



INFORME FINAL

Convenio Desempeño 2016

Desarrollo de estadísticas de conectividad para la XII Región
basados en resultados de modelos Mike3D, III Etapa

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Agosto 2017



INFORME FINAL

Convenio Desempeño 2016

Desarrollo de estadísticas de conectividad para la XII Región basados en resultados de modelos Mike3D, III Etapa

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Agosto 2017

REQUIRENTE

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

Subsecretaria de Economía y EMT
Natalia Piergentili Domenech

EJECUTOR

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Director Ejecutivo
Leonardo Núñez Montaner

Jefe División Investigación en Acuicultura
Leonardo Guzmán Méndez

JEFE PROYECTO

Elías Pinilla Matamala

AUTORES

Pablo Reche García
Elías Pinilla Matamala
Cristian Ruiz Soto
Luis Avello Fernández



ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	i
ÍNDICE FIGURAS	ii
ÍNDICE TABLAS	xii
RESUMEN EJECUTIVO	xiv
1. ANTECEDENTES.....	1
2. OBJETIVOS	15
2.1 Objetivo general	15
2.2 Objetivos específicos	15
3. METODOLOGÍA.....	16
3.1 Objetivo específico N°1	18
3.2 Objetivo específico N°2	42
3.3 Objetivo específico N°3	54
4. GESTIÓN DEL PROYECTO	56
5. RESULTADOS	58
5.1 Objetivo específico N°1.....	58
5.2 Objetivo específico N°2.....	76
5.3 Objetivo específico N°3.....	121
6. DISCUSIÓN	125
7. CONCLUSIONES	128
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	130

FIGURAS



ÍNDICE FIGURAS

- Figura 1.** Agrupaciones de concesiones o barrios de cultivo de Salmón del Sur de Chile (X, XI y XII regiones).
- Figura 2.** Imagen satelital (*Google Earth*) del área de interés en la XII Región de Magallanes.
- Figura 3.** Estacionalidad (verano arriba – Invierno abajo) de los centros de alta y baja presión que controlan los vientos en la región de Magallanes (Tuhkanen, 1992; modificado por Ponce y Fernández 2004).
- Figura 4.** Estacionalidad (invierno arriba – Verano abajo) de las isotermas de temperatura en la región de Magallanes (Tuhkanen, 1992; modificado por Ponce y Fernández 2004).
- Figura 5.** Distribución de la precipitación anual en mm totales acumulados en la región de Magallanes (Tuhkanen, 1992; modificado por Ponce y Fernández 2004).
- Figura 6.** Agrupaciones de concesiones o barrios salmoneros de la XII región dentro de la zona de estudio.
- Figura 7.** Campaña “Canal Cockburn Invierno 2013”.
- Figura 8.** Campaña “Canal Cockburn Verano 2014”.
- Figura 9.** Campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”.
- Figura 10.** Zona de interés en cuyos límites se debe implementar el modelo hidrodinámico.
- Figura 11.** Estaciones y puntos de observación de nivel del mar utilizados en el desempeño de las distintas configuraciones posibles de bordes del modelo.
- Figura 12.** Dominio del modelo de las pruebas 01A, 01B, 01C, 01D y 01E para la sección de bordes del modelo.
- Figura 13.** Evaluación del nivel del mar en cana Gajardo, canal Jerónimo, canal Ocasión, seno Chasco, estero Staples, isla Wren, seno Chasco, bahía Escondida y Punta Arenas para la selección de bordes del modelo. Pruebas 01A, 01B, 01C, 01D y 01E.
- Figura 14.** Extensión del dominio del modelo de MIKE3 FM de Magallanes Sur.
- Figura 15.** Malla flexible 3D.
- Figura 16.** Ejemplo de 3 anidamientos de la malla flexible de distinta resolución horizontal y tamaño de sus elementos triangulares (estrecho de Magallanes – paso Largo).
- Figura 17.** Ejemplo de estructura vertical de capas sigma.



- Figura 18.** Ejemplo de estructura vertical de capas Z.
- Figura 19.** Sondas batimétricas empleadas para construir el DEM del modelo Magallanes Sur. **En anexo II**
- Figura 20.** Nivel de resolución de las sondas batimétricas empleadas para construir el DEM del modelo Magallanes Sur frente a la resolución de la malla flexible (zoom en paso Froward, seno Magdalena). **En anexo II**
- Figura 21.** Temperatura (arriba) y salinidad (abajo) en superficie para el 8 de marzo 2017 de Mercator®.
- Figura 22.** Condiciones de borde de temperatura (mitad izquierda) y salinidad (mitad derecha) en los bordes caleta Meteoro (arriba), canal Ocasión (medio) y Punta Arenas (abajo) al principio de la simulación (10 de marzo) y al final (15 de Marzo); información procedente de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”. **En anexo II**
- Figura 23.** Series de tiempo horarias (10/03/2017 – 15/04/2017) de la anomalía del nivel medio del mar de las condiciones de borde del nivel del mar en cada borde del dominio. **En anexo II**
- Figura 24.** Densidad espectral del nivel medio del mar de las condiciones borde de del nivel del mar en cada borde del dominio. **En anexo II**
- Figura 25.** Dominio del modelo WRF de 5km (en rojo) y de los 2 anidamientos de 1km (en verde).
- Figura 26.** Evaluación del viento y presión atmosférica del modelo WRF 1 km de resolución frente a observaciones de 3 estaciones meteorológicas de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”.
- Figura 27.** Estaciones de aforo de caudal en su desembocadura al mar de la DGA.
- Figura 28.** *Balance Hídrico de Chile, 1987* – Detalle en río San Juan (rol 12582001) dentro de las cuencas administrativas de rol 124-125.
- Figura 29.** Superficie de la cuenca hídrica del río San Juan según los archivos SIG de divisorias de aguas.
- Figura 30.** Fuentes de agua dulce en el modelo de Magallanes Sur.
- Figura 31.** Ecuaciones para NRMSE (arriba y medio) y CC (abajo).
- Figura 32.** Diagrama de flujo de las etapas de desarrollo en conectividad.
- Figura 33.** Ejemplo de conectividad para dispersión tipo *upstream*. Unidad de trabajo (caja) diana en rojo.
- Figura 34.** Ejemplo de conectividad para dispersión tipo *downstream*. Unidad de trabajo (caja) diana en rojo.



- Figura 35.** Definición de caja (unidad de trabajo) y área de conectividad dentro del dominio del modelo. Ejemplo acotado de la laguna San Rafael.
- Figura 36.** Cronograma que explica cómo las partículas se excluyen / incluyen (y el “reciclaje de éstas últimas”) en base a la relación horizonte / tiempo de simulación.
- Figura 37.** Comparativa del número de partículas para un mismo modelo entre las dispersiones *upstream* y *downstream*. Mapa mostrando número de partículas de la matriz que georreferencia dicha información.
- Figura 38.** Set principal y sub-sets de matrices para un estudio de conectividad.
- Figura 39.** Ejemplo de una matriz de 5x5 elementos conteniendo probabilidades de conectividad y georreferenciada al estrecho de Magallanes (Punta Arenas). El recuadro rojo indica el elemento al cual hacen referencia las probabilidades de conectividad de los demás elementos.
- Figura 40.** Ingreso partículas en el modelo de dispersión de partículas de Magallanes Sur para los distintos horizontes y número de conectividades que establecen.
- Figura 41.** Barrios en el modelo de dispersión de partículas de Magallanes Sur.
- Figura 42.** Evaluación de la anomalía del nivel del mar en 7 estaciones del modelo Magallanes Sur para la prueba de batimetría de los modelos 01D – 02A. **En anexo II**
- Figura 43.** Evaluación de la anomalía del nivel del mar en 7 estaciones del modelo Magallanes Sur para la prueba de batimetría de los modelos 01D – 02B. **En anexo II**
- Figura 44.** Estaciones de CTD de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017” utilizadas en la evaluación del campo de masas del modelo. **En anexo II**
- Figura 45.** Comparación de perfiles de salinidad entre el modelo 02A y 02C en estaciones de CTD de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”. **En anexo II**
- Figura 46.** Comparación de perfiles de temperatura entre el modelo 02A y 02C en estaciones de CTD de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”. **En anexo II**
- Figura 47.** Evaluación de la anomalía del nivel del mar en 7 estaciones del modelo Magallanes Sur para la prueba de batimetría de los modelos 01D – 02C – 02D. **En anexo II**
- Figura 48.** Variación de la profundidad del equipo ADCP en los fondeos a media agua de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”. **En anexo II**



- Figura 49.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el canal Cockburn para los modelos 01D – 02C y 02D. **En anexo II**
- Figura 50.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 20, 30, 40, 50 y 90 m de profundidad en el paso Froward para los modelos 01D – 02C y 02D. **En anexo II**
- Figura 51.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el paso Froward para los modelos 01D – 02C y 02D. **En anexo II**
- Figura 52.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el canal Cockburn para los modelos 02D y 02E. **En anexo II**
- Figura 53.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 20, 30, 40, 50 y 90 m de profundidad en el paso Froward para los modelos 02D y 02E. **En anexo II**
- Figura 54.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el paso Largo para los modelos 02D y 02E. **En anexo II**
- Figura 55.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el canal Cockburn para los modelos 02E, 02G y 02I. **En anexo II**
- Figura 56.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 20, 30, 40, 50 y 90 m de profundidad en el paso Froward para los modelos 02E, 02G y 02I. **En anexo II**
- Figura 57.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el paso Largo para los modelos 02E, 02G y 02I. **En anexo II**
- Figura 58.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el canal Cockburn para los modelos 02G y 02H. **En anexo II**
- Figura 59.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 20, 30, 40, 50 y 90 m de profundidad en el paso Froward para los modelos 02G y 02H. **En anexo II**
- Figura 60.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el paso Largo para los modelos 02G y 02H. **En anexo II**
- Figura 61.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el canal Cockburn para los modelos 02I y 02J. **En anexo II**
- Figura 62.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 20, 30, 40, 50 y 90 m de profundidad en el paso Froward para los modelos 02I y 02J. **En anexo II**



- Figura 63.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el paso Largo para los modelos 02I y 02J. **En anexo II**
- Figura 64.** Comparación de perfiles de temperatura entre el modelo 02K y 02L en estaciones de CTD de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”. **En anexo II**
- Figura 65.** Comparación de perfiles de temperatura entre el modelo 02L y 02M en estaciones de CTD de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”. **En anexo II**
- Figura 66.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el canal Cockburn para los modelos 02L y 02M. **En anexo II**
- Figura 67.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 20, 30, 40, 50 y 90 m de profundidad en el paso Froward para los modelos 02L y 02M. **En anexo II**
- Figura 68.** Evaluación de la componente U de la velocidad de la corriente a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el paso Largo para los modelos 02L y 02M. **En anexo II**
- Figura 69.** Comparación de perfiles de temperatura entre el modelo 02M y 02N en estaciones de CTD de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”. **En anexo II**
- Figura 70.** Evaluación de la anomalía del nivel del mar del modelo de Magallanes Sur. **En anexo II**
- Figura 71.** Evaluación de la densidad espectral del nivel medio del mar en canal Gajardo. **En anexo II**
- Figura 72.** Evaluación de la densidad espectral del nivel medio del mar en canal Jerónimo. **En anexo II**
- Figura 73.** Evaluación de la densidad espectral del nivel medio del mar en bahía Escondida. **En anexo II**
- Figura 74.** Evaluación de la densidad espectral del nivel medio del mar en estero Staples. **En anexo II**
- Figura 75.** Evaluación de la densidad espectral del nivel medio del mar en isla Wren. **En anexo II**
- Figura 76.** Evaluación de la densidad espectral del nivel medio del mar en seno Chasco. **En anexo II**
- Figura 77.** Evaluación de la densidad espectral del nivel medio del mar en Punta Arenas. **En anexo II**
- Figura 78.** Evaluación de perfiles de temperatura del modelo de Magallanes Sur.
- Figura 79.** Evaluación de perfiles de salinidad del modelo de Magallanes Sur.



- Figura 80.** Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente U de la velocidad total y residual en el canal Cockburn.
- Figura 81.** Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente V de la velocidad total y residual en el canal Cockburn.
- Figura 82.** Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente U de la velocidad total y residual en el paso Froward.
- Figura 83.** Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente V de la velocidad total y residual en el paso Froward.
- Figura 84.** Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente U de la velocidad total y residual en el paso Largo.
- Figura 85.** Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente V de la velocidad total y residual en el paso Largo.
- Figura 86.** Condición inicial antes de liberarse ninguna partícula y límites de los barrios 49-60 en el dominio del modelo de dispersión de partículas de Magallanes Sur.
- Figura 87.** T=0 horas tras el ingreso de las partículas en cada uno de los barrios 49 - 60 en el dominio del modelo de dispersión de partículas de Magallanes Sur.
- Figura 88.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 49 en escenario de Invierno Cuadratura.
- Figura 89.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 50 en escenario de Invierno Cuadratura.
- Figura 90.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Invierno Cuadratura.
- Figura 91.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Invierno Cuadratura.
- Figura 92.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Invierno Cuadratura.
- Figura 93.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Invierno Cuadratura.
- Figura 94.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Invierno Cuadratura.
- Figura 95.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Invierno Cuadratura.
- Figura 96.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Invierno Cuadratura.



