información observacional, la baja resolución de los productos satelitales sumada a la persistente nubosidad, la geomorfología abrupta y accidentada de la batimetría, entre otras cosas vuelven compleja la tarea de validación de un sistema operacional desarrollado para un sistema de fiordos y canales como la Patagonia Chilena. Para abordar este objetivo, se reúne información satelital disponible de manera superficial en los mares interiores del dominio y se complementa con la información observacional de la columna de agua recolectada por el equipo de terreno de IFOP-Putemún. En este objetivo se presenta la validación de la temperatura superficial del mar (TSM), la temperatura y salinidad en la columna de agua, nivel del mar y corrientes pronosticadas por el modelo operacional MOSA-CROCO, tomando en cuenta la información disponible hasta la fecha.

El modelo operacional ha estado en funcionamiento desde 2017 hasta la fecha, destacándose por su alta estabilidad, lo que se refleja en el elevado porcentaje de días pronosticados. Durante el último periodo se observó un porcentaje de 99% de días pronosticados en 2023. Sin embargo, al considerar los datos hasta junio de 2024, el porcentaje disminuye a un 84% (Figura 9). Esta caída en el rendimiento se asocia a fallos en el pronóstico, los cuales se atribuyen a cambios en la configuración del forzante global utilizado y a ajustes en los recursos computacionales que provocaron interrupciones temporales. Actualmente, estas nuevas configuraciones han sido implementadas, por lo que se anticipa un alto porcentaje de pronósticos exitosos para lo que resta de 2024.

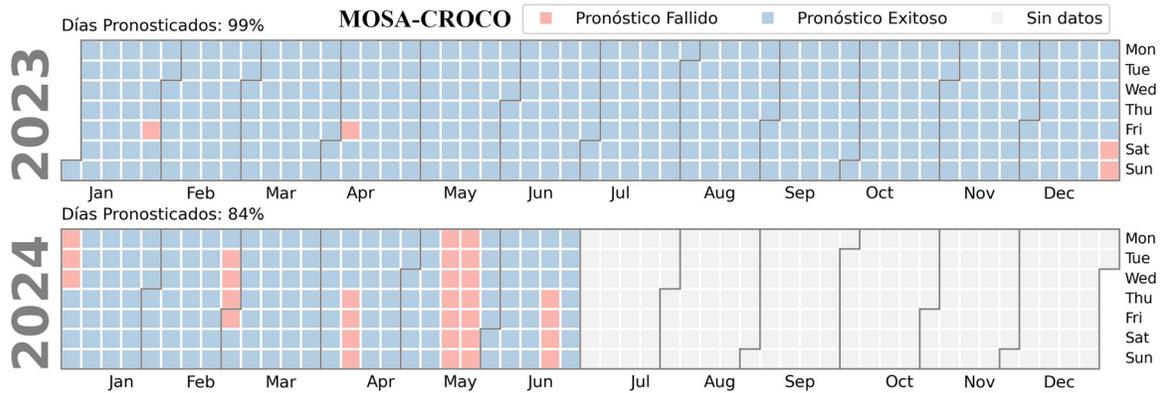


Figura 9: Rendimiento del pronóstico MOSA-CROCO para el periodo operacional 2023-2024.

Para el análisis temporal de la superficie del océano, se utilizó información satelital la cual permite llevar un seguimiento de la habilidad del modelo a lo largo de su período de desarrollo, logrando monitorear la variabilidad del sistema y como el modelo se ha ido ajustando a esta variabilidad en el tiempo, Además de conoce la distribución espacial del error. La TSM media para todo el dominio se ha comparado con el producto satelital AVHRR. Las diferencias muestran el grado de ajuste medio entre el pronóstico operacional y los campos satelitales.

Durante el primer año de implementación operacional, el modelo mostró el menor grado de ajuste, apreciándose una diferencia de amplitud entre las señales con un error de más de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 10a). En aquella etapa, la configuración implementada buscaba mantener un modelo estable priorizando la continuidad del pronóstico por sobre la exactitud de reproducir la variabilidad espacio-temporal de la región. Por esta razón, la estabilidad se alcanzó a partir del segundo año de operación superando el 98% de los días pronosticados y logrando ajustar la amplitud del modelo a un error menor a $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Si bien se ha logrado mantener una alta relación lineal durante todo el período (correlación de 0.97), es en la amplitud donde se han notado los cambios más significativos, con un error de $0.46\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Figura 10b). El modelo ha logrado reproducir, en términos generales, la estacionalidad de la temperatura. Esta condición se refleja en el primer modo de variabilidad, el cual presenta una alta concordancia y porcentajes de varianza explicada similares entre ambas bases de datos, con un 96% en el caso de MOSA y un 97% en los datos AVHRR (Figura 10c). Durante el último periodo (julio 2023 - abril 2024) no se observan cambios generales significativos.

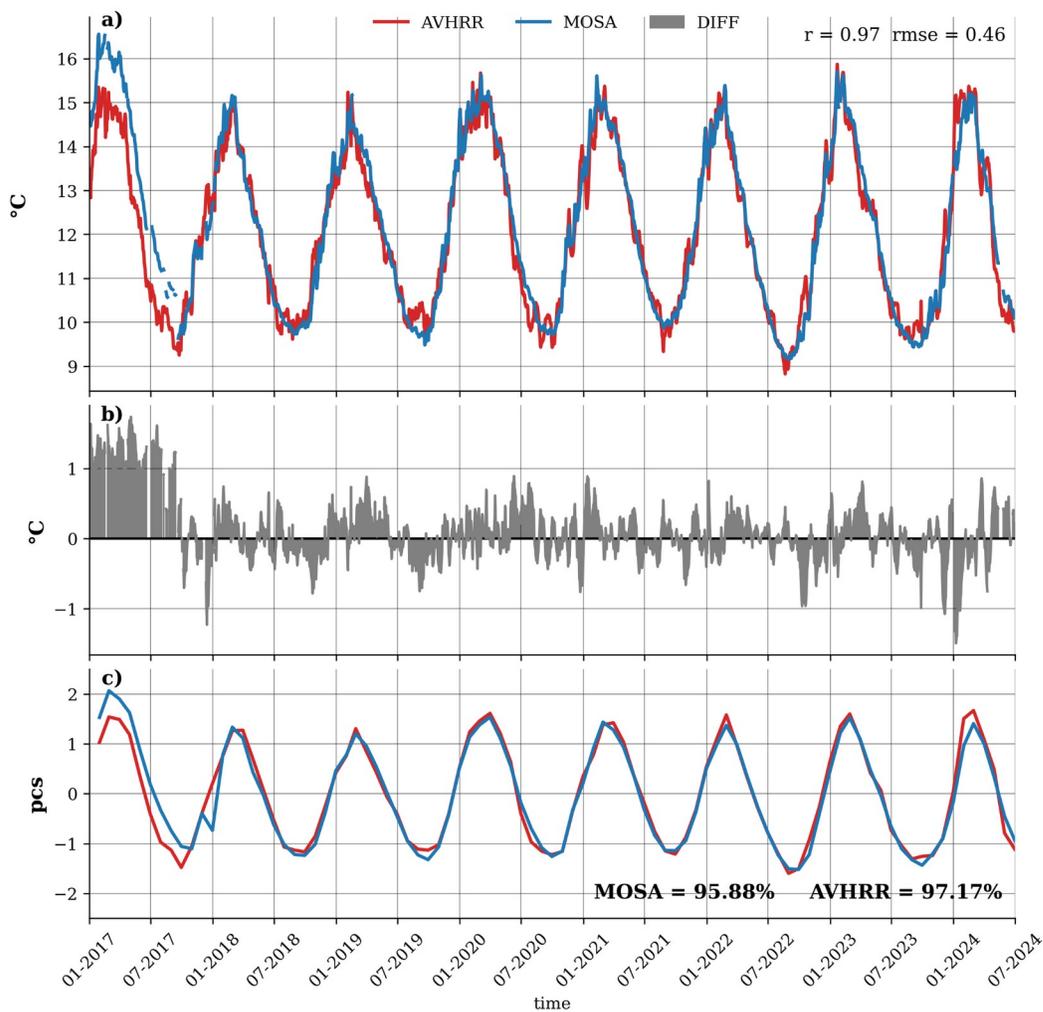


Figura 10: a) Promedio diario, b) diferencia y c) primer modo de la componente principal de TSM pronosticada por MOSA-CROCO y producto satelital AVHRR, entre enero de 2017 y junio de 2024.

El ciclo anual muestra que el modelo operacional MOSA-CROCO se ajusta de buena manera a los datos satelitales de AVHRR, la Figura 11 muestra el ciclo anual del índice de correlación (r), la raíz del error cuadrático medio (RMSE) y el sesgo (BIAS) entre el modelo y los datos satelitales. Estos estadísticos evidencian un alto grado de ajuste durante el año, con un sesgo registrado que no supera los ± 0.6 °C, un RMSE por debajo de los 0.7 °C y una correlación que se mantiene sobre los 0.5 (Figura 11a). Si bien estos valores representan un alto grado de ajuste, el comportamiento no es homogéneo durante todo el año. El modelo tiende a sobrestimar la TSM en 0.2 °C aproximadamente durante los meses de enero a agosto (Figura 11c) con un índice de correlación sobre los 0.7 . Hacia los meses de primavera, entre agosto y diciembre, el modelo tiende a subestimar la TSM, alcanzando en octubre el mayor desajuste, con un error estimado de 0.4 °C (Figura 11b). Probablemente estas diferencias están asociadas a los cambios en los aportes de agua dulce y radiación solar durante esta época del año, los cuales son subestimados por el modelo FLOW.

Durante el periodo enero - junio de 2024 el modelo ha presentado un índice de correlación superior a 0.5 , el cual se mantiene aproximadamente dentro de los valores estimados históricamente (Figura 11a). La menor correlación se estima en junio. En enero de 2024 el modelo alcanza su mayor error estimado históricamente, debido a un desajuste producido por una inestabilidad luego del reinicio del sistema producto de una caída en el pronóstico, sin embargo el modelo se logra estabilizar y mejorar las estimaciones alcanzando el mínimo de error histórico que no supera los 0.2 °C (Figura 11b). Este acontecimiento también es observado en el sesgo, donde en enero el modelo subestima la temperatura por más de 0.5 °C, que luego disminuye en febrero a menos de 0.2 °C (Figura 11c).

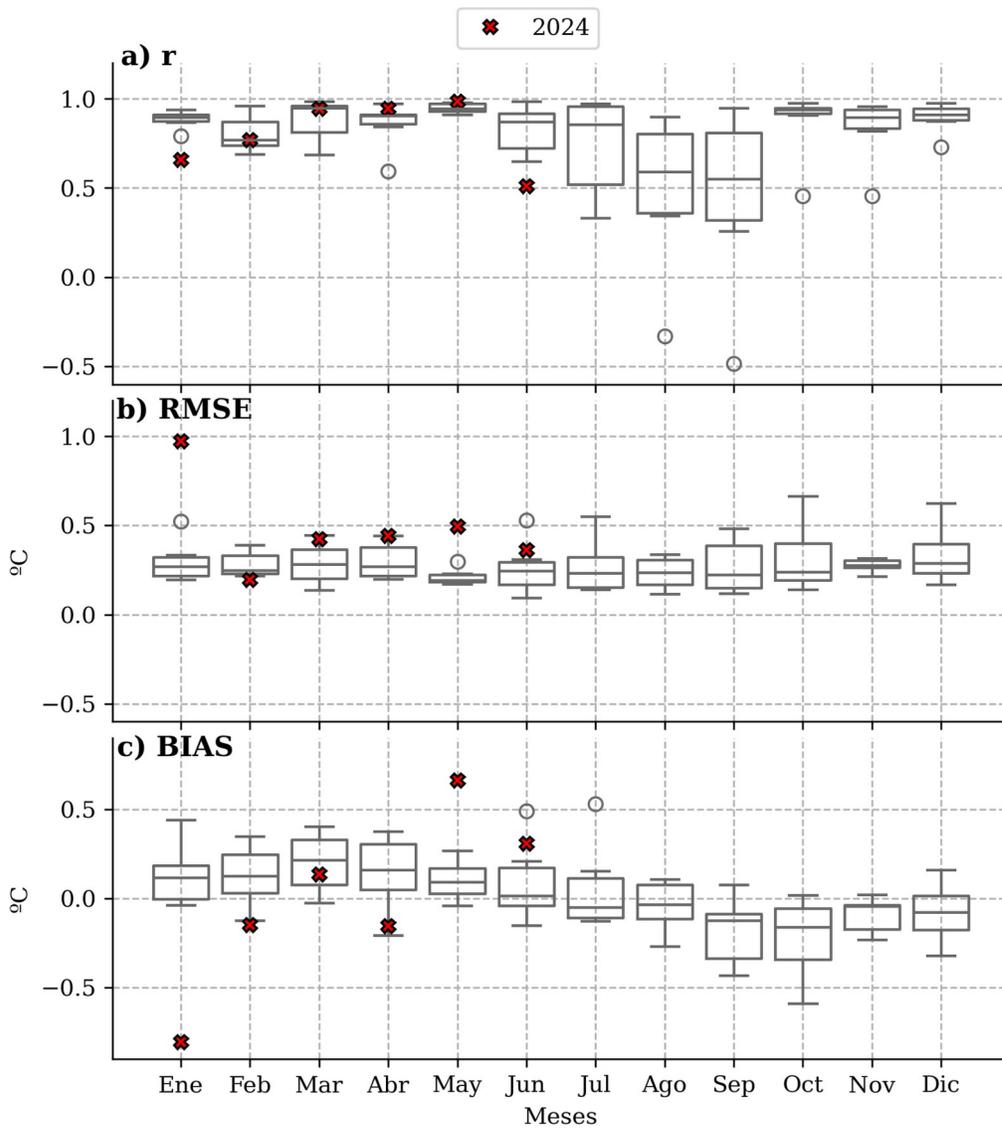


Figura 11: Correlaci3n, b) Raíz del error cuadrático medio y c) BIAS mensual entre la temperatura pronosticada por el modelo operacional MOSA-CROCO y el producto satelital.

Para estudiar el comportamiento de MOSA-CROCO en la columna de agua, se utilizan las mediciones de CTD realizadas en los cruceros oceanográficos realizados por IFOP. En esta etapa se cuenta con dos cruceros realizados en agosto de 2023 y junio de 2024. Los puntos de mediciones cubren parte del dominio de MOSA, específicamente al este del Mar Interior de Chiloé, donde se concentran los principales fiordos, canales y aporte de agua dulce de la región. Con esta información se construyó una transecta a lo largo del mar interior (Figura 2) considerando en el caso de MOSA los pronósticos para las fechas de los registros de CTD y una interpolación lineal en las coordenadas de los puntos medidos.

Las figuras 12 y 13 muestran la comparación entre ambas fuentes de información para agosto de 2023 y junio de 2024 respectivamente. Podemos notar que en ambos casos MOSA logra reproducir de buena manera la estructura general de la columna de agua, además se observa tanto el gradiente vertical como horizontal presente en temperatura y salinidad. La estructura definida por las mediciones muestra una disminución de la temperatura hacia el sur y mínimos de salinidad en 4 regiones particularmente importantes, las cuales son el fiordo de Reloncaví, fiordo Comau, fiordo Puyuhuapi y estero Elefantes (Figura 12). Si bien, el modelo es capaz de reproducir la estructura estuarina, las mayores diferencias están en su magnitud. Durante agosto de 2023 el modelo sobrestima la temperatura entre $0.5-2^{\circ}\text{C}$ y la salinidad entre 1-3 PSU, en el caso de temperatura la diferencia se aprecia en toda la columna y es más notoria en la zona de fiordo Reloncaví y fiordo Comau, donde se alcanza una diferencia de 2°C en la capa de 20-80 m. La salinidad en cambio muestra las mayores diferencias en la zona más somera, sobre los 20 metros de profundidad y más notoria hacia el sur en estero Elefantes y fiordo Puyuhuapi, donde en este último el modelo logra reproducir en esta época valores bajos de salinidad asociados a la región, pero con una sobre estimación de 3 PSU. En el caso de junio de 2024 la diferencia de temperatura se vuelve más notoria a lo largo de la columna de agua, sin embargo en esta ocasión el modelo subestima su magnitud en 1.5°C , pero mantiene una sobre estimación en salinidad de 2 PSU, sin embargo de menor magnitud, mejorando su desempeño en estero Elefantes y fiordo Comau (Figura 13). En el caso del fiordo Puyuhuapi se logra apreciar su presencia en las estimaciones del modelo, pero aun con una intensidad por sobre a lo esperado.

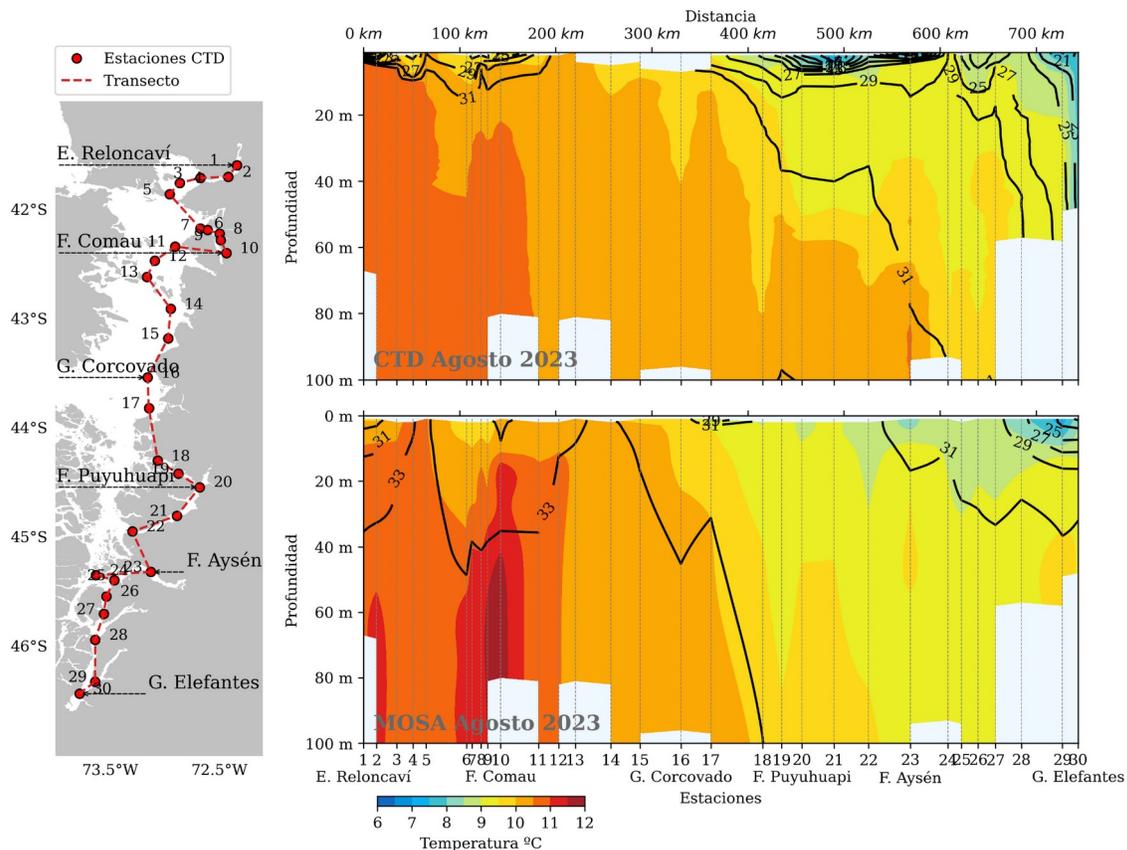


Figura 12: Transecta de temperatura (colores) y salinidad (Contornos) para las estaciones de medici3n del mapa (panel izquierdo) durante agosto de 2023. Mediciones de CTD (panel superior) y pron3stico MOSA (panel inferior).

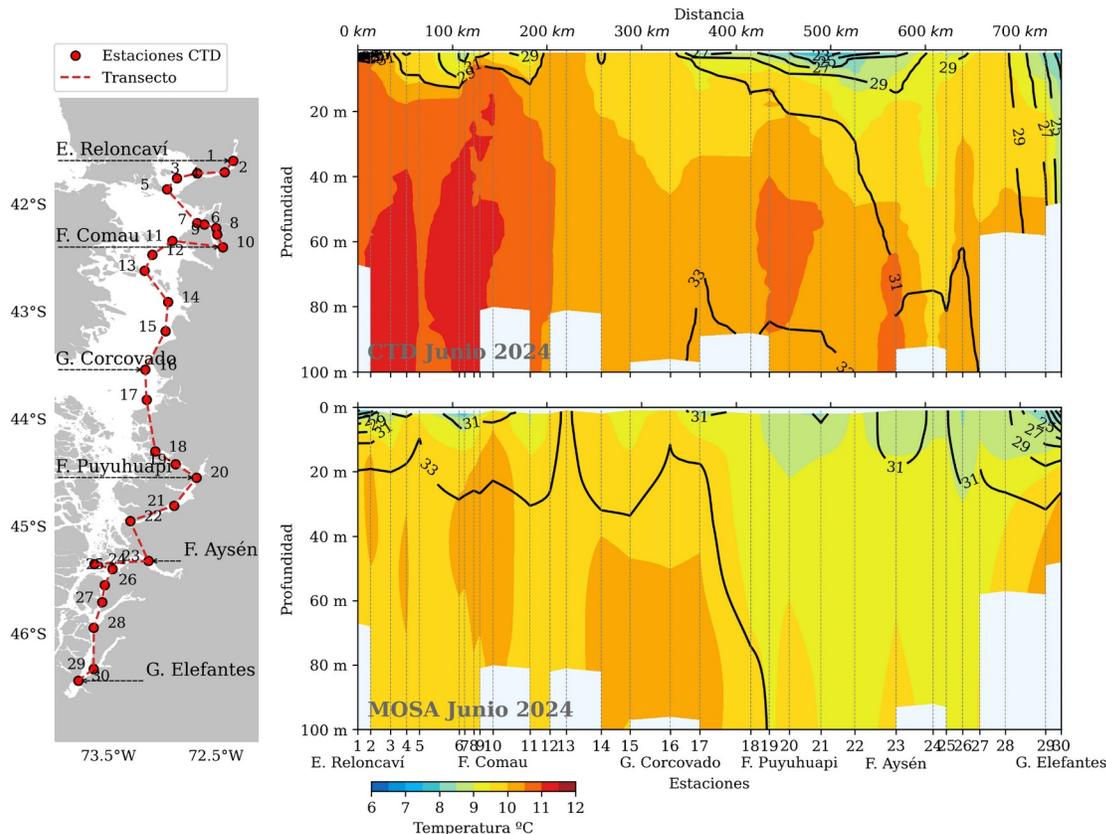


Figura 13: Transecta de temperatura (colores) y salinidad (Contornos) para las estaciones de medición del mapa (panel izquierdo) durante junio de 2023. Mediciones de CTD (panel superior) y pronóstico MOSA (panel inferior).

Para complementar el análisis se construyeron diagramas T-S para las mediciones CTD y se comparó con los perfiles estimados por MOSA. En términos generales y durante ambos periodos de análisis se puede notar un alto grado de ajuste (Figura 14). Como se ha evidenciado también en otros periodos de análisis el modelo es capaz de reproducir la estacionalidad en la columna de agua. Las principales diferencias se pueden observar en la parte más somera en los datos medidos en agosto de 2023, se pueden notar valores de salinidad por debajo de 20 PSU que no son reproducidos por MOSA (Figura 14a). En términos de temperatura el modelo se ajusta de mejor manera, sobre estimando levemente en agosto de 2023 y subestimando en junio de 2024 (Figura 14b).

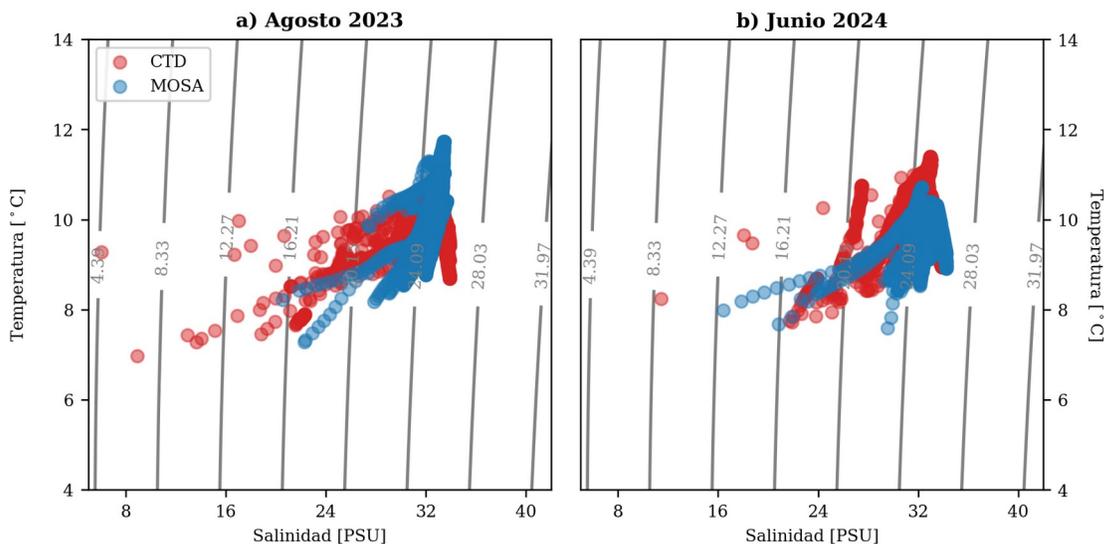


Figura 14: Diagramas T-S para a) agosto de 2023 y b) junio de 2024. Observaciones de CTD (rojo) y pronóstico MOSA (azul).

Para el caso de la dinámica de las corrientes, estas resultan complejas de predecir. En etapas anteriores del proyecto para evaluar el desempeño de MOSA-CROCO se han utilizado mediciones ADCP tomadas durante las campañas oceanográficas realizadas por IFOP para determinar la congruencia entre las señales observadas y las estimadas por el modelo. En esta etapa se actualiza el análisis utilizando un ADCP instalado en el fiordo Reloncaví y operado entre septiembre de 2022 y octubre de 2023. Esta información fue comparada con las componentes de velocidad integradas de MOSA-CROCO para las mismas profundidades registradas por el anclaje. La corriente medida en fiordo de Reloncaví muestra una orientación principalmente este-oeste que se alinea con la orientación del estuario, esta es más marcada en el modelo. Los ejes de máxima varianza coinciden entre ambas fuentes de información con un porcentaje de varianza explicada de un 93% en el caso del ADCP y un 98% en MOSA. Si bien las componentes presentan una orientación similar, la mayor diferencia se observa en la magnitud de la corriente, donde el modelo tiende a subestimar su intensidad (Figura 15a). Las densidades espectrales de potencia alcanzan una cantidad de energía similar entre las fuentes de información, evidenciando la leve subestimación del modelo, sin embargo los máximos espectrales se encuentran bien definidos, principalmente en las bandas diurnas y semidiurnas, que resaltan la importancia de la marea en la zona (Figura 15b). En esta ocasión las mayores

diferencias de energía espectral se notan hacia las frecuencias más altas, donde el modelo pierde energía a una mayor tasa que lo observado en las mediciones.

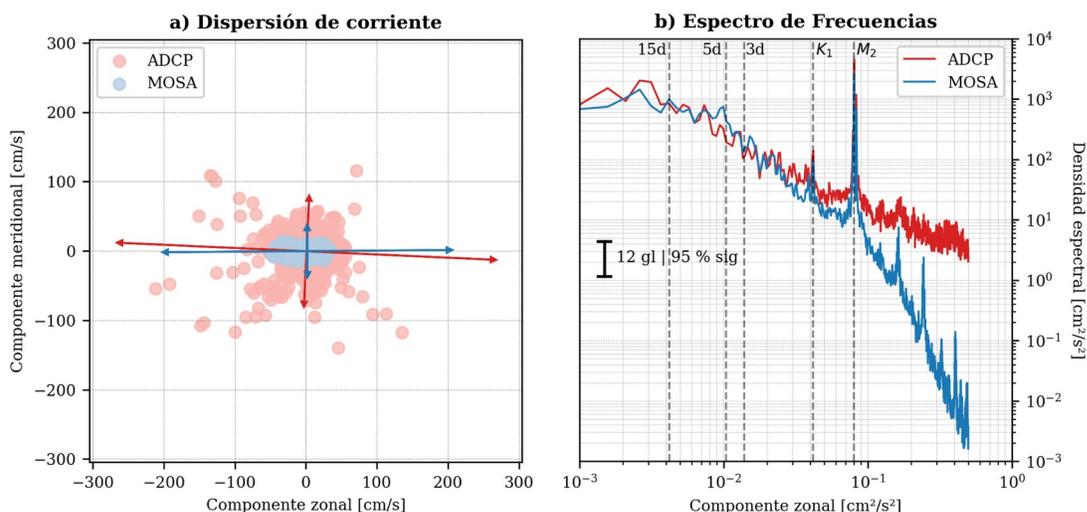


Figura 15: Dispersión y ejes de máxima varianza en las componentes ortogonales de corriente. b) Espectro de frecuencia para la componente zonal modelada (azul) y observadas (rojo). Datos registrados en la boca del fiordo de Reloncaví entre el 12 de septiembre de 2022 y el 15 de octubre de 2023 (ver posición geográfica en Fig. XX).

Para evaluar el nivel del mar simulado por MOSA se utilizan 6 estaciones de mareógrafos distribuidas en el dominio del modelo (Figura 2). Para esta etapa se consideró el periodo septiembre 2023 el cual contiene periodos de sicigia y cuadratura, que son comparables con los resultados obtenidos en la etapa anterior de este proyecto. Los resultados muestran que la marea simulada se mantiene en fase con las mediciones, las correlaciones evidencian un alto grado de ajuste con valores por sobre 0.8 (Figura 16a). Por otro lado, se mantiene una leve sobre estimación de la amplitud mareal, principalmente asociado al constituyente semidiurno M₂ (Figura 16b). La menor capacidad del modelo para reproducir la marea se mantiene en las estaciones de Melinka, Puerto Aguirre y Puerto Chacabuco.

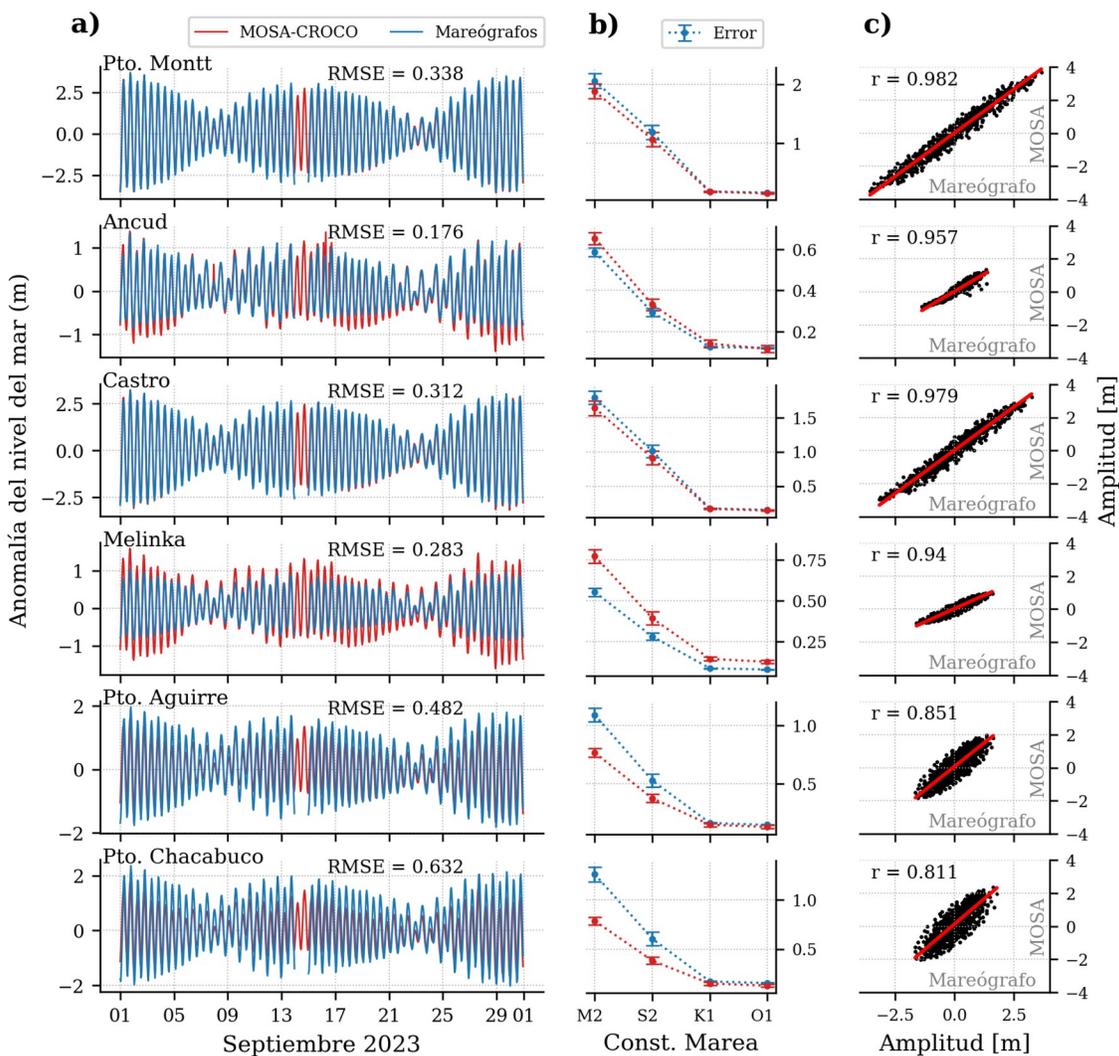


Figura 16: Series de tiempo de elevación del nivel del mar, b) amplitud de los principales constituyentes de mareas y c) diagrama de dispersión entre las elevaciones del nivel del mar simulada y observada durante Septiembre del 2023, para las estaciones de Puerto Montt, Ancud, Castro, Melinka, Puerto Aguirre y Puerto Chacabuco.