- Figura 97.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Invierno Cuadratura.
- Figura 98.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Invierno Cuadratura.
- Figura 99.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Invierno Cuadratura.
- Figura 100.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 49 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 101.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 50 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 102.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 103.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 104.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 105.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 106.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 107.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 108.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 109.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 110.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 111.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Invierno Sicigia.
- Figura 112.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 49 en escenario de Verano Cuadratura.
- Figura 113.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 50 en escenario de Verano Cuadratura.
- Figura 114.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Verano Cuadratura.
- Figura 115.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Verano Cuadratura.
- Figura 116.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Verano Cuadratura.
- Figura 117.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Verano Cuadratura.



- Figura 118.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Verano Cuadratura.
- Figura 119.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Verano Cuadratura.
- Figura 120.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Verano Cuadratura.
- Figura 121.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Verano Cuadratura.
- Figura 122.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Verano Cuadratura.
- Figura 123.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Verano Cuadratura.
- Figura 124.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 49 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 125.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 50 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 126.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 127.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 128.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 129.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 130.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 131.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 132.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 133.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 134.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 135.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Verano Sicigia.
- Figura 136.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 49 en escenario de Tormenta Cuadratura.
- Figura 137.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 50 en escenario de Tormenta Cuadratura.
- Figura 138.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Tormenta Cuadratura.



- Figura 139.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Tormenta Cuadratura.
- Figura 140.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Tormenta Cuadratura.
- Figura 141.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Tormenta Cuadratura.
- Figura 142.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Tormenta Cuadratura.
- Figura 143.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Tormenta Cuadratura.
- Figura 144.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Tormenta Cuadratura.
- Figura 145.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Tormenta Cuadratura.
- Figura 146.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Tormenta Cuadratura.
- Figura 147.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Tormenta Cuadratura.
- Figura 148.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 49 en escenario de Tormenta Sicigia.
- Figura 149.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 50 en escenario de Tormenta Sicigia.
- Figura 150.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Tormenta Sicigia.
- Figura 151.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Tormenta Sicigia.
- Figura 152.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Tormenta Sicigia.
- Figura 153.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Tormenta Sicigia.
- Figura 154.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Tormenta Sicigia.
- Figura 155.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Tormenta Sicigia.
- Figura 156.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Tormenta Sicigia.
- Figura 157.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Tormenta Sicigia.
- Figura 158.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Tormenta Sicigia.
- Figura 159.** T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Tormenta Sicigia.



- Figura 160.** Propuesta de *clústers* de barrios cuyos barrios (borde amarillo).
- Figura 161.** Selección de escenarios, horizontes y tipos de dispersión en el Visor de Conectividad del geoportal <http://ifop.meteodata.cl/conectividad/>.
- Figura 162.** Display de matriz georreferenciada correspondiente a la ubicación elegida y al escenario, horizonte y tipo de dispersión seleccionados en el Visor de Conectividad del geoportal <http://ifop.meteodata.cl/conectividad/>.
- Figura 163.** Probabilidad de conectividad para una caja o parcela de una matriz dada.
-



ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.	Posición y periodo de medición de los equipos instalados en la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano – Otoño 2017”. En anexo I
Tabla 2.	Posición y periodo de medición de los lances de CTD en la Campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano – Otoño 2017”. En anexo I
Tabla 3.	Estaciones y puntos de observación de nivel del mar utilizados en el desempeño de las distintas configuraciones posibles de bordes del modelo. En anexo I
Tabla 4.	Bordes utilizados en la evaluación del dominio del modelo y fuente de información del nivel del mar en cada uno de ellos.
Tabla 5.	Índices estadísticos empleados en la evaluación del nivel del mar en cana Gajardo, canal Jerónimo, canal Ocasión, seno Chasco, estero Staples, isla Wren, seno Chasco, bahía Escondida y Punta Arenas para la selección de bordes del modelo. Pruebas 01A, 01B, 01C, 01D y 01E. En anexo I
Tabla 6.	Catálogo (1 de 4) de Cartas Náuticas del SHOA del Atlas Hidrográfico de Chile (2009) en el área del dominio de Magallanes Sur. En anexo I
Tabla 7.	Catálogo (2 de 4) de Cartas Náuticas del SHOA del Atlas Hidrográfico de Chile (2009) en el área del dominio de Magallanes Sur. En anexo I
Tabla 8.	Catálogo (3 de 4) de Cartas Náuticas del SHOA del Atlas Hidrográfico de Chile (2009) en el área del dominio de Magallanes Sur. En anexo I
Tabla 9.	Catálogo (4 de 4) de Cartas Náuticas del SHOA del Atlas Hidrográfico de Chile (2009) en el área del dominio de Magallanes Sur. En anexo I
Tabla 10.	Fuente de información de las condiciones de borde de del nivel del mar en cada borde del dominio.
Tabla 11.	Pruebas de sensibilidad del modelo Magallanes Sur con los componentes y parametrizaciones de cada una.
Tabla 12.	Componentes del modelo de Magallanes Sur que supusieron mejoras en la calidad de los resultados identificadas durante las pruebas de evaluación del desempeño del modelo.
Tabla 13.	Índices estadísticos de la evaluación de la anomalía del nivel del mar del modelo de Magallanes Sur.
Tabla 14.	Índices estadísticos de la evaluación de la corriente euleriana en el canal Cockburn.
Tabla 15.	Índices estadísticos de la evaluación de la corriente euleriana en el paso Froward.



- Tabla 16.** Índices estadísticos de la evaluación de la corriente euleriana en el paso Largo.
- Tabla 17.** Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en un escenario de Invierno Cuadratura.
- Tabla 18.** Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en un escenario de Invierno Sicigia.
- Tabla 19.** Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en Verano Cuadratura.
- Tabla 20.** Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en un escenario de Verano Sicigia.
- Tabla 21.** Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en Tormenta Cuadratura.
- Tabla 22.** Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en Tormenta Sicigia.
- Tabla 23.** Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur de todos los escenarios de variabilidad ambiental integrados.



RESUMEN EJECUTIVO

La industria salmonicultora es desde hace pocas décadas la principal actividad económica para el extremo Sur de Chile (X, XI y XII regiones). En esta actividad del sector primario el principal riesgo para la producción es la mortalidad, descenso de la productividad y merma de la calidad que sufre la principal especie de cultivo, el *Salmo salar*, como consecuencia de enfermedades que aparecen cuando los cuidados sanitarios son insuficientes y/o inadecuados. El hacinamiento de los individuos es un factor de riesgo que facilita el surgimiento de brotes infecciosos y su transmisión dentro de un centro de cultivo. La transmisión entre las distintas unidades de manejo sanitario en que se jerarquiza la industria en Chile (centro de cultivo-barrio-macrozona) es controlada principalmente por el transporte pasivo de los agentes patógenos a través de las corrientes marinas locales. Por este motivo es vital el estudio de los sistemas de circulación marina locales y regionales para poder entender cuáles son las causas y factores de riesgo principales y así poder desarrollar mecanismos de prevención ante futuros eventos infecciosos.

El objetivo principal del presente proyecto (última de las tres etapas con las que se da una cobertura total a la conectividad de los mares australes de Chile) es dar una medida probabilística espacial de la dispersión de patógenos (virus ISA) entre distintas parcelas de agua dentro de un área común que engloba a todas ellas. Para lograr este objetivo se recurre al uso de modelos numéricos y aplicaciones derivadas (en este caso modelos de dispersión de partículas) por las prestaciones que ofrecen en cuanto a cobertura espacial y temporal total, ahorro de recursos y robustez gracias a la posibilidad de someter la modelación a condiciones ambientales *ad-hoc*.

El área de estudio en donde se localiza el modelo de Magallanes Sur que comprende el estrecho de Magallanes, canal Cockburn y otros cuerpos de agua interiores es un sistema de alta complejidad batimétrica que da lugar a la formación de distintas cuencas menores con sus propias características físicas y una limitada conexión entre ellas. El sistema en general está dominado por la entrada de la marea desde el Atlántico y que en periodos de sicigia permite la entrada de masas de agua desde el Este hacia el interior del sistema. Estas masas de agua identificada como agua subantártica (ASSA) que penetran tanto por el Atlántico como por el Pacífico se mezclan con el agua estuarina (AE) para dar lugar a agua subantártica modificada (ASSAM), cuya característica principal es la homogeneidad de su perfil vertical. El modelo de Magallanes Sur es capaz de reproducir de buen grado estas características generales de mezcla de la columna de agua y los principales patrones de circulación del estrecho de Magallanes en su cuenca occidental y central donde las evaluaciones del modelo muestran concordancia en la dirección de los flujos residuales de las componentes principales de la velocidad y errores entre 20-40% y correlaciones de hasta 70% para el total de la corriente. El modelo muestra limitaciones en el desarrollo de capas superficiales en la cuenca occidental, debido a una subestimación de los aportes de aguas glaciares de la península Muñoz Gameiro y glaciares cercanos y una sobre estimación de flujos residuales con dirección Este en el canal Cockburn

Del análisis de las conectividades entre barrios bajo una variedad de escenarios que dan cuenta de las condiciones ambientales típicas de invierno y verano junto a un caso extremo de tormenta se extrae que la competencia de los intensos y cuasi constantes vientos del Oeste con la marea determina el grado de dispersión y las conectividades que se establecen entre barrios de Magallanes Sur, siendo la marea el agente que regula esta competencia a lo largo de su ciclo mensual de



cuadratura y sicigia. Las mayores amplitudes de las corrientes de marea en sicigia restringen las dispersiones de partículas hacia el Este debidas al viento, llegando incluso a dispersar partículas hacia el Oeste durante la excursión mareal en los escenarios de sicigia con viento moderado. En cuadratura en cambio, el efecto dispersivo que genera el viento es el dominante y las partículas recorren mayores distancias hacia el Este.

Un análisis integral de las conectividades de los distintos escenarios de variabilidad ambiental permite la identificación de 4 *clústers* de barrios que establecen conectividades comunes entre los barrios de cada clúster, pero que a su vez están aislados de otros *clústers*. Estos *clústers* se proponen como una primera aproximación para la creación de macrozonas de regulación sanitaria y de acción común en la mitigación de eventos infecciosos por virus ISA.

La información probabilística y más detallada de las matrices de conectividades de cada uno de los escenarios ambientales y para todo el área de estudio de Magallanes Sur se encuentra disponible para su consulta a través del geoportal <http://ifop.meteodata.cl/conectividad/>, o bien a través de la web del grupo de Oceanografía Física del IFOP en Putemún <http://www.iproach.cl>.



1. ANTECEDENTES

La necesidad de abastecer a la creciente población mundial con una fuente de proteínas y la sobreexplotación de los caladeros naturales ha fomentado que desde el fin de la II guerra mundial la acuicultura haya ido ganando terreno frente a la tradicional pesca de extracción hasta representar actualmente el 43.1% de la producción mundial anual de pescado, y en el caso particular de Chile ha pasado del 0.1% en el periodo 1976-1978 al 9.6% para el año 2010. Entre los distintos tipos de acuicultura, Chile se sitúa en el tercer puesto mundial en cuanto a la producción de pescado en aguas marinas, lo que se conoce como maricultura, con un volumen de producción para el año 2013 de 736.310 toneladas (t), lo que supuso el 12.7% del total mundial de maricultura (FAO, 2015). Las mencionadas cifras productivas (>700.000 t/año) nos pueden dar una idea de la importancia de la acuicultura, y más concretamente la salmonicultura, para Chile en materia de economía y ocupación laboral. Según SalmonChile en el año 2012 la industria salmoneera aportó con el 3.7% de las exportaciones nacionales (sólo después del cobre), generando 60.000 puestos de trabajo entre directos e indirectos, lo que según la FAO se traduce en un volumen de mercado promedio para el trienio 2006-2008 de 4.350 millones USD. El desarrollo masivo de la acuicultura en Chile tiene su origen en los años 70 y 80 en que se fomentaron políticas liberales y de economía global que atrajeron a inversores extranjeros de países desarrollados (Noruega, Escocia, Canadá, USA), que vieron en Chile la posibilidad de abastecer la demanda de salmón de dichos países en una época del año en que en el hemisferio Norte no se cosechaba salmón, además de ofrecer óptimas condiciones ambientales y logísticas (Barton & Floydsand, 2010). No fue sino hasta los años 90 cuando los inversores locales pasaron a dominar el mercado, lo que se refleja en un alto número de pequeñas y medianas empresas dedicadas al ramo que florecieron. Según Sernapesca en el año 2013 en la región Sur austral de Chile había 1.494 centros dedicados a la salmonicultura inscritos en el Registro Nacional de Acuicultura, los cuales se reparten en 668 en la X Región de Los Lagos, 744 en la XI Región de Aysén y 82 en la XII Región de Magallanes y Antártica Chilena, repartidos en 93 barrios o agrupaciones de concesiones de cultivo (Figura 1).

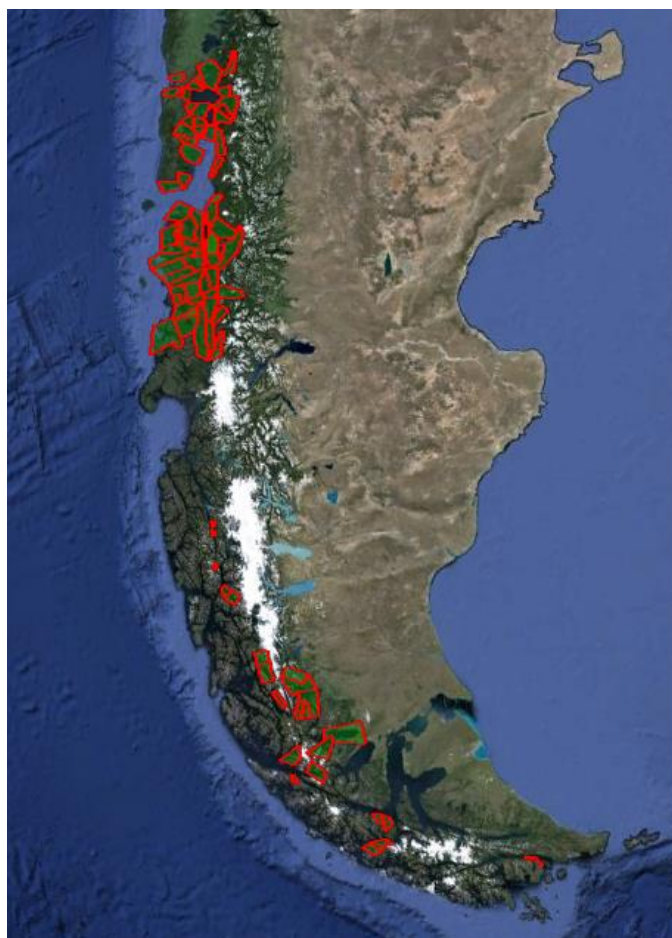


Figura 1. Agrupaciones de concesiones o barrios de cultivo de Salmón del Sur de Chile (X, XI y XII regiones).

El rápido crecimiento de este sector se vio favorecido por laxas normativas gubernamentales que propiciaron que las empresas aprovecharan las idóneas aguas de los mares interiores de la zona sur austral del país para una explotación intensiva del recurso, excediendo los límites razonables de producción para tales ambientes. Cuando hace veinte o treinta años una granja o centro de cultivo producía 200 – 500 t al año, con el desarrollo de la industria se llegaron a cuotas de 2500 – 3000 t y hasta 6000 t al año (FAO, 2010). Esta sobreproducción acarrió (y sigue acarreando) una serie de impactos medioambientales, como la contaminación al ecosistema por medio de desechos, fecas, antibióticos, escapes de individuos de salmón, etc., lo que a medio y largo plazo se termina convirtiendo en riesgos para la propia industria. Además, debido a la elevada producción, el hacinamiento de los salmones en los centros favorece la aparición de enfermedades y parásitos; si a esto le sumamos una igualmente alta densidad de centros de cultivo próximos entre sí se propicia un aumento en el riesgo de contagio o contaminación entre centros de cultivo ante un posible brote infeccioso inicial.

Dentro de este contexto en el año 2007 en Chiloé surgió un brote de virus ISA en cultivos de Marine Harvest, debido a una



partida contaminada de huevos procedentes de Europa, donde dicho virus ya había sido detectado anteriormente en cultivos de Noruega (1984), Canadá (1996), Escocia (1998) y EEUU (2001). En menos de un año el virus se expandió desde Chiloé hacia el Sur hasta cultivos de la región de Magallanes a más de 1200 km de distancia. Las pérdidas se estimaron en más de 800 millones USD a raíz de la alta mortalidad y el descenso en las tasas de crecimiento de los salmones supervivientes, hasta suponer un descenso del 65% de la producción nacional. Como consecuencia de todo esto se estima que 25.000 personas perdieron sus empleos (Silva, 2009).

Son varias las afecciones que afectan a la salmonicultura en Chile. De entre todas ellas es el conocido como virus ISA el que suscita mayor interés debido a las grandes pérdidas que viene generando desde 2007 en el sector nacional por afectar por encima de las demás especies (salmón Coho y trucha arco iris) al *Salmo salar*, especie que representa la mayor parte de la producción salmonícola en Chile. Del total de la producción anual de pescado en Chile a través de acuicultura en el año 2014, el 99.9% lo constituyen salmónidos, y de éstos el 67.5% fue *Salmo salar* (Sernapesca, 2015). *Salmo salar* (Linnaeus, 1758) hace referencia al Salmón del Atlántico, especie de la familia de los salmónidos, anádroma (desova en agua dulce y madura y engorda en el mar) y que llega a tallas máximas de hasta 25 kg, aunque su peso comercial está entorno a los 4-5 kilos que alcanza tras 15-20 meses de engorde. En Chile los salmónidos se introdujeron en 1905 a partir de ovas traídas de Hamburgo (Alemania), pero no fue hasta los años 80 cuando su cultivo cobró especial importancia.

ISA es el acrónimo en inglés de *Infectious Salmon Anemia*, un tipo de ortomixovirus tal como el de la influenza (Krossøy *et al.*, 1999; Dannevig *et al.*, 1995; Mjaaland *et al.*, 1997) aislado por primera vez en Noruega en 1984 (Dannevig *et al.*, 1995; Thorud & Djupvik, 1988). Es un virus altamente contagioso con bajas tasas de mortalidad en las fases iniciales (0.5-1%), cuyos síntomas no aparecen sino hasta 4 semanas después, pero que tras el periodo de incubación y latencia provoca altas mortalidades acumuladas (por encima del 90%). La sintomatología incluye letargo, anemia, leucopenia, ascitis, exoftalmia, oscurecimiento de la piel, hemorragia y finalmente muerte (Spickler, 2011). Un factor importante en el riesgo de infección es la carga vírica efectiva o umbral de concentración que determina la dosis mínima infecciosa (Ward & Atkin, 1984) por debajo de la cual el sistema inmune del huésped es capaz de eliminar al patógeno, pero que por encima de tal dosis causa infección. En el caso del virus ISA dicha dosis fue calculada por Raynard *et al.* (2001) y Gregory *et al.* (2009) estableciéndose entre $1-5 \times 10^5$ TCID₅₀, lo que se traduce en la cantidad de virus necesaria para matar al 50% de los huéspedes.

El virus ISA puede ser transmitido activa o pasivamente. Activamente a través de peces infectados que se puedan haber escapado, contaminación de equipos y material que se comparta entre centros de cultivo (Munro *et al.*, 2003), embarcaciones (McClure *et al.*, 2005) y el lastre de éstas (Murray *et al.*, 2002). Las poblaciones locales de salmónidos salvajes y otros peces susceptibles de ser infectados también son un factor de riesgo (Plarre *et al.*, 2005; Nylund *et al.*, 2002), pues actúan tanto como transmisores como de reservorios naturales; y no sólo peces sino también otro tipo de interacciones (*Caligus sp.*, *Lepeophtheirus*) pueden actuar como vectores de transmisión (Nylund *et al.*, 2003; Gustafson *et al.*, 2005). Pasivamente, y es aquí donde el presente estudio de conectividad adquiere relevancia, se transmite horizontalmente por el transporte de agua infectada entre un centro contaminado y otro, aumentando el riesgo con la cercanía entre centros (Vågsholm *et al.*, 1994; Jarp & Karlsen, 1997; McClure *et al.*, 2005) entre otros factores relacionados con las prácticas de cultivo como el tipo de redes y la profundidad de éstas.



El estudio de la conectividad de un sistema a partir de la variabilidad climatológica ambiental, entendiendo por tal la variabilidad estacional intraanual de dicho sistema, permite establecer cuál es la zonificación y compartimentación más adecuada en función de la hidrodinámica local, para en última instancia determinar cuál sería el emplazamiento de los centros de cultivo salmonícolas que minimizara las probabilidades de arribo y dispersión de partículas entre dichos centros. La conectividad es determinada a partir de los campos de corrientes que transportan masas de agua y las partículas contenidas en ella en suspensión, dilución o flotación. Dado que la conectividad implica el desplazamiento de masas de agua entre dos puntos (o parcelas de agua), cuanto más reducida sea el área sobre el cual se calculará la conectividad más pérdida de información tendremos, pues el intercambio de masas y partículas está confinado a los límites de dicha área. Por ello si bien se puede estimar la conectividad en áreas pequeñas a partir de mediciones de los campos de corrientes, para la estimación de la conectividad en grandes superficies (miles de km²) la medición en terreno de tales campos de corrientes se antoja una tarea que demandaría de enormes recursos económicos y humanos que harían que esta tarea fuera prácticamente irrealizable. La modelación numérica, partiendo del principio de que proporciona una línea base bien definida contra la cual comparar las observaciones empíricas, y así los modelos apropiados pueden proporcionar hipótesis comprobables y dar una idea de los aspectos específicos de los procesos biológicos o hidrodinámicas en el mundo real (Adams *et al.*, 2012), son la solución a la limitación antes planteada. Además, a través de la modelación numérica podemos modular *ad hoc* las condiciones ambientales a fin de dar representación a la variabilidad climatológica ambiental, lo cual no puede ser garantizado cuando se realizan mediciones en terreno.

Son varios los estudios de modelación de conectividad que se han llevado a cabo hasta la fecha para diferentes aplicaciones y bajo diferentes aproximaciones, no limitándose sólo al campo biosanitario en acuicultura como en el presente informe. Al-Rabeh *et al.* en 1989 ya utilizaron un modelo estocástico que incluía advección, difusión, emulsificación, evaporación y dispersión para calcular el transporte y área afectada por vertidos de crudo en el golfo Árabe. En la misma línea están los trabajos de Pagnini *et al.* (2010), Wang & Shen (2010), Broström *et al.* (2011) y Cho *et al.* (2012) entre otros. Metodologías de conectividad también son aplicadas para el estudio de dinámicas poblacionales de organismos marinos, especialmente en cuanto al rol que las corrientes tienen en la dispersión de huevos, larvas y juveniles dentro de las dinámicas de metapoblaciones y la persistencia y expansión de dichos organismos (Fox *et al.*, 2006; Knights *et al.*, 2006; Tremblay *et al.*, 2008; Fox *et al.*, 2009; Roughan *et al.*, 2011; Adams *et al.*, 2014).

Las aplicaciones de modelación numérica y cálculo de conectividad de patógenos de influencia en la acuicultura se han centrado sobre todo en el caso de los piojos de mar (nombre genérico dado a un grupo de copépodos, entre los que destacan *Lepeophtheirus salmonis* y *Caligus elongatus*) y en el propio virus ISA. La mayoría de estos estudios han sido llevados a cabo en Escocia (Amundrud & Murray, 2009; Salama *et al.*, 2011, Adams *et al.*, 2012), Noruega (Asplin *et al.*, 2004, Scheel *et al.*, 2007; Askeland, 2011; Aldrin *et al.*, 2012) y Canadá (Stucchi *et al.*, 2010), pero de ellos se pueden extraer generalidades y patrones extrapolables a las aguas de Chile por la similitud de los ambientes de cultivo y escenarios de estudio que comparten todos estos países entre sí. Por ejemplo la importancia de la migración vertical descrita por Sundelöf & Jonsson (2011) donde la distancia y dirección de la dispersión de organismos planctónicos varía drásticamente en función de las rápidas migraciones verticales que realicen, independientemente de la fase del flujo mareal. El rol de ciertos lugares como fuente o sumidero para la dispersión y la variabilidad temporal, como en el caso de la dispersión larval entre el golfo de Vizcaya y el canal de La Mancha (Ayata *et al.*, 2010), donde la estacionalidad marcada por variaciones en la descarga de los ríos y los patrones climatológicos se impone sobre la variabilidad interanual, apenas significativa; este trabajo también apunta a que la dispersión sólo tiene lugar entre sistemas de igual régimen



hidrodinámico, siendo débil la conectividad entre diferentes sistemas y sujeta a condiciones hidroclimáticas puntuales. Scheel *et al.* (2007) encontraron que centros ubicados dentro de un radio de 5 km comparten el mismo riesgo de infección, incluso más allá de esta distancia como apuntan Lyngstad *et al.* (2008) que encontraron que los sitios infectados a 10 km eran propensos a compartir los virus ISA del mismo genogrupo, lo que indicaría una posible infección compartida. Aldrin *et al.* (2010) demostraron que el riesgo de infección aumenta rápidamente con la distancia inversa del vecino infectado más cercano, siempre que la distancia fuera menor a 10 km. A partir del uso de datos de corrientes estimados a partir de un modelo hidrográfico Gustafson *et al.* (2007) observaron que los sitios ubicados corriente abajo de un centro infectado eran más propensos a recibir la contaminación que otro centro situado corriente arriba. Cornejo *et al.* (2014) aplicaron un modelo de simulación de grandes remolinos (conocido comúnmente como LES en inglés) para ver cómo afecta un centro de cultivo a la hidrodinámica local y las consecuencias de ello sobre la dispersión de partículas; observaron que la extensión de la estela (*wake*) que se forma corriente abajo del centro es función directa de la velocidad de la corriente, mientras que la caída en la velocidad es función directa del coeficiente de fricción; así las partículas difundirán advectivamente según el coeficiente de fricción, viéndose retenidas por mayor tiempo dentro de los centros de cultivo cuanto más bajo sea este coeficiente. A través de un modelo epidemiológico-hidrodinámico Salama & Murray (2009) demostraron que el riesgo de infección aumenta según lo hace el número y tamaño de los centros de cultivo, especialmente en sectores donde prevalecen corrientes de alto régimen, mientras que cuantos menos centros de cultivo haya y más separados estén éstos entre sí, las pérdidas en la producción serán menores. En un trabajo sobre una enfermedad de carácter pancreático debida a un alphavirus que afecta a la salmonicultura en Noruega, Viljugrein *et al.* (2009) integraron factores como la distancia Euclídea, distancia por vía marítima y contacto con el agua entre centros de cultivo a modelos estadísticos, para concluir que es el contacto con el agua el factor que mejor explicaba los casos de infección, partiendo de que el contacto con el agua es, a su vez, factor del campo de velocidades de la corriente y que por tanto, dicha enfermedad es transportada pasivamente por las corrientes.