5.1.2 MOSA-WRF

MOSA-WRF se encuentra operativo desde el 20 de Julio del año 2018. La Figura 17 muestra su rendimiento en el periodo 2023 – 2024 hasta principios de julio, 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 100% de efectividad, no experimentando caídas en esta etapa del proyecto.

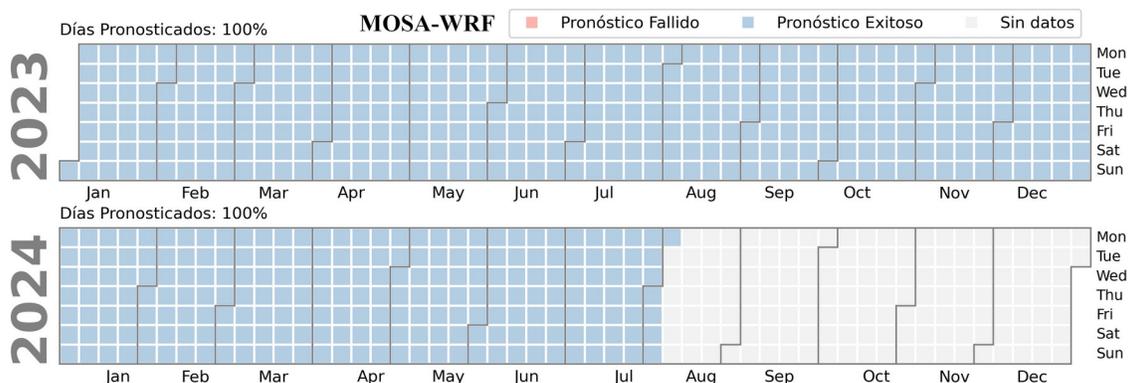


Figura 17: Rendimiento del sistema MOSA-WRF durante el periodo 2023 – 2024.

5.1.2.1 Evaluación espacial con ERA5

Para el caso de las correlaciones en ambas componentes del viento (Figura 18) se muestran valores cercanos a 1, durante todo el año, en la zona del mar abierto, tendiendo a disminuir a medida que se acercan al continente. En el caso de la componente zonal hay un mayor desfase entre estos dos productos en las zonas costeras con influencia oceánica para el periodo de verano (Figura 18-1) con valores entre 0.8 y 0.9, aumentando este desfase en zonas de mar interior de Chiloé y Aysén, con valores entre 0.5 y 0.7. Finalmente en zonas cordilleranas en donde la topografía es mas irregular, principalmente en la zona noreste del dominio, las correlaciones son bajas, mostrando una mínima o nula relación entre ambos modelos con valores que se acercan a 0. Los valores de correlación mantienen esta variabilidad espacial durante las otras estaciones del año, sin

embargo aumentan a medida que se acerca al invierno y disminuyen tendiendo al verano.

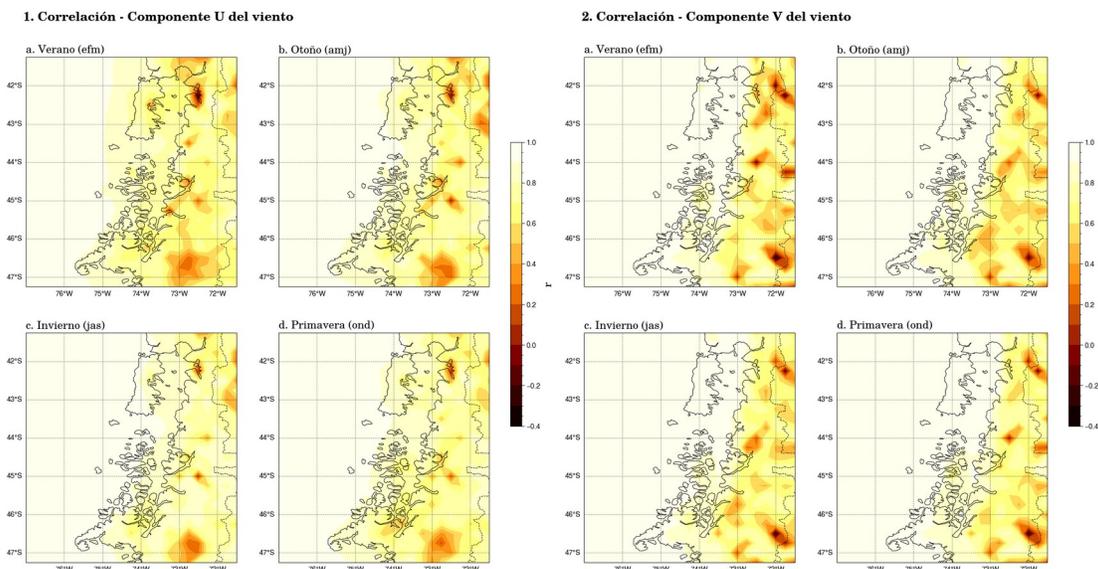


Figura 18: Correlación entre MOSA-WRF y ERA5 para el año 2023. El panel N°1 muestra la componente U del viento y el N.º 2 la componente V del viento. Los subplots a, b, c, y d, representan las estaciones del año para verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente.

La componente meridional del viento (Figura 18-2) muestra un ajuste aceptable en las fases de los modelos para las zonas de mar abierto, la Isla grande y mar interior de Chiloé, en el caso de las cuatro estaciones del año con valores cercanos a 1, tendiendo a disminuir cuando se encuentra principalmente en la zona de la Cordillera de los Andes y en el sector insular norte de la región de Aysén, con valores próximos a 0.6, disminuyendo considerablemente la fase de ambos modelos en los sectores al interior de la cordillera, principalmente en donde la topografía se torna más compleja, con valores bajos entre 0 y 0.4. Se destaca al igual que la componente U, este desfase se acentúa en los sectores cordilleranos a medida que se acerca el verano y disminuyendo relativamente en invierno.

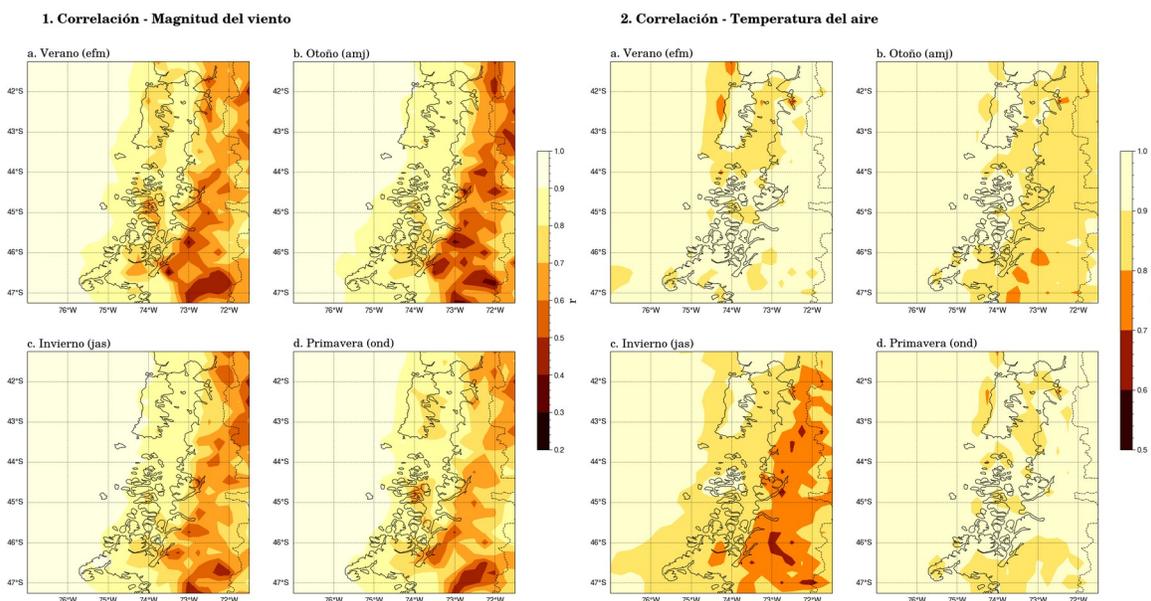


Figura 19: Correlación entre MOSA-WRF y ERA5 para el año 2023. El panel N°1 muestra la magnitud del viento y el N.º 2 la temperatura del aire a 2 metros. Los subplots a, b, c, y d, representan las estaciones del año para verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente.

En relación a la Magnitud del viento (Figura 19-1), el campo de correlación muestra un comportamiento similar al de sus componentes ortogonales; mayores valores en la zona del mar abierto, con valores cercanos a 1, disminuyendo a medida que se encuentra con el relieve terrestre, encontrándose el mayor desfase en el sector sur de la Cordillera de los Andes. Existe un desfase mayor en primavera y verano para la zona costera con influencia oceánica, por otra parte, estos desfases aumentan en otoño para el sector sur de la cordillera de los Andes, finalmente se ve un leve aumento en las correlaciones para el periodo de verano en el mar interior de Chiloé y Aysén norte, con valores que bordean los 0.8.

Las correlaciones para la temperatura del aire (Figura 19-2) se ven bastante altas para el sector de mar abierto con valores cercanos a 1, tendiendo a disminuir con valores cercanos a 0.8 en invierno para la zona sur. En términos generales en primavera y verano hay un ajuste considerable para los sectores en donde hay tierra, disminuyendo esta fase principalmente en la cordillera de los Andes y el sector insular de la región de Aysén en las estaciones de otoño-invierno, con valores que llegan a bordear los 0.5.

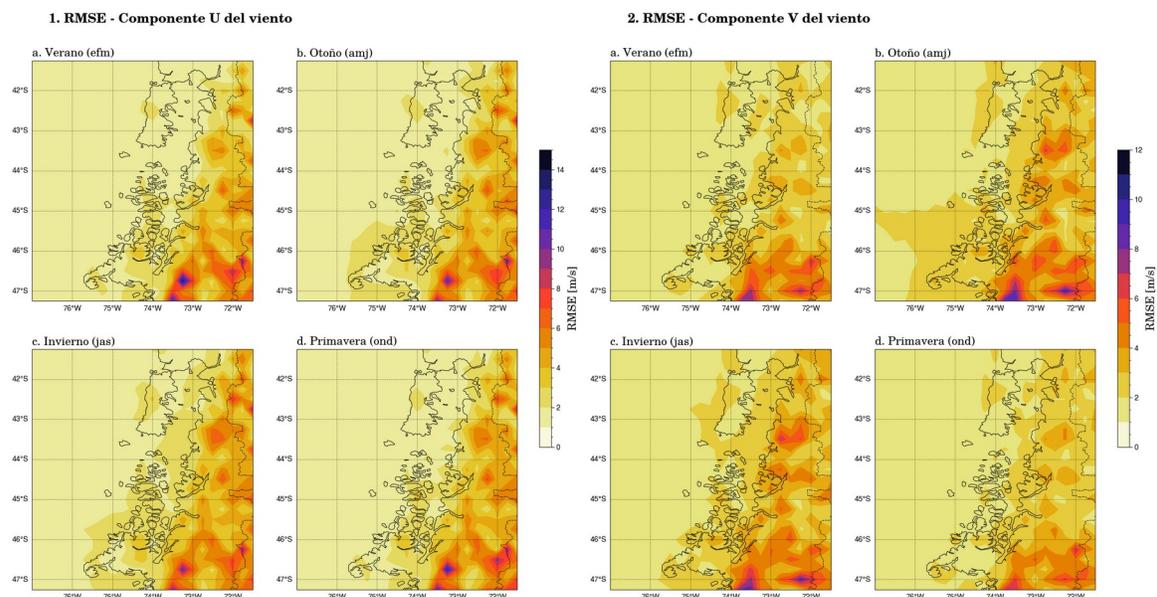


Figura 20: RMSE entre MOSA-WRF y ERA5 para el año 2023. El panel N°1 muestra la componente U del viento y el N.º 2 la componente V del viento. Los subplots a, b, c, y d, representan las estaciones del año para verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente.

Los campos de la Raíz del error cuadrático medio (RMSE) de MOSA-WRF con respecto a ERA5 para las componentes ortogonales del viento se muestran en la Figura 20, para el caso de la componente zonal (Figura 20-1) se ve un mayor ajuste en la zona de mar abierto principalmente para los periodos de verano y primavera con valores entre 0 y 1.5 m/s, tendiendo a aumentar el error en épocas de otoño e invierno, bordeando los 3 m/s. Por otro lado en los sectores en donde hay tierra estos valores tienen a aumentar, principalmente en sectores al interior de la montaña, tendiendo a ser mayores en otoño-invierno con valores que alcanzan hasta los 13 m/s, principalmente hacia el sur.

La componente V del viento tiene un comportamiento parecido, con valores bajos en sectores de mar abierto, aumentando levemente en los mares interiores cuyos valores pueden bordear los 3 m/s (Figura 20-2). Existe una tendencia a los valores mayores en zonas de la costa del Océano Pacífico abierto, como en Chiloé y las islas de la Región de Aysén; estos valores también tienden a aumentar a medida que se avanza hacia el sur, sobretodo en sectores altos con

topografía irregular, el cual se acentúa en periodos de verano y primavera, logrando llegar a los 7 m/s.

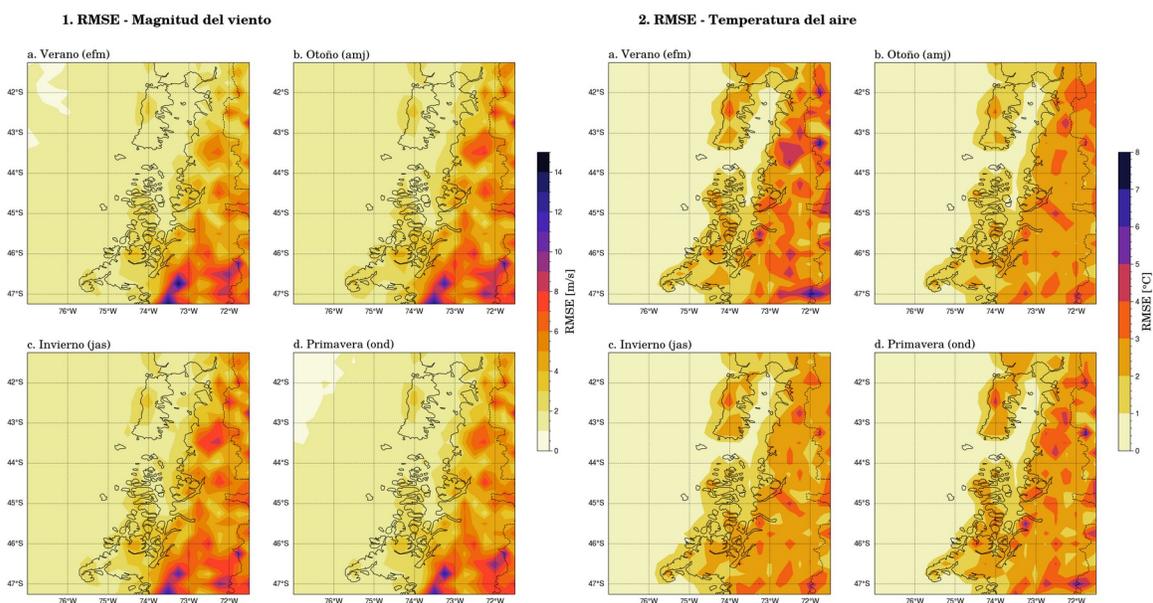


Figura 21: RMSE entre MOSA-WRF y ERA5 para el año 2023. El panel N°1 muestra la magnitud del viento y el N.º 2 la temperatura del aire a 2 metros. Los subplots a, b, c, y d, representan las estaciones del año para verano, otoño, invierno y primavera, respectivamente.

Para el caso de la Magnitud del viento (ver Figura 21-1) se aprecia un comportamiento similar a sus componentes U y V en el mar abierto, presentando un leve desajuste cerca de la costa en invierno, en verano y otoño se observa un menor error entre estos dos productos para los mares interiores con valores que bordean 1 m/s, sin embargo hacia la Cordillera de los Andes los errores aumentan, principalmente en otoño e invierno y a medida que se avanza hacia el sur, con valores bordeando los 13 m/s.

En el caso de la temperatura del aire a 2 metros (Figura 21-2), existe un error mínimo sobre el mar, con valores que bordean 1 °C, sin embargo sobre tierra aumenta esta diferencia entre los modelos, mostrando valores rodeando los 2 °C. Las zonas cordilleranas, especialmente en donde la topografía se hace mas abrupta la diferencia es mayor con valores que pueden llegar hasta los 7 °C en las cimas de las montañas, estos valores tienen a aumentar levemente hacia la época primavera-verano.

5.1.2.2 Evaluación del viento con datos observados:

La evaluación de ERA5 y WRF con datos observados, se centró en la estación meteorológica de Marimeli (Figura 22a) durante el año 2023, acotando el periodo desde cuando esta comenzó a registrar datos (8/2/2023 – 31/12/2023). Se puede apreciar que para la magnitud del viento, MOSA-WRF obtuvo una correlación mayor que ERA5, de 0.6 comparado con 0.48. Para el caso del sesgo, MOSA-WRF sobrestimo las observaciones un promedio de 1.07 m/s en comparación con ERA que obtuvo una subestimación de -0.25 m/s. En el caso de la variabilidad de los datos, MOSA-WRF logró resolver mejor la amplitud de estos, sobrestimando en un 16% a diferencia de ERA5 que subestimó en un 37% la desviación estándar de los datos. Finalmente el RMSE fue un poco menor en ERA5 comparado con MOSA-WRF, cuyos valores corresponden a 1.97 m/s y 2.4 m/s.

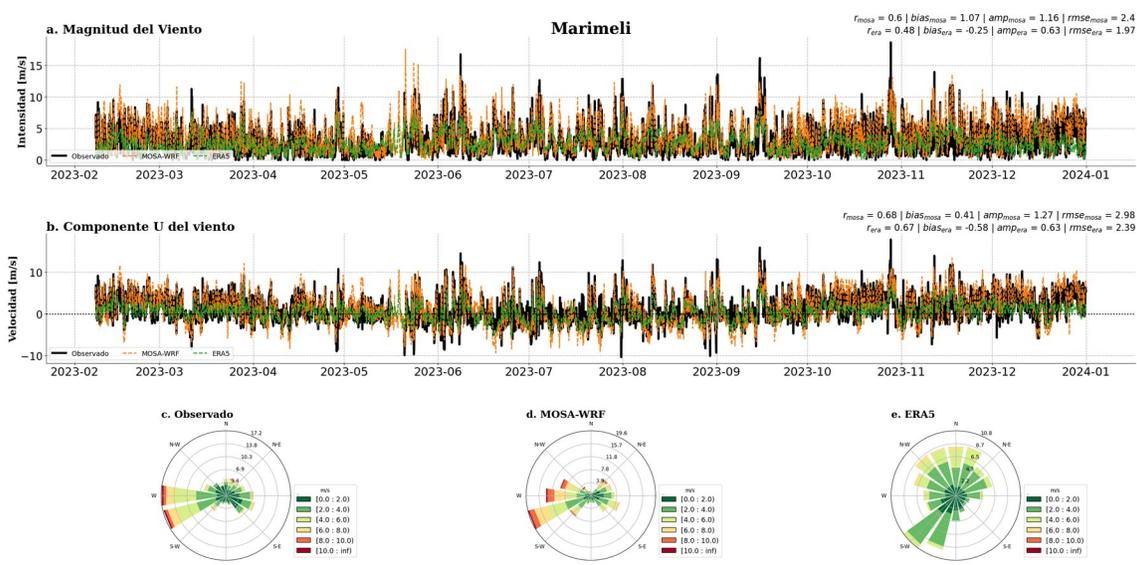


Figura 22: Evaluación del viento en la estación de Marimeli entre el 8/2/2023 y 31/12/2023. Panel a. corresponde a la magnitud y panel b. a la componente U del viento. Las líneas negras corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5. Los paneles inferiores muestran las rosas de viento correspondiente observado (c), MOSA-WRF (d.) y ERA5 (e).

Para la componente U del viento (Figura 22b), MOSA-WRF mostró una correlación levemente mayor que ERA5; 0.68 y 0.67 respectivamente. En este caso MOSA-WRF sobrestimó el promedio de los datos en 0.41 m/s a diferencia de ERA5 que subestimó este parámetro en -5.8 m/s. La amplitud de la variación de la

componente zonal fue sobrestimada en un 27% por MOSA-WRF a diferencia de ERA5 que subestimó esta métrica en un 37%. Finalmente el RMSE fue similar en que para la magnitud del viento, con un valor mayor para MOSA-WRF con respecto a ERA5, 2.98 m/s y 2.39 m/s respectivamente.

En términos de la dirección del viento, se observa que en Marimeli predominan los vientos del Oeste y Oeste-suroeste con un porcentaje de ocurrencia cercano al 34% y valores por sobre los 10 m/s, además se observa una segunda componente entre el Este y Este-sureste con un 15% de ocurrencia que escasamente alcanzan los 10 m/s (Figura 22c). En relación a MOSA-WRF, este producto logra reproducir el principal componente del viento desde el Oeste y Oeste-suroeste con un 33% de ocurrencia aproximadamente y valores por sobre los 10 m/s, al igual que el segundo componente predominante desde el Este (Figura 22d). ERA5 por su parte no resuelve correctamente la dirección del viento, entregando direcciones predominantes desde entre el Noroeste y Noreste en donde se registran la máxima ocurrencia de valores que alcanzan los 8 m/s, por debajo de los valores máximos de las observaciones, y el segundo componente con menor magnitud y porcentaje de ocurrencia entre el Suroeste y Sur-oestesur (Figura 22e).

Para hacer un acercamiento a la predicción de los eventos extremos, en términos de magnitud del viento, se decidió definir un umbral aleatorio para evaluar como se comportaron ambos productos en eventos en donde la magnitud del viento horaria haya superado este umbral. Para obtener este valor se definió el percentil 99 de los datos observados. La distribución estadísticas de esta variable para el periodo de estudio, muestra un comportamiento asimétrico, con las mayor parte de los datos desplazados hacia vientos más débiles entre 0 y 3 m/s (Figura 23) y luego un segundo modo con vientos entre 4 y 6 m/s. Finalmente los vientos mayores a 9.9 m/s presentan la frecuencia más baja correspondiente al percentil 99 (<1%).

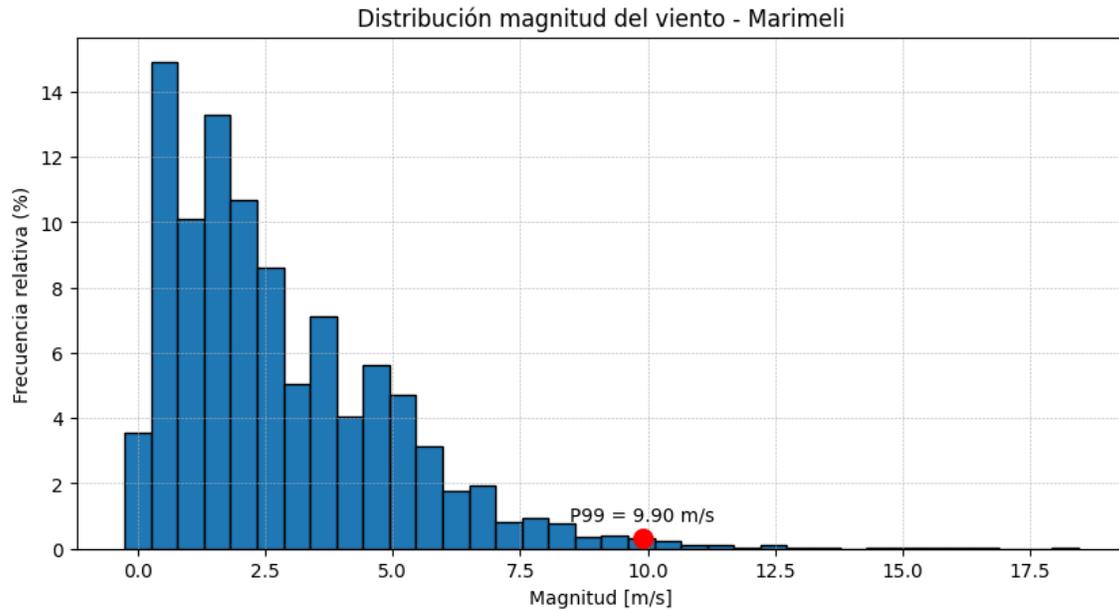


Figura 23: Distribuci3n estadística para los datos de magnitud del viento para la estaci3n de Marimeli y percentil 99.

Dado este umbral se identificaron todos los valores por sobre este numero y la fecha asociada a estos eventos. Se seleccionaron los dos registros mayores, los que correspondieron al 28 de octubre y 8 de junio de 2023, con valores de 18.7 y 16.8 m/s respectivamente, por lo tanto se definieron dos ventanas de tiempo para evaluar, tanto para Marimeli como en Cucao. El primer evento se defini3 entre el 28 – 31 de octubre y el segundo evento entre el 7 – 10 de junio.

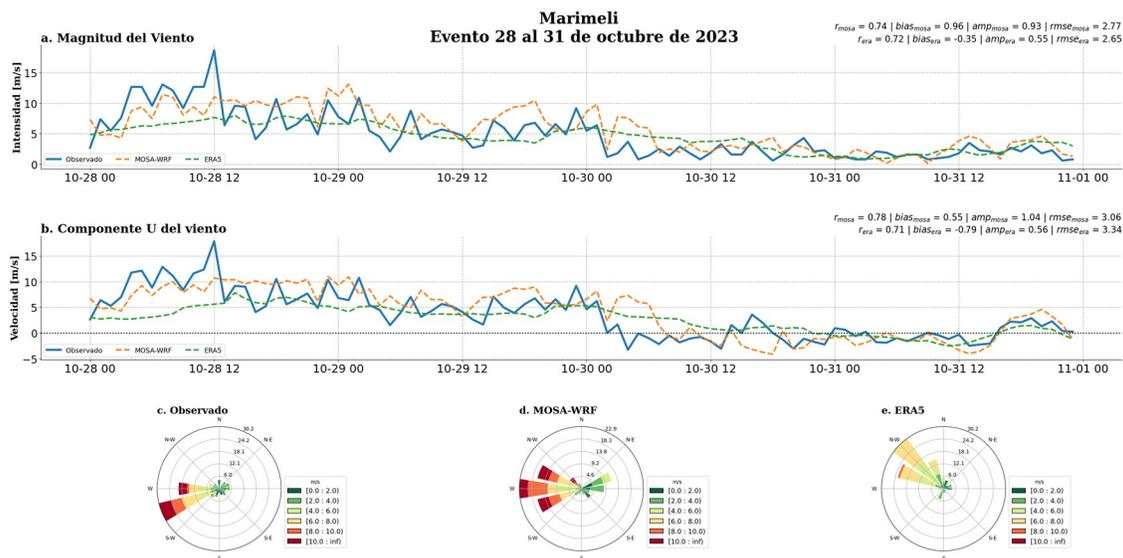


Figura 24: Evaluación del viento en la estación de Marimeli entre el 28/10/2023 y 31/10/2023. Panel a. corresponde a la magnitud y panel b. a la componente U del viento. Las líneas azules corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5. Los paneles inferiores muestran las rosas de viento correspondiente observado (c), MOSA-WRF (d.) y ERA5 (e).

Para el caso del primer evento seleccionado, en Marimeli la magnitud del viento tuvo un mejor ajuste en términos de su correlación para MOSA-WRF con un valor de 0.74, mientras que la validación con ERA5 alcanzó 0.72 (Figura 24a). El promedio de los datos fue sobrestimado por MOSA-WRF en 0.96 m/s, en tanto ERA5 subestimo el promedio de los datos en -0.35 m/s. Por el lado de la amplitud de la variación de los datos, MOSA-WRF, se acercó bastante a la realidad con una subestimación del 7%, llegando a un valor muy cercano a 1, a diferencia de ERA5 cuyo valor alcanzó 0.55, subestimando en un 45% la desviación estándar de las observaciones. Finalmente el RMSE fue levemente mayor para MOSA-WRF que para ERA5 con valores de 2.77 y 2.65 m/s respectivamente.

La componente U obtuvo un valores de correlación más alto para MOSA-WRF que para ERA5, obteniendo 0.78 y 0.71 respectivamente (Figura 24a). El sesgo obtenido por MOSA-WRF fue de 0.55 m/s a diferencia de ERA5, el cual mostró una subestimación del promedio de -0.79 m/s. Por el lado del error de amplitud, MOSA-WRF obtuvo un valor muy cercano a 1 en comparación con ERA5 el cual subestimo la variación de los datos en un 44%. Finalmente el RMSE fue levemente menor en MOSA-WRF con valores de 3.06 y 3.34 m/s.

La dirección del viento en la estación se puede apreciar principalmente entre el Oeste-suroeste y Oeste, con vientos que superaron continuamente los 10 m/s, con aproximadamente un 12% de ocurrencia y con mucha menor ocurrencia vientos más débiles provenientes desde el este. El modelo MOSA-WRF logró reproducir esta fuerte componente con origen en el oeste con vientos por sobre los 10 m/s en aproximadamente el 12% del tiempo, dejando en segundo plano los vientos de menos intensidad provenientes del este. Por su parte, ERA5 entregó una componente principal del viento desde la dirección Noroeste con valores mucho menos intensos, alcanzando los 8 m/s en la mayor cantidad del tiempo.

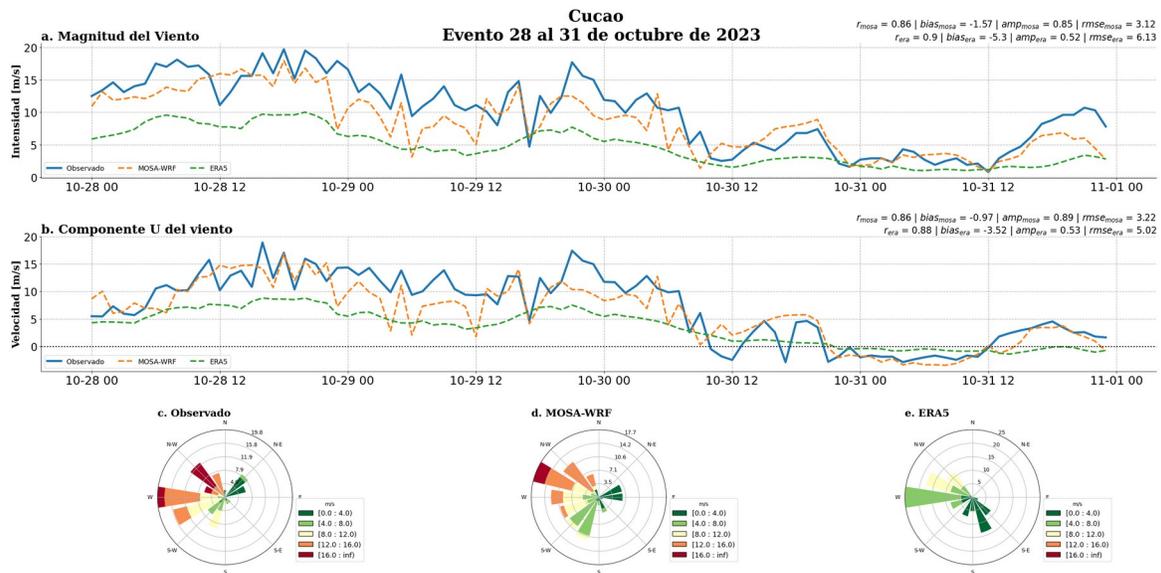


Figura 25: Evaluación del viento en la estación de Cucao entre el 28/10/2023 y 31/10/2023, para la magnitud (a) y la componente U del viento (b). Las líneas azules corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5. Los paneles inferiores muestran las rosas de viento correspondiente observado (c), MOSA-WRF (d.) y ERA5 (e).

Comparando este mismo evento en la estación de Cucao se puede apreciar que la magnitud del viento mostró correlaciones altas en los dos modelos, obteniendo un valor mayor ERA5 en comparación con MOSA-WRF cuyos valores fueron 0.9 y 0.86 respectivamente (Figura 25a). El sesgo estimado para MOSA-WRF fue de -1.57 y -5.3 m/s para ERA5. Las amplitud de los datos se acercó más en el modelo MOSA con un valor de 0.85 a diferencia de 0.52 que se observó en

ERA5, para finalmente obtener un RMSE menor en MOSA-WRF en comparación con ERA5 con valores de 3.12 y 6.13 m/s, respectivamente.

La componente U del viento obtuvo valores altos de igual modo para ambos modelos, entregando el mayor valor en el caso de ERA5 con 0.88, a diferencia de WRF con un valor de 0.86 (Figura 25b). El sesgo fue menor en MOSA-WRF con un valor de -0.97 m/s en comparación con ERA5 que obtuvo un valor de -3.52 m/s. La amplitud de los datos fue subestimada en un 11% por MOSA-WRF, comparado con ERA5, el cual presentó una subestimación de un 47%. Finalmente el RMSE fue menor en MOSA-WRF que en ERA5, con valores de 3.22 y 5.02 m/s.

La dirección del viento en Cucao mostró el mayor porcentaje de ocurrencia entre el Sur-oesteoeste y Noroeste con valores que superaron los 16 m/s, junto a otra componente mas débil entre el Noreste y el Este con valores que alcanzaron los 8 m/s (Figura 25c). Además en MOSA-WRF la dirección del viento de igual manera que en las observaciones, primó el viento entre el Sur-oesteoeste y Noroeste, con valores que superaron los 10 m/s y una componente más débil proveniente desde el Este y Este-noreste. Para el caso de ERA5 la dirección del viento mostró un fuerte componente desde el Oeste con valores relativamente bajos, alcanzando 8 m/s y con menor frecuencia magnitudes que alcanzan los 12 m/s desde el Noroeste. Una segunda componente con intensidades muy bajas, cercanas a 4 m/s se presentaron desde el Sur-estesur.

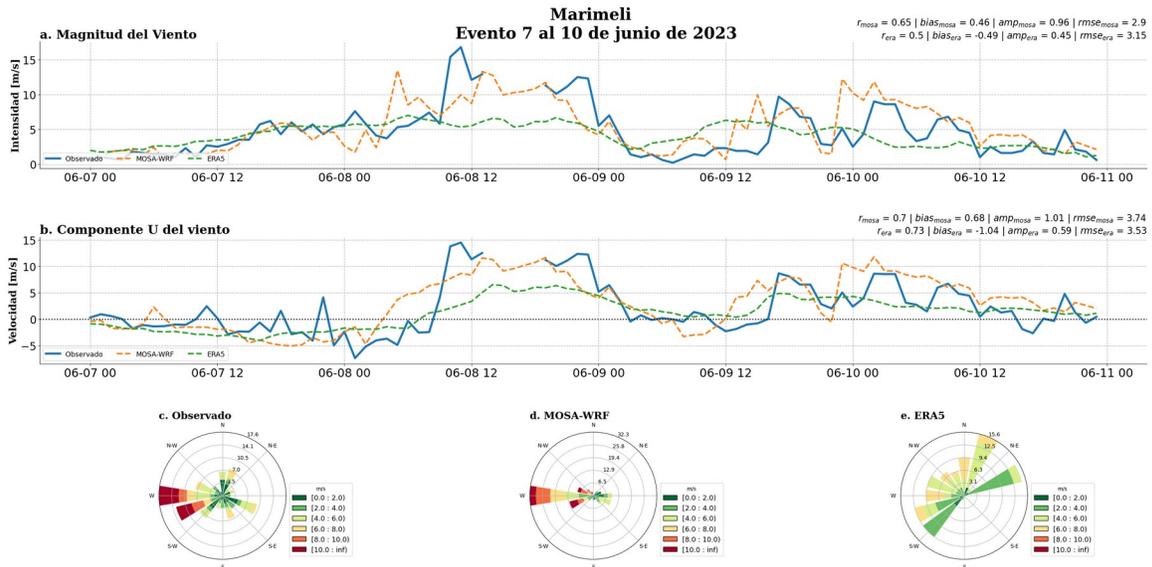


Figura 26: Evaluaci3n del viento en la estaci3n de Marimeli entre el 7/6/2023 y /10/6/2023, para la magnitud (a) y la componente U del viento (b). Las lneas azules corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5. Los paneles inferiores muestran las rosas de viento correspondiente observado (c), MOSA-WRF (d.) y ERA5 (e).

El segundo evento identificado como m1s intenso en Marimeli se defini3 entre el 7 – 10 de junio (Figura 26) en donde el m1ximo fue cercano al medio d1a y se puede apreciar un vac1o en los datos observados posterior a este m1ximo, el cual probablemente est3 asociado a este evento. Sin embargo en d3nde si se registraron datos para la Magnitud del viento se mostr3 una correlaci3n mayor en MOSA-WRF con un valor de 0.65 a diferencia de ERA5 que arroj3 un valor menor de 0.5 (Figura 26a). El promedio de los datos fue sobrestimado en 0.46 m/s, mientras que en ERA5 fue de -0.49 m/s. La amplitud de los valores de MOSA-WRF se acerc3 bastante con un valor de 0.96 comparado con ERA5 que alcanz3 un valor de 0.59. Finalmente el caso del RMSE fue menor en MOSA-WRF que en ERA5 con valores de 2.9 y 3.15 m/s respectivamente.

La componente U obtuvo valores similares para MOSA-WRF y ERA5 en relaci3n a la correlaci3n con valores de 0.7 y 0.73 respectivamente (Figura 26b) . El sesgo fue menor en MOSA-WRF, mostrando un valor de 0.68 m/s a diferencia de -1.04 m/s resuelto por ERA5. La amplitud de los datos fue bien representada por MOSA-WRF con un valor muy cercano a 1 y ERA5 subestim3 este valor en un

41%. El RMSE fue levemente mayor en MOSA-WRF con 3.74 m/s y 3.53 m/s para el caso de ERA5.

La dirección del viento predominante para este evento en la estación de Marimeli entregó vientos predominantes y más intensos desde el Oeste y Oeste-suroeste con magnitudes superiores a 10 m/s (Figura 26c), los cuales fueron reproducidos satisfactoriamente por MOSA-WRF (Figura 26d), con la dirección predominante desde el Oeste y menor ocurrencia desde el Oeste-suroeste en donde se registraron valores por sobre los 10 m/s, a diferencia de ERA5 (Figura 26e) que mostró un eje principal de circulación del viento entre el Noreste y Suroeste y vientos considerablemente menores alcanzando los 8 m/s.

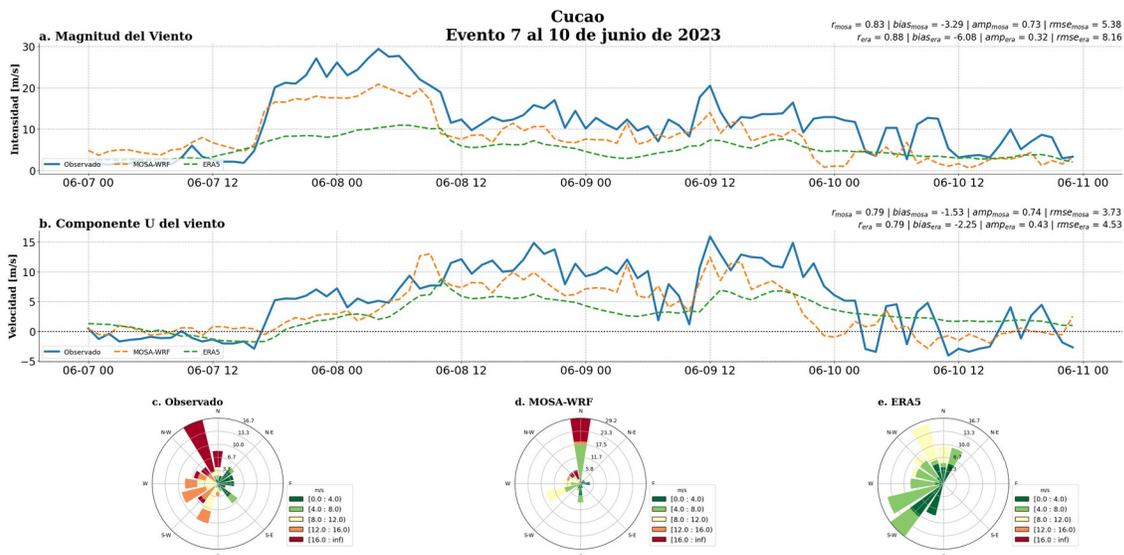


Figura 27: Evaluación del viento en la estación de Cucao entre el 7/6/2023 y /10/6/2023, para la magnitud (a) y la componente U del viento (b). Las líneas azules corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5. Los paneles inferiores muestran las rosas de viento correspondiente observado (c), MOSA-WRF (d.) y ERA5 (e).

Para este segundo evento, en la estación de Cucao se aprecian correlaciones altas en ambos modelos, siendo para el caso de la Magnitud del viento con valores de 0.83 y 0.88 para MOSA-WRF y ERA5 (Figura 27a). El sesgo fue menor en MOSA-WRF con un valor de -3.29 m/s a diferencia de ERA5 que mostró un valor de -6.08 m/s. La amplitud de los datos fue mejor representada, de igual forma por MOSA-WRF, alcanzando un valor de 0.73 y ERA5 de 0.32, finalmente el RMSE fue menor en MOSA-WRF con un valor de 5.38 m/s y 8.16 m/s para ERA5.

La componente zonal del viento arrojó correlaciones similares para ambos modelos con un valor de 0.79, por su parte el bias para MOSA-WRF fue de -1.53 m/s y ERA5 de -2.25 m/s (Figura 27b). La amplitud de los datos fue mejor representada por MOSA-WRF con un valor de 0.74 a diferencia de ERA5 que presentó un valor de 0.43, para finalmente entregar un valor mas pequeño en MOSA-WRF en términos del RMSE a diferencia de ERA5, cuyos valores fueron 3.73 y 4.53 m/s.

Por su parte la dirección del viento registrada en la estación de Cucao (Figura 27c), fue principalmente desde el Nor-oestenorte y del Norte con un mayor porcentaje de ocurrencia de vientos intensos desde esas direcciones, superando los 16 m/s de magnitud. En el caso de MOSA-WRF la principal dirección que se resolvió fueron vientos desde el norte con mayores intensidades seguidos de vientos desde el Norte-noroeste, cuyas intensidades igualmente superaron los 16 m/s (Figura 27d), sin embargo en ERA5 los vientos fueron considerablemente menos intensos, con valores que solo alcanzan los 12 m/s con una dirección Norte-noroeste, mostrando una segunda componente con un porcentaje de ocurrencia importante, pero con intensidades menores desde el Suroeste, las cuales alcanzan los 8 m/s (Figura 27e).

5.1.2.3 Evaluación de la temperatura con datos observados:

La temperatura se evaluó en la estación de Marimeli y Cucao (Figura 3) en donde para Marimeli se obtuvieron correlaciones significativamente altas para ambos modelos, siendo levemente mayor ERA5 que MOSA-WRF con valores de 0.85 y 0.83, a su vez, el promedio de los datos fue subestimado por MOSA-WRF en -0.9 m/s , mientras que la menor calidad la obtuvo ERA5 con un valor de -2.78 m/s (Figura 28). La amplitud de los registros fue mejor representada por MOSA-WRF con un valor de 0.98 en comparación con ERA5 que alcanzo un valor de 0.92. Finalmente MOSA-WRF obtuvo un RMSE menor con valor de 2.11 m/s y ERA5 3.27 m/s.

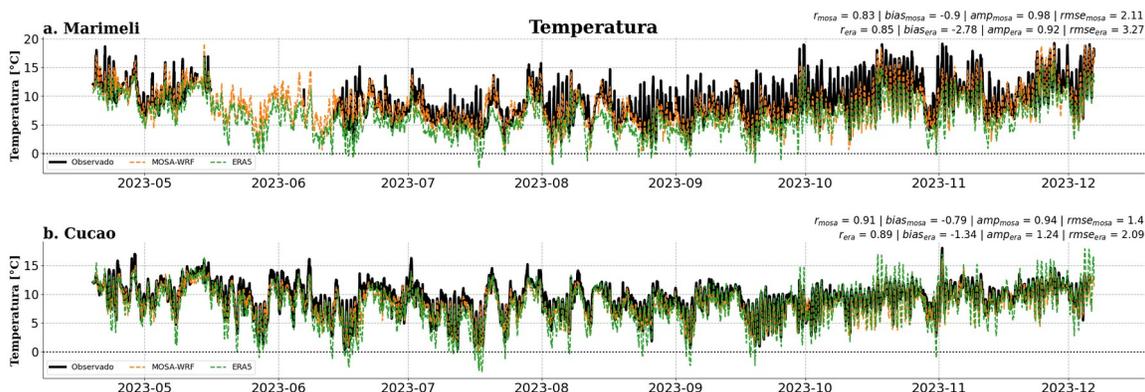


Figura 28: Evaluaci3n de la temperatura entre el 19/4/2023 y 6/12/2023, para la Marimeli (a) y Cucao (b). Las lneas azules corresponden a los datos observados, naranjas a MOSA-WRF y verdes a ERA5.

Para el caso de Cucao (Figura 28b) la correlaci3n fue mayor en MOSA-WRF con un valor de 0.91 a diferencia de ERA5 que presento un valor de 0.89. El sesgo fue menor en MOSA-WRF con una subestimaci3n del promedio de los datos de -0.79 m/s y ERA5 -1.34 m/s. A su vez, la amplitud de la variabilidad de los datos se representa de mejor forma en MOSA-WRF con un valor de 0.94, mientras que en ERA5 se sobrestim3 esta m3trica en un 24%. Finalmente el RMSE fue de 1.4 m/s en MOSA-WRF, mejor que en ERA5 que obtuvo un valor de 2.09 m/s.

5.2 Resultados objetivo espec3fico 2:

Calibrar y evaluar el modelo MOSA para la regi3n de Magallanes y la Ant3rtica Chilena con observaciones oceanogr3ficas y hist3ricas.

5.2.1 Desempeño operacional

El modelo MOSA-MAG comenz3 a funcionar de manera operacional en el servidor de c3mputos el d3a 7 de julio del 2021, y desde la fecha se ha mantenido relativamente estable hasta la fecha. Si bien el sistema ha funcionado casi con normalidad, han existido ocasiones donde este ha fallado. Estas fallas se han debido a diversos motivos. En un principio, se producen debido a inestabilidades propias del modelo por la compleja topograf3a del dominio, sumada al ingreso extra de volumen de agua a trav3s de caudales de r3os y glaciares presentes en la regi3n. Este volumen extra genera un estr3s sobre el dominio, el cual al intentar

mantener la continuidad del flujo, aumenta el riesgo de provocar errores tipo “blow up”, donde el modelo no puede resolver las ecuaciones de movimiento para esas condiciones y por lo tanto se interrumpe la simulación. Estas fallas, también pueden deberse a problemas con las descargas de datos globales y en algunos casos a problemas de hardware, tales como almacenamiento de datos, memoria del equipo y fallas en los nodos de cálculo.

En la Figura 29 se presenta como ha sido el desempeño operativo del modelo entre enero de 2023 y junio de 2024, donde se han contabilizado 30 días sin pronóstico, alcanzado un 96 y 92 % de efectividad en 2023 y 2024 respectivamente. Las caídas de más de 3 días se debieron principalmente a problemas con las condiciones de bordes, ya sea por inconvenientes con los servidores de MercatorOcean (Marine Copernicus), problemas de actualización del toolbox de Marine Copernicus, problemas con la descarga de GFS, y problemas de red internos del sistema. No obstante, cada problema fue resuelto, lográndose poner de vuelta el pronóstico operativo oportunamente.

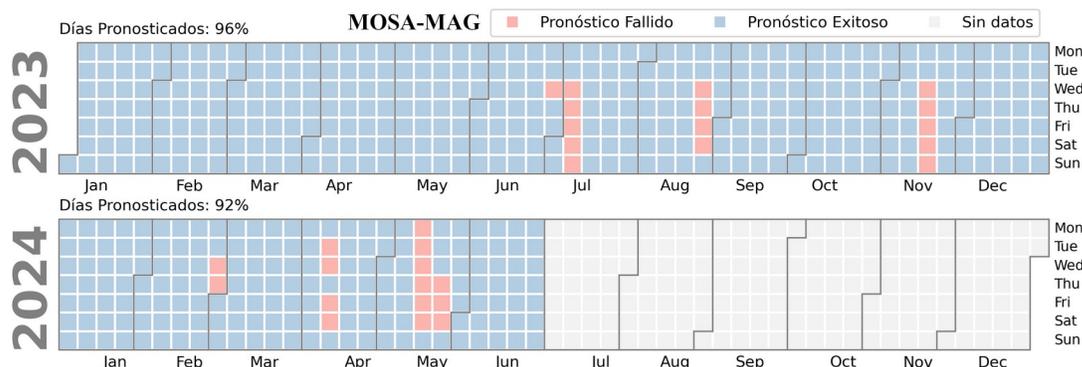


Figura 29: Rendimiento del sistema MOSA-MAG durante el periodo 2023 – 2024.

5.2.2 Evaluación de Temperatura Superficial del Mar (TSM)

A modo de evaluar y tener una aproximación de la calidad de los pronósticos oceanográficos generados, se realizaron dos tipos de evaluaciones de la Temperatura Superficial del Mar (TSM). Por una parte se evaluó la evolución diaria de TSM usando datos satelitales del producto AVHRR, cuyos productos son campos de TSM contruídos a través de técnicas de interpolación óptima basado en observaciones satelitales además de datos insitu disponibles desde boyas, anclajes, cruceros, etc. Mientras que por otra parte para conocer la distribución espacial del error, se contrastaron promedios mensuales de TSM entre MOSA-

MAG y datos satelitales de VIIRS. Para el primer caso, se construyeron promedios diarios de TSM de MOSA-MAG entre enero de 2022 y junio de 2024. Estos promedios, luego fueron promediados espacialmente considerando todo el dominio de estudio, dejando fuera datos escapados, para así obtener una serie de tiempo promedio (Figura 30).

A lo largo del periodo analizado, ambas series de TSM muestran una tendencia similar en la variabilidad estacional, lo que indica que MOSA-MAG es consistente con la estacionalidad reflejada en los datos satelitales. Sin embargo, se observan discrepancias notables, especialmente durante los máximos estacionales, donde MOSA-MAG exhibe una TSM consistentemente más baja que la de los datos AVHRR, siendo esto más evidente en los meses más cálidos. Aunque ambas series muestran la misma tendencia durante los periodos de baja temperatura, el modelo sigue subestimando la magnitud de la TSM en comparación con AVHRR. Estadísticamente, el coeficiente de correlación de 0.90 indica una fuerte correlación entre ambas series temporales, lo que sugiere que el modelo reproduce bien la forma general de la serie temporal observada. Sin embargo, un RMSE de 2.70 refleja una discrepancia significativa de la TSM pronosticada frente a las observadas, mientras que el sesgo de 2.60 sugiere que el MOSA-MAG tiende a subestimar sistemáticamente la TSM en comparación con los datos satelitales. En resumen, aunque MOSA-MAG es capaz de capturar las tendencias generales y la variabilidad estacional de la TSM en comparación con los datos AVHRR, tiende a subestimar las temperaturas a lo largo de todo el periodo, lo que sugiere que podrían ser necesarios ajustes en el modelo para mejorar la precisión en la predicción de la TSM. El área sombreada presenta la desviación estándar de ambas figuras, donde se destaca una mayor dispersión de datos lo cual en parte es atribuido a que tiene mas datos producto de su mayor resolución.

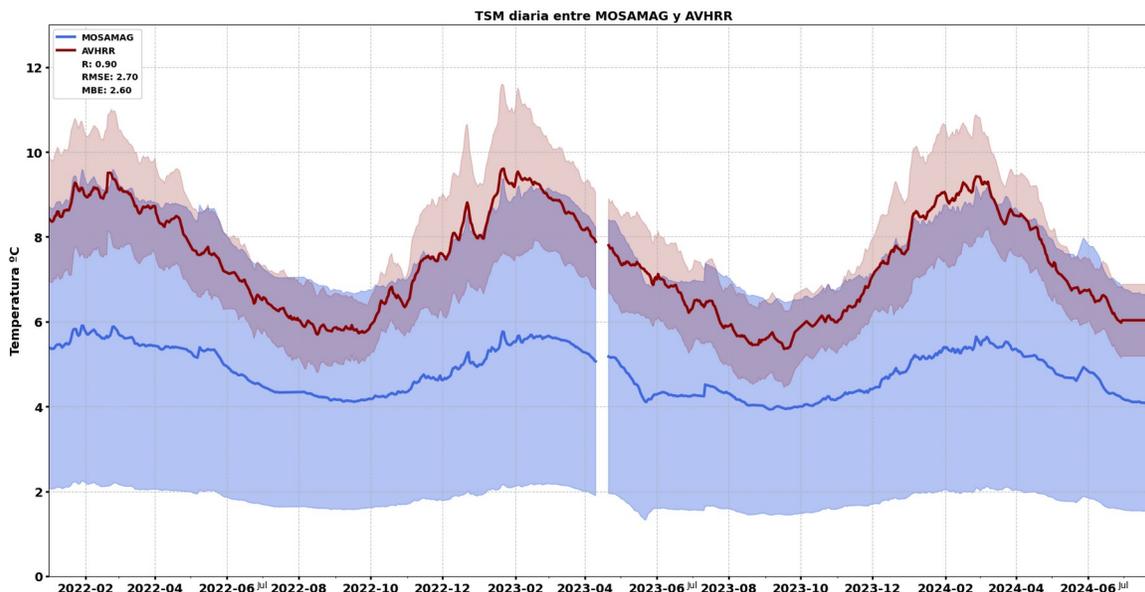


Figura 30: Promedio diario de TSM pronosticada por MOSA-MAG y producto satelital AVHRR, entre enero de 2022 y junio de 2024.

La Figura 31 muestra el espectro de densidad calculado a partir de datos diarios de TSM para MOSA-MAG y AVHRR, utilizando el método de Welch, P. (1967), el cual distribuye la varianza a través de segmentos discretizados, en nuestro caso fue de 160 días y 12 grados de libertad sobre un periodo total de 960 días. En el espectro, se observa que ambas series temporales (MOSA-MAG en morado y AVHRR en verde) muestran patrones similares en términos de distribución de la energía a través de las frecuencias. Las mayores densidades espectrales se encuentran en las frecuencias más bajas (períodos más largos), lo cual es consistente con la dominancia de las variaciones estacionales y las señales de baja frecuencia. La confianza al 95% se muestra en la gráfica, indicando la robustez de las estimaciones espectrales. A medida que aumenta la frecuencia, la densidad espectral disminuye de manera similar para ambas series, lo que sugiere que tanto el modelo como las observaciones satelitales capturan de manera coherente las variaciones de alta frecuencia entre 5 y 30 días, aunque con menor energía en el modelo. La consistencia en las curvas a lo largo de casi todo el rango de frecuencias indica que MOSA-MAG reproduce con precisión las variaciones de la TSM observadas en AVHRR en diferentes escalas temporales. Sin embargo, la pequeña discrepancia en ciertas frecuencias sugiere que podría haber diferencias menores en cómo el modelo y las observaciones capturan las variaciones de frecuencia intermedia.

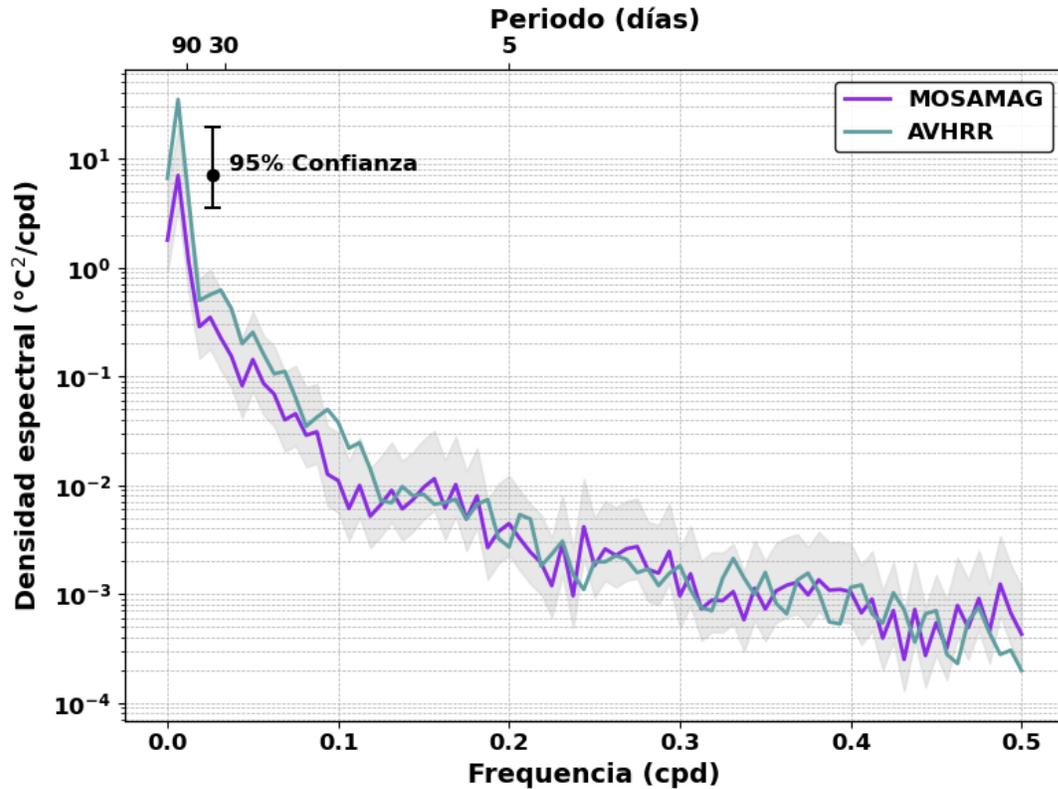


Figura 31: Densidad espectral de datos horarios de TSM de MOSAMAG y de AVHRR. Los espectros se construyeron con 12 grados de libertad y un solapamiento del 20%.

Para conocer la distribuci3n espacial del error se usaron promedios mensuales de TSM obtenidos de datos satelitales VIIRS, los cuales fueron contrastados con promedios mensuales de TSM de MOSA-MAG a trav3s del c3lculo del coeficiente de Pearson (R), la ra3z del error cuadr3tico medio (RMSE) y el Error de Sesgo medio (MBE). Con el objeto de conocer la distribuci3n espacial de los estad3sticos, se interpol3 la grilla de MOSA-MAG a la resoluci3n de VIIRS y luego se calcularon promedios pixel por pixel durante 30 meses.

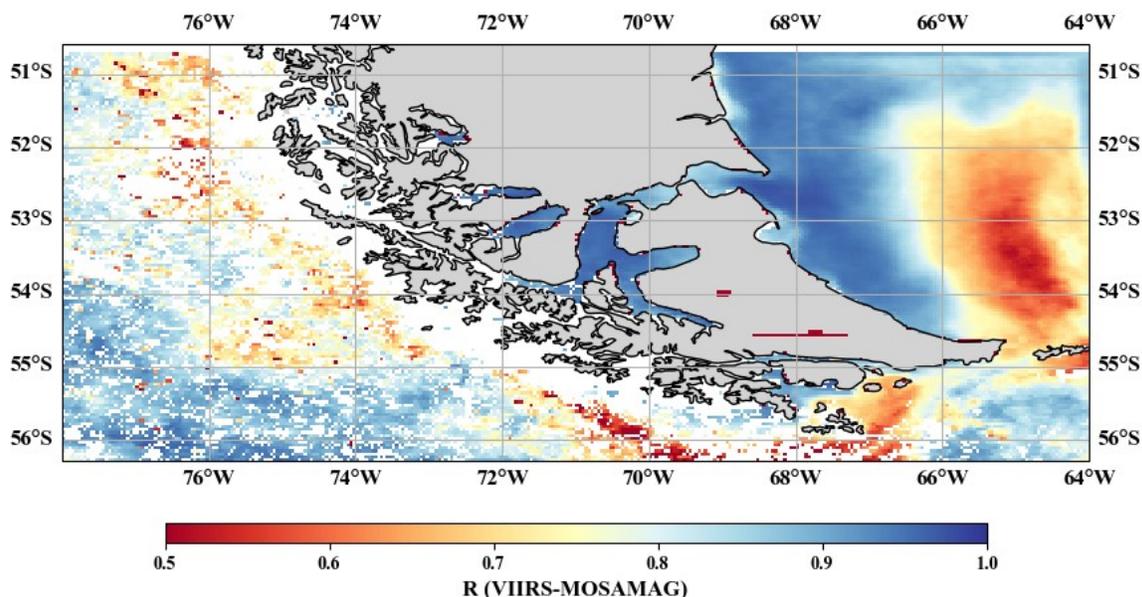


Figura 32: Distribución espacial del Coeficiente de relación de Pearson (R) entre datos mensuales de VIIRS y MOSAMAG.

El coeficiente R presentado en la Figura 32 revela una correlación alta ($R > 0.8$) en la mayoría de la región, especialmente en las áreas al este de la isla de Tierra del Fuego, donde los valores de R se acercan a 1.0, lo que indica que el modelo MOSA-MAG reproduce satisfactoriamente la variabilidad de la TSM observada por VIIRS en esta zona. Sin embargo, en las áreas occidentales y suroccidentales, hacia el océano Pacífico, los valores de R disminuyen, con correlaciones en el rango de 0.5 a 0.7, sugiriendo que el modelo tiene dificultades para capturar con precisión la TSM en estas regiones. Esta diferencia en la correlación podría estar asociada a limitaciones de los datos satelitales debido a la nubosidad, además de la presencia de áreas más dinámicas de la costa del Pacífico. La variabilidad de la correlación también podría reflejar desafíos en la modelización de la dinámica de las corrientes oceánicas y las interacciones tierra-mar, que son particularmente complejas en esta región. Mientras que MOSA-MAG muestra una excelente concordancia con los datos de VIIRS en áreas específicas, existen zonas donde la correlación es más baja, indicando áreas potenciales para mejorar la precisión del modelo.

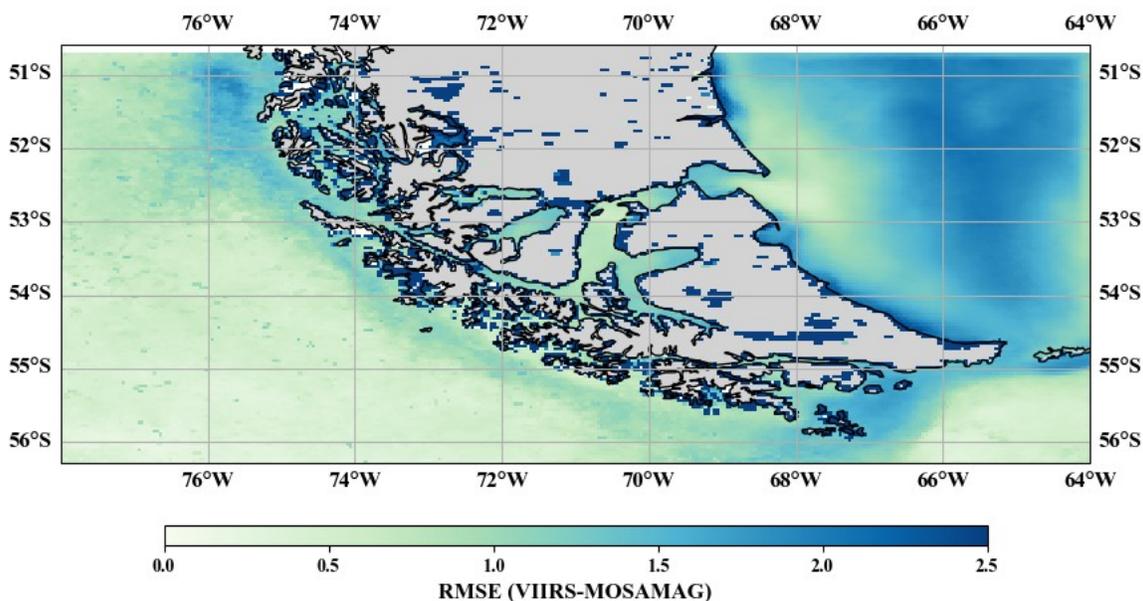


Figura 33: Distribuci3n espacial de la raiz del Error cuadrático medio (RMSE) entre datos mensuales de VIIRS y MOSAMAG.

El mapa de RMSE presentado en la Figura 33, muestra que el error cuadrático medio entre las TSM de MOSA-MAG y las observaciones de VIIRS es generalmente bajo, con valores que oscilan entre 0 y 2.5 °C. Las mayores discrepancias se observan en áreas costeras y en el océano abierto al este de la regi3n, donde el RMSE alcanza valores cercanos a 2.5 °C. Este patr3n sugiere que MOSA-MAG tiene dificultades para capturar con precisi3n la variabilidad de la TSM en esta zona.

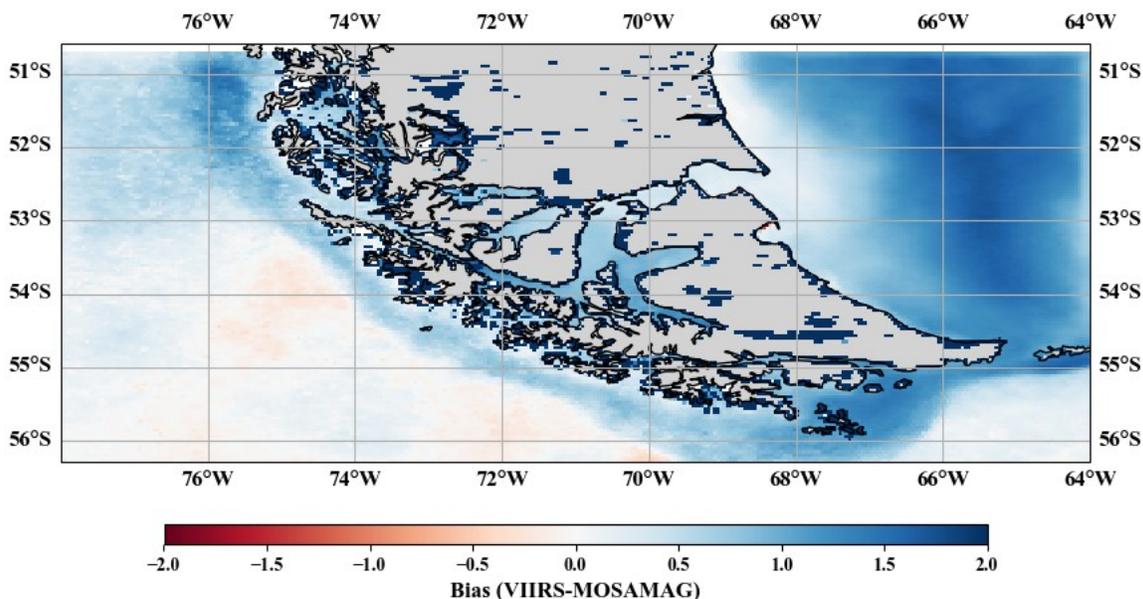


Figura 34: Distribuci3n espacial del sesgo medio (BIAS) entre datos mensuales de VIIRS y MOSAMAG.