En base a todos estos antecedentes y a raíz del brote de 1998-1999 de virus ISA en 1999 en Escocia se desarrolló un programa de control de emergencia basado en un modelo de excursión de la marea. El modelo utiliza supuestos oceanográficos simples para definir una distancia en la que el virus ISA se pudo mover por las corrientes de mareas (Stagg, 2003). En las islas Shetland, la distancia es de 3,6 kilómetros, siendo esta distancia el doble en la parte continental de Escocia, donde los rangos de marea son mayores. Sitios o centros de cultivo que caen dentro de esta distancia se incluyen dentro de la zona de control, mientras que una zona de vigilancia está configurada para todos los sitios alrededor de la zona de control hasta que se alcanza una distancia de separación tal que la excursión mareal de ambos sitios no se superpone.

Los esfuerzos por regular la salmonicultura en Chile fueron impulsados a raíz del brote de virus ISA en el año 2007, dada la enorme repercusión económica y social que tuvo, y así el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo a través del Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura decidió tomar cartas en el asunto y ejecutar una serie de normativas para la regulación de la actividad con el fin de salvaguardar los intereses derivados de la salmonicultura, tanto económicos y sociales como ecosistémicos, creando para ello una subdirección nacional dedicada a la acuicultura (ley N° 20.597, del año 2012). Al momento de surgir la crisis, y pese a ser un sector importante en la economía nacional, la regulación e intervención por parte de organismos del gobierno era escasa, dejando en manos del sector privado la autorregulación de la actividad. Antes de la crisis la regulación gubernamental se centraba en las directrices dadas por la Ley General de Pesca y Acuicultura de 1991 (Ley N° 19.079), el Reglamento Sanitario para la Acuicultura y el Reglamento Ambiental para



la Acuicultura que tan sólo establecían: a) las áreas de bienes nacionales apropiadas para la acuicultura como aquellas áreas no reclamadas por cualquier otra actividad marítima, sin atender a criterios de desempeño ambiental; b) los derechos de explotación a través de concesiones; c) la normativa ambiental que exige la caracterización preliminar del área de explotación (CPS) junto al seguimiento anual de información ambiental (INFA) por medio de los cambios en oxígeno; c) la normativa sanitaria donde se establecen medidas de control y vigilancia de enfermedades y protocolos de actuación en caso de brotes (Irrarrázaval, 2015). En el año 2010, y tras anteriores reformas a la Ley General de Pesca y Acuicultura y la crisis del virus ISA del año 2007, se publica la nueva Ley N° 20.434 (Historia de la Ley N° 20.434, 2010) que mejora la regulación ambiental y sanitaria de los centros de cultivo a través de: i) un nuevo ordenamiento de las áreas de manejo sanitario en las llamadas agrupación de concesiones o barrios salmoneos (a razón de 24 en la X Región de Los Lagos, 33 en la XI Región de Aysén y 28 en la XII Región de Magallanes) para las cuales se establecen planes comunes de coordinación donde, entre otras medidas, se establece una distancia de 1'5 millas de separación entre centros de cultivo; ii) una nueva normativa sanitaria que dentro de las áreas de manejo sanitario coordine los tiempos de cosecha, uso de antibióticos y regulación de la densidad de producción para evitar estrés en los salmoneos que los haga más propensos a contraer enfermedades. Además de las agrupaciones de concesiones se añade una nueva categoría de ordenación en las llamadas macrozonas, áreas que engloban a dos o más agrupaciones, cuyo objetivo es evitar la contaminación entre macrozonas en caso de un brote de patógenos para lo que se establecen franjas de separación entre dichas macrozonas y se controla el tránsito de embarcaciones entre ellas. La densidad de producción se determinará considerando el desempeño ambiental y sanitario a partir de los Informes Ambientales de todas las agrupaciones de una macrozona. Esta Ley N° 20.434 además da más peso a la fiscalización de las medidas aprobadas por parte de Sernapesca, estableciendo que los Informes Ambientales serán realizados por entes acreditados por Sernapesca. Todas estas medidas apuntan a un cambio más adecuado en la manera de afrontar un evento infeccioso y evitar su propagación entre centros, agrupaciones y macrozonas, pasando de medidas bajo criterios individuales a la consideración de criterios colectivos bajo un enfoque ecosistémico que salvaguarde la protección de los ecosistemas marinos. Todas estas disposiciones de carácter preventivo se fundamentan en la investigación científica al respecto, reconociéndose en este sentido el rol público del Instituto de Fomento Pesquero. Así mismo se crearán comités científicos cuyas recomendaciones deberán estar fundamentadas en criterios científicos y no socio-económicos (Fuentes, 2014).

Las investigaciones científicas llevadas a cabo en Chile respecto a la dispersión de virus ISA, son también más abundantes a partir del brote de virus ISA del año 2007. Mardones *et al.* (2009) realizaron análisis epidemiológicos sobre la irrupción y dispersión del virus ISA en Chile en un nuevo rebrote que aconteció en el año 2008 y que mostró un patrón espacio-temporal de dispersión y posterior agrupación que sugieren que el transporte pasivo por medio de las corrientes, junto a la proximidad de los centros de cultivo entre sí son factores clave en la dispersión del virus entre centros de cultivo. Sin embargo la transmisión del virus ISA dentro de un mismo centro de cultivo (es decir, entre las diferentes balsas-jaula) es independiente de la proximidad y concentración de otros centros y depende de otros factores como el estado de evolución del brote (estado de incubación y diagnóstico de infección clínicamente detectada), la detección temprana del virus, la resistencia de los salmoneos a mostrar síntomas, manipulación inadecuada de la mortalidad (a través de la dispersión de tejidos contaminados, especialmente sangre), virulencia de la cepa de virus y el número de peces y jaulas (Mardones *et al.*, 2013). En estos análisis no se consideran factores de riesgo operacionales como contaminación por escape de salmoneos o a través de los *wellboats* que transportan los salmoneos vivos desde los centros de cultivo hasta los centros de acopio donde son faenados; este sistema, respecto del procesamiento tradicional *in situ*, representaba el 20-30% en 2006, con perspectivas de aumentar hasta el 70% en el futuro (Sanhueza, 2006). En 2014 a través de una serie



de entrevistas y reuniones un grupo de expertos (Gustafson *et al.*, 2014) dieron valor estadístico a los factores de riesgo en la dispersión de virus ISA entre barrios (o agrupaciones de centros), por ser esta unidad de ordenación sobre la que mayoría de las nuevas directrices y esfuerzos de contención operan. Los principales factores de riesgo identificados (entre otros de menor importancia) fueron la bioseguridad en las plantas de procesamiento (centros de acopio), estrategias de cultivo y barbecho, transporte de salmones adultos, densidad de jaulas y peces, calidad de los *smolts* (juveniles de salmón), tráfico marítimo e hidrografía, entendiéndose por hidrografía el factor que define los límites de un barrio (los barrios se definen por patrones hidrográficos comunes en ellos) y que nuevos estudios hidrográficos podrían aportar un conocimiento más detallado que ayudara a definir más eficazmente el ordenamiento territorial de los barrios.

En cuanto a la implementación de modelos numéricos en aplicaciones de dispersión y conectividad contamos con antecedentes de autores como Buschmann *et al.* (2014) que por medio de Ocean Applied Science Ltda. y utilizando el software de código libre ROMS (Regional Ocean Modelling System) desarrollaron una herramienta que permite decidir donde realizar las primeras siembras tras el cese obligatorio de la actividad tras la crisis del virus ISA, y el establecimiento de áreas de riesgo de contagio entre centros. Similar al presente estudio, pero sin contar con la aplicación de estadísticas de conectividad sobre los resultados de dispersión lagrangiana de partículas, está el trabajo de Olivares *et al.* (2015) donde de nuevo y por medio del modelo ROMS se estudia la variabilidad y los efectos del viento y la marea sobre la dispersión de virus ISA en la región de Aysén; las principales conclusiones que se extraen de su trabajo es que periodos de sicigia propician dispersiones sobre áreas más extensas, cambios temporales en el viento modifican patrones de circulación estuarina y que la variabilidad espacial del régimen hidrodinámico del sector es muy grande, de tal manera que centros cercanos entre sí pueden dispersar partículas en modo muy distinto. Por su parte Carolina Meruane también ha desarrollado modelos numéricos sobre los cuales sí ha implementado metodologías de conectividad; trabajos como Meruane *et al.* (2011) donde se presenta una herramienta de ayuda en la toma de decisiones para una adecuada sectorización de los barrios de salmones en función de la hidrodinámica local; para ello simuló la hidrodinámica en la región de Aysén a partir del modelo CWR-ELCOM, sobre la cual y valiéndose de las derivas de trazadores virtuales, creó una matriz de riesgo, donde cada elemento representa el tiempo que demoran los trazadores en llegar desde un barrio de origen al resto de los centros de cultivo. En Meruane *et al.* (2013) vuelve nuevamente a implementar el modelo CWR-ELCOM para un modelo regional que incluye Chiloé-Aysén para estudiar cuáles son los motores que controlan el transporte de masas de agua en las capas superficiales y así entender mejor los mecanismos de dispersión horizontal del virus ISA; encontraron que si bien en los sectores interiores de Chiloé-Aysén la circulación es de tipo estuarina, la dispersión es modulada por la acción combinada de la marea y el viento.

A estos trabajos hay que sumar el conocimiento en materia de modelación y dispersión lagrangiana de Porobic *et al.* (2012) en modelación de la conectividad de la langosta de Juan Fernández y de Parada *et al.* (2012) en modelación de dispersión larval de anchoveta en Chile central, entre otros muchos trabajos de éstos y otros autores.

El área de estudio del presente trabajo está inserta en el sector central de la Patagonia chilena, considerada como una de las más extensas del planeta y que debido a los grandes aportes de agua dulce de ríos y glaciares crea una de las mayores zonas estuarinas del mundo (Dávila *et al.*, 2002). La zona litoral del Sur de Chile (X, XI, XII Regiones) está caracterizada por la presencia de profundos canales y fiordos que comunican numerosos cuerpos de agua y que a su vez dan lugar a complicados patrones de circulación. Estos patrones son resultado de las influencias de los forzantes meteorológicos y oceanográficos, consecuencia a su vez de fenómenos de mayor escala, derivados de la interacción



océano atmósfera del Océano Pacífico y Atlántico y el gran sistema estuarino continental. Estos sistemas oceánicos introducen energía a la zona estuarina mediante la llegada de ciclones extra-tropicales que generan la presencia de fuertes vientos oceánicos (Garreaud *et al.*, 2009), junto a la formación de sistemas frontales que al llegar al continente descargan volúmenes importantes de precipitaciones haciendo de la Patagonia chilena uno de los ambientes de mayor pluviosidad en el planeta (Romero, 1985) con precipitaciones medias acumuladas en el año de 5.000 – 10.000 mm (Miller, 1976). Asimismo la penetración de energía hacia aguas interiores proveniente de la propagación de ondas de marea hacia la intrincada zona estuarina de fiordos y canales genera patrones de transporte de agua complejos de caracterizar (Le Provost, 1991; Parker, 1991). Debido a los procesos glaciares que dieron origen a estos fiordos y canales la presencia de constricciones batimétricas es una de las principales características que, si bien no actúan como límites absolutos para la circulación entre cuencas, sí determinan la existencia de singularidades en el intercambio de agua entre éstas, las cuales se expresan como por ejemplo, en la presencia de flujos contrarios en dos o más capas, haciendo necesaria la descripción de éstas como parte de la estimación de parámetros relevantes, tales como la conectividad.

Como parte de los proyectos de *Convenio de desempeño “Asesoría integral para la toma de decisiones en Pesca y Acuicultura”* (entre la Subsecretaría de Economía y EMT e IFOP), ASIPA 2011/2012/2013, se comenzó el desarrollo de modelos numéricos hidrodinámicos que fuesen capaces de disminuir la incertidumbre reinante que existe en la zona sur austral de Chile (X a XII Regiones) respecto a la propagación de patógenos y plagas entre los centros de cultivo de salmónidos. El presente proyecto se trata de la segunda de tres etapas que pretenden dar una cobertura total a la zona Sur de Chile abarcando las regiones de Los Lagos, Aysén y Magallanes. En esta II etapa se determina la conectividad en un área compartido por las regiones de Aysén y Magallanes, entre el golfo de Penas por el Norte y bahía Beaufort por el Sur.