Por su parte, la distribuci3n espacial del sesgo, ilustrado en la Figura 34, muestra la diferencia sistemática entre las TSM de MOSA-MAG y las observadas por VIIRS. En general, el sesgo es mayormente negativo en la regi3n costera y positiva en el oc3ano abierto, lo que indica que MOSA-MAG tiende a subestimar la TSM en las zonas costeras y a sobre estimarla en el oc3ano. Los valores de sesgo oscilan entre $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $2\text{ }^{\circ}\text{C}$, con un sesgo positivo m1s pronunciado al este de la regi3n y un sesgo negativo en algunas 1reas costeras y de mares interiores, predominando un sesgo de 2°C (en nuestro caso indica que el modelo es mas frio en las zonas de mares interiores del dominio).

Los mapas de RMSE y sesgo revelan que, aunque MOSA-MAG reproduce en general la variabilidad espacial de la TSM, existen discrepancias importantes en 1reas espec1ficas. La subestimaci3n en las zonas interiores y la sobrestimaci3n en la zona oce1nica sugieren que el modelo podr1a beneficiarse de ajustes o mejoras en la resoluci3n y en la parametrizaci3n de procesos f1sicos que afectan la TSM en estas regiones.



Finalmente, para visualizar la evolución temporal de estos estadísticos, en la Figura 35 muestra las series mensuales de los tres estadísticos: el coeficiente de correlación de Pearson (R), el error cuadrático medio (RMSE), y el error medio sesgado (MBE) entre las temperaturas superficiales del mar (TSM) obtenidas de MOSA-MAG y las observadas por el satélite VIIRS para el periodo comprendido entre enero de 2023 y junio de 2024. En ella podemos observar como el coeficiente de correlación varía a lo largo del tiempo, alcanzando su valor máximo durante los meses de verano (enero-febrero de 2024), con valores cercanos a 0.7. Esto sugiere que el modelo MOSA-MAG reproduce mejor las variaciones observadas por VIIRS durante estos meses. Sin embargo, en los meses de invierno y primavera (junio-octubre de 2023), el coeficiente de correlación disminuye, llegando a valores tan bajos como 0.3, lo que indica una menor concordancia entre el modelo y las observaciones en ese periodo.

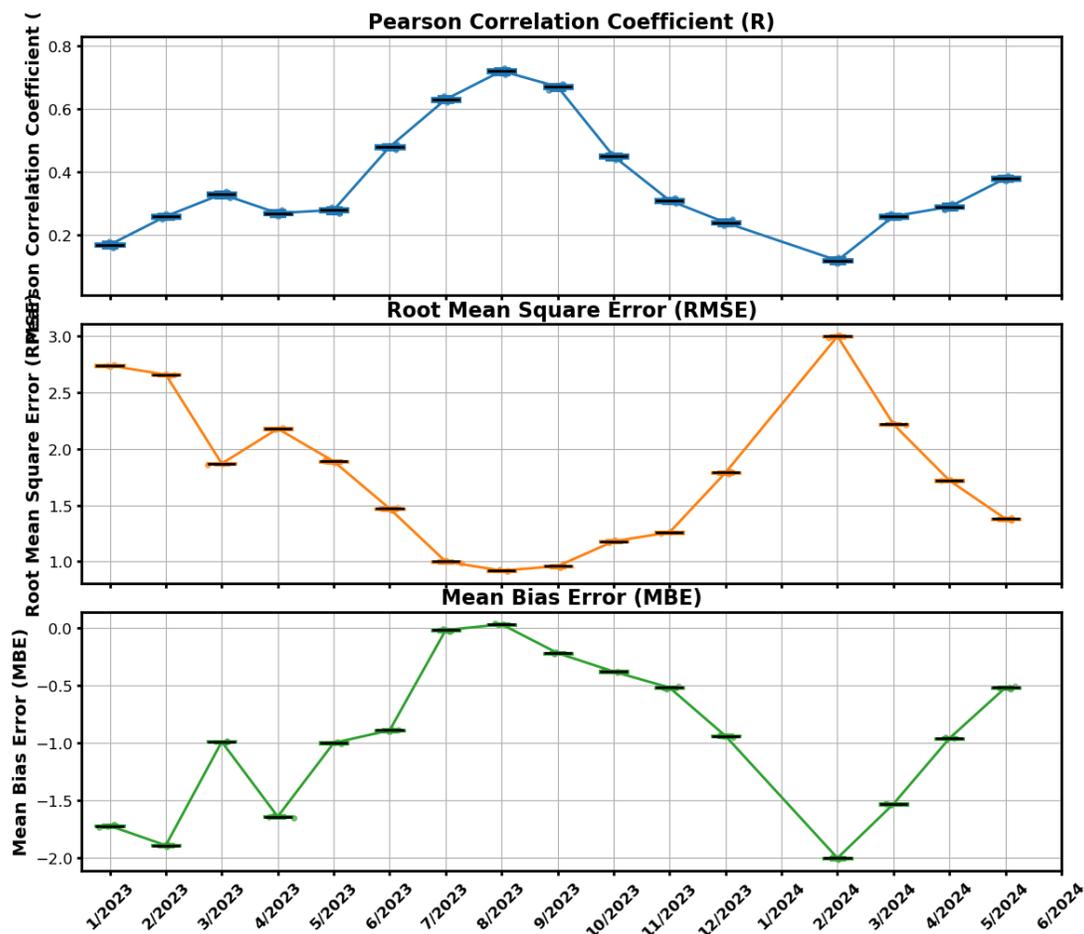


Figura 35: a) Correlaci3n, b) Raíz del error cuadrático medio y c) BIAS mensual entre la temperatura pronosticada por el modelo operacional MOSA-MAG y el producto satelital VIIRS.

Por su parte el RMSE es más alto en los primeros meses de 2023, con valores superiores a 2.5 °C, mientras disminuye a lo largo del ańo hasta alcanzar un mńimo alrededor de julio de 2023, con valores cercanos a 1.0 °C. Posteriormente, el RMSE aumenta nuevamente a principios de 2024, alcanzando un pico en enero, lo que indica mayores discrepancias entre el modelo y las observaciones durante ese periodo. Por su parte el sesgo medio muestra una tendencia a subestimar la TSM en los primeros meses de 2023 (MBE negativo), y luego a sobre estimarla en los meses de invierno y primavera (MBE positivo), especialmente en julio de 2023 y enero de 2024. En febrero de 2024, se observa un sesgo negativo más pronunciado, lo que indica una tendencia del modelo a subestimar las temperaturas en ese periodo.

Las series mensuales muestran gran variabilidad en la capacidad del modelo MOSA-MAG para replicar las condiciones de TSM observadas por VIIRS. Los resultados sugieren que la precisión del modelo varía según la estación, con mejor rendimiento en los meses de verano, mientras que en invierno y primavera, se observan mayores errores y variabilidad en el sesgo.

5.2.3 Campo de Masa, Temperatura y Salinidad.

Para evaluar la variabilidad estacional del campo de masa en la columna de agua se utilizaron las estaciones de muestreo de CTD realizadas en el marco del Programa de Monitoreo de Marea Roja “Fiordos” perteneciente a IFOP. Estas estaciones están ubicadas generalmente en aguas someras y áreas costeras, lo que a veces puede resultar en datos que no son completamente representativos o precisos para ser comparados directamente con los modelos oceánicos, especialmente considerando que MOSA-MAG tiene una resolución espacial de 1.5 km. Sin embargo, a pesar de estas limitaciones, los datos de CTD son extremadamente útiles para evaluar y validar los pronósticos del modelo, debido a que estos muestreos se realizan casi mensualmente, proporcionando una valiosa base de datos temporal. Para analizar estos datos, se agruparon las estaciones en tres regiones geográficas: norte, centro y sur, como se muestra en la Figura 36. Cada una de estas regiones se caracteriza por diferentes condiciones oceanográficas y climáticas, lo que permite realizar un análisis más detallado y específico de las variaciones estacionales en cada zona. Con los datos de CTD recopilados, se construyeron diagramas T-S (Temperatura-Salinidad) estacionales para cada una de estas regiones.

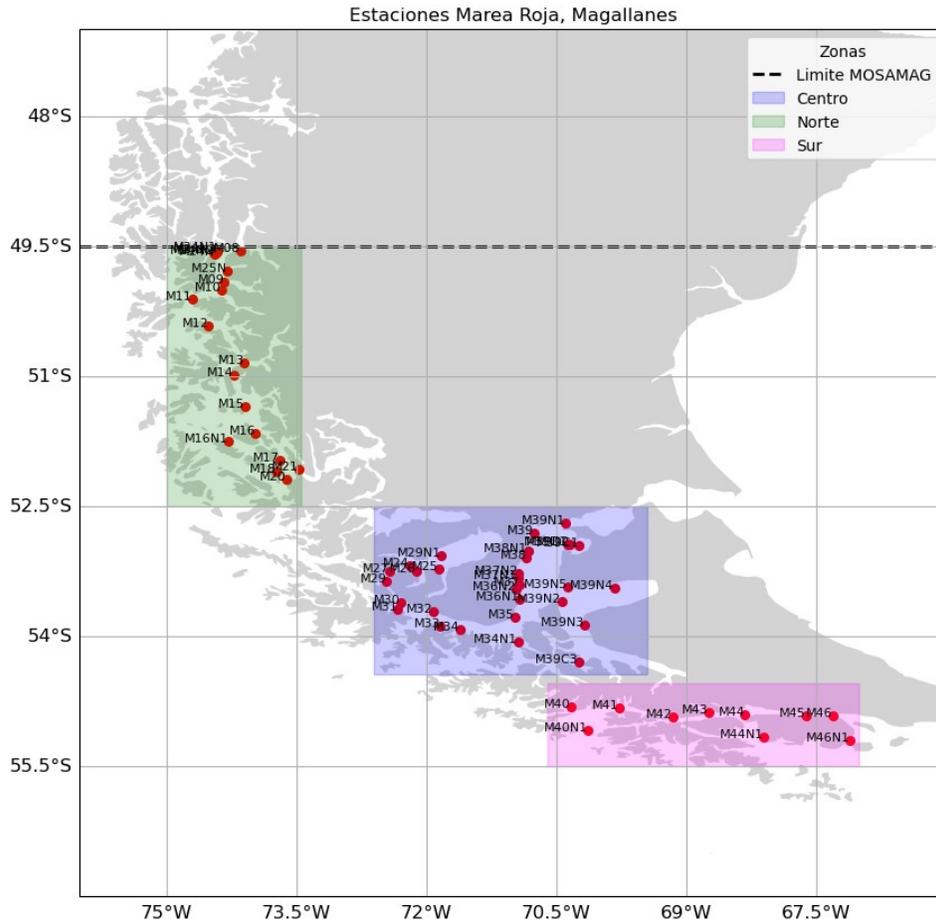


Figura 36: Mapa con las estaciones del muestreo del programa de Marea Roja, Fiordos de la división de Acuicultura, IFOP. Se divide en 3 las zonas (norte, centro y sur) para focalizar el análisis.

5.2.3.1 Zona Norte

De acuerdo a la Figura 37 en invierno los datos de CTD muestran una tendencia hacia aguas más frías y salinas en comparación con los datos de MOSA-MAG, que tienden a representar aguas ligeramente más cálidas y con menor salinidad. Por su parte en primavera las diferencias entre el modelo y los datos observados parecen disminuir, aunque MOSA-MAG sigue presentando una mayor dispersión en los valores de temperatura y salinidad. Las observaciones de CTD indican una estructura de agua más bien homogénea en términos de salinidad, mientras que el modelo muestra una mayor variabilidad. En verano, se

observa que MOSA-MAG tiende a subestimar la salinidad en comparación con las observaciones de CTD, especialmente en las capas superficiales. Sin embargo, la temperatura predicha por el modelo está más en línea con las observaciones, aunque sigue existiendo una discrepancia notable en términos de salinidad. Finalmente durante el otoño, las diferencias entre las temperaturas predichas por el modelo y las observadas se reducen, aunque el modelo sigue subestimando la salinidad, como se observa en otras estaciones. Esta subestimación podría estar relacionada con procesos de mezcla vertical o de intercambio entre las aguas costeras y el océano que no están bien representados en el modelo.

Norte

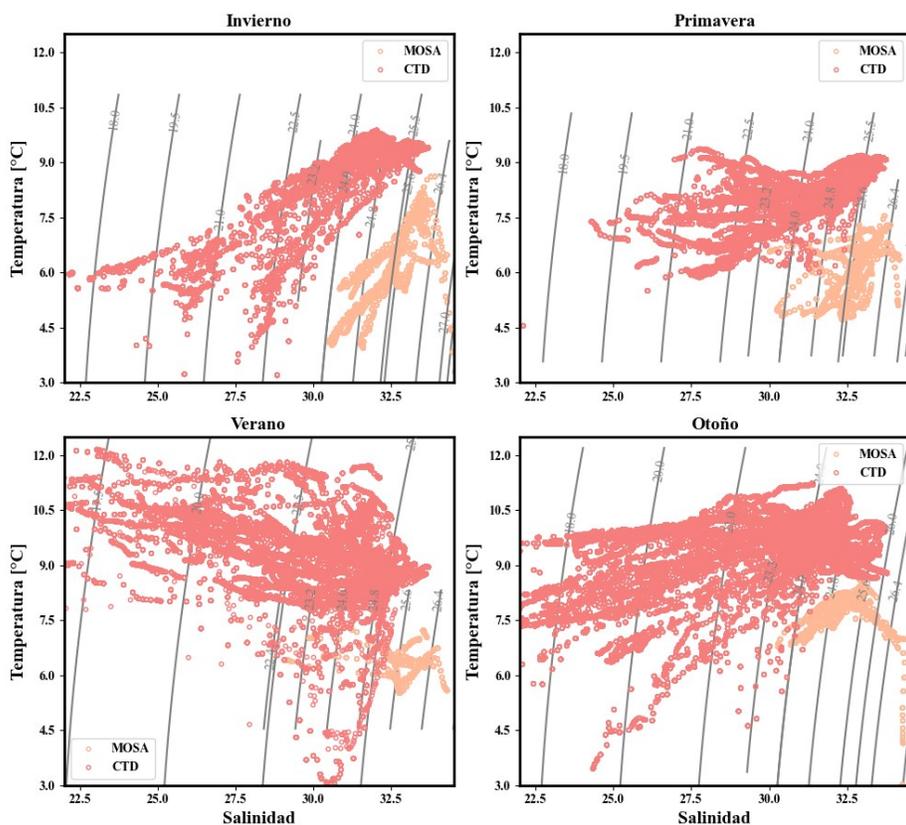


Figura 37: Diagrama T-S estacionales entre datos de MOSA-MAG y datos de CTD del programa de Marea Roja, fiordos, zona norte.

5.2.3.2 Zona Centro

Para el caso de la zona centro, los diagramas TS se presentan en la Figura 38. En ella podemos observar que durante invierno, los datos de MOSA-MAG tienden a mostrar temperaturas y salinidades más altas en comparación con las observaciones de CTD. Las diferencias en la salinidad son particularmente notables, con el modelo mostrando una mayor dispersión en las salinidades más altas, mientras que los datos de CTD indican una estructura de agua más homogénea y ligeramente menos salina. Mientras que en primavera, MOSA-MAG sigue mostrando una tendencia a sobrestimar tanto la temperatura como la salinidad en comparación con los datos de CTD. Sin embargo, la dispersión de los datos de MOSA es menor que en invierno, lo que sugiere una mejor concordancia en esta estación, aunque persisten las diferencias en la estructura de la columna de agua. En verano se observa una mayor discrepancia entre el modelo y los datos observados. Acá MOSA-MAG tiende a sobrestimar la temperatura y, en menor medida, la salinidad en las capas superficiales. Esto refleja una dificultad sistemática del modelo para representar adecuadamente la estratificación y salina que ocurre en esta región durante el verano.

comparación con los resultados de MOSA-MAG, que tiende a mostrar aguas más cálidas y salinas. Esto sugiere una subestimación del modelo en la captura de las condiciones frías y frescas típicas de la región durante esta estación. Mientras que en primavera, las diferencias se reducen ligeramente, pero el modelo sigue mostrando una tendencia a sobrestimar tanto la temperatura como la salinidad, especialmente en las capas superficiales. Los datos de CTD muestran una estructura de agua más homogénea y con menor salinidad que la predicha por el modelo. No obstante, durante verano, MOSA-MAG presenta una mayor dispersión en los valores de salinidad, especialmente en las salinidades más bajas, y una tendencia a sobrestimar la temperatura en comparación con los datos de CTD. Esta estación muestra las discrepancias más notables. En otoño las diferencias entre el modelo y las observaciones de CTD son más evidentes en la salinidad, donde el modelo sigue mostrando una mayor variabilidad y sobre estimación en comparación con las observaciones. Sin embargo, la temperatura parece estar mejor representada en esta estación en comparación con las otras.

Sur

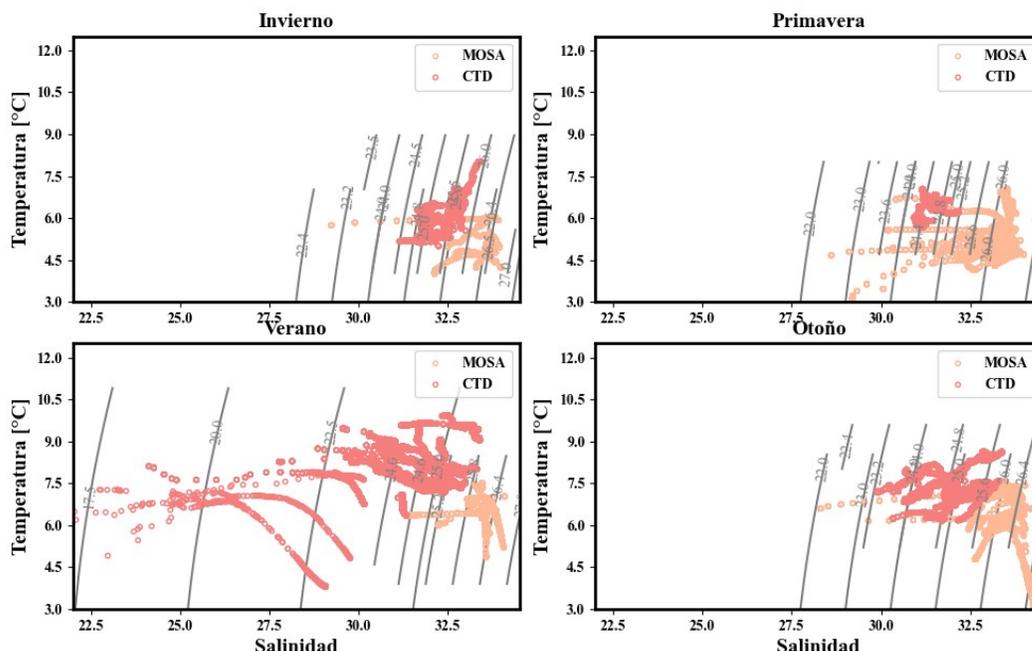


Figura 39: Diagrama T-S estacionales entre datos de MOSA-MAG y datos de CTD del programa de Marea Roja, fiordos, zona sur.

En las tres zonas analizadas (Norte, Centro y Sur), los diagramas TS revelan que MOSA-MAG tiende a sobrestimar tanto la temperatura como la salinidad en comparación con los datos de CTD, especialmente durante las estaciones de invierno y verano. En la zona Norte, se observan discrepancias significativas en la salinidad, con el modelo mostrando mayor variabilidad que las observaciones. En la zona Centro, el modelo también sobreestima la salinidad y la temperatura, aunque las diferencias son menos pronunciadas que en el Norte. Por último, en la zona Sur, las mayores discrepancias ocurren durante el verano, donde el modelo subestima la influencia de procesos de mezcla y afluencia de agua dulce, lo que resulta en una sobrestimación de la salinidad. Estos patrones indican que, aunque MOSA-MAG captura algunas tendencias generales, se requieren ajustes para mejorar la precisión de las predicciones.

5.2.4 Nueva malla.

En esta etapa se ha trabajado en una nueva grilla de MOSA-MAG con cambios tanto en la máscara (definición de áreas de agua y tierra) como en la batimetría. Esta nueva grilla, denominada Magc20, se presenta en la Figura 40. Este nuevo dominio conserva los mismos bordes que el anterior, pero corrige varias imprecisiones en la batimetría, especialmente en las zonas del canal Beagle y sus alrededores, el canal Cockburn, el golfo Almirante Montt y el seno Ottway. Además, se realizaron cambios en la máscara para representar de forma más adecuada los fiordos en torno a la Cordillera Darwin en Tierra del Fuego, así como el sector del fiordo Las Montañas y el canal Sarmiento. Uno de los mayores cambios en la malla fue cerrar el paso entre el seno Skyring y el paso Gajardo, ya que actualmente el modelo permite un ingreso de agua sobre dimensionado, lo que aumenta notablemente la salinidad, no solo en la zona occidental, sino en todo el cuerpo de agua, induciendo errores y una pobre representación de las condiciones del seno Skyring. En la realidad, se evidencia que el intercambio de propiedades por este cruce es marginal. Otro cambio importante es la reducción de la profundidad mínima desde los actuales 70 metros a 20 metros de profundidad.

Esta grilla aun esta en etapa de pruebas y ajustes a modo de alcanzar una malla estable. Se espera que en los próximos meses se implemente al modelo oficial, la cual junto con la futura implementación del modelo atmosférico de alta resolución basado en WRF para este dominio (MOSA-WRF_MAG), genere un fuerte impacto en la calidad de los pronósticos y el grado de ajuste de las variables con las observaciones.

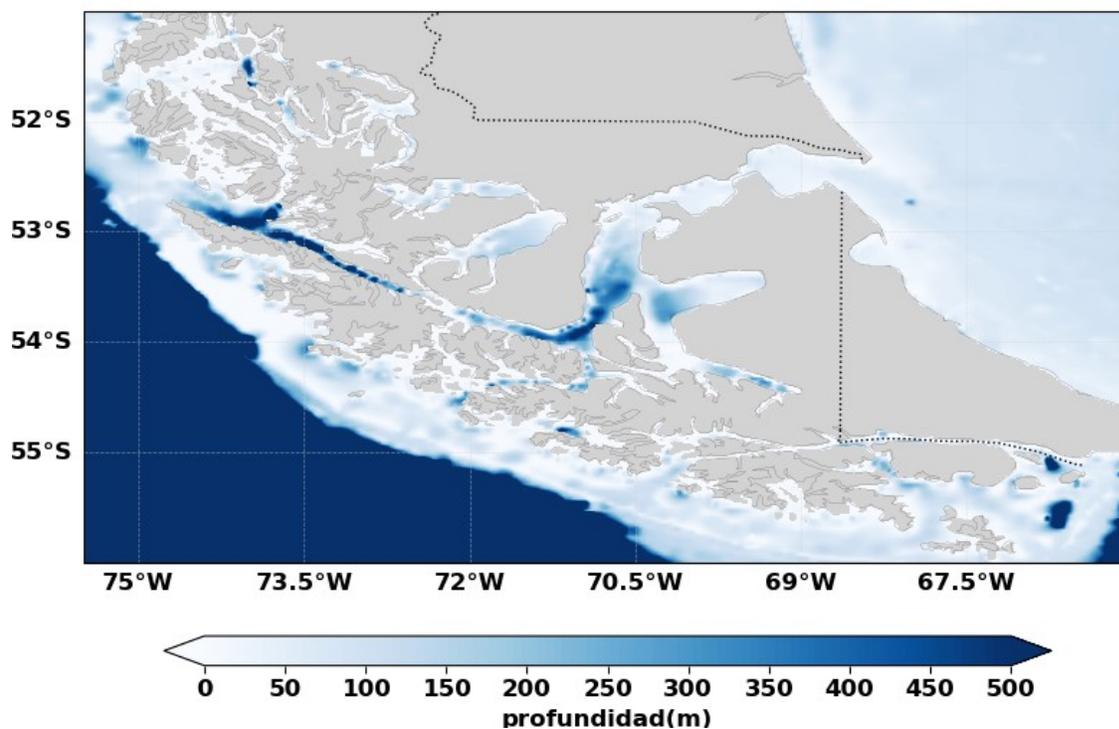


Figura 40: Dominio con la nueva grilla de MOSA-MAG, la cual incluye una nueva máscara y mejoras en la batimetría.

5.3 Resultados objetivo específico 3:

Ampliar el atlas biogeoquímico para las regiones de Los Lagos y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo a los años 2019-2020.

5.3.1 Salinidad

En general la salinidad promedio en la capa de mezcla varió entre 28 y 35 PSU (Figura 41). Se observaron pequeñas diferencias entre los datos observados y modelados, con el mejor ajuste en la zona de CsMIC, Guafo y la costa de Chiloé. Sin embargo, se detectaron algunas discrepancias notables en ciertas regiones, como en el canal Moraleda, donde se registró la mayor diferencia, de aproximadamente 2 PSU en 2019 y 3 PSU en 2020. Esta diferencia provocó que la masa de agua observada fuera clasificada como agua dulce y la salinidad modelada como masa de agua modificada subantártica. Otra discrepancia observada en salinidad entre los datos y el modelo fue de aproximadamente 1 PSU en la zona de CnMIC, donde también causó que la masa de agua, que en los datos observados se clasificara como agua modificada subantártica, quedara como agua subantártica con el modelo.

En la capa de fondo la salinidad varió entre 32.6 y 34.2 PSU (Figura 41). En este caso el ajuste entre los datos observados y modelados fue mejor que el registrado en la capa de mezcla. La comparación entre las salinidades promedio observadas y modeladas mostró la misma tendencia. Sin embargo, se observaron diferencias notables, siendo la mayor en la zona de CnMIC con 0.5 PSU y otra de 0.2 PSU en la zona de CsMIC. La diferencia en CnMIC provocó una discrepancia en la clasificación de la masa de agua, donde los datos observados la clasificaron como agua modificada subantártica, mientras que la discrepancia en los datos modelados llevó a clasificarla como agua subantártica.

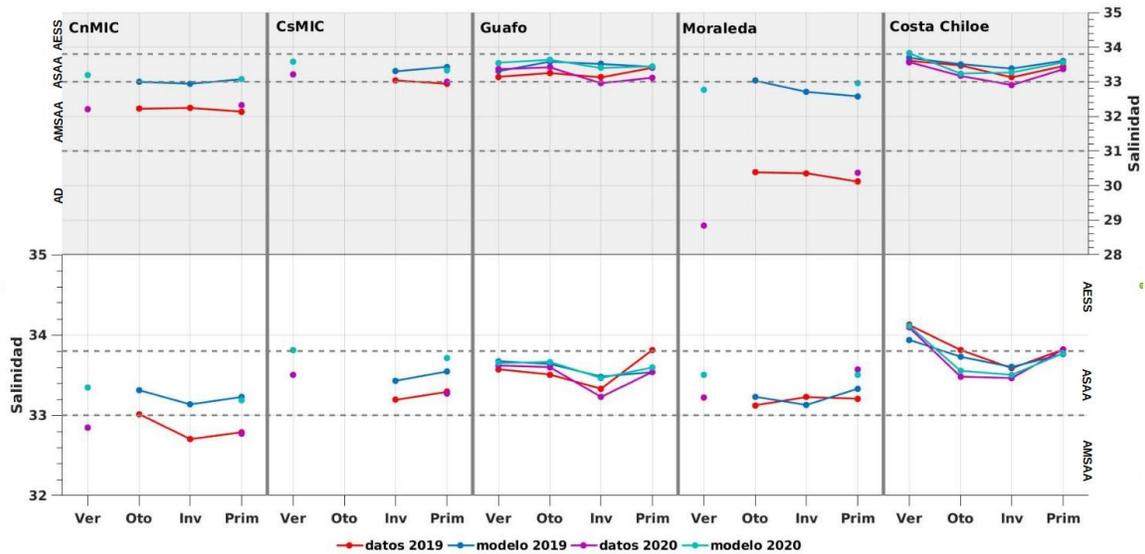


Figura 41: Comparación de salinidad promedio estacional de salinidad observada y modelada en la capa de mezcla (panel superior) y bajo de la capa de mezcla (panel inferior), además en líneas punteadas se observan los límites del criterio de salinidad de los tipos de agua dulce (AD), agua modificada subantártica (AMSAA), agua subantártica (ASAA) y agua ecuatorial subsuperficial (AESS).

5.3.2 Temperatura

La comparación de la temperatura promedio estacional entre los datos observados y modelados en la capa de mezcla mostró una concordancia en las variaciones estacionales (Figura 42). En términos generales la temperatura mínima se registró en invierno, mientras que la temperatura máxima varió espacialmente, registrándose principalmente en verano y primavera, y únicamente en otoño en la costa de Chiloé. A su vez, el modelo fue capaz de reproducir la variación interanual observada entre 2019 y 2020, como se observó en la zona de CnMIC, donde la temperatura promedio de los datos de primavera de 2019 fue aproximadamente 1°C mayor que la registrada en 2020. Sin embargo, la magnitud de la diferencia entre los promedios observados y modelados varió espacialmente. La mayor discrepancia se registró en Moraleda durante el verano y la primavera de 2020, con una diferencia de aproximadamente 1.2°C . En la capa de fondo, la

comparación de temperatura promedio estacional entre los datos observados y modelados (Figura 42) mostraron menores diferencias en comparación con la capa de mezcla. La mayor diferencia fue de 1°C en el sector de Moraleda. Sin embargo, al igual que en la capa de mezcla, los datos registraron variaciones estacionales e interanuales.

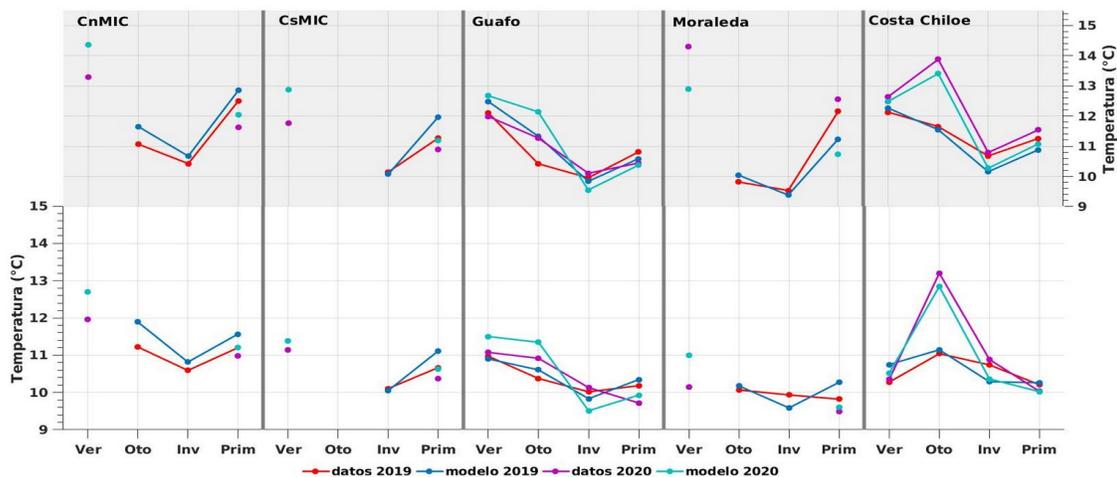


Figura 42: Comparación de temperatura promedio estacional (°C) observada y modelada en la capa de mezcla (panel superior) y bajo de la capa de mezcla (panel inferior).

5.3.3 Oxígeno disuelto

Las concentraciones de oxígeno disuelto entre los datos observados y modelados en la capa de mezcla (Figura 43) mostraron notables discrepancias en ciertas zonas y estaciones. Por ejemplo, en la región de CsMIC, la mayor diferencia fue de 2.0 ml/l en verano de 2020, mientras que en primavera de 2019 se observó una diferencia de solo 0.2 ml/l. Sin embargo, en términos generales, las concentraciones modeladas fueron de aproximadamente 6 ml/l, registrando poca variación estacional en comparación con los datos observados, que variaron entre 5 y 7.2 ml/l. En la mayoría de las zonas, el máximo se registró en primavera, excepto en la costa de Chiloé, donde el máximo se observó en otoño.

En la capa de fondo, las diferencias de oxígeno disuelto promedio entre los datos observados y modelados fueron mayores que las observadas en la capa de mezcla (Figura 43). La mayor discrepancia, de aproximadamente 3 ml/l, se observó en verano de 2019 en la costa de Chiloé y en verano de 2020 en Moraleda. Sin embargo, también se identificaron zonas con diferencias mínimas,

como en la primavera de 2019 en la región de CnMIC.

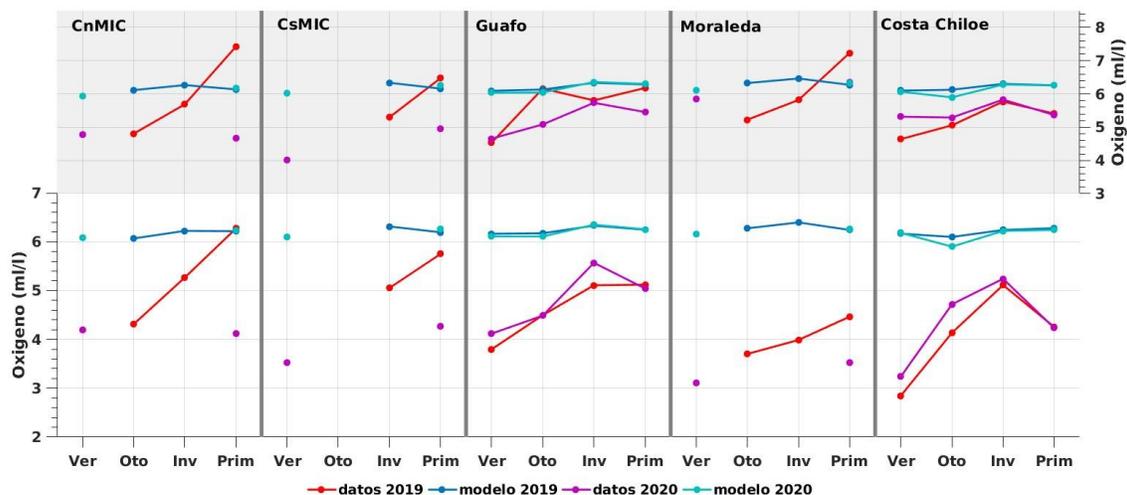


Figura 43: Comparación de oxígeno disuelto promedio estacional (ml/l) observada y modelada en la capa de mezcla (panel superior) y bajo de la capa de mezcla (panel inferior).

5.3.4 Nitrato

Las concentraciones de nitrato entre los datos observados y modelados en la capa de mezcla (Figura 44) mostraron mayores similitudes en 2019 que en 2020. En 2020, se observaron discrepancias notables y una mayor variabilidad en los datos. En algunas zonas, como CnMIC y Moraleda, los valores observados fueron más bajos en comparación con los datos modelados, con una diferencia máxima de 2 μM en otoño de 2019 y 6 μM en verano de 2020, respectivamente. En otras zonas, como CsMIC y Guafo, los valores observados fueron más altos en comparación con los datos modelados, con una diferencia máxima de 6 μM en verano y 4 μM en primavera de 2020, respectivamente. A pesar de estas discrepancias, se observaron similitudes entre datos observados y modelados, especialmente en las zonas de Guafo y Moraleda, donde además se registró un buen ajuste entre los datos en 2019.

En la capa de fondo, las concentraciones de nitrato en los datos observados fueron mayores que en los datos modelados (Figura 44). Las mayores diferencias se observaron en la zona de CsMIC en verano de 2020, con una diferencia de 10

μM . Sin embargo, a pesar de estas discrepancias, se observaron similitudes entre los datos observados y modelados en ciertas épocas, como en otoño e invierno de 2019 en la zona de CnMIC.

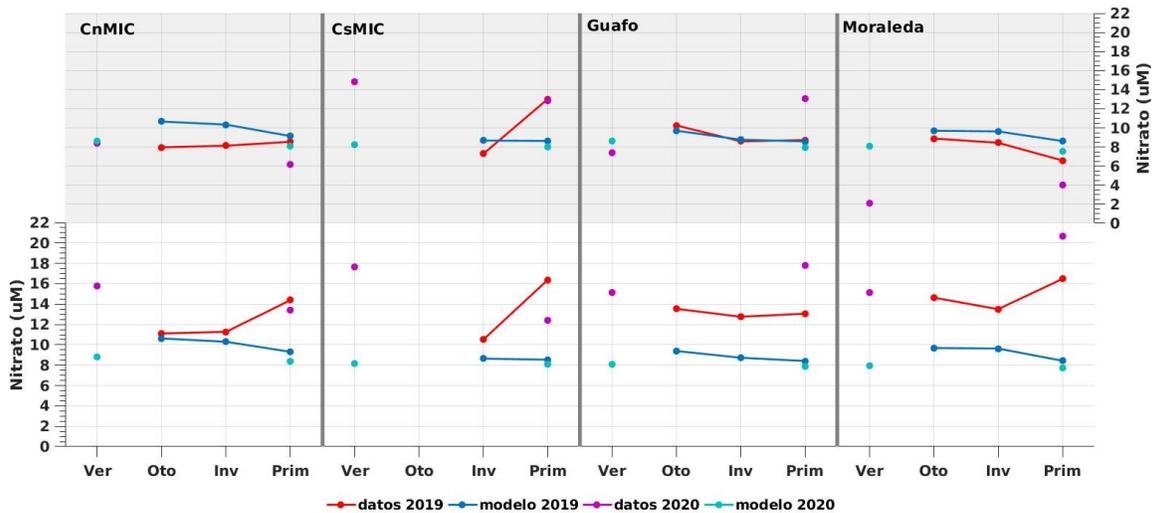


Figura 44: Comparación de nitrato promedio estacional (μM) observada y modelada en la capa de mezcla (panel superior) y bajo de la capa de mezcla (panel inferior).

5.3.5 Clorofila satelital

La clorofila satelital registró valores que oscilaron entre 1 y 7.8 mg/L (Figura 45), con las mayores concentraciones observadas durante el verano en las zonas de CnMIC y la Costa de Chiloé. Se evidenció una clara variabilidad estacional, con concentraciones altas en verano, una disminución en otoño e invierno, y un aumento en primavera. Además, se observó una variación interanual, aunque esta fluctuación dependió de la zona específica. En cuanto al modelo, este presentó valores que oscilaron entre 0 y 0.7 mg/L, reflejando una ligera variación estacional que coincide en parte con los patrones observados en los datos reales. No obstante, la discrepancia con los datos observados es significativa, especialmente durante el verano y la primavera, donde las diferencias alcanzan entre 5 y 6 mg/L. En otoño e invierno, estas discrepancias se reducen considerablemente, situándose en aproximadamente 0.5 mg/L.

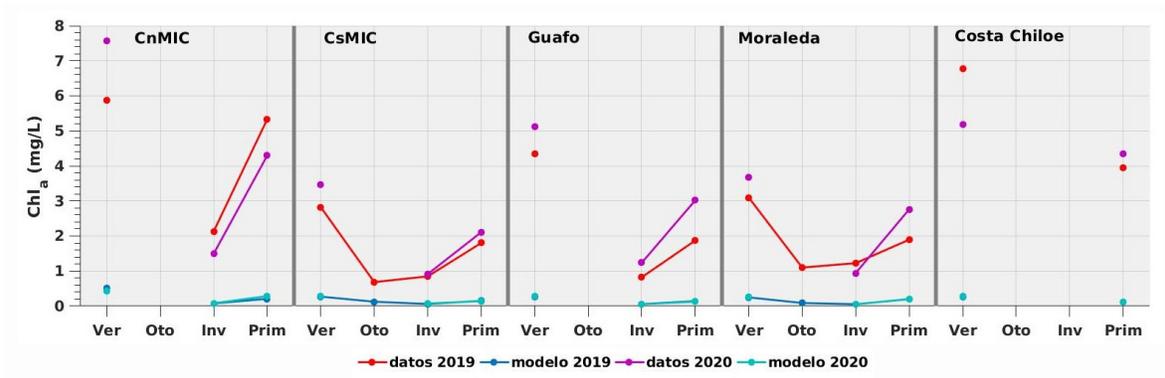


Figura 45: Comparaci3n de clorofila satelital promedio de MODIS (mg/l) y clorofila del modelo.

5.4 Resultados objetivo específico 4:

Calibrar y validar el modelo de oleaje para el mar interior de Chiloé y Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo.

El desarrollo de un modelo de oleaje fue realizado a través de una asesoría externa con el Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepcion, quienes realizaron diversas pruebas de diseño, calibración y evaluación de un modelo operacional para los mares interiores de Patagonia norte, específicamente entre las regiones de Lagos y de Aysén.

La evaluación del desempeño del modelo operacional de oleaje, llamado MOSA-WW3, en comparación con las distintas bases de datos disponibles se presentaran como series de tiempo y campos de altura significativa de ola. Además, se utilizan parámetros estadísticos como el coeficiente de determinación, el sesgo y la raíz del error cuadrático medio para cuantificar el grado de representación del oleaje simulado con respecto a las mediciones.

5.4.1 Evaluación de grillas computacionales

En la Figura 46 se presenta la variación temporal de la altura significativa (H_s), dirección media (D_m) y periodo peak (T_p) para los días 1, 2 y 3 de diciembre. Cada gráfico contrasta el comportamiento de los registros de la boya SHOA y las simulaciones de los 5 casos de grillas computacionales utilizadas. En la Tabla 4 se exhiben parámetros estadísticos de coeficiente de correlación (R), el sesgo (BIAS) y la raíz del error medio cuadrático (RSMD), para la altura significativa (H_s), dirección media (D_m) y periodo peak (T_p), obtenidos de la comparación con la boya SHOA y los distintos casos de parametrizaciones físicas sobre la grilla no-estructurada. Además, en la Tabla 5 se exponen las puntuaciones considerando la ponderación por estadístico (MPSe) y la ponderación por cada variable simulada (MPS).

Tabla 4: Parámetros estadísticos de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla no-estructurada.

Estadístico Modelo	Boya SHOA - Islas Desertores								
	Hs			Dm			Tp		
	R	BIAS	RMS D	R	BIAS	RMSD	R	BIA S	RMS D
P1	0.23	-0.04	0.15	0.24	-3.05	77.15	0.009	0.87	2.99
P2	0.22	-0.03	0.15	0.23	-1.65	77.94	0.011	0.81	2.92
P3	0.29	0.02	0.16	0.23	3.50	77.88	0.087	0.31	2.66
P4	0.32	0.05	0.17	0.24	7.43	76.87	0.037	0.28	2.61
P5	0.21	-0.04	0.15	0.21	3.05	77.71	0.055	0.79	3.16
P6	0.21	-0.04	0.15	0.21	3.05	77.71	0.055	0.79	3.16
P7	0.30	0.03	0.16	0.23	2.86	77.77	0.003	0.34	2.56

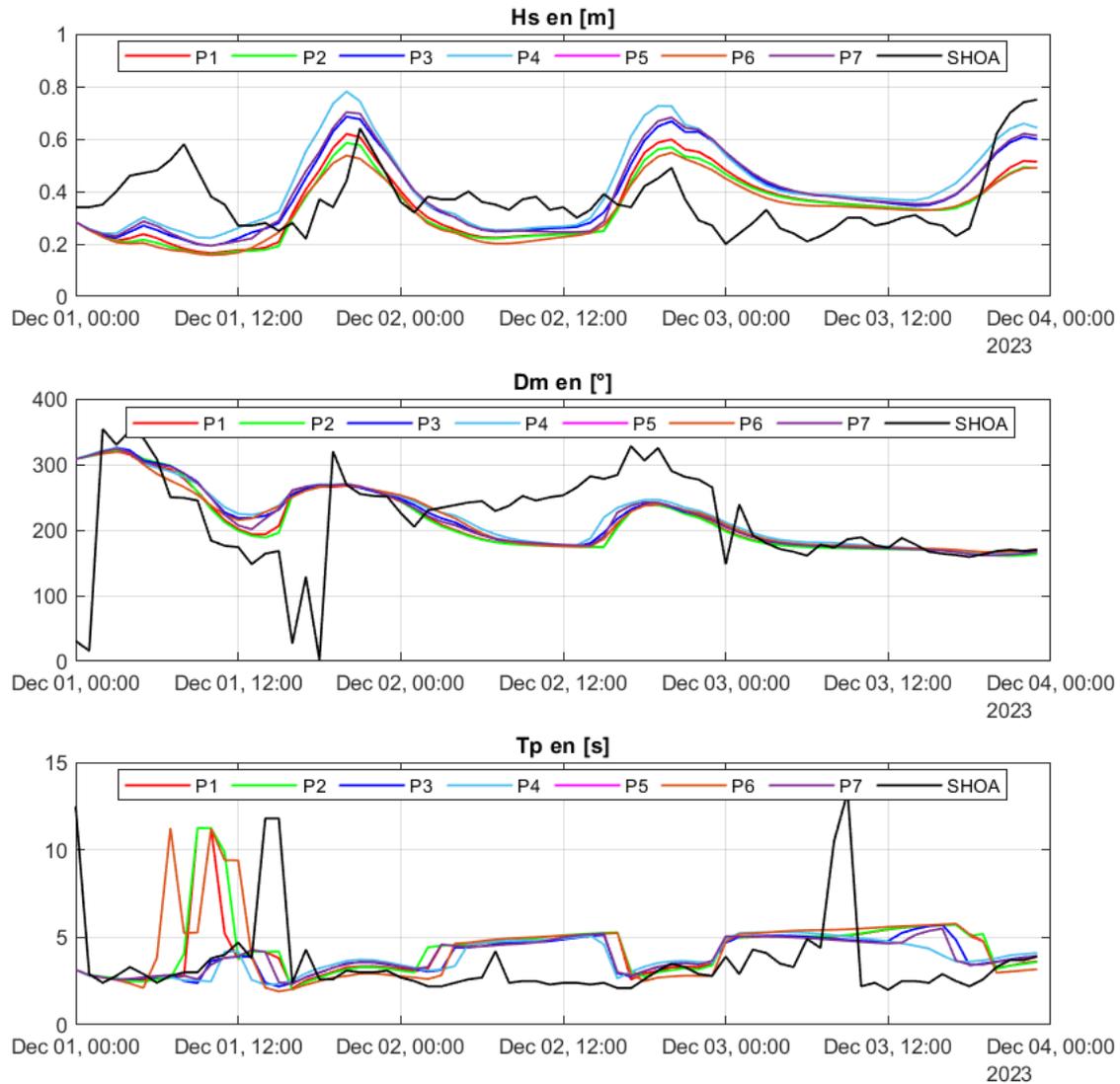


Figura 46: Comparación de series de tiempo de los días 1, 2 y 3 de diciembre de las 7 combinaciones de parametrizaciones físicas en la grilla no-estructurada versus los registros de la boya SHOA.

A partir de la información expuesta se desprende que las 7 combinaciones de parametrizaciones físicas se comportan de manera similar entre sí en la representación de la altura significativa (H_s) y la dirección media (D_m), con leves diferencias en la representación del período peak (T_p) por parte de P1 y P2. Los mayores contrastes son perceptibles en la magnitud de H_s , los cuales aumentan a medida que la altura aumenta.

Tabla 5: Parámetros estadísticos de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla no-estructurada.

Parámetro Caso	MPSe			MPS
	Hs	Dm	Tp	
P1	0.68	0.45	0.22	0.45
P2	0.53	0.64	0.17	0.44
P3	0.71	0.49	0.92	0.71
P4	0.33	0.67	0.77	0.59
P5	0.47	0.35	0.22	0.35
P6	0.47	0.35	0.22	0.35
P7	0.61	0.60	0.63	0.61

Como se observa en la Tabla 4, con respecto a la altura significativa (Hs), el mejor coeficiente de correlación se obtiene para el caso P4 con una correlación de 0.32. Sin embargo, el menor sesgo corresponde al caso P3 con una sobre estimación de 0.02 m, y el menor valor de RMSD concierne a los casos P1, P2, P5 y P6 con 0.15 m. En cuanto a Tp, P3 logra el mejor R con un valor de 0.087, el menor sesgo es por parte de P4 con una sobre estimación de 0.28 s, y el menor RMSD lo obtiene el caso P7 con 2.56 s. Con relación a Dm, el mejor coeficiente de correlación es de 0.24 correspondiente al caso P4, el menor sesgo lo alcanza P2 con una subestimación de 1.65°, y el menor RMSD se consigue en P4 con 76.87°. En contraste con lo anterior, para Hs la menor correlación la obtienen P5 y P6, el mayor sesgo recae en P4 y el mayor RMSD se obtiene también para P4. El menor R de la dirección media resultó para los casos P5 y P6, el mayor sesgo lo obtiene P4 y el error más grande concierne al caso P2. Por último, la peor correlación de Tp es calculada para P7, el mayor sesgo corresponde al caso P1 y el mayor RMSD recae en P5 y P6.

Con referencia a la Tabla 5 la combinación con mejor puntuación en la representación de Hs es P3 con una calificación de 0.71, en la representación de Dm es P2 con un valor de 0.64 y para Tp la combinación con mejor puntuación es P3 con una calificación de 0.92. Finalmente, al aplicar la ponderación de cada variable, el caso con mejor puntuación general fue P3 con una calificación de 0.71, seguida por P7 con 0.61 puntos.

De acuerdo con lo anterior y teniendo como referencia los valores de MPSe, al comparar P1, P2 y P7 es posible inferir que la compilación ST6FLX2 (P1) tiene

una mejor puntuación de Hs, ST6FLX3 (P2) una mejor puntuación en Dm y ST6FLX4 (P7) una mejor calificación en Tp. En cuanto a la puntuación general de éstas, la mejor compilación concierne a P7 con una calificación total de 0.61 puntos. Por otra parte, del contraste entre los casos P5 y P6 se desprende que no existe ninguna diferencia al variar el paquete ST2 usando FLX3 y FLX2.

5.4.2 Grilla estructurada

En la Figura 47 se presenta la variación temporal de la altura significativa (Hs), dirección media (Dm) y periodo peak (Tp) para los días 1, 2 y 3 de diciembre. Cada gráfico contrasta el comportamiento de los registros de la boya SHOA y las simulaciones de los 5 casos de grillas computacionales utilizadas. En la Tabla 6 se exhiben parámetros estadísticos de coeficiente de correlación (R), el sesgo (BIAS) y la raíz del error medio cuadrático (RSMD), para la altura significativa (Hs), dirección media (Dm) y periodo peak (Tp), obtenidos de la comparación con la boya SHOA y los distintos casos de parametrizaciones físicas sobre la grilla no-estructurada. Además, en la Tabla 7 se exponen las puntuaciones considerando la ponderación por estadístico (MPSe) y la ponderación por cada variable simulada (MPS).

Tabla 6: Parámetros estadísticos de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla no-estructurada.

Estadístico Caso	Boya SHOA - Islas Desertores								
	Hs			Dm			Tp		
	R	BIAS	RMS D	R	BIAS	RMS D	R	BIAS	RMS D
E1	0.51	-0.002	0.12	0.33	22.54	74.26	0.21	-0.53	2.36
E2	0.51	-0.016	0.12	0.34	23.59	74.16	0.16	-0.57	2.39
E3	0.49	0.101	0.14	0.33	24.53	73.56	0.14	-0.40	2.40
E4	0.45	0.055	0.14	0.33	22.10	73.94	0.19	-0.45	2.37
E5	0.43	-0.037	0.12	0.38	28.35	71.08	0.23	-1.06	2.33
E6	0.43	-0.037	0.12	0.38	28.35	71.08	0.23	-1.06	2.33
E7	0.50	0.085	0.14	0.33	21.35	74.15	0.16	-0.28	2.40

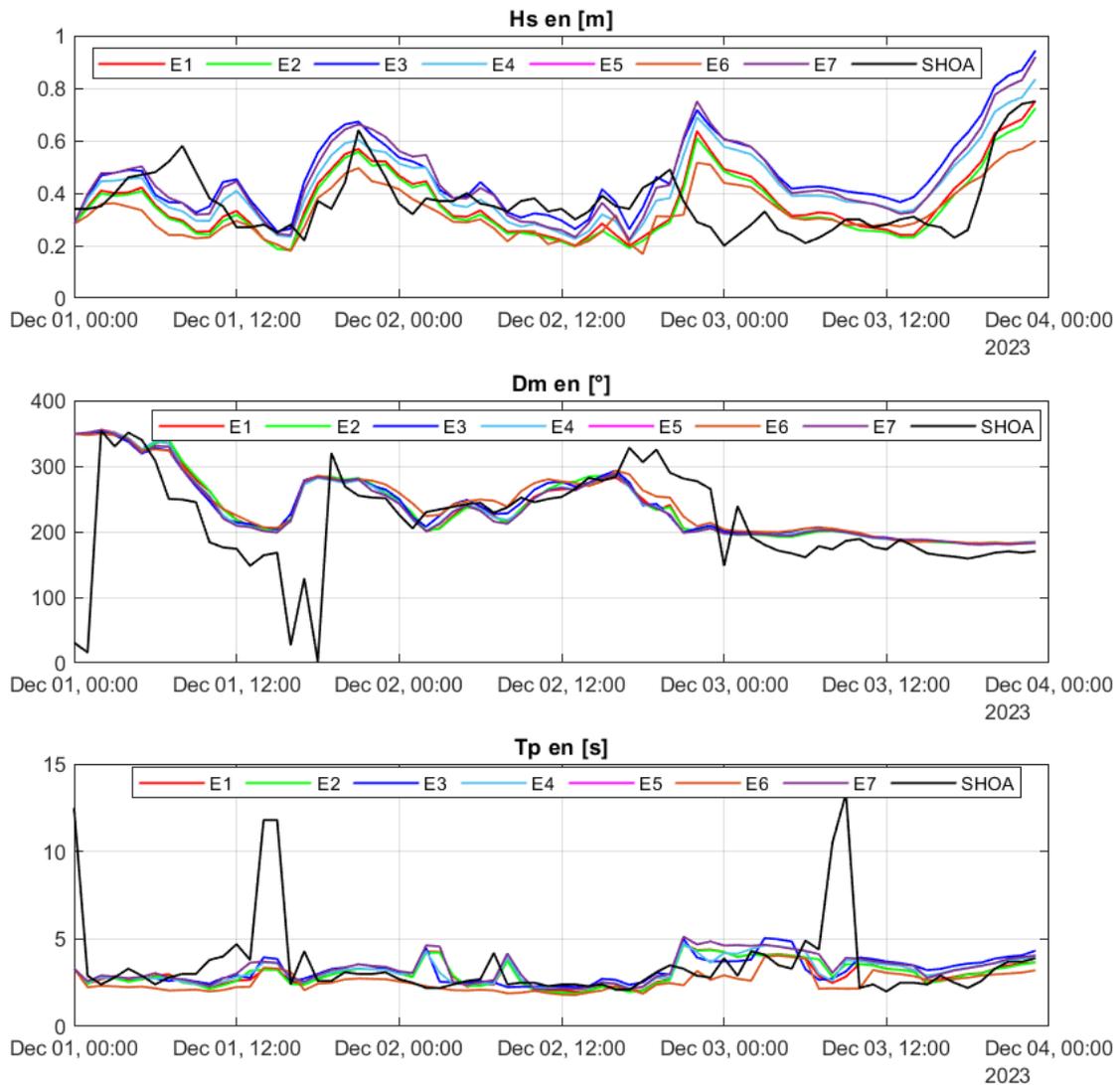


Figura 47: Comparaci3n de series de tiempo de los d1as 1, 2 y 3 de diciembre de las 7 combinaciones de parametrizaciones f1sicas en la grilla estructurada versus los registros de la boya SHOA.

Tabla 7: Calificación de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla estructurada.

Parámetro Caso	MPSe			MPS
	Hs	Dm	Tp	
E1	0.90	0.32	0.21	0.48
E2	0.91	0.29	0.58	0.59
E3	0.31	0.28	0.56	0.38
E4	0.32	0.36	0.72	0.47
E5	0.55	0.67	0.67	0.63
E6	0.55	0.67	0.67	0.63
E7	0.34	0.33	0.66	0.44

A partir de la información expuesta en la Figura 47 se observa que en general todos los casos tienen un comportamiento similar con leves diferencias en magnitud. En este sentido, la altura significativa sería el parámetro más sensible a las modificaciones en las condiciones físicas empleadas. Dichas diferencias se ven incrementadas en los aumentos de energía.

Con relación a la altura significativa (Hs), el mejor coeficiente de correlación se obtiene para los casos E1 y E2 con una correlación de 0.51, el menor sesgo también corresponde a E1 subestimando en 0.003m y los menores valores de RMSD son para E1, E2, E5 y E6 con 0.12m. Con respecto al periodo peak (Tp), los casos E5 y E6 presentan la mejor correlación y menores RMSD con valores de 0.23 y 2.33 m respectivamente, mientras que E3 demuestra tener el menor sesgo de -0.40s. De igual forma, los casos E5 y E6 resultaron en la mayor correlación y mejor RMSD para la variable de dirección media (Dm). Por el contrario, para Hs la menor correlación se dispone en E5 y E6 con valores de R de 0.43, el mayor sesgo recae en E3 con una sobrestimación de 0.101m y el mayor RMSD corresponde al caso E7. Las menores correlaciones recaen en los casos E1, E3, E4 y E7, mientras los mayores sesgos se obtuvieron para E5 y E6 con una sobrestimación de 28.35 ° y el mayor valor de RMSD es 74.26° para E1. Por último, la menor correlación de Tp es calculada para E3, los mayores valores de sesgo conciernen a las subestimaciones de 1.06s de E5 y E6, aparte de que el mayor RMSD resultó en los casos E3 y E7.

En cuanto a la Tabla 7 la combinación de condiciones físicas que mejor representó la altura significativa fue el caso E2 con una puntuación de 0.91,

seguida de E1 con 0.90. Con relación a la dirección media, las parametrizaciones de E5 y E6 obtienen la mejor puntuación de 0.67. Además, la mejor calificación con respecto al periodo peak es de 0.72 para E4, seguida de E5 y E6 con 0.67. Finalmente, al aplicar la ponderación de cada variable, el caso con mejor puntuación general fueron E5 y E6 con una calificación de 0.67, seguidos por E2 con 0.59.

Cabe destacar, que no se encontraron diferencias en E5 y E6, es decir, que el paquete ST2 no fue afectada por los cambios de FLX2 y FLX3. Estos últimos si implicaron variaciones en el ST6 sobre todo en una mejor representación de T_p por parte de FLX3. Si bien, ST2 obtiene la mejor puntuación general en comparación con ST6, es importante señalar que ST2 demuestra un mayor equilibrio en la ponderación de los estadísticos, mientras que ST6 destaca por su buena representación de H_s en contraste con los demás casos.

5.4.3 Comparación Satelital

A continuación, se presentan gráficos de dispersión de altura significativa (H_s) para comparar los datos obtenidos desde los productos satelitales NOAA-CoastWatch versus valores simulados con el modelo WW3. En la Figura 5 se expone la comparación de la grilla estructurada y en la Figura 6 de la grilla no estructurada. Se hace distinción entre el total de datos observados dentro del dominio de simulación y los que ocupan lugar dentro del mar interior de Chiloé (longitudes mayores a -74°). Las figuras recién mencionadas incluyen el total de datos obtenidos para los meses de enero y febrero durante el año 2024 considerando la información de los 6 satélites en conjunto.

En general, las simulaciones mediante la grilla regular basada en ETOPO1 logra representar de buena manera el oleaje de la zona teniendo como referencia los productos satelitales. A partir de la Figura 48 se observa que la mayoría de los casos obtuvieron coeficientes de determinación superiores a los 0.7. Es más, se evidencia que la representación de la variabilidad del oleaje tiene un ajuste de 0.71, una subestimación de 0.71m y un error de 0.82m. Para todos los satélites se tiene una subestimación por parte del modelo, la cual aumenta a medida que las olas son más altas, es decir, que se tienen valores más cercanos a los registros cuando se trata de alturas pequeñas.

De un total de 3698 mediciones realizadas durante los meses de enero y febrero que coinciden con el dominio simulado, tan solo 253 se ubicaron dentro del mar interior de Chiloé. De esta manera, tan sólo menos del 10% de las mediciones satelitales contribuye a caracterizar el oleaje de dicha zona. Con estos antecedentes, en la Figura 48 se observa un R^2 de 0.79, una subestimación de 0.33m y un error de 0.5 m. Por ende, existe un aumento en representación de la variabilidad y disminución de los errores por parte del oleaje simulado en el mar interior en comparación con la parte oceánica.

En contraste, los resultados de la grilla no estructurada disminuyen la representación del oleaje en comparación con la grilla estructurada. La representación de la variabilidad del oleaje oscila entre menos del 10% y hasta el 55% de lo descrito por los satélites (Figura 49). Ahora bien, en el caso de los errores son más parecidos a lo obtenido con la grilla estructurada. Como se puede apreciar, las simulaciones basadas en la grilla no estructurada obtuvieron un ajuste de 0.29 (R^2), una subestimación de 0.65 m y error medio cuadrático de 0.91m. Al analizar la Figura 49 se observa que disminuye la correlación y aumentan los errores en más de un 10%.

En resumen, las simulaciones de oleaje mediante la grilla estructurada demuestran un mejor rendimiento en comparación con la grilla no estructurada. Aunque ambos métodos presentan una subestimación de las alturas significativas de ola (H_s), la grilla estructurada logra una mayor precisión y menor error en las mediciones. Es importante destacar que estos resultados son válidos en aguas abiertas, ya que los satélites no miden entre fiordos y canales, lo que limita la cantidad de datos disponibles para el mar interior de Chiloé. Sin embargo, a pesar de la reducción significativa en el número de mediciones en esta región, las simulaciones aún logran representar el oleaje de manera general. La similitud en la subestimación en ambos casos subraya la necesidad de seguir mejorando los modelos para capturar con mayor precisión las alturas de ola, pero los resultados obtenidos ofrecen una base para el análisis y la gestión del oleaje en la región.

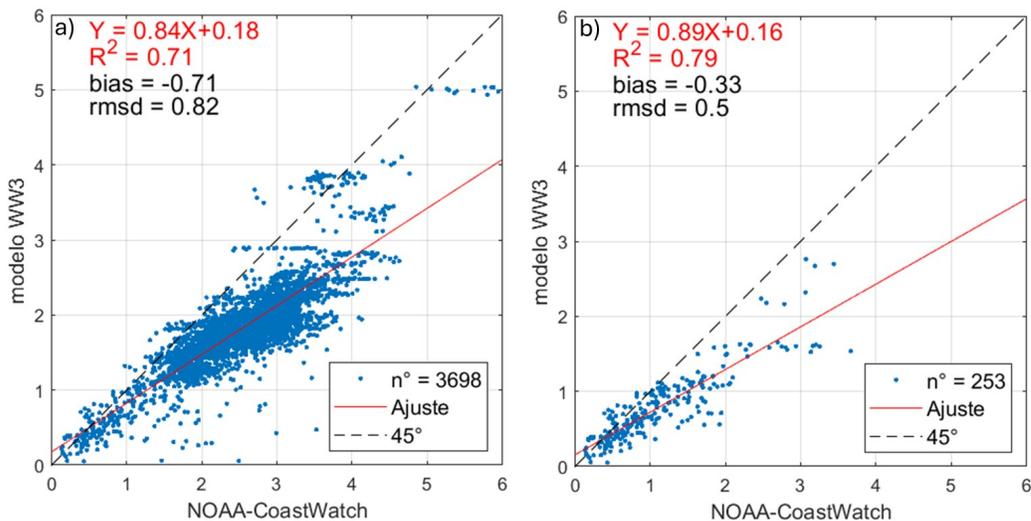


Figura 48: Comparación de gráficos de dispersión de Hs de los meses de enero y febrero del 2024, comparación entre datos satelitales NOAA-CoastWatch y modelo de oleaje WW3 con grilla estructurada. El gráfico de la izquierda (a) incluye todos los puntos comprendidos en el periodo temporal de análisis y a la derecha (b) sólo incluye los puntos que se encuentran dentro del Mar Interior de Chiloé.

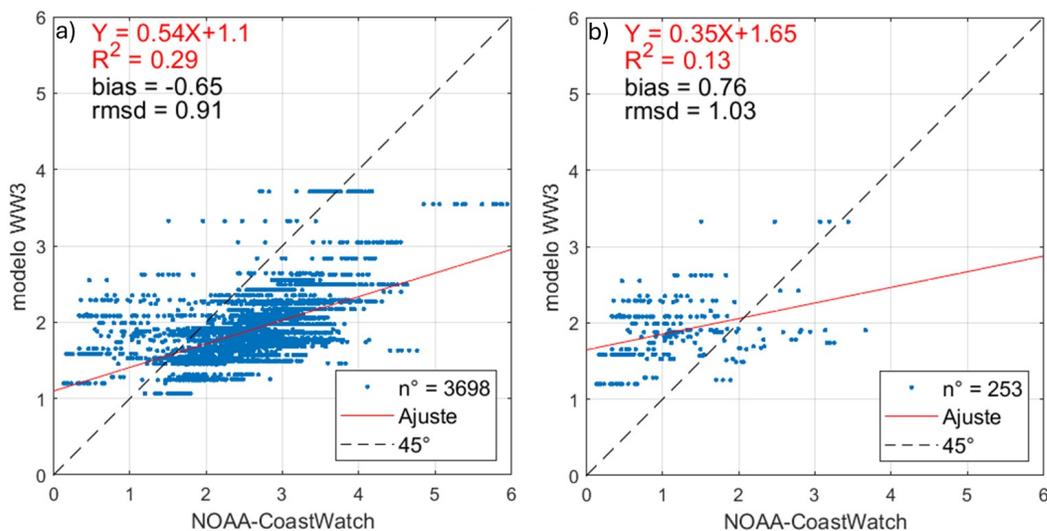


Figura 49: Comparación de gráficos de dispersión de Hs de los meses de enero y febrero del 2024, comparación entre datos satelitales NOAA-CoastWatch y modelo de oleaje WW3 con grilla no-estructurada. El gráfico de la izquierda (a) incluye todos los puntos comprendidos en el periodo temporal de análisis y a la derecha (b) sólo incluye los puntos que se encuentran dentro del Mar Interior de Chiloé.

5.4.4 Comparación con MFWAM

En la Figura 50 se presenta la variación temporal de la altura significativa (Hs), dirección media (Dm) y periodo peak (Tp) para los días 1, 2 y 3 de diciembre. Cada gráfico contrasta el comportamiento de los registros de la boya SHOA y las simulaciones obtenidas entre el modelo operacional de oleaje WW3 con grilla no estructurada (WW3N), modelo WW3 con grilla estructurada (WW3E) y el modelo operacional de oleaje distribuido por Copernicus Marine Service (MFWAM). En la Tabla 8 se exhiben parámetros estadísticos de coeficiente de correlación (R), el sesgo (BIAS) y la raíz del error medio cuadrático (RMSD), para la altura significativa (Hs), dirección media (Dm) y periodo peak (Tp), obtenidos de la comparación con la boya SHOA y los modelos WW3N, WW3E y MFWAM. Además, en la Tabla 9 se exponen las puntuaciones considerando la ponderación por estadístico (MPSe) y la ponderación por cada variable simulada (MPS).