Para la resolución de la hidrodinámica se ha utilizado el modelo numérico MIKE 3 HD FM desarrollado por DHI (Instituto de Hidráulica y Medio Ambiente Danés, <https://www.dhigroup.com/>). MIKE 3 es un sistema de modelamiento en 3 dimensiones que considera la solución numérica de las ecuaciones tridimensionales incompresibles de Navier-Stokes utilizando el enfoque de Reynolds, los supuestos de Boussinesq y de presión hidrostática, por lo que el modelo consiste en las ecuaciones de conservación de masa y momentum, temperatura, salinidad y densidad considerando un esquema turbulento de cierre. Como algoritmo de solución discreta de las ecuaciones indicadas, el modelo utiliza el método de volúmenes finitos centrados en cada celda. La estructura de discretización en una malla irregular permite un buen ajuste al borde costero, por lo que se considera que este tipo de solución es la adecuada para zonas de topografía compleja. En la vertical utiliza coordenadas sigma que pueden ser combinadas con una estructuración rectangular. Para la integración temporal, se utiliza un enfoque semi-implícito donde los términos horizontales son tratados explícitamente y los verticales de manera implícita. Este modelo ha sido ampliamente utilizado para reproducir distintos procesos en distintos escenarios en sectores costeros, oceánicos, canales, estuarios y lagos (Chubarenko & Tehepikova, 2001; Zarein & Naderkhanloo, 2014; Bolaños *et al.*, 2014). En paralelo al modelo de MIKE 3 que simula la hidrodinámica se desacopla un modelo de dispersión de partículas, cuyos resultados serán computados para finalmente obtener las matrices de conectividad que son representadas en mapas de probabilidad.

La validación de la conectividad (siendo ésta función de las derivas de las partículas simuladas en el modelo desacoplado de dispersión de partículas) por logística y altos costes no puede hacerse por comparación directa con mediciones de terreno, pero sí se puede validar indirectamente por medio de la evaluación del modelo hidrodinámico, partiendo de la premisa de que el movimiento de las partículas es dado exclusivamente por el campo advectivo de corrientes del modelo

hidrodinámico. La validación del modelo hidrodinámico ha sido realizado a partir de una serie de criterios que se basan en un conjunto de atributos dados por la consistencia, calidad y valor de los resultados del modelo (Murphy, 1993). Para valorar la calidad de los resultados del modelo, éstos han sido confrontados frente a mediciones hechas en terreno con equipos de ADCP, mareógrafos y CTD.

Entre las primeras tareas de este proyecto está la recopilación de referencias en la bibliografía que nos entreguen una primera idea de donde centrar el foco dentro del área de interés, la cual ocupa en la XII región el estrecho de Magallanes hasta Tierra de Fuego y canales y fiordos adyacentes principales, a fin de determinar cuáles son las “zonas calientes” y críticas en el transporte de agua y dispersión de patógenos entre unidades de salmonicultura.

El área de estudio (**Figura 2**) está compuesta por 2 canales principales, el estrecho de Magallanes y el canal Cockburn. El estrecho de Magallanes se extiende por cerca de 600 km desde la boca oriental en el océano Atlántico hasta la boca occidental en el océano Pacífico con un ancho que varía entre 3 y 40 km. Ambas bocas se encuentran aproximadamente a la misma latitud de 52.3°S. Equidistante de ambas bocas, dando una vaga forma de “V” y determinando la orientación del estrecho de Magallanes, se encuentra la sección más meridional y que comunica en estrecho de Magallanes hacia el Sur-Oeste, a través de los canales Magdalena y Cockburn, con el océano Pacífico. La morfología del estrecho de Magallanes es del origen glaciar y su formación corresponde a las últimas glaciaciones durante el Pleistoceno (Breuer et al., 2013) entre hace 2.5 millones y 10.000 años.



Figura 2 Imagen satelital (Google Earth) del área de interés en la XII Región de Magallanes.

La disposición de la línea de costa y la presencia de constricciones batimétricas (*sill* de origen glaciar) dan lugar a un número de subcuencas dentro del sistema general, cada una de ellas con sus propias características físicas y



oceanográficas gracias al relativo aislamiento y reducido intercambio de agua entre ellas (Antezana, 1999). Estas subcuencas ya fueron descritas por Panella et al. (1991) y después por Valdenegro y Silva (2003), éstos últimos autores a partir de los resultados del crucero CIMAR-3 de Octubre de 1998.

Las principales subcuencas dentro del sistema general del estrecho de Magallanes son las siguientes:

- Subcuenca occidental que va desde la boca occidental hasta la isla Carlos III con profundidades promedio entorno a los 800 m en el paso Largo, con máximas por debajo de 1000 m en el sector Norte del paso Largo y una constricción en el paso Tortuoso (extremo Norte de la isla Carlos III) con cotas por encima de los 100 m.
- Subcuenca central que se extiende desde la isla Carlos III donde se va ganando profundidad hacia el Oeste con sondas entorno al paso Froward y del Hambre alrededor de los 400 – 600 m para ir aflorando hasta los 100 m y menos según nos acercamos a la Segunda Angostura.
- Subcuenca oriental entre la Segunda y la Primera Angostura con profundidades someras menores a 70 metros.
- Canales Cockburn y Magdalena con profundidades de 300 a 500 m entre su unión al estrecho de Magallanes al Norte y la salida al océano Pacífico por el Oeste. Recibe al seno Keats procedente de los campos de hielo de la cordillera Darwin en Tierra del Fuego.
- Otros cuerpos de agua adyacentes e igualmente significativos son los senos interiores de Skyring y Otway que se unen al estrecho a través de los canales Gajardo y Jerónimo respectivamente y entre ellos por el canal Fitz Roy. Lo angosto de estas vías de comunicación (100 m en algunos puntos) sumado a la batimetría presente restringe en alto grado el transporte de agua entre estos cuerpos de agua y el sistema principal lo que lleva a la diferenciación en sus características físicas propias.
- Por último, está la subcuenca conformada por el seno Almirantazgo, canal Whiteside y bahía Inútil con profundidades de 200 a 300 m y máximos de 500 - 600 m al Oeste de isla Wickham. Esta subcuenca se une al estrecho de Magallanes por el ancho y somero (< 100 m) paso Boquerón cerca de Porvenir. El seno Almirantazgo se interna en Tierra del Fuego donde se le unen numerosos senos y fiordos procedentes de los glaciares de Tierra del Fuego.

Para un escenario de primavera como el del CIMAR-3, Valdenegro y Silva, 2003 observaron a grandes rasgos ciertos patrones en la distribución del campo de masas. Tanto la temperatura como la salinidad presentaron en determinados sectores de la subcuenca central una distribución vertical homogénea debido al efecto de intensa mezcla originado por el viento y la marea y la ausencia (o débil presencia) de picnoclina. En otros sectores cercanos a glaciares de la cordillera de Darwin la temperatura presentó perfiles invertidos, con mínimos en superficie y máximo en profundidades donde la termoclina alcanza valores de 1°C/10m, lo cual se asocia a la entrada por superficie de aguas frías (0-2°C) procedente de glaciares, aunque también se apunta a un posible enfriamiento invernal según Pickard (1971). Mientras entre la subsuperficie y hasta los 100 metros el agua más cálida se asocia a masas de agua que penetran a través de las bocas



que comunican con el océano. De los 100 m hasta el fondo la temperatura y la salinidad apenas mostraron variaciones, pero manteniendo diferencias entre las aguas profundas de las distintas subcuencas.

Este tipo de perfiles y campos de densidad se corresponden con la distribución de las masas de agua y su transporte a través del sistema, lo cual revela los principales patrones de circulación regional. El Agua Dulce (AD) que ingresa al sistema a través de ríos, glaciares y las altas precipitaciones (especialmente en la subcuenca occidental) se mezcla con el Agua SubAntártica (ASSA) que entra al estrecho de Magallanes por la subsuperficie de la boca Oeste a la subcuenca occidental formando Agua Estuarina (AE) entre la superficie y hasta los 75m, por debajo de esta capa y hasta los 150 m se encuentra el Agua SubAntártica Modificada (ASSAM), y en las capas profundas se sitúa el Agua SubAntártica procedente del océano. El agua profunda de las demás subcuencas a lo largo del sistema se trata de Agua Estuarina superficial formada en la subcuenca occidental, que una vez superado el umbral batimétrico del paso Tortuoso al norte de la isla Carlos III (de unos 100 m de profundidad), se hunde hasta el fondo de la subcuenca central y desde ahí se extiende hacia el Este rellenando las demás subcuencas en toda la columna de agua.

El gradiente gravitacional generado por la entrada de estos volúmenes de Agua Dulce conduce el Agua Estuarina hacia fuera del sistema por la superficie de las bocas Oeste al Pacífico y Este al Atlántico. Este último transporte de Agua Estuarina por superficie al Atlántico, y debido a la baja profundidad de la boca Este, es controlado por la marea. Esta misma constricción batimétrica también restringe el ingreso de Agua SubAntártica por la boca Este desde el Atlántico (Valdenegro y Silva, 2003; Sievers y Silva, 2006). En cualquier caso, Antezana (1999) sugiere que las aguas al interior del sistema de fiordos y canales se intercambia entre subcuencas en mayor grado de lo que hace el sistema entero del estrecho de Magallanes con los océanos Atlántico y Pacífico debido a las citadas constricciones batimétricas.

Tal y como observaron Medeiros y Kjerfve (1988), Cerda (1993) y Salinas et al. (2004) el agente hidrodinámico más energético es la onda de marea. La onda de marea penetra al sistema principalmente por la boca Este del océano Atlántico donde las amplitudes son mayores que en el océano Pacífico y desde donde se propaga al interior del sistema hacia el Oeste. La amplitud en la boca Este es de más de 7 m en cuadratura y 9 m en sicigia, de los cuales 3.5 m corresponden a la componente M2, y de ahí el carácter semidiurno de esta onda de marea. Este gran volumen de agua es acelerado hasta máximos de 4.5 m/s a su paso por la 1° Angostura, de 3 m/s en la 2ª Angostura y ya por debajo de 2 m/s una vez al interior del estrecho. En su propagación hacia el Oeste a través de las constricciones batimétricas de la 1° y 2° Angostura disipan gran parte de la energía, lo que reduce la amplitud de la onda en más de 6 m y provocan un retraso en la fase de 3-4 h, además de transformar el régimen de semidiurno a mixto predominantemente semidiurno y la aparición de nuevas componentes de aguas someras. Al interior del sistema la batimetría y los cambios de orientación de los canales afectan también a las velocidades de propagación de la onda de marea en aguas someras, siendo estas velocidades mucho más lentas en las subcuencas oriental y occidental (19.2 y 9.5 m/s, respectivamente) que en la central (108.3 m/s) más profunda que las anteriores y con menos accidentes o constricciones batimétricas a la propagación.

Estos mismos autores igualmente apuntan a que el nivel medio del mar también se ve afectado por las anomalías de presión atmosférica. No hay diferencias significativas a lo largo del estrecho, y estas anomalías tienen efectos de ± 1 m sobre la superficie libre. La presión atmosférica y sus vientos asociados sufren pocas variaciones estacionales y la presión atmosférica tan sólo se ve afectada por el paso de depresiones ciclónicas formadas en el frente polar del Pacífico Sur y que cruzan la región de Magallanes de Oeste a Este. Por lo general, predominan los vientos *westerlies* (del Oeste)

resultado de la posición relativa de la célula de alta presión subtropical del Pacífico Sur-Este (que llega hasta los 40°S) respecto del centro de bajas presiones sub-Polar alrededor del círculo Polar Antártico (**Figura 3**).

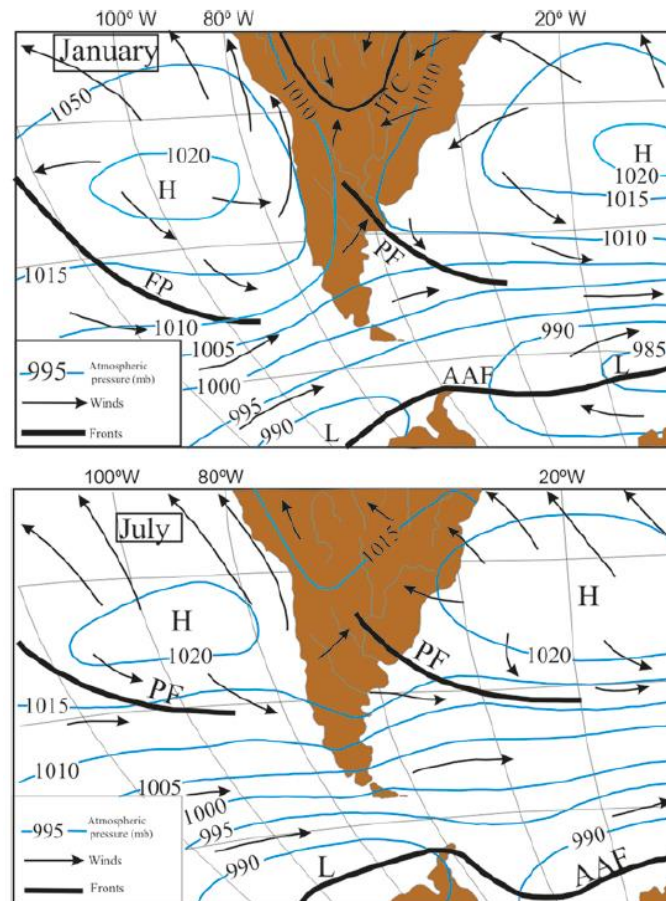


Figura 3. Estacionalidad (verano arriba – Invierno abajo) de los centros de alta y baja presión que controlan los vientos en la región de Magallanes (Tuhkanen, 1992; modificado por Ponce y Fernández 2004).