En general, los parámetros varían entre rangos de valores similares, a excepción de ciertas particularidades puntuales. Por ejemplo, todas las alturas de ola varían entre 0.2m y 0.7 m, los valores de dirección media oscilan entre los 150° y 360°, y los periodos peak entre 2s y 6s. Además, se observa que las series del modelo MFWAM no evidencia alta variabilidad temporal, es decir que oscilan poco en torno a su valor promedio, a excepción del Tp que una mayor cantidad de saltos en comparación con la Hs y Dm. Asimismo, en las tres variables el modelo MFWAM tiende a posicionarse sobre la boya SHOA.

Como se observa en la Tabla 8 con respecto a la altura significativa (Hs), el mejor coeficiente de correlación y menor sesgo se obtiene para WW3E con una correlación de 0.51 y una subestimación de 0.002m. En cambio, la peor correlación, sesgo y raíz del error medio cuadrático se determinaron para WW3N. En este sentido, se puede observar como el modelo MFWAM logra una mejor representación de la Hs en comparación con WW3N. En cuanto a Dm, WW3E vuelve a obtener la mejor representación de la variabilidad temporal asociada a el coeficiente de correlación, pero en este caso el modelo MFWAM consiguió la peor representación basada en R², sesgo y RMSD. Con relación a Tp, el mejor coeficiente de correlación es de 0.21 correspondiente al modelo WW3 con grilla estructurada, el menor sesgo lo alcanza MFWAM con una sobrestimación de 0.07s, y el menor RMSD se consigue en WW3E con 2.36s.

Con referencia a la Tabla 9 el modelo con mejor puntuación en la representación de Hs, Dm y Tp fue conseguido por WW3 con grilla estructurada

mediante calificaciones de 0.93, 0.87 y 0.67 respectivamente. De esta manera, al aplicar la ponderación de cada variable, WW3N obtuvo una calificación de 0.82. Por otro lado, se evidencia que el modelo MFWAM consigue una mejor representación en lo que es la altura significativa en comparación con WW3N, mientras que para la dirección media y periodo peak es al revés. Cabe destacar que la puntuación MPSe considera la ponderación entre los estadísticos R, sesgo y RMSD. En este sentido, los valores 0 que se observan en la Tabla 9 indican que en todos los estadísticos se obtuvo la peor ponderación en comparación con los otros modelos. En definitiva, la grilla estructurada del modelo WW3 logra una mejor representación general del oleaje en un punto cercano a la Isla Desertores según lo registrado por la boya SHOA.

Tabla 8: Parámetros estadísticos de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla no-estructurada

Estadístico Modelo	Boya SHOA - Islas Desertores								
	Hs			Dm			Tp		
	R	BIAS	RMS D	R	BIAS	RMS D	R	BIAS	RMS D
MFWAM	0.44	0.035	0.11	0.14	44.00	85.17	0.06	0.07	3.40
WW3E	0.51	-0.002	0.12	0.33	22.54	74.26	0.21	-0.53	2.36
WW3N	0.32	0.05	0.166	0.24	7.43	76.87	0.04	0.28	2.61

Tabla 9: Calificación de las combinaciones de parametrizaciones físicas para la grilla estructurada.

Parámetro Modelo	MPSe			MPS
	Hs	Dm	Tp	
MFWAM	0.66	0.00	0.38	0.35
WW3E	0.93	0.87	0.67	0.82
WW3N	0.00	0.81	0.44	0.41

La Figura 51 compara un promedio de la altura significativa del oleaje (Hs) desde el 26/06/2024 hasta el 02/07/2024 obtenidas por los modelos WW3N, WW3E y MFWAM.

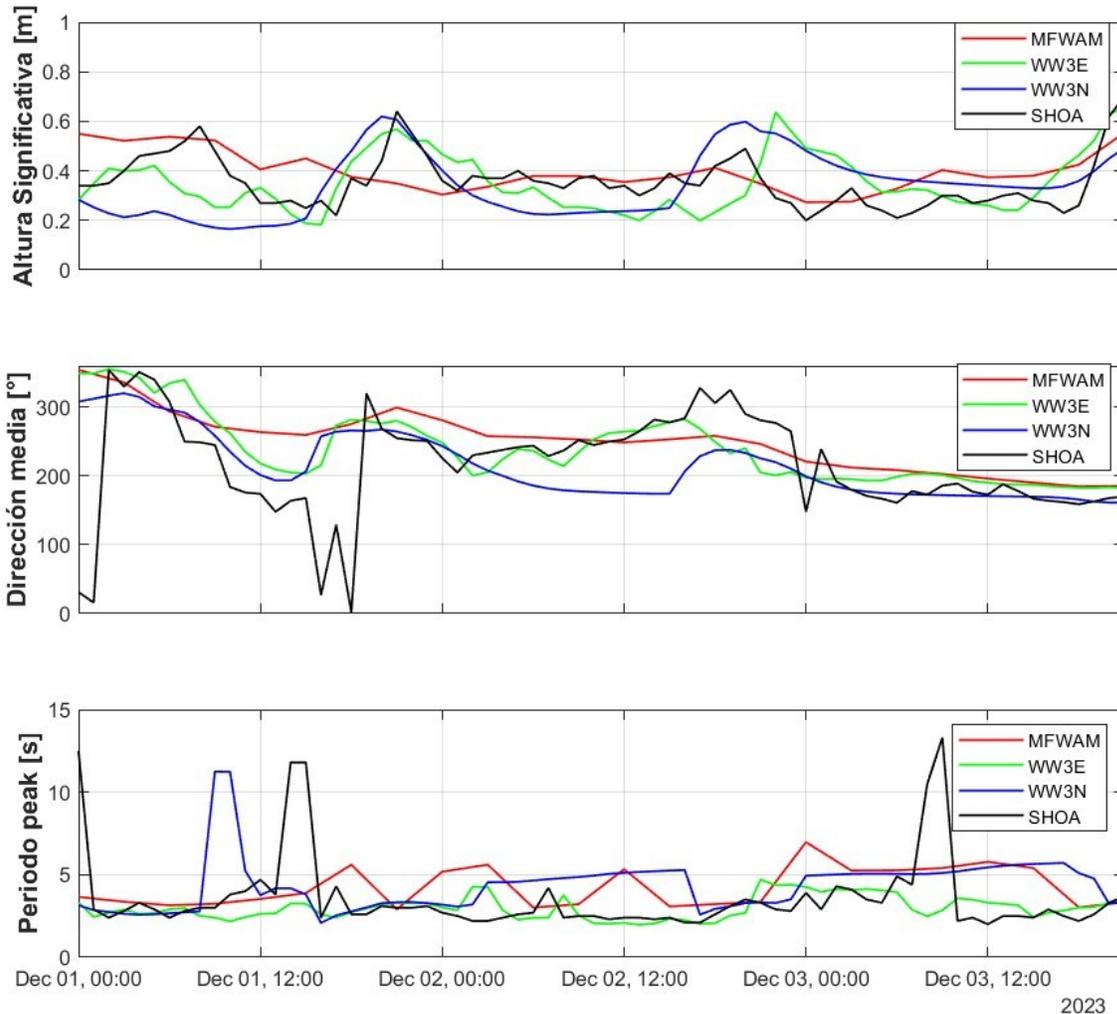


Figura 50: Comparaci3n de series de tiempo de los días 1, 2 y 3 de diciembre entre el modelo WW3 con grilla no estructurada (WW3N), WW3 con grilla estructurada (WW3E) y el producto distribuido por Copernicus Marine Service (MFWAM) versus los registros de la boya SHOA.

En general, tanto WW3E como WW3N tienen un comportamiento similar. En la parte oceánica el modelo MFWAM tiene alturas de olas mayores en comparaci3n con el modelo WW3. Sumado a la subestimaci3n encontrada en la comparaci3n satelital se podría inferir que falta un porcentaje de energía por representar. No obstante, en la zona del mar interior las magnitudes de ola son similares en todos los casos. En este sentido, hay una disminuci3n de aproximadamente 2m entre el océano abierto y el Mar Interior de Chiloé por parte de WW3. Para MFWAM estas diferencias son mayores. Basándose en

Al analizar las figura 51 se muestra que la respuesta evolutiva del oleaje al entrar al mar interior se reproduce de diferentes maneras por parte de cada modelo. Por una parte, se evidencia que la resolución de MFWAM no alcanza a incluir las islas que están en el mar interior y las que se encuentran al sur de la Isla Grande de Chiloé, ya que se existe un oleaje de 0.3m aproximadamente sobre ellas. Sin embargo, la batimetría si incluye una disminución de la profundidad que se puede apreciar en obstaculización del oleaje al ingresar por el sur de Chiloé. Por otro lado, aunque el modelo WW3N tenga mejor resolución para representar la confección costera del mar interior, se evidencia que lugares cercanos a la costa continental hay severas sobrestimaciones de Hs. No es común que el oleaje tienda a aumentar al pasar por un fiordo o un canal si que existan condiciones extremas de viento.

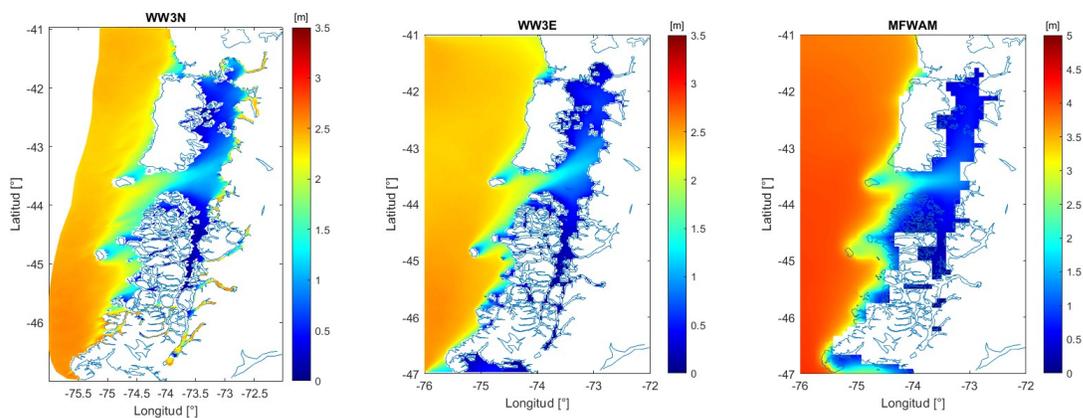


Figura 51: Comparación de la altura significativa (Hs) promedio durante el día 2 de julio del año 2024 entre el modelo WW3 con grilla no estructurada (WW3N, primera fila), WW3 con grilla estructurada (WW3E, segunda fila), y el producto distribuido por Copernicus Marine Service (MFWAM, tercera fila).

En la Figura 52 se expone una parte de la grilla no estructurada para analizar su confección. Además, se superpone una base de datos de la línea de costa para contrastar los límites costeros. De este modo, se observan ciertas discrepancias donde incluso se obvian ciertas islas pegadas a Chiloé en torno a los 73°W y 43°S. Otro aspecto importante, corresponde a los triángulos que componen la grilla. Para las grillas no estructuradas una recomendación es que los triángulos sean lo más equiláteros posibles. Como se puede apreciar en la



grilla, varios de los elementos no siguen estas características e incluso se pueden identificar ángulos obtusos. Por otro lado, es importante asegurar que no existan puntos flotantes en la grilla, es decir, que todos los elementos estén cerrados. Sin embargo, se puede observar la existencia de algunos. Estos aspectos pueden ser los responsables de por qué la grilla no estructurada no obtiene mejores resultados en comparación con la grilla estructurada. En consecuencia, con esto se puede inducir error en lo que es la transmisión de la energía entre nodos, lo que afecta en la redistribución de la energía del oleaje, además de procesos como la refracción y difracción.

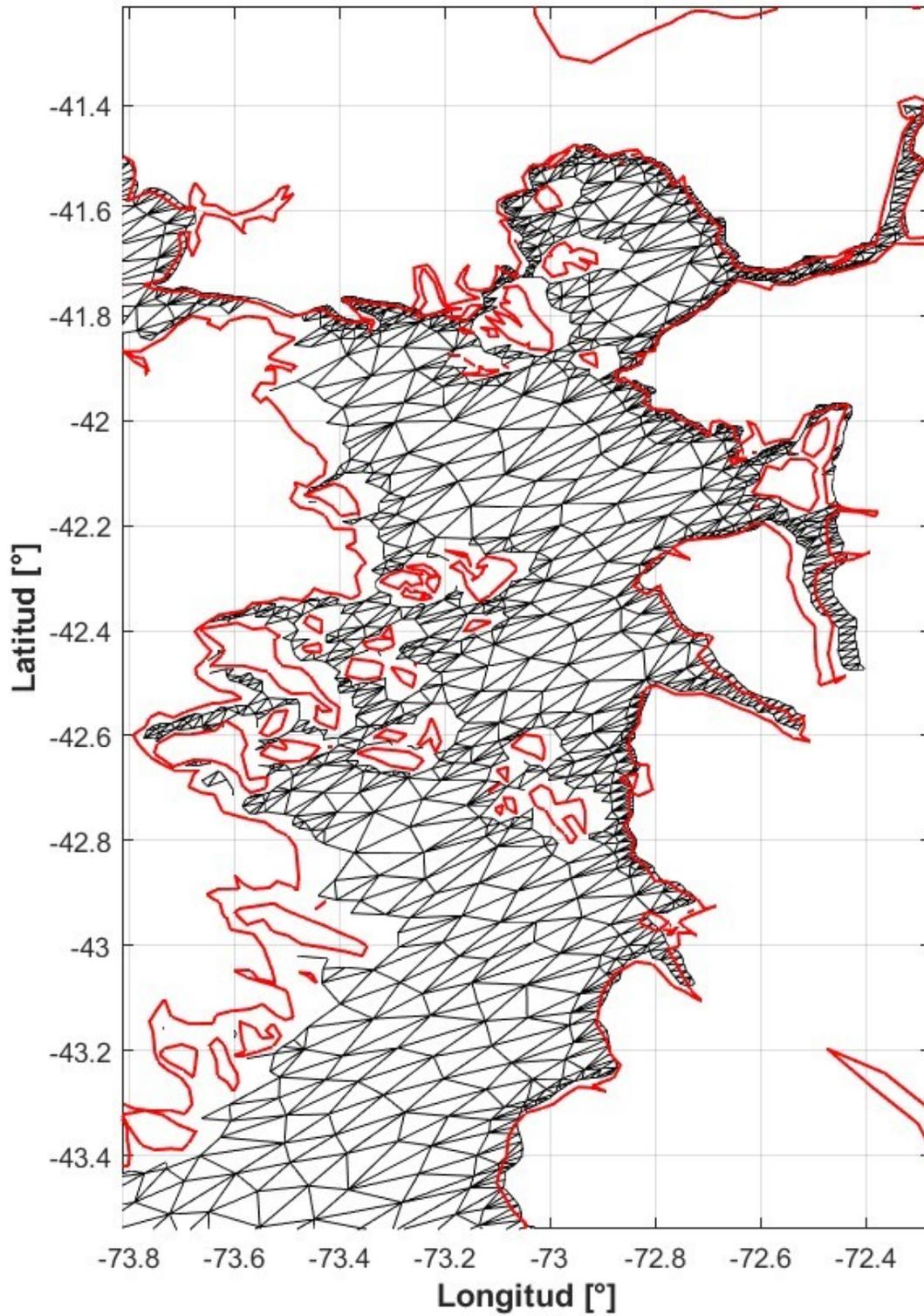


Figura 52: Grilla no estructurada basada en triángulos del dominio del Mar Interior de Chiloé utilizada por el modelo operacional WW3.

6. Discusión

6.1 Sistema operacional MOSA para las regiones de Chiloé-Aysén.

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. A lo largo de estos años, 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 (Figura 53). 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.

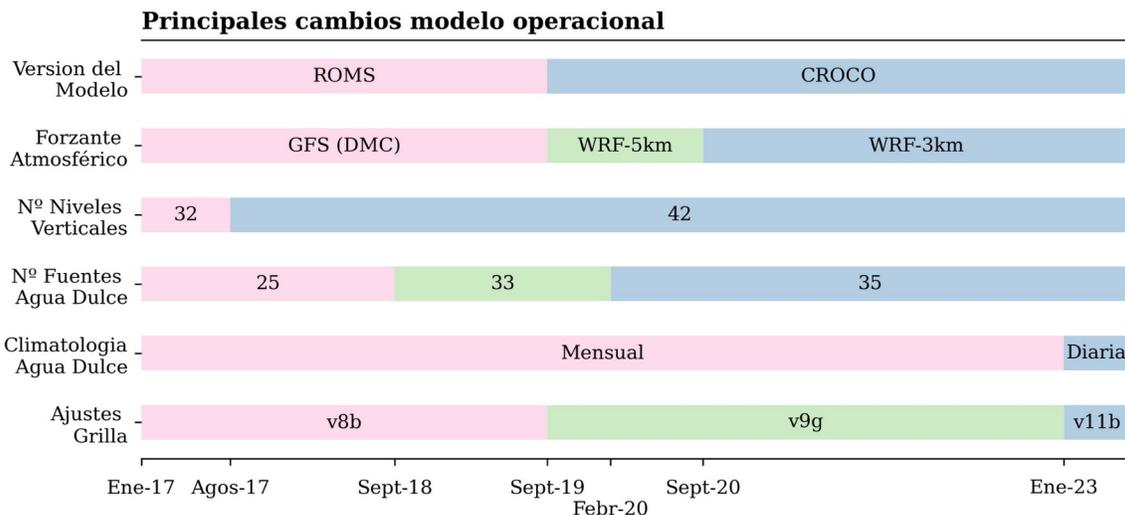


Figura 53: Principales cambios efectuados en la configuración del modelo operacional MOSA-CROCO a la fecha.

El desarrollo temporal de la temperatura superficial del mar reveló una marcada variabilidad estacional. Durante la primavera y el verano austral la temperatura aumenta gradualmente hasta alcanzar su máximo en la temporada de febrero-marzo, mientras que en otoño comienza la temporada de transición hacia el invierno, donde se alcanzan las temperaturas más frías. Este ciclo anual de temperatura es coherente con lo observado en seno de Reloncaví (Saldías et al., 2020) y en estudios previos realizados en Patagonia norte (Narváez et al., 2019, Strub et al., 2019).

En 2022 se realizaron 2 cambios importantes en la configuración del modelo. El primer cambio correspondió a actualizar la batimetría de la parte sur del dominio (Canal Moraleda, y sistema Jacaf-Puyuhuapi), y la zona del paso Desertoires y la boca del Fiordo Comau en la zona norte del dominio. Esta batimetría fue evaluada e incorporada al modelo operacional en enero del 2023. En este contexto, se destaca que el modelo ha sufrido 3 grandes cambios en la batimetría. Al inicio, el modelo era muy profundo en la zonas costeras con batimetrías de 70 m de profundidad, lo que resultaba en que no se podían reproducir los efectos de resonancia de la marea esperados en la zona de estudio con los máximos en la zona del Seno de Reloncaví (Aiken, 2008). Luego, la primera versión de la grilla mejorada y operacional (grilla v8b) fue usada hasta Septiembre del 2019, pues era una batimetría que privilegiaba la estabilidad del modelo en vez de las profundidades más realistas, lo que resultaba en una grilla muy somera en muchas zonas profundas como el seno del Reloncaví, la boca del

Fiordo Comau, canal Moraleda o la Boca del Guafo. Luego, esta grilla fue mejorada centrándose en el seno del Reloncaví principalmente, logrando buenos ajustes en la zona norte, pero con las mismas falencias en la zona sur. Esta grilla (v9g) estuvo operativa hasta diciembre del 2022. Finalmente, la última grilla implementada (v11b), recoge información nueva disponible, y revisa nuevamente las principales zonas del dominio de estudio. Los cambios realizados se reflejan en los análisis de nivel del mar, pues el error entre el modelo y los mareógrafos han disminuidos en el tiempo. Los resultados muestran una alta concordancia, siendo las estaciones de la zona norte del dominio mejor representadas, si bien hacia el sur las estaciones muestran una mayor diferencia, probablemente debido a una mayor complejidad geomorfológica en la región, estas diferencias no son significativas.

De la misma manera, en el afán constante de mejorar la estimación del sistema estuarino en la región y de reproducir adecuadamente la salinidad superficial se cambió la fuente de variabilidad de las entradas de agua dulce en el modelo. Desde la puesta en marcha del modelo operacional, se asumió que una de las principales falencias del modelo era contar con fuentes fidedignas de flujos de agua dulce en la región. En este sentido, el modelo ha sido mejorado constantemente. Al comienzo, el modelo fue configurado con 3 fuentes puntuales medidas por la DGA y promediadas mensualmente. Luego, se aumentó a 5 estaciones, 3 fuentes con promedios mensuales y 2 con promedios diarios. Luego se pasó de 25 a 35 fuentes puntuales con promedios diarios. Para la última actualización se desarrolló mediante asesoría el modelo FLOW, el cual contiene simulaciones desde 1980 hasta el 2022 con flujos diarios para más de 30000 cuencas de la Patagonia Chilena. A partir de estos datos, se realizó una climatología diaria, la cual fue integrada al modelo operacional en enero del 2023.

Estos cambios se ven reflejados en la columna de agua al analizar las transectas CTD. Los resultados del modelo muestran una estructura estuarina altamente heterogénea, caracterizada por una estructura vertical con una capa superficial altamente variable y un capa inferior más uniforme y salina, tal como se ha evidenciado en estudios previos (Sievers and Silva; 2008, Iriarte et. al; 2014). Estas características del sistema Patagónico también son confirmadas en mediciones locales realizadas en fiordo Aysén (Castro et. al; 2017), fiordo Puyuhuapi (Schneider et. al, 2014) donde se exhibe una columna de agua estratificada, que genera fuertes gradientes verticales de salinidad y temperatura. Las masas de aguas simuladas por el modelo revelan principalmente la presencia de Agua Subantártica Modificada (ASAAM) (con salinidades entre 31-33 PSU) y

ASAA, tal como fue descrito por Silva et al., 2009. Las mayores limitaciones del modelo, en ambos periodos analizados, se observan en superficie (<20m), donde no fue capaz de reproducir de buena manera la presencia de Agua Estuarina (AE), principalmente en las zonas con mayores aportes de agua dulce, lo cual sugiere seguir trabajando en el ajuste de este forzante.

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. Si bien al comienzo la mirada estaba centrada en procesos regionales, 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 presentes en los mares de las regiones de Los Lagos y de Aysén.

6.2 Sistema operacional MOSA-WRF

Los resultados obtenidos para la evaluación espacial revelan un panorama complejo respecto al desempeño de los modelos MOSA-WRF y ERA5 en la región austral de Chile. Si bien ambos modelos muestran una buena concordancia en la zona del mar abierto, especialmente para las variables de viento y temperatura del aire, la situación se torna más compleja al adentrarse en las zonas terrestres, particularmente en la Cordillera de los Andes. La topografía irregular, especialmente en las regiones cordilleranas, se revelan como factores determinantes en el desempeño de los modelos. Esto se observa en la disminución de las correlaciones y en el aumento del RMSE en las zonas terrestres y en donde la topografía es más abrupta. Estas tendencias sugieren que los modelos resuelven de manera muy diferente estas variables ya sea por las parametrización de los procesos físicos, especialmente en áreas con terreno complejo o sus resoluciones horizontales respectivamente.

Es notable la influencia estacional en el desempeño de los modelos. La componente zonal del viento (U) muestra una mayor influencia de la topografía durante el verano, lo que podría explicarse por un aumento en la actividad convectiva y la generación de vientos locales debido a las diferencias de temperatura entre las laderas de la montaña y el aire circundante. La componente meridional (V), en cambio, presenta un mejor ajuste en las zonas de mar abierto durante todo el año, pero con una disminución de la correlación en la Cordillera de los Andes, especialmente durante el verano. El análisis de la temperatura del aire a 2 metros muestra un error mínimo en las zonas marinas, con valores alrededor

de 1 °C. Sin embargo, la diferencia entre los modelos aumenta en la tierra, especialmente en las zonas cordilleranas, donde la topografía es más abrupta, alcanzando hasta 7 °C en las cimas de las montañas. Estos valores tienden a aumentar en primavera-verano. Esto destaca la necesidad de modelos con mayor precisión en la representación de la temperatura del aire en las zonas de montaña, especialmente durante las estaciones cálidas.

La precisión limitada de los modelos en las zonas terrestres, especialmente en la Cordillera de los Andes, tiene implicaciones significativas para diversas aplicaciones. La predicción meteorológica en zonas de montaña se ve afectada, especialmente durante los eventos de viento extremo. El análisis climático también se ve afectado, especialmente en la caracterización de la variabilidad climática en la región austral. La gestión de recursos hídricos, la planificación de infraestructuras y la gestión de riesgos relacionados con eventos climáticos extremos se ven afectadas por la precisión de los modelos en la representación de la dinámica atmosférica en estas zonas.

Los análisis de los dos eventos de vientos máximos registrados en la estación de Marimeli, junto con las comparaciones con las simulaciones de MOSA-WRF y ERA5 en ambas estaciones (Marimeli y Cucao), arrojan resultados interesantes que resaltan la complejidad de la dinámica atmosférica en la región austral y las limitaciones de los modelos utilizados.

En general, se observa que las simulaciones de MOSA-WRF, especialmente en la estación de Marimeli (ubicada en un área con topografía compleja), muestran un mejor ajuste a las observaciones, particularmente en la componente zonal (U) y en la magnitud del viento. Esto sugiere que MOSA-WRF, podría capturar mejor los efectos locales de la topografía en la dinámica del viento en zonas con características complejas. En contraste, ERA5, que tiene una menor resolución espacial, muestra una mayor correlación con las observaciones en Cucao (ubicada en un área con topografía abierta). Esto sugiere que ERA5 puede capturar mejor la dinámica del viento en áreas con topografía más uniforme, donde la influencia de los efectos locales es menor. La mayor precisión de MOSA-WRF en Marimeli, especialmente durante el primer evento, tiene implicaciones importantes para aplicaciones como la predicción de eventos extremos de viento en zonas con topografía compleja, como los fiordos de la región austral. Esto podría ser útil para la gestión de riesgos en sectores como la navegación, la industria acuícola, la energía eólica, y la seguridad de infraestructura, entre otras. La mayor correlación de ERA5 con las observaciones en Cucao, por otro lado,

podría ser útil para aplicaciones como el análisis climático a escala regional, donde la precisión en zonas con topografía más homogénea es crucial.

Si bien los resultados muestran que MOSA-WRF, en general, tiene un mejor ajuste a las observaciones en Marimeli, es importante mencionar que la influencia de la topografía en el desempeño de los modelos se ve afectada por la estacionalidad. Durante el verano, se observa una mayor influencia de la topografía en la componente zonal del viento (U), lo que sugiere que la actividad convectiva y los vientos locales generados por el relieve son más intensos durante esta época del año. En cambio, en invierno, la influencia de la topografía parece ser menor. El análisis de la temperatura del aire en las estaciones de Marimeli y Cucao arroja resultados interesantes que muestran una diferencia en el desempeño de los modelos en función de la ubicación y la complejidad del terreno.

En Marimeli, ambos modelos, MOSA-WRF y ERA5, muestran correlaciones significativamente altas lo que indica una buena concordancia general con las observaciones. Sin embargo, se observan diferencias en el sesgo (bias) y en la representación de la amplitud de la temperatura. MOSA-WRF presenta un sesgo menor en comparación con ERA5, lo que sugiere una mejor capacidad de MOSA-WRF para capturar el promedio de la temperatura en esta zona con topografía compleja. En cuanto a la amplitud de las variaciones de temperatura, MOSA-WRF también tiene un mejor desempeño que ERA5. Esto sugiere que MOSA-WRF captura mejor la variabilidad diaria de la temperatura en Marimeli, lo cual es importante para aplicaciones que requieren una mayor precisión en la representación de las variaciones de temperatura. Finalmente, MOSA-WRF presenta un RMSE menor que ERA5, lo que sugiere una mayor precisión general en la representación de la temperatura en Marimeli. En Cucao, MOSA-WRF también muestra una mayor correlación con las observaciones que ERA5, lo que sugiere que MOSA-WRF captura mejor la variabilidad general de la temperatura en esta zona con una topografía más abierta. Similar a Marimeli, MOSA-WRF presenta un menor sesgo que ERA5, lo que indica una mejor representación del promedio de la temperatura en esta zona. La amplitud de la variabilidad de la temperatura se resuelve mejor en MOSA-WRF, mientras que ERA5 sobrestima esta métrica en un 24%. Finalmente, MOSA-WRF también presenta un RMSE menor que ERA5, lo que sugiere una mayor precisión en la representación de la temperatura en Cucao. Estos resultados sugieren que MOSA-WRF, con su resolución espacial más fina, podría ser más adecuado para la representación de la temperatura en áreas con topografía compleja, como Marimeli. Por otra parte,

ERA5, con su resolución más gruesa, podría ser más efectivo en áreas con topografía más uniforme, como Cucao.

A pesar de los resultados positivos, es importante mencionar que los modelos aún presentan limitaciones en la representación de la dinámica del viento en la región austral, especialmente en áreas con topografía compleja. Es necesario investigar más a fondo la influencia de la topografía en el desempeño de los modelos, especialmente durante eventos de viento extremos. Se recomienda la implementación de modelos de mayor resolución, así como la mejora en la parametrización de los procesos físicos en los modelos, especialmente en áreas con topografía abrupta. Asimismo se recomienda aumentar la densidad de estaciones meteorológicas en terrenos complejos donde dominan los procesos locales.

6.3 Sistema operacional MOSA para la región de Magallanes.

6.3.1 Implementación de un modelo en al región de Magallanes

En la etapa VII 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, con el objetivo de obtener un diagnóstico confiable sobre su factibilidad de implementación en esta área. Los pasos para su implementación fueron similares a los realizados previamente con el modelo de pronóstico operacional MOSA-CROCO para las regiones de Los Lagos y Aysén (Ruiz et al, 2021). Sin embargo, a diferencia de estas regiones, donde el modelo ya opera hace casi 8 años, en la región de Magallanes existe una mayor incertidumbre sobre los procesos dinámicos y su variabilidad. La modelación y la predicción de los océanos costeros en esta zona representa un desafío significativo debido a la dinámica compleja y rica, así como a los diversos acoplamientos con la atmósfera inferior y los intercambios con las regiones cercanas a la costa y mar adentro (Schiller & Brassington, 2011).

Aunque existen estudios que han abordado la hidrodinámica de la región, muchos se centran en enfoques locales o en la incidencia de propiedades conservativas del agua sobre organismos específicos, dado el peso de la industria pesquera y la salmonicultura en la zona. Estos estudios suelen ser limitados tanto espacial como temporalmente, enfocándose en microsistemas específicos. Sin embargo, algunos trabajos han ofrecido una visión regional, identificando patrones hidrográficos y de propagación de mareas, así como estudios basados en modelos numéricos (Calvete & Silva, 2002; Salinas et al., 2004; Aiken, 2008; Brun et al.,

2020; Cucco et al., 2022). A pesar de estos avances, aún no se dispone de herramientas que permitan comprender la evolución sinóptica del sistema, mas aun en una región donde el impacto del cambio climático se reflejara dramáticamente en la respuesta de la criósfera Patagónica. Con el retroceso de los campos de hielo a un ritmo sin precedentes en las regiones más meridionales (Weidemann et al., 2020), los sistemas de fiordos glaciares adyacentes están expuestos a una creciente escorrentía de agua dulce. Las consecuencias más importantes, aunque desconocidas, afectarán a procesos marinos como la circulación y estratificación de los fiordos, la química del agua y el funcionamiento de los organismos acuáticos en todo el ecosistema marino (Iriarte et al, 2023).

Nuevos resultados señalaron que las condiciones ambientales observadas en el sistema costero de la Patagonia, baja temperatura (actualmente 12 °C), típica de otoño y primavera y acidificación costera (escenarios actuales y futuros) serían favorables para el desarrollo de floraciones de *Karenia selliformis*, dada su plasticidad natural (Vellojin et al., 2023). Además se ha observado que el predominio de aguas profundas en los canales, y el probable mayor tiempo de residencia de sus aguas, modula el final de las FAN (Iriarte et al, 2023).

Al comparar estos resultados con otros estudios de modelado en la región se puede observar que el desempeño del modelo MOSA-MAG es similar en términos de reproducir patrones generales de temperatura y salinidad, pero enfrenta mayores desafíos al capturar procesos más específicos. Por ejemplo, Palma y Matano (2021) realizaron una simulación detallada de la Pluma de Magallanes, utilizando un modelo con una resolución horizontal más fina (5 km en la costa) y forzamientos que incluyen mareas, vientos y corrientes de frontera. Su estudio destaca la importancia de la mezcla vertical inducida por mareas y su impacto en la homogenización de la columna de agua, así como en el desplazamiento de frentes de salinidad hacia mar adentro. Sin embargo, su modelo también presenta limitaciones al representar con precisión las corrientes en áreas críticas y la influencia de las corrientes oceánicas, como la Corriente de Malvinas, en la distribución de salinidad.

En términos de calidad, ambos modelos comparten fortalezas en la reproducción de patrones generales, aunque en MOSA-MAG parece mostrar limitaciones adicionales en la representación de procesos finos, como los de mezcla y estratificación, particularmente en relación con el derretimiento glaciar y el aporte de agua dulce de ríos, que son factores críticos en la dinámica de la región. Estos aspectos resaltan la necesidad de realizar ajustes adicionales en el

modelo MOSA-MAG, especialmente en la representación de los procesos de borde y en la incorporación de datos de descarga de ríos y derretimiento glaciario, para mejorar la precisión en la representación de las condiciones oceánicas en la región de Magallanes. Con mejoras adicionales y una calibración más fina, el modelo MOSA-MAG podría convertirse en una herramienta esencial para la predicción y gestión ambiental en esta región tan dinámica y compleja, similar al potencial mostrado por los modelos utilizados en estudios previos en la región.

En este contexto, la implementación de un modelo operacional en la zona puede representar un aporte considerable al conocimiento de los procesos dinámicos, así como permitir la anticipación de escenarios críticos ambientales, posicionando a MOSA-MAG como una herramienta potencialmente valiosa.