La temperatura sí que está controlada por una variación estacional y zonal Norte-Sur y también Este-Oeste, ésta última por la mayor influencia del océano Pacífico que del Atlántico, suavizando las amplitudes térmicas en el sector occidental y dando lugar a mayores oscilaciones térmicas del lado oriental del sistema (**Figura 4**).

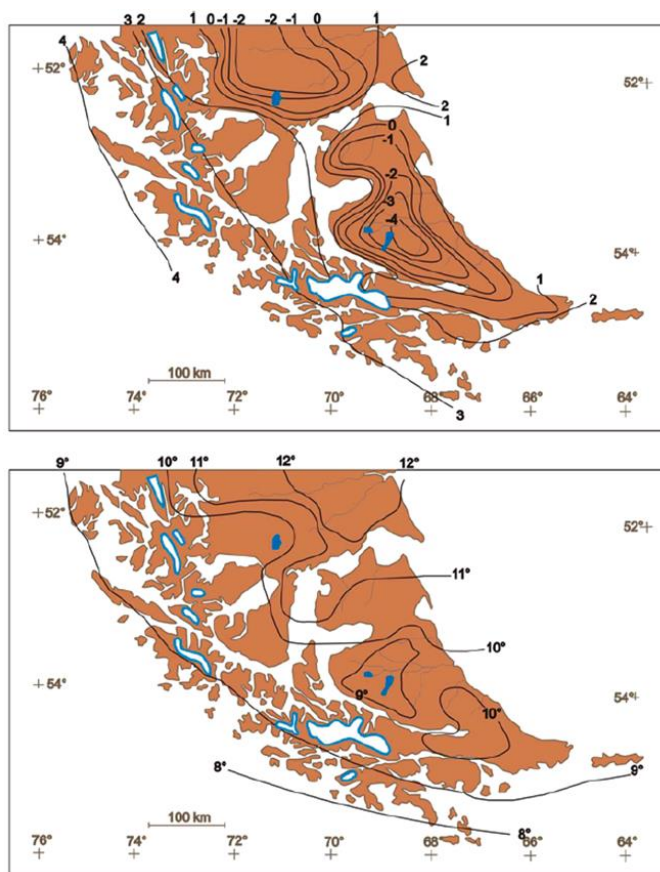


Figura 4. Estacionalidad (invierno arriba – Verano abajo) de las isotermas de temperatura en la región de Magallanes (Tuhkanen, 1992; modificado por Ponce y Fernández 2004).

Los vientos constantes del Oeste y cargados de humedad del Pacífico al encontrarse con las más meridionales estribaciones de los Andes (Cordillera de Darwin) ascienden y crean una de las más altas zonas de precipitación en latitudes medias del mundo con valores acumulados por encima de 5000 mm año en el sector de barlovento al Oeste del sistema de Magallanes (**Figura 5**). En el lado Este de sotavento, el aire menos cargado de humedad y la topografía más suave lleva a un régimen de precipitaciones más suave, por debajo de 300 mm al año de media en el sector oriental del estrecho de Magallanes (Panella et al. 1991; Endlicher y Santana, 1988; Tuhkanen, 1992; Ponce y Fernández, 2014)

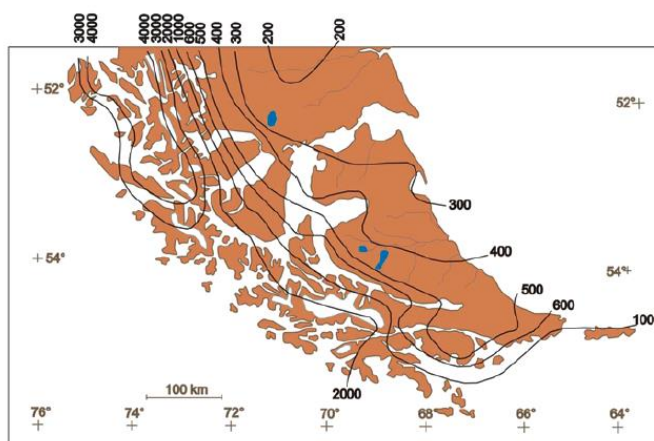


Figura 5. Distribución de la precipitación anual en mm totales acumulados en la región de Magallanes (Tuhkanen, 1992; modificado por Ponce y Fernández 2004).

En el área de estudio de la XII región, las únicas unidades de ordenamiento territorial de la industria salmonícola actualmente implementadas son los barrios o agrupaciones de concesiones, las cuales están distribuidas tal como se muestra en la **Figura 6**. A la fecha estas agrupaciones no están aglutinadas dentro de macrozona de carácter sanitario. Por lo tanto, el estudio se centrará en la conectividad entre barrios de cultivo. Estos barrios se aglutinan en 2 sectores bien marcados: los barrios 49-52 en el sector Nor-Oeste, incluyendo seno Skyring, canal Gajardo, golfo Xaltega y estero Córdoba y los barrios 54-60 que se encuentran en el sector Sur alrededor de la isla Capitán Aracena y Tierra del Fuego a lo largo del margen Sur del canal Cockburn.

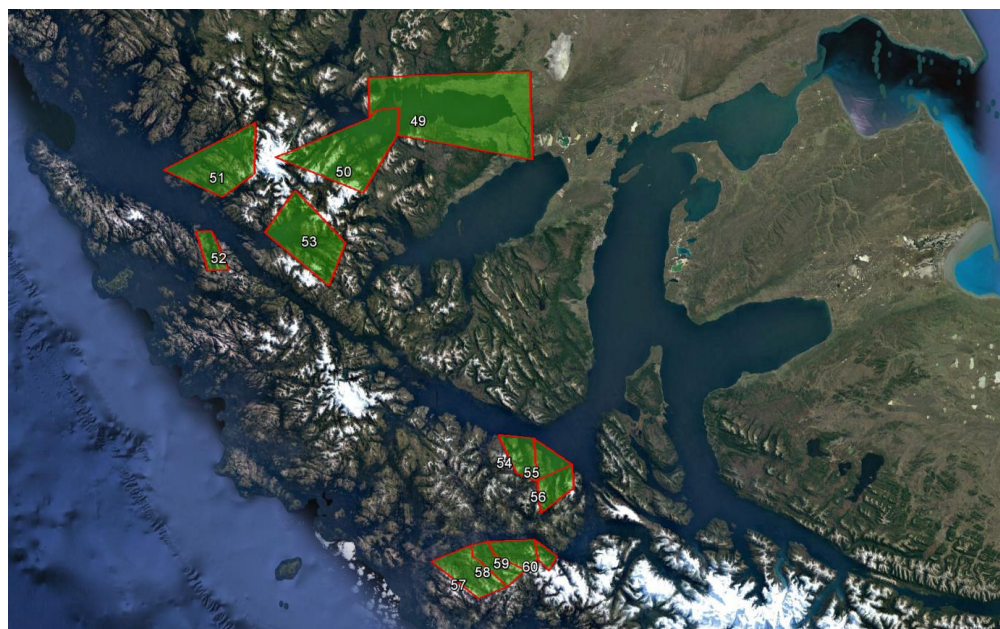


Figura 6. Agrupaciones de concesiones o barrios salmoneros de la XII región dentro de la zona de estudio.



2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar estadísticas de conectividad para la XII Región de Magallanes en la zona comprendida entre el sector oeste del estrecho de Magallanes y Tierra del Fuego.

2.2 Objetivos específicos

2.2.1 Objetivo N°1

Realizar una evaluación de los modelos hidrodinámicos que se utilizarán para el cálculo de conectividad, detallando la exactitud y las limitaciones del mismo mediante evaluaciones frente a mediciones de campañas oceanográficas y pruebas de sensibilidad.

2.2.2 Objetivo N°2

Llevar a cabo un análisis de la conectividad para los distintos escenarios ambientales necesarios para dar cuenta de la variabilidad ambiental intra-anual del sistema y elaborar una matriz de conectividad para cada escenario ambiental, estableciendo las probabilidades de conexión entre los distintos sectores.

2.2.3 Objetivo N°3

Proveer la información obtenida a través de un sistema de información geográfica montado en plataforma web.

3. METODOLOGÍA

La metodología con la cual se desarrollaron los objetivos del presente proyecto de “Estadísticas de conectividad para la XII región” está basada en la implementación de modelos numéricos. Los modelos numéricos suponen una ventaja por sobre la observación directa de los procesos en el terreno debido a las ventajas que implican el uso de modelos en cuanto al ahorro de recursos humanos, económicos y rapidez en la ejecución, además del aumento en la cobertura espacial que ofrece y la posibilidad de someter el estudio a un amplio espectro de condicionantes (lo cual termina otorgando robustez al experimento). Todas estas ventajas son inexistentes o muy limitadas a través de la mera observación en el terreno. En cualquier caso, la práctica de estudios de modelación no exime de la observación en terreno, la cual es necesaria en cuanto sirve con el doble propósito de permitir establecer el grado de confiabilidad del modelo (y por tanto, de los resultados que de él se deriven) y servir de información ambiental de las condiciones iniciales y/o forzantes del modelo.

A la fecha de ejecución del presente proyecto las únicas mediciones disponibles dentro del área de estudio y que hubieran sido registradas en un mismo periodo de tiempo para un amplio rango de variables (correntometría, nivel del mar, estaciones meteorológicas y propiedades físicas de la columna de agua) eran las campañas de IFOP “Canal Cockburn Invierno 2013” y “Canal Cockburn Verano 2014” (**Figuras 7 y 8** respectivamente). Ambas campañas repiten prácticamente las mismas posiciones de las mediciones para poder registrar y comparar la variabilidad estacional invierno-verano. Ambas campañas tuvieron por objeto la caracterización del medio físico donde se ubican los centros de cultivo en el sector Norte de la isla Capitán Aracena y canal Cockburn en el extremo occidental de Tierra de Fuego (barrios 54-55-56-57-58-59-60, **Figura 6**) y es por esto que la ubicación de las mediciones de correntometría se realizaron al interior de fiordos y esteros, sectores típicos donde se instala la industria por las favorables condiciones operacionales.

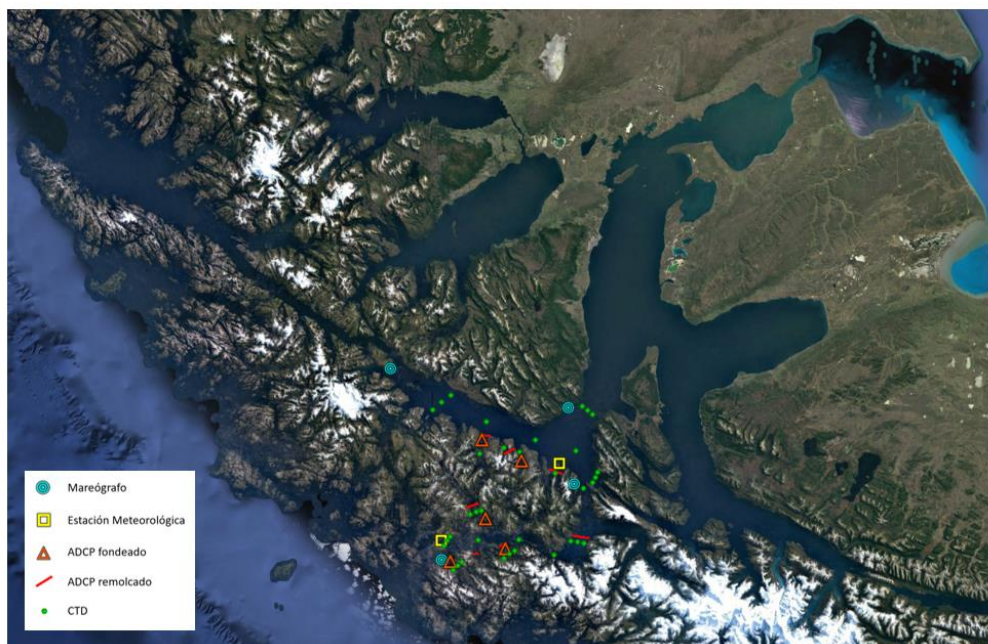


Figura 7. Campaña “Canal Cockburn Invierno 2013”.

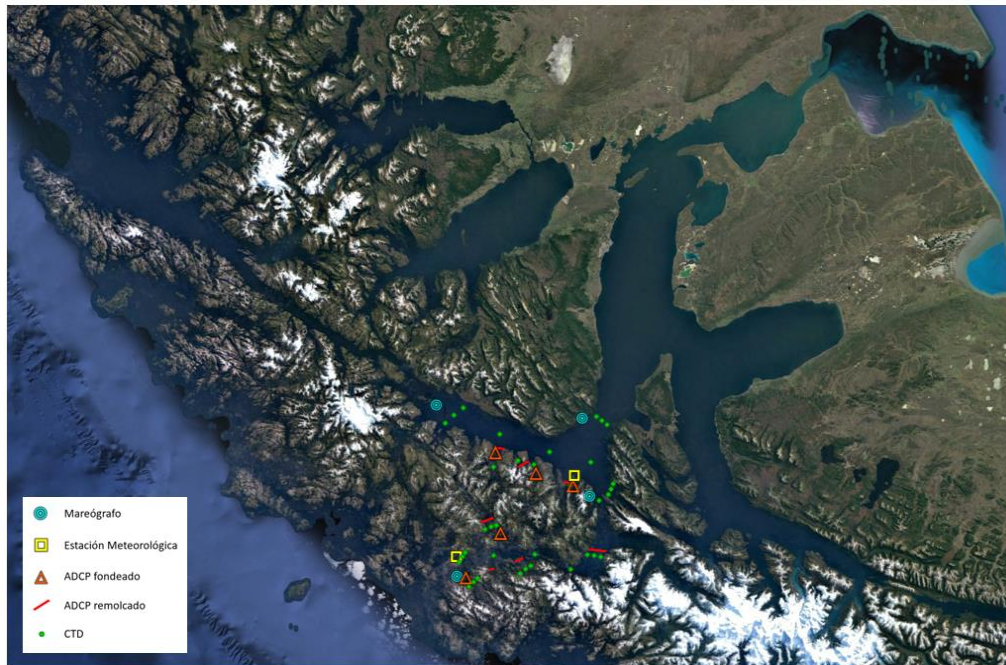


Figura 8. Campaña “Canal Cockburn Verano2014”.

Con los antecedentes bibliográficos anteriormente descritos, y recordando que el objetivo del presente estudio es la determinación de la conectividad entre unidades de producción (centros de cultivo-barrios-macrozonas) se consideró más conveniente hacer una evaluación del modelo en su desempeño para reproducir los patrones de circulación y transporte de masas de agua en los canales que sirven de nexo y comunicación entre estos mismos fiordos y esteros donde se ubican los centros de producción antes que evaluar el desempeño del modelo dentro de dichos sistemas interiores de fiordos y esteros. A este fin se diseñó una nueva campaña oceanográfica que, dentro de los recursos disponibles, cubriera el máximo posible de zonas estratégicas para la acuicultura dentro del área de estudio y cuyas mediciones se ubicaran en sectores clave para evaluar los patrones de mesoescala de la circulación entre barrios o agrupaciones de concesiones.

La ejecución de la campaña se externalizó a través de licitación en Mercado Público (<https://www.mercadopublico.cl/Home>) a través del llamado 1049-43-LP16 publicada en agosto de 2016. Este llamado quedó desierto por la ausencia de propuestas. En vista de que persistía la necesidad de realizar la campaña oceanográfica, que garantizara el cumplimiento de los objetivos del proyecto, se volvió a licitar en un nuevo llamado con código 1049-1-LP17 y publicado ya en enero de 2017. Ante la posibilidad de que este nuevo llamado quedara desierto otra vez, lo cual por la proximidad de la fecha de entrega del informe final (agosto 2017) implicaría que no daría tiempo a volver a licitar la campaña, se decidió reducir los alcances de la campaña pero que siguiera cumpliendo en los objetivos que se demandan. De entre las propuestas recibidas para efectuar la campaña y tras su evaluación (primando por encima de otros requisitos la experiencia profesional en el área) se adjudicó a Costa Sur Bravo y Mackenney Consultores Asociados Limitada. La campaña oceanográfica, denominada como “IFOP - estrecho de Magallanes – canal Cockburn verano-otoño 2017” tuvo lugar entre los meses de

marzo y abril de 2017 y consistió en 3 fondeos de ADCP (RDI 302.7 khz, registrando datos cada 5 minutos en celdas de 2m), junto con otros 3 mareógrafos (HOBO y Aanderaa) y 3 estaciones meteorológicas (Young 05103) que estuvieron registrando condiciones ambientales por al menos 1 mes en paralelo. Tanto al inicio de la campaña (cuando se instalaron y/o fondearon los equipos) como al final de la misma (cuando se retiraron los equipos) se hicieron mediciones de temperatura y salinidad con CTD en 69 estaciones. La **Figura 9** y las **Tablas 1 y 2 (anexo I)** recogen las posiciones y periodos de medición de los equipos de la campaña “estrecho de Magallanes – canal Cockburn verano-otoño 2017”.

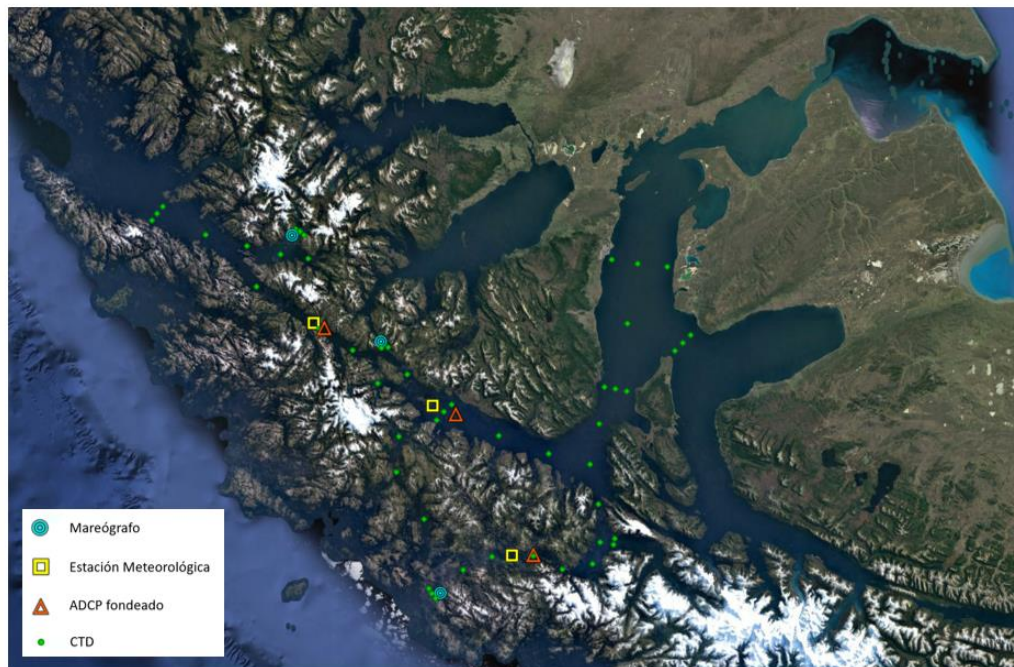


Figura 9. Campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”.

3.1 Objetivo N°1

Realizar una evaluación de los modelos hidrodinámicos que se utilizarán para el cálculo de conectividad, detallando la exactitud y las limitaciones del mismo mediante evaluaciones frente a mediciones de campañas oceanográficas y pruebas de sensibilidad.

El primer paso en el desarrollo del modelo hidrodinámico es la definición de los límites o bordes del área de estudio o dominio del modelo. Estos límites se deben definir dentro del área de interés propuesta inicialmente en el Objetivo General para Magallanes Sur (2.1), que comprende el sector occidental del estrecho de Magallanes hasta Tierra del Fuego (**Figura 10**), y a partir de la disponibilidad y desempeño de las condiciones ambientales que sirvan de condiciones de borde al modelo. La información ambiental que se requiere en los bordes para forzar al modelo son el nivel del mar y la distribución de densidades en la columna de agua (dada por la temperatura y la salinidad) con la introducción de flujos baroclínicos.



Figura 10. Zona de interés en cuyos límites se debe implementar el modelo hidrodinámico.

Para el campo de densidades o masa sólo hay 3 alternativas que garanticen la cobertura total de información sobre el dominio del modelo y de los posibles bordes:

- Cruceros CIMAR: los cruceros CIMAR-3 de octubre de 1998 y CIMAR-16 de octubre de 2010 son los únicos de acceso público y liberados cuyas zonas de muestreo coinciden con el área del dominio del modelo.
- Modelos globales: Mercator es reconocido como uno de los modelos globales de mejor desempeño y de los pocos con resolución suficiente para incluir los mares interiores, canales y fiordos de Magallanes.
- Campaña IFOP - estrecho de Magallanes – canal Cockburn verano-otoño 2017: si bien las estaciones de CTD de esta campaña no cubren la totalidad del área del sector occidental del estrecho de Magallanes (faltan mediciones en seno Almirantazgo, Otway y Skyring) son las mediciones que mejor garantizan el desempeño del modelo al ser las únicas que registraron temperatura y salinidad en el mismo periodo en que se registraron las otras variables ambientales con que se va a evaluar el modelo y que por tanto será el periodo para el que se realice la simulación.

Una vez identificado la fuente de información del campo de densidades, la selección de los bordes se hará en función del desempeño de las distintas posibilidades de condiciones de borde del nivel del mar. Basándonos en los antecedentes dados por Medeiros y Kjerfve (1988), Cerda (1993) y Salinas et al. (2004) en cuanto a la transformación de la onda de marea en su ingreso principalmente por la boca Este del Atlántico y la aparición de componentes de aguas someras se recomienda el uso de mediciones in situ del nivel del mar antes que información procedente de modelos globales cuya baja resolución no permita la correcta representación de los procesos no lineales que dan lugar a la formación de componentes de aguas someras. La posición y fuente de información de las condiciones de borde de nivel del mar que se emplearon en las pruebas de borde del modelo se incluyen en la **Figura 11** y la **Tabla 3 (anexo I)**. Cuando el periodo de medición de los mareógrafos no se solapaba con el periodo de simulación del modelo se recurrió a construir series pronóstico de la oscilación del nivel del mar construidas a partir de las componentes armónicas extraídas de mediciones superiores a un

ciclo mareal completo (Pawlowicz *et al.*, 2002; Foreman, 1977; Foreman, 1978; Godín, 1972). La información del nivel del mar procedente del modelo de altimetría satelital Topex-Poseidon por su parte no presenta inconvenientes de disponibilidad y su registro es continuo.

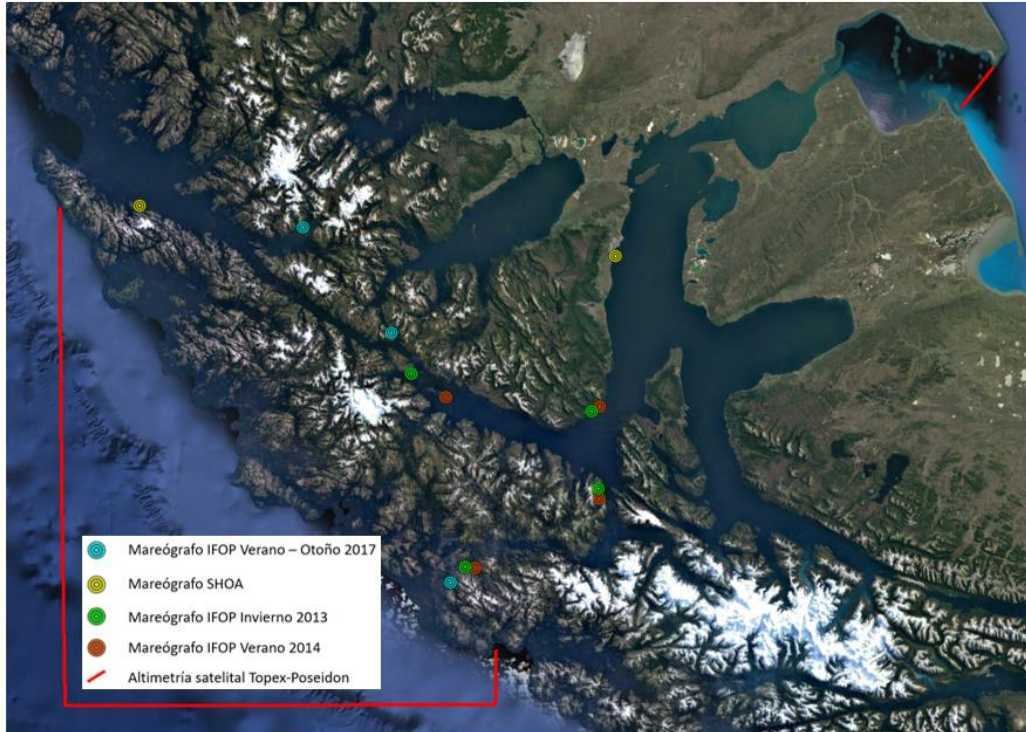


Figura 11. Estaciones y puntos de observación de nivel del mar utilizados en el desempeño de las distintas configuraciones posibles de bordes del modelo.