6.3.4 Evaluación y disponibilidad de datos

Las evaluaciones preliminares del modelo MOSA-MAG indican que, si bien reproduce adecuadamente la estacionalidad de la temperatura y la salinidad, aún presenta desajustes significativos. En general, la temperatura simulada se encuentra aproximadamente 2 °C por debajo de lo observado en perfiles de CTD y productos satelitales, especialmente en el borde oriental, durante los meses de invierno y otoño. Esto podría atribuirse a las condiciones de borde utilizadas y a la sensibilidad del flujo de calor a la superficie del océano en el modelo, especialmente con la resolución atmosférica de GFS de 0.25° (~25 km), que puede no ajustarse correctamente a la resolución del modelo.

Por otro lado, la salinidad simulada se presenta generalmente subestimada. Este sesgo es esperable debido a la complejidad de modelar el flujo de descargas de ríos en todo el dominio, particularmente bajo la influencia de los Campos de Hielo Sur y la Cordillera Darwin. Esto coincide con los hallazgos de Brun et al. (2020), quienes analizaron la dinámica de la salinidad en el Estrecho de Magallanes, evidenciando que las aguas de menor salinidad ($S < 31.5$) observadas en la desembocadura atlántica del estrecho son cruciales para el transporte neto del Pacífico hacia el Atlántico. La subestimación en el modelo podría estar vinculada a la complejidad de representar adecuadamente los flujos de agua dulce que ingresan desde el fiordo Almirantazgo y otras fuentes en el sistema.

Además, la comparación temporal de la temperatura del modelo con datos satelitales de AVHRR muestra que, si bien la señal estacional está bien representada ($r = 0.88$), el error cuadrático medio (RMSE) es de aproximadamente

2.8 °C, con una desviación estándar considerablemente mayor que la de AVHRR, lo que introduce ruido en estos valores. Este comportamiento se observa particularmente en primavera y verano, cuando el sesgo negativo en el modelo aumenta, sugiriendo dificultades para capturar los procesos de mezcla y estratificación, influenciados por el derretimiento glaciar y de nieves. Comparando con Brun et al. (2020), quienes analizaron la estratificación térmica y salina en el Estrecho de Magallanes y el Canal Beagle, se observa que sus resultados también indican una fuerte influencia de las aguas estuarinas y de deshielo en la estructura vertical y la dinámica de las corrientes. Sin embargo, su estudio revela que la estructura de salinidad y temperatura en la región es altamente dependiente de la estacionalidad y de la interacción entre las entradas de agua dulce y la mezcla oceánica, algo que parece ser subestimado en MOSA-MAG.

En resumen, aunque MOSA-MAG ha demostrado ser un desarrollo con enorme potencial, aún requiere ajustes para mejorar su precisión en la representación de las condiciones oceánicas de la región de Magallanes, especialmente durante las estaciones más cálidas. Los resultados sugieren que, con mejoras adicionales, el modelo podría convertirse en una herramienta esencial para la predicción y gestión ambiental en esta región tan dinámica y compleja

6.4 Modelo biogeoquímico MOSA-PISCES.

6.4.1 Importancia de los modelos biogeoquímicos

Los entornos costeros son zonas altamente dinámicas donde convergen múltiples procesos, como corrientes oceánicas, mareas, interacción entre agua dulce y salada, y transporte de sedimentos y procesos ecológicos complejos. En este sentido, los modelos numéricos son herramientas esenciales para comprender estos sistemas, siendo utilizados para simular y predecir una amplia gama de procesos físicos, químicos y biológicos. Su principal importancia radica en su capacidad para integrar gran cantidad de datos e información generando escenarios que ayudan a comprender estos sistemas complejos y predecir cambios en estos ambientes.

En las último tiempo el Instituto de Fomento Pesquero implemento modelos físicos que permiten comprender la dinámica costera, a distintas escalas, del mar interior de Chiloé y de las Regiones de Aysén y Magallanes. Sin embargo, el entendimiento de los procesos biológicos y ecológicos de estas áreas ha tenido un desarrollo menor. En este sentido, los modelos biogeoquímicos complementan a los modelos físicos al incorporar procesos biológicos y químicos que regulan la

calidad del agua y la salud de los ecosistemas marinos. A diferencia de los modelos f3sicos, que se fundamentan en leyes f3sicas, los modelos biogeoqu3micos deben considerar, los ciclos de nutrientes, la din3mica de los ecosistemas, interacci3n entre modelos f3sicos y biol3gicos, entre otros procesos. El uso de estos modelos no solo puede ser usado para proyectar escenarios futuros, sino tambi3n para reconstruir situaciones y fen3menos pasados, es por ello que podr3an convertirse en una valiosa herramienta para el desarrollo de pol3ticas p3blicas y toma de decisiones (Fennel *et al.*, 2019). Esto, ya que permiten evaluar a priori los resultados de la implementaci3n de una medida particular, escenarios de gesti3n y cuantificaci3n de riesgo e incertidumbre, entre otros.

La utilizaci3n de modelos biogeoqu3micos ha aumentado significativamente a nivel internacional, siendo utilizados en apoyo de la gesti3n territorial y el desarrollo de pol3ticas ambientales marinas como en EEUU, Australia (Fulton *et al.*, 2014) y UK . Un ejemplo reciente de c3mo los modelos biogeoqu3micos ayudan a la gesti3n y planificaci3n del medio marino es la cuarta versi3n del procedimiento com3n para la identificaci3n del estado de eutrofizaci3n del 3rea mar3tima de la Convenci3n para la Protecci3n del Medio Ambiente Marino del Atl3ntico Nordeste de Europa (OSPAR Convention <https://oap.ospar.org/en/ospar-assessments/quality-status-reports/>).

Esta convenci3n, compuesta por varios pa3ses, tiene como objetivo reducir los niveles de eutrofizaci3n del medio marino. En su 3ltima versi3n, se determinaron 3reas con caracter3sticas oceanogr3ficas similares, donde para cada una de estas unidades, se calcularon umbrales de nutrientes y clorofila utilizando diversos modelos biogeoqu3micos (Devlin *et al.*, 2023). Para ello, se simul3 un escenario de pre-eutrofizaci3n en el a3o 1900 y se utiliz3 para comparar con el estado actual, simulado desde 2009 hasta 2014 (Van Leeuwen *et al.*, 2023). Esto permiti3 identificar las 3reas m3s eutrofizadas y gestionar dichas 3reas a trav3s de un plan de reducci3n de nutrientes. En cuanto al ox3geno disuelto, la convenci3n utiliza principalmente datos observacionales, pero los mapas de 3reas deficientes en ox3geno disuelto en la columna de agua fueron obtenidos mediante el rean3lisis del modelo biogeoqu3mico realizado por Ciavatta *et al.* (2016). Por lo tanto, este tipo de modelo es 3til para conocer las condiciones de ox3geno y nutrientes en la columna de agua en gran escala espacial y temporal, lo que permite identificar y especificar las zonas menos resilientes y m3s vulnerables; al conocer estas 3reas se podr3an implementar medidas de gesti3n m3s efectivas para proteger la biodiversidad marina y mantener la sostenibilidad de los recursos acu3ticos. Esta informaci3n es crucial para la planificaci3n y adaptaci3n a mediano y largo plazo,

asegurando que las políticas y prácticas de manejo de recursos sean adecuadas para enfrentar desafíos ambientales (Hyder *et al.*, 2015).

En Chile la Ley de Pesca (Ley N° 18.892), norma las actividades de acuicultura en el espacio marino y establece que “los establecimientos que exploten concesiones o autorizaciones de acuicultura operen en niveles compatibles con las capacidades de carga de los cuerpos de agua lacustres, fluviales y marítimos, asegurando la vida acuática y la prevención del surgimiento de condiciones anaeróbicas en las áreas de impacto de la acuicultura”. Aunque esta ley solo menciona el oxígeno en la columna de agua, cada vez es más evidente que los aportes de nutrientes antropogénicos estimulan la productividad primaria (también conocida como eutrofización), lo que a su vez exacerba la disminución del oxígeno (Fennel *et al.*, 2019; Rabalais *et al.*, 2010; Diaz and Rosenberg, 2008).

6.4.2 Evaluación CROCO-PISCES

Es importante destacar que el objetivo de la modelación biogeoquímica se encuentra actualmente en su cuarta etapa de desarrollo. Durante las dos primeras etapas, se enfocó en conocer y evaluar diferentes modelos biogeoquímicos. Para ello, se realizaron climatologías utilizando los modelos NPDZ, Fennel y PISCES. En ese momento, IFOP llevó a cabo las simulaciones con el modelo NPDZ, mientras que los otros dos modelos fueron evaluados a través de asesorías externas. Se llegó a la conclusión de que PISCES era el modelo más completo, ya que incluía variables que los otros modelos no consideraban, y además, en cuanto a los resultados de oxígeno disuelto eran similares a los observados en el modelo de Fennel.

Tras esta evaluación, se incrementaron los recursos computacionales y se realizó una modelación *hindcast* utilizando PISCES para el año 2018. En esta etapa, se implementaron mejoras como el aumento de los caudales, los cuales pasaron a utilizarse en una resolución diaria. Posteriormente se entra en la etapa actual, en la que se han centrado los esfuerzos en mejorar la representación física del modelo. A través de pruebas de sensibilidad, se incorporaron varios ríos adicionales, se ajustaron las concentraciones de nutrientes en los ríos y se modificó la descarga fluvial, estos cambios tenían como objetivo mejorar el resultado del modelo.

6.4.3 CROCO

Los resultados del modelo CROCO o hidrodinámico simulado para 2019 y 2020, mostraron un buen desempeño en las variables de salinidad y temperatura. En cuanto a la salinidad, se observó una mayor variabilidad en la capa de mezcla que en la de fondo, principalmente debido a la presencia variable de agua dulce en diferentes zonas. Las áreas con menor aporte de agua dulce, como Guafo y la costa de Chiloé, presentaron menores diferencias entre los resultados del modelo y los datos observados. En contraste, en las zonas de CnMIC y Moraleda, las diferencias entre los resultados del modelo y los datos observados fueron mayores de 1 y 2 PSU respectivamente. A pesar de estas discrepancias, el modelo logró reproducir las tendencias. Un ejemplo de esto se muestra en la Figura 54, donde el modelo replica la variación diaria, especialmente la observada en mayo de 2019, destacando el peak de baja salinidad.

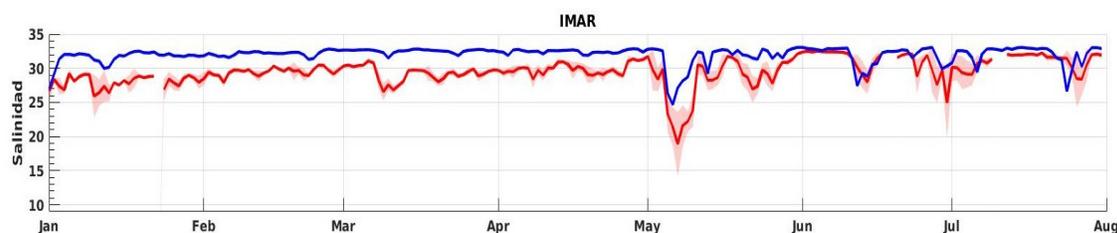


Figura 54: Variación diaria del 2019 entre los datos observados (azul) y modelados (rojo) en la boya ubicada en el seno de Reloncavi del Centro i-mar de la Universidad de los Lagos.

En los resultados de salinidad no se observaron variaciones significativas en la comparación estacional. Sin embargo, si se observó que la discrepancia entre los datos observados y el modelo es mayor en los meses de verano y otoño (enero a junio). Esto podría sugerir que parte del problema es la mezcla vertical, para abordar este asunto, en futuras evaluaciones se debería profundizar en evaluar el viento. La comparación de la variación diaria solo se pudo realizar en este punto debido a la falta de datos horarios en otros sectores. Los promedios espaciales y temporales se utilizaron para evaluar el desempeño del modelo y se eligieron en función de los datos de nitrato, que están limitados tanto temporal como espacialmente. Esta limitación en los datos impidió una evaluación más amplia y detallada en otras regiones.

Otro sector que registró una alta diferencia de salinidad en la capa de mezcla fue Moraleda, esta alta discrepancia podría deberse a que la precipitación

local depende en gran medida de la topografía exacta, la cual no siempre se resuelve adecuadamente en una escala cuadrículada de 0.25° , que es la resolución del modelo atmosférico ERA5. Por ello, se realizó una comparación entre la precipitación mensual acumulada simulada y la observada localmente en estaciones meteorológicas ubicadas en la región de Aysén, pertenecientes a la red de agrometeorología del Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Esta comparación se realizó únicamente para el año 2019. Los resultados mostraron que, aunque hubo ciertas diferencias, el modelo ERA5 tendió a sobreestimar las precipitaciones en general, por lo que se descarta esta variable como causa principal de la discrepancia observada en la salinidad (Figura 55).

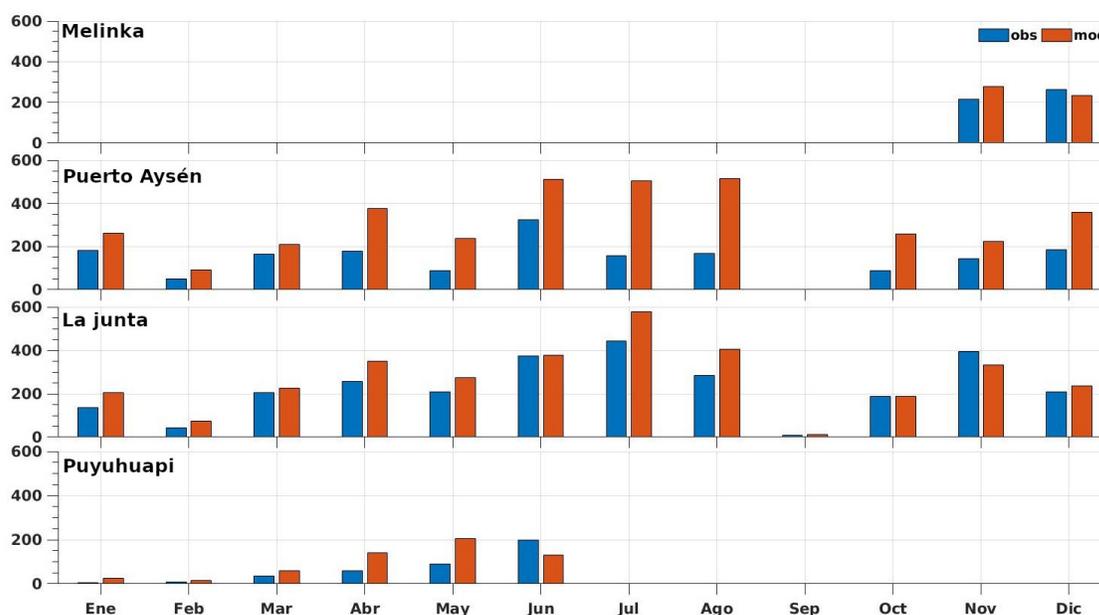


Figura 55: Precipitación acumulada mensual registrada en 2019 en estaciones meteorológicas del INIA y modelada por el modelo de reanálisis ERA5.

Un punto a considerar es que el aumento de la discrepancia en verano podría deberse en gran medida a la influencia del Campo de Hielo Norte, donde se encuentra el glaciar San Rafael. Esta área podría estar contribuyendo significativamente a las variaciones de salinidad observadas en esta estación. Según Rivera *et al.* (2007), este glaciar ha experimentado un evidente proceso de adelgazamiento y retroceso desde 1979 hasta 2001, perdiendo un total de 14 km^2 . El glaciar San Rafael es un glaciar de marea, los cuales se distinguen por alcanzar el océano y sentarse en el lecho marino. Esto implica además de generar enormes aportes de agua dulce por el derretimiento superficial (que drena como flujo

subglaciar), además de la formación de témpanos y derretimiento submarino por el contacto del frente con el océano. Estos procesos constituyen una fuente significativa de agua dulce, las investigaciones sugieren que el derretimiento aumenta cuadráticamente con la temperatura del océano circundante (Holland *et al.*, 2008). Las tasas de derretimiento submarino pueden alcanzar varios metros al día durante los meses de verano. Por ejemplo, en el glaciar LeConte en Alaska, se ha registrado un derretimiento submarino de 12 m/día en verano (Rignot *et al.*, 2010). Además, el derretimiento submarino tiene una enorme influencia en la generación de témpanos (Motyka *et al.*, 2006), lo que podría contribuir aún más a la variabilidad de la salinidad en la región. Aunque el modelo FLOW considera el derretimiento del glaciar San Rafael, es probable que este esté subestimado debido a que no incluye el derretimiento submarino ni formación de témpanos.

Además del desafío de determinar el volumen de agua procedente del derretimiento submarino, existe la dificultad de cómo incorporarlo en el modelo de manera estable. Esto se debe a que cerca del glaciar San Rafael hay una laguna proglacial, y la inclusión de grandes volúmenes de agua dulce podría desestabilizar el modelo.

En cuanto a la temperatura, el modelo fue más cálido que los datos observados. Además, se observó que el año 2019 tuvo un mejor desempeño que el 2020. Sin embargo, esta aparente diferencia podría estar influenciada por la variabilidad estacional, ya que en 2019 las estaciones evaluadas fueron otoño, invierno y primavera, mientras que en 2020 se evaluaron las estaciones de verano y primavera. Las estaciones evaluadas en 2020, especialmente el verano, se caracterizan por tener una mayor variabilidad de temperatura debido al incremento de la radiación solar y al efecto del viento. A pesar de las diferencias de temperatura entre el modelo y los datos observados, el modelo mostró un buen desempeño espacio-temporal, con una diferencia máxima de tan solo 1°C, lo cual se considera como un buen ajuste. Además, se destaca la alta temperatura observada en otoño de 2020 en la costa de Chiloé en ambas capas. Esto podría deberse a la presencia de una onda de calor, descrita por Pujol *et al.* (2022) en el material complementario. En esta publicación, se describe una ola de calor de intensidad moderada categoría I en una clasificación de 4 categorías, esta fue registrada entre el 13 de mayo y el 29 de abril del 2020 la que coincidió con el muestreo realizado en la costa de Chiloé. Es importante destacar que este peak de alta temperatura también fue simulado por el modelo, lo que sugiere que el modelo tiene la capacidad de reproducir olas de calor. Aunque se requieren más análisis para confirmarlo, este resultado es prometedor.

En resumen, para el modelo físico solo se compararon las variables de

salinidad y temperatura, pero este fue capaz de reproducir los patrones estacionales e interanuales tanto en la capa de mezcla como por debajo de ella. Aunque la salinidad y la temperatura fueron sobreestimadas, el modelo fue capaz de reproducir la variabilidad espacio-temporal de manera consistente. A pesar de ello, en el futuro se deberían incluir la evaluación de las las corrientes y mareas para una evaluación más completa, sin embargo, es importante mencionar que una de las variables más crítica para el modelo PISCES es la temperatura, ya que se utiliza directamente en algunos procesos como el crecimiento del fitoplancton, predación, entre otros (Aumont *et al.*, 2015).

6.4.4 PISCES

En este informe, se evaluó el modelo PISCES únicamente las variables de oxígeno disuelto, clorofila y nitrato. Aunque el modelo simula 24 variables, se eligieron estas tres porque son las que cuentan con mayor cantidad de información disponible. El oxígeno se cuantificó a través de CTDO, la clorofila mediante imágenes satelitales y el nitrato es la única variable cuantificada a través de muestreos.

El desempeño del modelo en cuanto al oxígeno disuelto en la capa superior fue variable. Aunque las diferencias máximas con los datos observados fueron de hasta 2 ml/l y en algunas estaciones no hubo diferencias entre los valores observados y modelados, en términos generales, no se observó una consistencia con las concentraciones observadas. Además, es importante mencionar que no se observó variación significativa entre la capa de mezcla y la de fondo, esta falta de consistencia puede deberse, en parte, al funcionamiento del modelo y, por otra parte, a la implementación del mismo.

En cuanto al funcionamiento del modelo, la discrepancia de oxígeno en la capa de mezcla puede deberse a la falta de agua dulce, la que se caracteriza por presentar altos valores de oxígeno disuelto. Sin embargo, esta explicación es aplicable solamente a las zonas de CnMIC y Moraleda. Como ya se mencionó, en estas zonas se observó una importante discrepancia de salinidad entre lo observado y lo modelado. Otro proceso clave que contribuye al aporte de oxígeno disuelto en la capa de mezcla es la producción primaria, la cual en este informe se evaluó utilizando la clorofila como proxy. En los resultados de clorofila se detectó una significativa discrepancia entre los datos observados y los modelados. Mientras que la clorofila modelada alcanzó un máximo de apenas 0.7 mg/L, los datos observados mostraron máximos de hasta 7.8 mg/L, especialmente en las estaciones de verano y primavera. La baja productividad primaria simulada en el

modelo, reflejada en los bajos niveles de clorofila, implica que las concentraciones de oxígeno en la capa de mezcla no aumentan de manera significativa, particularmente en primavera en las zonas de CnMIC y Moraleda. Además, la baja concentración de clorofila en el modelo sugiere que la cantidad de materia orgánica que se produce y eventualmente se sedimenta es insuficiente. Esta falta de materia orgánica disponible para la descomposición (remineralización) en las capas más profundas reduce aún más el consumo de oxígeno, lo que contribuye a la observación de una menor variabilidad en las concentraciones de oxígeno en profundidad.

En la capa inferior a la capa de mezcla, los valores del modelo mostraron una sobresaturación de oxígeno y no se observó una variación interanual significativa. Las discrepancias entre los resultados modelados y los datos observados fueron notables, lo que sugiere posibles limitaciones en la implementación del modelo. A pesar de que los resultados del modelo lograron capturar de manera aceptable la distribución de las masas de agua en términos de salinidad no lograron replicar con precisión las características distintivas de oxígeno disuelto y nitrato que son fundamentales para identificar diferentes masas de agua. Por ejemplo los datos observacionales indicaron que durante el verano, en la capa de fondo de la costa de Chiloé, se detectó la presencia de la masa de agua ecuatorial subsuperficial (AESS), que se asoció con bajas concentraciones de oxígeno (3 a 3.5 ml/L). Esta observación coincide con lo descrito por Silva et al. (2009), quienes caracterizan la AESS por su bajo contenido de oxígeno disuelto (2 a 3 ml/L) y su alto contenido de nitrato (20 a 30 μM). Sin embargo, el modelo no logró reproducir con precisión estas características de oxígeno disuelto, lo que sugiere que el modelo biogeoquímico aún se encuentra en un proceso de estabilización. Esto podría deberse a que las condiciones de borde no se han propagado completamente a lo largo de todo el dominio modelado, lo que implica que las condiciones iniciales todavía ejercen una influencia significativa sobre los resultados obtenidos. Es importante destacar que el modelo fue sometido a un tiempo de estabilización (*spin-up*) de solo 3 meses antes de la simulación completa del año 2018. Este período de estabilización parece ser insuficiente para que el sistema alcance un equilibrio dinámico, lo que permite que las condiciones iniciales persistan y afecten negativamente la precisión de las simulaciones.

En cuanto al tiempo de estabilización, algunos autores sugieren períodos mucho más largos para alcanzar un equilibrio adecuado como, por ejemplo, Ross *et al.* (2023) recomiendan un *spin-up* de al menos 10 años antes de la fecha de análisis. Es importante destacar que, en el caso de las condiciones biogeoquímicas, el *spin-up* debe ser extenso, ya que muchas de las variables

biogeoquímicas, como las concentraciones de nutrientes, oxígeno, y la productividad primaria, se obtienen a partir de climatologías. Estas climatologías son promedios a largo plazo que representan las condiciones generales de una región, pero para que estas variables sean verdaderamente representativas de la zona de estudio específica, es crucial un período de estabilización adecuado.

Sin embargo, es importante destacar que una de las principales limitaciones de los *spin-up* largos es el tiempo de cómputo necesario para llevarlos a cabo. En particular, el modelo PISCES, un modelo de complejidad intermedia que incluye 24 variables biogeoquímicas, presenta un desafío significativo en este aspecto. PISCES realiza simulaciones en línea, lo que implica que primero ejecuta la simulación física (CROCO) y luego corre el modelo biogeoquímico. Este proceso integrado es altamente demandante en términos computacionales, de modo que la simulación de un solo mes puede tardar aproximadamente 3.5 días en completarse. Por ejemplo, para simular 10 años utilizando este modelo, se requerirían más de 420 días de tiempo de cómputo continuo, lo cual puede no ser viable debido a las limitaciones en los recursos computacionales disponibles. Aunque se han logrado mejoras en los tiempos de cómputo ya que en las primeras etapas de este objetivo, un mes de simulación con PISCES tomaba una semana. Además, a este tiempo debe sumarse el necesario para realizar pruebas y ajustes, es decir, encontrar las mejores parametrizaciones que optimicen la simulación. Este proceso de afinación del modelo es esencial para garantizar que las simulaciones sean lo más precisas y eficientes posible, lo que incrementa aún más las demandas de tiempo y recursos. Sin embargo, es importante destacar que la duración del *spin-up* también depende de los aspectos específicos que se está interesado en evaluar. Como se observó en los resultados, los procesos en la capa de mezcla son más dinámicos en comparación con la capa de fondo, donde la escala temporal de ajuste es mucho mayor. Otro factor importante a considerar en el tiempo de *spin-up* son las condiciones iniciales, ya que si existen buenas condiciones iniciales estas puede reducir el tiempo necesario para el *spin-up*, debido a que las condiciones estarían más cerca del estado de equilibrio.

En conjunto, estos factores subrayan la necesidad de equilibrar cuidadosamente la duración del *spin-up* con la optimización de las simulaciones y los objetivos específicos que se desean evaluar en el modelo, siempre considerando las limitaciones prácticas de tiempo y recursos. Por ello, en el futuro, se planea mejorar tanto las condiciones iniciales como el tiempo de estabilización. Para ello, se utilizarán datos del modelo biogeoquímico *hindcast* de Mercator, el cual fue empleado por Linford et al. (2023) para evaluar el ingreso de la masa de

agua AESS por la boca del Guafo. Hasta ahora, las condiciones iniciales provenían de datos de CIMAR. Además, se aumentará el tiempo de estabilización, pasando de 1 año, utilizado en esta etapa, a 5 años. Con estas mejoras, se busca probar la configuración de las parametrizaciones y evaluar su desempeño en la simulación de la clorofila en la capa de mezcla, con el objetivo de lograr una representación más precisa de las concentraciones de oxígeno en esta capa.

En resumen, los modelos numéricos son indispensables para comprender y predecir procesos costeros complejos. Al integrar modelos físicos con biogeoquímicos, se puede obtener una visión holística de los sistemas marinos, lo que es fundamental para la gestión ambiental y la conservación de los recursos costeros. La capacidad de estos modelos para simular escenarios futuros y evaluar diferentes estrategias de manejo los convierte en herramientas clave para la toma de decisiones informada en la protección y uso sostenible de los ecosistemas costeros.

6.5 Modelo oleaje MOSA-WW3

Un modelo de oleaje basado en el modelo WW3 fue implementado para la región de Los Lagos y Aysén, al cual referiremos como MOSA-WW3. El desempeño del modelo fue evaluado utilizando diferentes bases con observaciones de boyas de oleaje. En general, se logra representar de buena manera el oleaje del dominio, ya que los valores de altura de ola significativa demuestran una variabilidad con valores cercanos a las mediciones de la boya SHOA (sesgo = -0.09m). De igual forma, se encuentran grandes diferencias en la representatividad de la dirección y periodo del oleaje debido a que sus estadísticos demuestran que la mayor parte del tiempo se sobrestiman las magnitudes y no se logra representar de manera adecuada su variabilidad temporal registrada por la boya SHOA.

6.5.1 Disponibilidad de observaciones

La validación del modelo de pronóstico operacional MOSA-WW3 se realizó mediante la comparación con diversas fuentes de datos observacionales. Se utilizaron mediciones de una boya Watchkeeper del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (SHOA) y productos satelitales NOAA-CoastWatch basados en seis campañas distintas. Además, se utilizaron datos de

un modelo operacional de oleaje administrado por Copernicus Marine Service. Estas comparaciones son fundamentales para evaluar la precisión y fiabilidad del modelo bajo distintos escenarios. Sin embargo, se identificaron importantes limitaciones en la disponibilidad de datos observacionales en el Mar interior de Chiloé. La boya del SHOA, una de las pocas disponibles y de libre acceso en esta región, dejó de funcionar a principios de diciembre de 2023 y aún no ha sido restituida. Esta ausencia de datos es significativa, ya que reduce la capacidad de validación en una zona crítica. Además, la cantidad de puntos de observación proporcionados por satélites también disminuye en el Mar interior, y algunos satélites ni siquiera realizan mediciones en esta área.

Los satélites presentan limitaciones adicionales, ya que no abarcan fiordos y canales en sus mediciones, lo que deja importantes áreas sin datos observacionales. Esta falta de cobertura y disponibilidad de boyas resaltan la necesidad urgente de instalar más boyas en el Mar interior de Chiloé y sus alrededores. Una mayor cantidad de boyas permitiría obtener datos más robustos y consistentes, esenciales para validar y mejorar el desempeño del modelo MOSA-WW3 de manera concluyente.

6.5.2 Grillas Computacionales

Para la simulación del oleaje en el Mar interior de Chiloé, se compararon cinco tipos de grillas computacionales, evaluando diversas fuentes de información batimétrica como GEBCO, ETOPO1 y la batimetría utilizada en MOSA-CROCO. En este análisis, se distinguió entre una grilla que incorpora información de obstrucciones (G2) y otra que no (G3), encontrando que la consideración de obstrucciones resultó en mejores resultados. Además, se evaluó el impacto de una mayor resolución utilizando grillas obtenidas de MOSA-CROCO. Aunque la grilla de mayor resolución ofreció una representación más precisa del oleaje, las mejoras fueron marginales considerando el alto tiempo de cómputo asociado a una resolución de 0.0125° .

Se observó que todas las grillas estructuradas presentaron comportamientos similares entre ellas, diferenciándose notablemente de la grilla no estructurada. Este hallazgo es particularmente relevante para una zona como la Isla Desertores, donde las grillas estructuradas lograron una mejor representación comparada con la grilla no estructurada. En términos generales, y sin profundizar en los sistemas de fiordos y canales de las regiones X y XI, las

grillas estructuradas demostraron un rendimiento superior. De esta manera, se encontró una mejor representación de las variables de oleaje con la grilla estructurada de 0.025° basada en Etopo1 y con inclusión de información de obstrucciones (G2). Aparte de obtener mejores puntuaciones que la grilla no-estructurada, G2 tiene un tiempo de cómputo de aproximadamente la mitad del caso G1. En otras palabras, aparte de obtener un mejor desempeño tiene asociado un menor costo computacional. Este resultado subraya la importancia de seleccionar adecuadamente la grilla computacional, considerar las obstrucciones y la resolución en la modelación del oleaje para obtener predicciones más precisas y fiables.

6.5.3 Parametrizaciones físicas

La evaluación del desempeño de las distintas parametrizaciones físicas se llevó a cabo tanto sobre la grilla no estructurada como en la grilla estructurada con mejor rendimiento, G2. Esta evaluación se centró en la comparación de distintos términos fuente y sumidero relacionados con el crecimiento y la disipación de energía debido al viento, incluidos en los paquetes ST2, ST3, ST4 y ST6. Adicionalmente, se consideraron cuatro métodos distintos para calcular el estrés del viento sobre el oleaje, disponibles en los switches FLX0, FLX2, FLX3 y FLX4. Los resultados mostraron que la grilla estructurada ofrecía mejores representaciones de la altura significativa (H_s), la dirección media (D_m) y el periodo peak (T_p) en comparación con la grilla no estructurada. Entre los diferentes paquetes, el switch ST6 proporcionó la mejor representación de la altura significativa del oleaje en los casos E1, E2 y E7. Sin embargo, el paquete ST2 fue superior en la representación de la dirección media y el periodo peak. El paquete ST2 obtuvo la mejor puntuación general, demostrando un equilibrio más adecuado entre los tres parámetros del oleaje analizados.

Es importante resaltar que la metodología de evaluación del desempeño de Beyá et al. (2017) permite la variación de ponderaciones para crear un ambiente de comparación más controlado. Esto significa que se puede ajustar la importancia relativa de cada parámetro estadístico o variable del oleaje según las prioridades del estudio. Por ejemplo, se puede asignar mayor importancia a H_s y menor a T_p , que presenta más dificultades para modelarse. Asimismo, se puede priorizar la representación de la variabilidad temporal del fenómeno o la precisión en la distancia promedio entre los valores simulados y observados. En el presente documento, se otorgó la misma importancia a los tres parámetros (H_s , D_m y T_p).

Sin embargo, para un análisis más riguroso, podría ser necesario enfocar más en la altura del oleaje en ciertos escenarios. La sensibilidad a las parametrizaciones físicas sigue siendo un área de interés debido a las múltiples posibilidades y grados de libertad. Sería valioso explorar la activación de switches adicionales como STAB2 y STAB3, asociados a correcciones de estabilidad en el input de viento y compatibles con ST2 y ST3 respectivamente, así como el switch UOST, diseñado para reducir errores locales asociados a características batimétricas y costeras no resueltas, especialmente con información de obstrucciones. En consecuencia, es indispensable continuar evaluando la eficiencia del modelo y comparando sus resultados con más fuentes de información en distintas zonas del dominio de simulación. Por lo tanto, es de suma importancia profundizar en la sensibilidad ante las parametrizaciones físicas para optimizar el modelo de pronóstico de oleaje.

6.5.4 Comparación Satelital

Las simulaciones de oleaje utilizando la grilla estructurada demostraron un mejor rendimiento en comparación con la grilla no estructurada. Aunque ambos métodos presentan una subestimación de las alturas significativas de ola (H_s), la grilla estructurada logró mayor precisión y menor error en las mediciones. Es importante destacar que estos resultados son válidos principalmente en aguas abiertas, ya que los satélites no miden entre fiordos y canales, lo que limita la cantidad de datos disponibles para el Mar interior de Chiloé. A pesar de esta reducción significativa en el número de mediciones, las simulaciones lograron representar el oleaje de manera general. Estos hallazgos recalcan la necesidad de mejorar los modelos para capturar con mayor precisión las alturas de ola y seguir fortaleciendo la base de datos de observaciones en la región, especialmente en áreas con baja cobertura satelital.

6.5.5 Confección de grilla no estructurada

En la comparación entre las grillas estructuradas y no estructuradas, se ha observado que las grillas estructuradas presentan un desempeño superior. Esta mejor representación por parte de las grillas estructuradas podría estar relacionada con la confección y disposición de la no estructurada, las cuales muestran defectos en dos sentidos principales.

Seg3n las recomendaciones y pr3cticas establecidas, las grillas no estructuradas basadas en tri3ngulos deben ser confeccionadas con tri3ngulos lo m3s equil3teros posible. Sin embargo, la grilla no estructurada utilizada en este estudio presenta una cantidad significativa de tri3ngulos que no siguen este aspecto. Esta configuraci3n puede contribuir a una representaci3n inadecuada de las din3micas del oleaje. Adem3s de la geometr3a desfavorable de los tri3ngulos, se han identificado puntos flotantes en la grilla no estructurada que act3an como fuentes de error en la transmisi3n de informaci3n entre nodos. Estos puntos flotantes pueden inducir inconsistencias y errores en las simulaciones del modelo, afectando la precisi3n del pron3stico del oleaje. Dada esta problem3tica, resulta esencial comparar otras grillas no estructuradas para contrastar su desempe1o frente a las grillas estructuradas. La confecci3n de grillas no estructuradas es un proceso sumamente complejo que requiere una cuidadosa consideraci3n de las condiciones f3sicas del oleaje.

En conclusi3n, aunque las grillas no estructuradas ofrecen flexibilidad y detalle en la representaci3n de las caracter3sticas batim3tricas y del oleaje, su confecci3n requiere una atenci3n meticulosa para evitar errores que puedan comprometer la precisi3n de las simulaciones. La comparaci3n sistem3tica de diferentes grillas no estructuradas con las estructuradas permitir3 identificar las mejores pr3cticas y optimizar el pron3stico operacional de oleaje en el sistema MOSA-WW3.

6.5.6 Importancia del sistema de pron3stico operacional de oleaje

Un sistema de pron3stico de oleaje de libre acceso para el Mar interior de Chilo3 representa una herramienta fundamental para diversas actividades y sectores en la regi3n. Este tipo de sistema no solo ofrece beneficios significativos en t3rminos de seguridad y eficiencia operativa, sino que tambi3n contribuye al desarrollo cient3fico y a la gesti3n ambiental. Las instalaciones mar3timas, incluyendo puertos y plataformas de cultivo, dependen de informaci3n precisa del oleaje para operar de manera segura y eficiente. Un pron3stico confiable del oleaje permite a los gestores planificar y ejecutar operaciones con mayor seguridad, minimizando el riesgo de da1os y accidentes. Adem3s, la optimizaci3n de recursos es posible con pron3sticos precisos, ya que permite programar el uso de equipos y personal de manera eficiente, evitando tiempos muertos y maximizando la productividad de las instalaciones mar3timas. La capacidad de prever las condiciones del oleaje es fundamental para la toma de decisiones

informadas sobre los cierres de puerto. Con un pronóstico fiable, las autoridades portuarias pueden anticipar condiciones peligrosas y cerrar los puertos de manera preventiva, protegiendo la seguridad de las operaciones y minimizando interrupciones innecesarias. Esto también ayuda a prevenir accidentes marítimos, protegiendo vidas humanas y bienes materiales.

Por otra parte, contar con una climatología del oleaje en la zona es esencial para la planificación a largo plazo de proyectos marítimos y la construcción de infraestructuras resistentes. La climatología proporciona datos históricos y patrones de comportamiento del mar, fundamentales para diseñar estructuras que puedan soportar las condiciones oceánicas. Además, estos datos son vitales para estudios de impacto ambiental, permitiendo evaluar cómo las actividades humanas afectan el mar y diseñar medidas de mitigación adecuadas. El atlas de oleaje para Chile es una herramienta valiosa, pero su exclusión del Mar interior de Chiloé limita su utilidad. Incluir esta región en un sistema de pronóstico proporcionaría una herramienta más completa y útil para los usuarios locales. La inclusión de esta zona específica respondería a las necesidades particulares de los usuarios, mejorando la pertinencia y aplicabilidad de MOSA-WW3. Desarrollar un sistema de pronóstico y bases de datos de libre acceso para el Mar interior de Chiloé representa un desafío técnico y científico que impulsará la innovación y el desarrollo en la modelación del oleaje. La contribución a la ciencia y la tecnología en esta área fortalecerá la capacidad de respuesta y gestión de los fenómenos marinos en la región.

En resumen, se destaca los avances significativos en la implementación de modelos operacionales para la Patagonia chilena, enfocados en la simulación de variables oceanográficas y atmosféricas, críticas para la gestión costera y la predicción de eventos extremos. Los modelos MOSA-CROCO y MOSA-WRF han mostrado un rendimiento sólido en la representación de procesos oceanográficos y atmosféricos, aunque persisten desafíos en la simulación de salinidad superficial y eventos de viento extremo. El desarrollo del modelo MOSA-MAG para la región de Magallanes y la implementación de MOSA-WW3 para el pronóstico de oleaje en Los Lagos y Aysén subrayan la importancia de continuar mejorando la precisión y cobertura de estos sistemas, mas aun en zonas de baja cobertura observacional, donde es de alto valor contar con información ambiental oportuna y operacional.

Estas herramientas permite posicionarnos de mejor forma para enfrentar los desafíos en un contexto de cambio climático y garantizar una gestión más efectiva de los recursos marinos en la zona sur-austral de Chile.

7. Conclusiones

Este informe destaca los avances significativos en la implementación de modelos operacionales para la Patagonia chilena, enfocados en la simulación de variables oceanográficas y atmosféricas.

El modelo MOSA-CROCO ha demostrado ser un modelo maduro y eficiente para la simulación de procesos oceánicos en los mares interiores de Los Lagos y Aysén, aunque aún enfrenta desafíos en la representación precisa de la salinidad superficial, especialmente durante los períodos de mayor estratificación. Se trabajará en las parametrizaciones y en las fuentes de ríos, con el fin de mejorar la representación de las estructuras termohalinas verticales y de la corriente.

Por su parte MOSA-WRF ha mostrado un destacado rendimiento en la predicción de temperatura y viento, superando incluso al modelo europeo ERA5 en la simulación de eventos de viento extremo, lo que es crucial para la gestión y anticipación de contingencias en un contexto de cambio climático.

Mientras MOSA-MAG es una apuesta innovadora para la región de Magallanes, proporcionando información casi en tiempo real en una zona con escasa cobertura de datos in situ; aún requiere ajustes en la calibración, especialmente en la temperatura y salinidad superficial, además que requiere mejorar los aportes de agua dulce glaciar. Se está trabajando en una nueva malla que junto con la implementación de un modelo atmosférico de alta resolución, se espera que mejore la calidad de los resultados

Se presenta el desarrollo del modelo biogeoquímico MOSA-BGQ, basado en el modelo PISCES, el cual ha logrado capturar de manera aceptable la distribución de masas de agua, pero presenta discrepancias significativas en la simulación de oxígeno disuelto y clorofila, lo que sugiere la necesidad de un tiempo de estabilización más prolongado y mejores condiciones iniciales. Se realizarán simulaciones de reanálisis con el objeto de mejorar la condición inicial, además de pruebas de sensibilidad de diversos parámetros críticos que pueden afectar el consumo de oxígeno disuelto en el modelo.

Finalmente, en este informe se exhibe el desarrollo e implementación de un modelo operacional de oleaje MOSA-WW3, el cual ha mostrado un buen desempeño en la predicción de la altura de ola significativa en Los Lagos y Aysén, aunque persisten desafíos en la precisión de la dirección y el periodo del oleaje.



La implementación de este modelo resalta la necesidad de mejorar la cobertura de observaciones en el Mar interior de Chiloé para optimizar la precisión y utilidad del sistema.

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).

Albretsen, J. (2011). NorKyst-800 report no. 1: User manual and technical descriptions. *Fisken og havet*.

Amante, C. & Eakins, B., (2009). ETOPO1 Arc-Minute Global Relief Model: procedures, data sources and análisis. (doi: 10.7289/V5C8276M).

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.

Aumont O., & Bopp L. (2006). Globalizing results from ocean in *situ* iron fertilization studies. *Global Biogeochem. Cycles* 20, GB2017. doi:10.1029/2005GB002591.

Aumont, O., Ethe, C., Tagliabue, A., Bopp, L., & Gehlen, M. (2015). Pisces-v2: An ocean biogeochemical model for carbon and ecosystem studies. *Geoscientific Model Development*, 8, 2465-2513. doi:10.5194/gmd-8-2465-2015.

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.

Beyá, J., Álvarez, M., Gallardo, A., Hidalgo, H., & Winckler, P. (2017). Generation and validation of the Chilean Wave Atlas database. *Ocean Modelling*, 16-32. doi: 10.1016/j.ocemod.2017.06.004

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*, 237, 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.

Buchanan, P. J., & Tagliabue, A. (2021). The regional importance of oxygen demand and supply for historical ocean oxygen trends. *Geophysical Research Letters*, 48. doi:10.1029/2021GL094797.



Castro, J. S., Sievers, H., & López, M. C. (2017). Variabilidad espacial y temporal de la temperatura, salinidad y densidad en el fiordo Aysén, Chile. *Revista Estudios Hemisféricos y Polares*, 8(2), 21-36.

Chassignet, E. P., & Verron, J. (1998). *Ocean Modeling and Parameterization*, vol. 516 of *Mathematical and Physical Sciences*.

Chawla, A. & Tolman, H. (2008). Obstruction grids for spectral wave models. *Ocean Modelling*, volumen 22. doi: 10.1016/j.ocemod.2008.01.003.

Ciavatta, S., Kay, S., Saux-Picart, S., Butenschön, M. and Allen, J.I., (2016). Decadal reanalysis of biogeochemical indicators and fluxes in the North West European shelf-sea ecosystem. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 121(3), pp.1824-1845. Devlin, M. J., Prins, T. C., Enserink, L., Leujak,

Cucco, A., Martín, J., Quattrocchi, G., Fenco, H., Umgiesser, G., & Fernández, D. A. (2022). Water circulation and transport time scales in the Beagle Channel, southernmost tip of South America. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10(7), 941.

Dagestad, K.-F., Röhrs, J., Breivik, Ø., and Ådlandsvik, B.: OpenDrift v1.0: a generic framework for trajectory modelling, (2018). *Geosci. Model Dev.*, 11, 1405-1420, <https://doi.org/10.5194/gmd-11-1405-2018>, 2018.

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.

Devlin, M. J., Prins, T. C., Enserink, L., Leujak, W., Heyden, B., Axe, P. G., ... & Iglesias-Campos, A. (2023). A first ecological coherent assessment of eutrophication across the North-East Atlantic waters (2015–2020). *Frontiers in Ocean Sustainability*, 1, 1253923.

Diaz R.J., & Rosenberg, R. (2008). Spreading dead zones and consequences for marine ecosystems. *Science* 321:926–29.

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.

Fennel K. & Testa JM. (2019). Biogeochemical Controls on Coastal Hypoxia. *Ann Rev Mar Sci.*;11:105-130. doi: 10.1146/annurev-marine-010318-095138. PMID: 29889612.

Flanders Marine Institute (VLIZ), (2024). Intergovernmental Oceanographic Commission (IOC) . Sea level station monitoring facility. Accessed at <https://www.ioc-sealevelmonitoring.org> on 2024-07-29 at VLIZ. DOI: 10.14284/482.

Fulton E.A. & Link J.S., (2014). Modeling approaches for marine ecosystem-based management, in: M.J. Fogarty, J.J. McCarthy (Eds.), *Marine Ecosystem Management: The Sea*, vol. 16, Harvard University Press, 2014, pp. 121–170.

Gastineau, G. & Soden, B. J. (2009). Model projected changes of extreme wind events in response to global warming . *Geophys. Res. Lett.* 36, L10810

GEBCO Compilation Group, (2020). GEBCO 2020 Grid (doi:10.5285/a29c5465-b138-234d-e053-6c86abc040b9).

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-Fontetalba, C.; Flores-Aqueveque, V.; Alfaro, S.C. (2022). Variability of the Southwestern Patagonia (51°S) Winds in the Recent (1980–2020) Period: Implications for Past Wind Reconstructions. *Atmosphere*, 13, 206.

Holland, P. R., Jenkins, A., & Holland, D. M. (2008). The Response of Ice Shelf Basal Melting to Variations in Ocean Temperature. *Journal of Climate*, 21(11), 2558-2572. <https://doi.org/10.1175/2007JCLI1909>.

Huang, B., C. Liu, V. Banzon, E. Freeman, G. Graham, B. Hankins, T. Smith, and H.-M. Zhang, (2020). Improvements of the Daily Optimum Interpolation Sea Surface Temperature (DOISST) Version 2.1, *Journal of Climate*, 34, 2923-2939. doi: 10.1175/JCLI-D-20-0166.1.

Holmer, M. (2010). Environmental issues of fish farming in offshore waters: perspectives, concerns and research needs. *Aquaculture Environment Interactions*, 1(1), 57-70.



Hyder, K., Rossberg, A. G., Allen, J. I., Austen, M. C., Barciela, R. M., Bannister, H. J., ... & Paterson, D. M. (2015). Making modelling count-increasing the contribution of shelf-seas community and ecosystem models to policy development and management. *Marine Policy*, 61, 291-302.

Iriarte, J. L., Pantoja, S., & Daneri, G. (2014). Oceanographic processes in Chilean fjords of Patagonia: from small to large-scale studies. *Progress in Oceanography*, 129, 1-7.

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.

Linford, P., Pérez-Santos, I., Montes, I., Dewitte, B., Buchan, S., Narváez, D., (2023). Recent deoxygenation of Patagonian fjord subsurface waters connected to the Peru–Chile undercurrent and equatorial subsurface water variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 37, e2022GB007688. <https://doi.org/10.1029/2022GB007688>

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.

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.



Motyka, R. J., Hunter, L., Echelmeyer, K. A., and Connor, C. (2003). Submarine melting at the terminus of a temperate tidewater glacier, LeConte Glacier, Alaska, USA. *Annals of Glaciology*, 36, 57–65.

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.

Narváez, D. A., Vargas, C. A., Cuevas, L. A., García-Loyola, S. A., Lara, C., Segura, C., ... & Broitman, B. R. (2019). Dominant scales of subtidal variability in coastal hydrography of the Northern Chilean Patagonia. *Journal of Marine Systems*, 193, 59-73.

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 v spread between salmon farms in Southern Chile based on numerical simulations of currents. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 158, 31-39.

OSPAR, (2023). Concentrations of Dissolved Oxygen Near the Seafloor in the Greater North Sea, Celtic Seas and Bay of Biscay and Iberian Coast.

Paduan, J. D., & Shulman, I. (2004). HF radar data assimilation in the Monterey Bay area. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 109(C7).

Palma, E. D., & Matano, R. P. (2012). A numerical study of the Magellan Plume. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(C5).

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.

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.

Pujol C., Pérez-Santos I., Barth A. and Alvera Azcarate A. (2022). Marine heatwaves offshore central and south Chile: Understanding forcing mechanisms during the years 2016-2017. *Front. Mar. Sci.* 9. doi: 10.3389/fmars.2022.800325.

Rabalais N., Turner R., & Wiseman W.Jr. (2002). Gulf of Mexico hypoxia, A.K.A. “the dead zone.” *Annu. Rev. Ecol. Syst.* 33:235–63.

Ravichandran, M. (2011). In-Situ Ocean Observing System. In *Operational oceanography in the 21st century* (pp. 55-90). Springer, Dordrecht.

Rignot, E., Koppes, M. & Velicogna, I. (2010). Rapid submarine melting of the calving faces of West Greenland glaciers. *Nature Geosci* 3, 187–191. <https://doi.org/10.1038/ngeo765>.

Rivera A., Benham T., Casassa G., Bamber J. , & Dowdeswell J.A. (2007). Ice elevation and areal changes of glaciers from the Northern Patagonia Icefield, Chile. *Glob. Planet. Change*, 59 (2007), pp. 126-137, 10.1016/j.gloplacha.2006.11.037.

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.

Ross, A. C., Stock, C. A., Adcroft, A., Curchitser, E., Hallberg, R., Harrison, M. J., Hedstrom, K., Zadeh, N., Alexander, M., Chen, W., Drenkard, E. J., du Pontavice, H., Dussin, R., Gomez, F., John, J. G., Kang, D., Lavoie, D., Resplandy, L., Roobaert, A., Saba, V., Shin, S.-I., Siedlecki, S., and Simkins, J. (2023). A high-resolution physical–biogeochemical model for marine resource applications in the northwest Atlantic (MOM6-COBALT-NWA12 v1.0), *Geosci. Model Dev.*, 16, 6943–6985, <https://doi.org/10.5194/gmd-16-6943-2023>.

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.

Saldías, G. S., Hernández, W., Lara, C., Muñoz, R., Rojas, C., Vásquez, S., ... & Soto-Mardones, L. (2021). Seasonal variability of SST fronts in the Inner Sea of Chiloé and its adjacent coastal ocean, northern Patagonia. *Remote Sensing*, 13(2), 181.

1.

Salinas, C. X., Palacios, E., Pozo, K., Torres, M., Rebolledo, L., Gómez, V., ... & Galbán, C. (2024). Marine litter pollution in a subantarctic beach of the Strait of Magellan, Punta Arenas, Chile. *Marine Pollution Bulletin*, 202, 116313.

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.

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. A., & Silva, N. (2006). Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. Avances en el conocimiento oceanográfico de las aguas interiores chilenas, Puerto Montt a cabo de Hornos. Comité Oceanográfico Nacional-Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, 53-58.

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., & Calvete, C. (2002). Características oceanográficas físicas y químicas de canales australes chilenos entre el golfo de Penas y el Estrecho de Magallanes (Crucero CIMAR-FIORDOS 2). *Cienc. Tecnol. Mar*, 25(1), 23-88.

Silva, N., Rojas, N., and Fedele, A. (2009). Water masses in the Humboldt Current System: Properties, distribution, and the nitrate deficit as a chemical water mass tracer for Equatorial Subsurface Water off Chile, *Deep-Sea Res. Pt. II*, 56, 1004–1020, <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2008.12.013>.

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.



Strub, P. T., James, C., Montecino, V., Rutllant, J. A., & Blanco, J. L. (2019). Ocean circulation along the southern Chile transition region (38–46 S): Mean, seasonal and interannual variability, with a focus on 2014–2016. *Progress in Oceanography*, 172, 159-198.

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.

The WAVEWATCH III Development Group (WW3DG), (2019). User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 6.07. Technical Note 333. College Park, MD, USA: NOAA/NWS/NCEP/MMAB.

Trenberth, K. E. (2008). Necesidades de observación para la predicción y adaptación climáticas. *Boletín de la OMM*, 57(1), 17-21.

Van Leeuwen, S. M., H.-J. Lenhart, T. C. Prins, A. Blauw, X. Desmit, L. Fernand, R. Friedland, O. Kerimoglu, G. Lacroix, A. van der Linden, A. Lefebvre, J. van der Molen, M. Plus, I. Ruvalcaba Baroni, T. Silva, C. Stegert, T. A. and Troost and L. Vilmin . (2023). Deriving pre-eutrophic conditions from an ensemble model approach for the North-West European seas. *Front. Mar. Sci.* 10: 1129951, doi: 10.3389/fmars.2023.1129951

Vásquez Anacona, H.; Mattar, C.; Alonso-de-Linaje, N.G.; Sepúlveda, H.H.; Crisóstomo, J.(2023). Wind Simulations over Western Patagonia Using the Weather Research and Forecasting Model and Reanalysis. *Atmospher* , 14, 1062.

Weidemann, S. S., Arigony-Neto, J., Jaña, R., Netto, G., Gonzalez, I., Casassa, G., & Schneider, C. (2020). Recent climatic mass balance of the Schiaparelli Glacier at the Monte Sarmiento Massif and reconstruction of Little Ice Age climate by simulating steady-state glacier conditions. *Geosciences*, 10(7), 272.

Welch, P. (1967). The use of fast Fourier transform for the estimation of power spectra: a method based on time averaging over short, modified periodograms. *IEEE Transactions on Audio and Electroacoustics*, 15(2), 70–73.

Wilks, D. S. (2011). Statistical methods in the atmospheric sciences. Academic press.



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.

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.

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:

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \rho g \quad (1)$$

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.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

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

$$\rho = \rho_0 = cte \quad (3)$$

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.

$$\vec{u} \cdot \nabla(-H) = w \quad (4)$$

5. **Conservación de momento horizontal.**

$$K_{Mv} \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| u}{\rho_0}; K_{Mv} \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{-C_d |\vec{u}| v}{\rho_0}; \quad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla v + fu = \frac{-1}{\rho_0} \frac{\partial P}{\partial y} + \nabla_h (K_{Mh} \cdot \nabla_h v) + \frac{\partial}{\partial z} K_{Mv} \left(\frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (6)$$

6. **Ecuaciones conservativas de trazadores temperatura y salinidad**

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla T = \nabla_h (K_{Th} \cdot \nabla_h T) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Tv} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (7)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla S = \nabla_h (K_{Sh} \cdot \nabla_h S) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{Sv} \frac{\partial S}{\partial z} \right) \quad (8)$$

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-hidrostáticos, es decir, las fuerzas de los gradientes de presión y gravedad no se

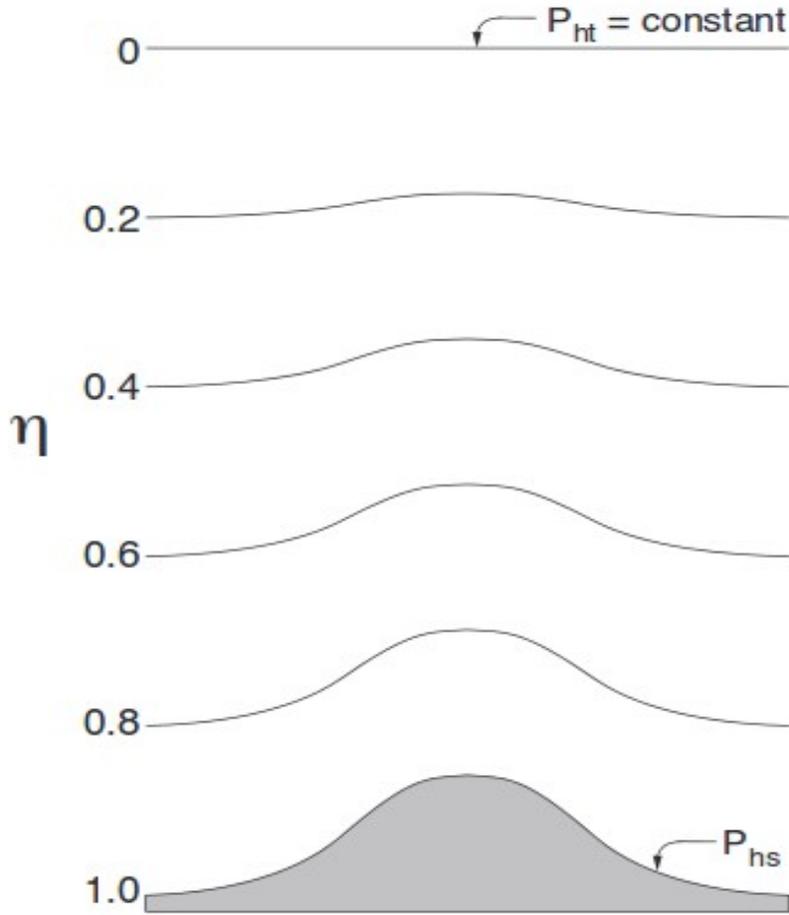
encuentran equilibradas, permitiendo la libre trayectoria de las parcelas de aire en la componente vertical. De igual manera existe la opci3n para activar el m3dulo hidrost3tico. Posee un sistema de coordenadas Eulerianas (Skamarock et al., 2005) en donde el observador se encuentra en un punto fijo con respecto al movimiento del fluido. Cuenta con un m3dulo de asimilaci3n de datos, y una arquitectura de software que favorece la computaci3n paralela y la extensibilidad del sistema. Finalmente el modelo ofrece una amplia gama de aplicaciones meteorol3gicas a trav3s de escalas de decenas de metros a miles de kil3metros.

WRF ofrece dos n3cleos din3micos para el c3lculo de las ecuaciones que gobiernan la atm3sfera, estos son: el Advanced Research WRF (ARW), y el Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM). Para el caso de MOSA-WRF, este se bas3 en el n3cleo WRF-ARW desarrollado principalmente por NCAR, siendo la continuaci3n del modelo atmosf3rico MM5. Este n3cleo integra las ecuaciones de Euler no hidrost3ticas compresibles (Skamarock et al., 2005) y se formulan usando una coordenada vertical de presi3n hidrost3tica que sigue al terreno, denotada por η y definida como:

$$\eta = \frac{P_h - P_{ht}}{\mu} \quad (9)$$

donde $\mu = P_{hs} - P_{ht}$, P_h es el componente hidrost3tico de la presi3n, y P_{hs} y P_{ht} se refieren a valores entre la superficie y los l3mites superiores, respectivamente. La definici3n de coordenadas (9) propuesta por Laprise (1992), es la coordenada σ tradicional utilizada en muchos modelos atmosf3ricos hidrost3ticos. η var3a desde un valor de 1 en la superficie hasta 0 en el l3mite superior del dominio del modelo (Fig. Error: Reference source not found). Esta coordenada vertical tambi3n se conoce como coordenada vertical de masa.

Como $\mu(x,y)$ representa la masa por unidad de 3rea dentro de la columna en el dominio del modelo en (x, y) las variables de forma de flujo apropiadas son:



$$V = \mu v = (U, V, W), \Omega = \mu \eta', \Theta = \mu \theta \quad (10)$$

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 $\varphi = gz$ (el geopotencial), p (presión) y $\alpha = 1 / \rho$ (la densidad inversa). Usando las variables definidas anteriormente, las ecuaciones de Euler se pueden escribir como:

$$\partial_t U + (\nabla \cdot Vu) - \partial_x(p\varphi_\eta) + \partial_x(p\varphi_x) = F_U \quad (11)$$

$$\partial_t V + (\nabla \cdot Vv) - \partial_y(p\varphi_\eta) + \partial_y(p\varphi_y) = F_V \quad (12)$$

$$\partial_t W + (\nabla \cdot Vw) - g(\partial_\eta p - \mu) = F_w \quad (13)$$

$$\partial_t \Theta + (\nabla \cdot V\theta) = F_\Theta \quad (14)$$

$$\partial_t \mu + (\nabla \cdot V) = 0 \quad (15)$$

$$\partial_t \varphi + \mu^{-1}[(V \cdot \nabla_\varphi) - gW] = 0 \quad (16)$$

Junto con la relación de diagnóstico para la densidad inversa:

$$\partial_\eta \varphi = -\alpha \mu \quad (17)$$

y la ecuación de estado

$$p = p_0 (R_d \theta / p_0 \alpha)^\gamma \quad (18)$$

Entre (11) - (18), los subíndices x , y y η denotan diferenciación,

$$\nabla \cdot V_a = \partial_x (U a) + \partial_y (V a) + \partial_\eta (\Omega a) \quad (19)$$

y

$$V \cdot \nabla_a = U \partial_x a + V \partial_y a + \Omega \partial_\eta a \quad (20)$$

donde a representa una variable genérica. $\gamma = c_p/c_v = 1.4$ 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.

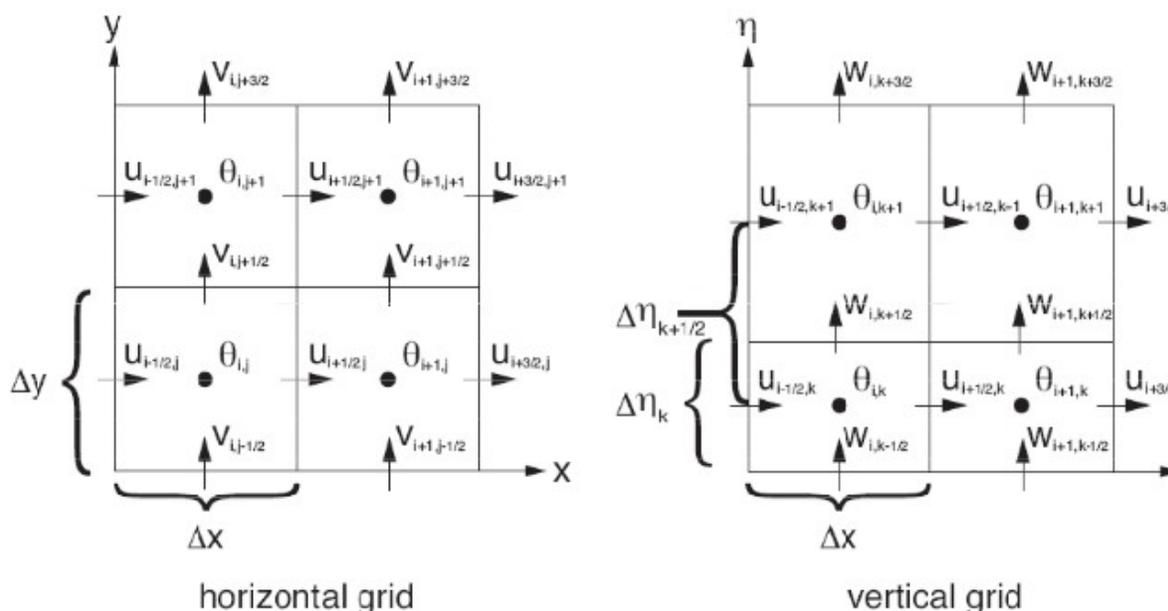


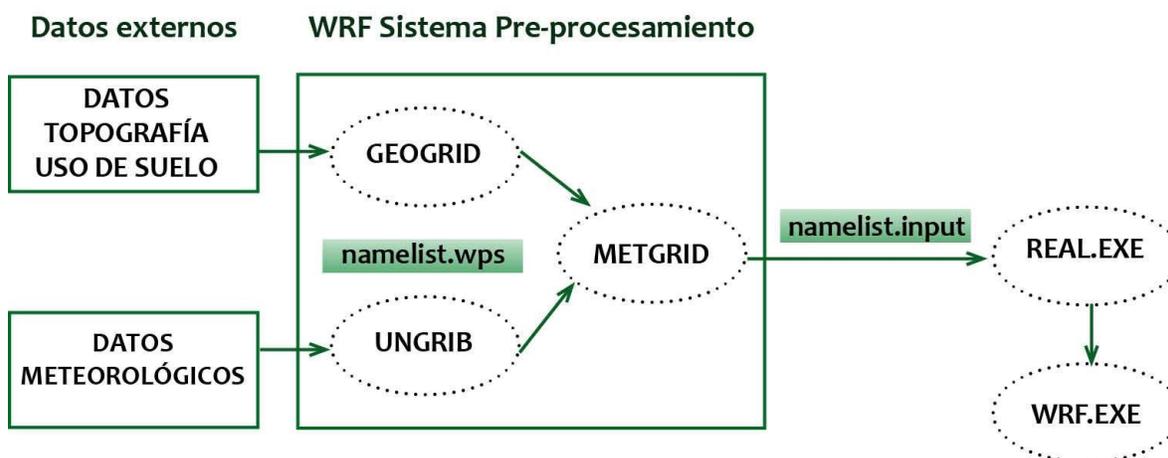
Figura 56: Grilla arakawa-C utilizada al resolver las ecuaciones que gobiernan la atm3sfera. Fuente Skamarock et al. (2005)

Por otro lado, la discretizaci3n espacial en el n3cleo ARW esta dada por la grilla Arakawa-C (Fig. Error: Reference source not found), en d3nde las componentes de la velocidad horizontal (U y V) y vertical (W) se resuelven en el centro de cada lado de las cuadr3culas, dejando en el medio de cada cuadr3cula las variables termodinámicas, de masa y escalares.

Además, 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 informaci3n es esencial para lograr una simulaci3n atmosférica exitosa. En esta versi3n se utilizaron los productos del modelo global de predicci3n atmosférica “Global Forecast System” (GFS). Estos pron3sticos tienen una frecuencia temporal de 6 horas y una resoluci3n 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).



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: 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 número 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).

$$SESGO_{yx} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (Y_k - X_k) \quad (21)$$

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} .

$$r_{yx} = \frac{COV_{yx}}{s_y s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})(X_k - \bar{X})}{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y}) \sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})} \quad (22)$$

- 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 acerque 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.

$$COCIENTE_{s_x, s_y} = \frac{s_y}{s_x} = \frac{\sum_{k=1}^N (Y_k - \bar{Y})}{\sum_{k=1}^N (X_k - \bar{X})} \quad (23)$$

Error medio absoluto: Este error conocido como MAE (por sus siglas en inglés), 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.

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

Raíz del error cuadrático medio (RMSE): También conocido por RMSE (por sus siglas en inglés) 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).

$$RMSE = \sqrt{\sum_{k=1}^N \frac{(Y_k - X_k)^2}{N}} \quad (25)$$

Anexo D: Módulo Biogeoquímico 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 (PO_4^{3-} , NO_3^- , NH_4^+ , 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.

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).





 www.ifop.cl

 info@ifop.cl

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO - CHILE