Se realizaron una serie de pruebas a fin de evaluar el desempeño de las distintas opciones disponibles de condiciones de borde de nivel del mar y disponer de un criterio que permitiera seleccionar aquella configuración de bordes con mejor desempeño en la simulación del nivel del mar, para ser utilizada en las siguientes pruebas de evaluación del modelo. Al seleccionar una configuración no solo se está eligiendo de qué tipo de fuente procede la condición de borde de nivel del mar (mareógrafos del SHOA, IFOP o altimetría satelital) sino también cuáles serán los bordes y límites del dominio del modelo. Por lo tanto, en estas pruebas de condiciones de borde de nivel del mar se evalúa tanto el desempeño de éstas como el desempeño del modelo en resolver la hidrodinámica a partir de la interacción de ésta con la batimetría asociada a cada borde.

Las características de las condiciones de borde y la ubicación de los bordes de cada prueba del modelo de Magallanes Sur se detallan en la **Figura 12** y la **Tabla 4**. Estas pruebas se realizaron por 8 días entre el 10 y el 18 de marzo de 2017.



PRUEBA	Borde 1	Marea Borde 1	Borde 2	Marea Borde 2	Borde 3	Marea Borde 3
01 A	C. Meteoro	SHOA	O. Pacífico	Topex-Poseidon	O. Atlántico	Topex-Poseidon
01 B	C. Meteoro	SHOA	S. Chasco	IFOP	O. Atlántico	Topex-Poseidon
01 C	C. Meteoro	SHOA	C. Ocasi3n	IFOP	O. Atlántico	Topex-Poseidon
01 D	C. Meteoro	SHOA	C. Ocasi3n	IFOP	Punta Arenas	SHOA
01 E	C. Meteoro	SHOA	O. Pacífico	Topex-Poseidon	Punta Arenas	SHOA

Tabla 4. Bordes utilizados en la evaluaci3n del dominio del modelo y fuente de informaci3n del nivel del mar en cada uno de ellos.

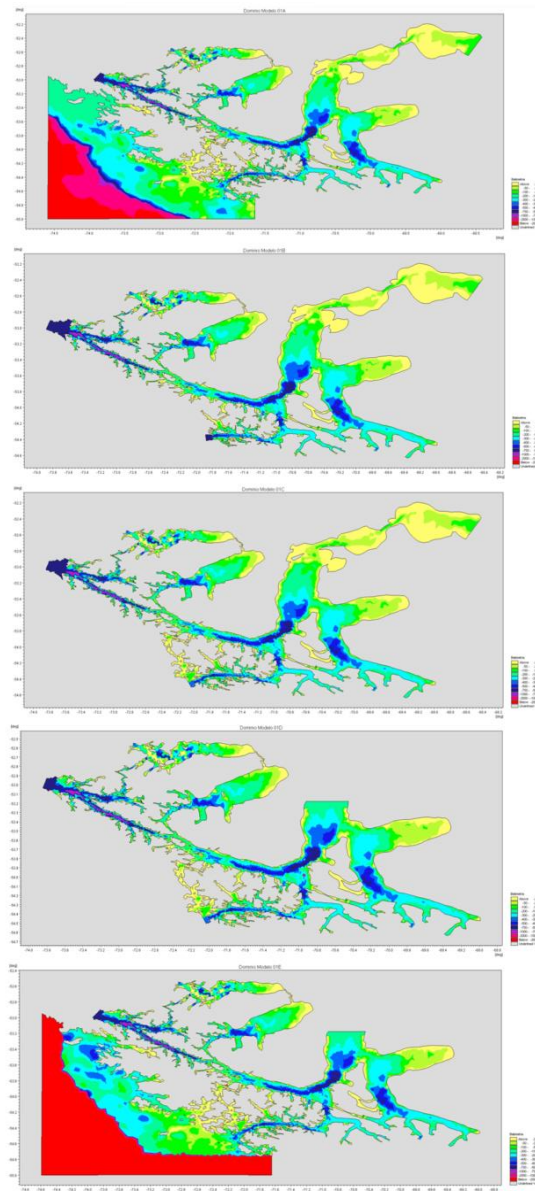


Figura 12. Dominio del modelo de las pruebas 01A, 01B, 01C, 01D y 01E para la secci3n de bordes del modelo.

La **Figura 13** y la **Tabla 5 (anexo I)** muestra la evaluación del nivel del mar de las pruebas para la elección de los bordes del dominio modelo en las 8 estaciones elegidas a tal fin (**Figura 11 y Tabla 3 – anexo I**).

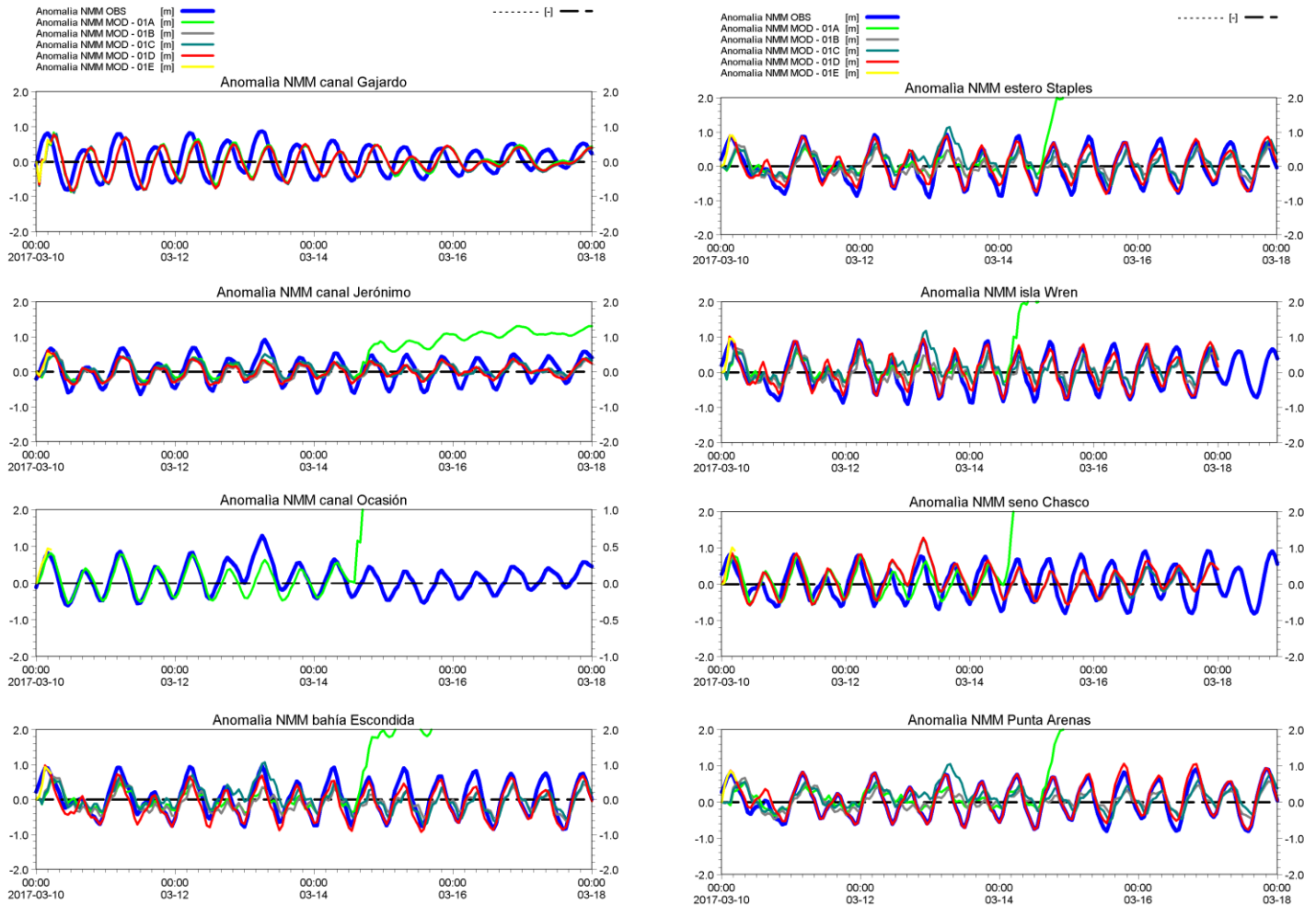


Figura 13. Evaluación del nivel del mar en cana Gajardo, canal Jerónimo, canal Ocasión, seno Chasco, estero Staples, isla Wren, seno Chasco, bahía Escondida y Punta Arenas para la selección de bordes del modelo. Pruebas 01A, 01B, 01C, 01D y 01E.

De las 5 configuraciones posibles de bordes de las que se dispuso de información para alimentar al modelo en sus condiciones de borde de nivel del mar y campo de masas, y que delimitan el dominio del modelo 2 de ellas (**01A** y **01E**) se comportaron inestablemente. Estas 2 configuraciones comporten en común sus bordes oceánicos en el Pacífico, a través de los cuales se alcanzaron desbalances de volúmenes de agua, ingresando más agua al dominio del modelo de la que sale y forzando al nivel medio del mar a subir por encima del nivel medio histórico. En el caso de la prueba **01E** el



desbalance fue tan acusado que el modelo colapsó (*blow-up*). Igualmente, las configuraciones **01B** y **01C** en que el borde Este se situó en punta Dungeness (ya en la salida al océano Atlántico) las evaluaciones de nivel del mar, especialmente en las estaciones más influenciadas por la entrada de onda de marea desde el Atlántico (estero Stapler, bahía Escondida, isla Wren y Punta Arenas) no reprodujeron la oscilación de la superficie libre del mar tan bien como la prueba **01D**. La configuración **01D** con bordes en caleta Meteoro, canal Ocasión y Punta Arenas fue la que mejores resultados produjo en cuanto a menores errores y una mejor correlación de las fases respecto de las observaciones. Por tanto el dominio del modelo de Magallanes Sur emplearía estos 3 bordes en las siguientes pruebas.

En las pruebas 01A, 01B, 01C, 01D y 01E los respectivos modelos se construyeron con los mismos componentes de campo de masas, batimetría, forzante meteorológico, etc. Con el fin de sólo poder diferenciar qué bordes eran los más adecuados, y cual sería, por tanto, el dominio definitivo del modelo. A continuación, se describen las distintas configuraciones de los componentes del modelo que se han empleado en la etapa de construcción del modelo a lo largo de pruebas que veremos más adelante en “Pruebas de sensibilidad del modelo de Magallanes Sur”.

Componentes del Modelo de Alta Resolución de Magallanes Sur

- **I) MIKE3 FM by DHI:** el modelo que usaremos para resolver la hidrodinámica con la que obtener los campos de corrientes advectivos y flujos difusivos que dispersen las partículas es MIKE3 FM. MIKE3 FM es un *suite* de ecuaciones con interfaz gráfica desarrollado por la compañía danesa DHI basado en la solución numérica de las 3 ecuaciones dimensionales e incompresibles de Navier-Stokes y Reynolds bajo las asunciones de Boussinesq y de la presión hidrostática. De esta manera el modelo consiste en las ecuaciones de continuidad, momentum, temperatura, salinidad y densidad para un esquema de cierre turbulento.

En el dominio horizontal pueden utilizarse sistemas cartesianos y esféricos. La superficie libre es tomada como aproximación a un sistema de coordenadas sigma. El dominio espacial es discretizado por la subdivisión continua y sin solapamiento de elementos. En el plano horizontal se utiliza una malla desestructurada de elementos triangulares (pueden también seleccionarse elementos cuadrangulares discretamente), mientras que en la vertical la discretización es estructurada. De esta manera, los elementos pueden ser prismas o cubos. La discretización espacial de las ecuaciones primitivas es resuelta en el centro de cada elemento bajo un método de volúmenes finitos. Se utiliza la aproximación de Riemann para calcular los flujos convectivos, haciendo posible utilizar soluciones discontinuas.

Para la integración del tiempo MIKE3 FM utiliza una solución semi-implícita donde los términos horizontales son tratados explícitamente y donde los términos verticales son tratados implícitamente (**DHI, 2011**).

- **II) DOMINIO:** el área del modelo, al que nos referiremos como “modelo Magallanes Sur”, se extiende a lo largo del estrecho de Magallanes y el canal Cockburn, incluyendo los senos Skyring, Otway y Almirantazgo, entre otros cuerpos de agua menores (**Figura 14**). Los límites o bordes del dominio, y donde actúan como forzantes las condiciones de borde, son 3: Al Nor-Oeste del dominio y limitando con el océano Pacífico Sur-Oriental en la boca Nor-Oeste del estrecho de Magallanes está el borde que va desde la línea que une caleta Meteoro y la isla Emiliano Figueroa; al Sur del dominio y en

la conexión a través de la boca Sur del canal Cockburn con el océano Pacífico Sur-Oriental a la altura de la isla Aguirre y el canal Ocasión se encuentra otro borde; el último de los bordes, y que es el límite oriental del dominio, es el que une Punta Arenas con Tierra de Fuego. La superficie total ocupada solo por agua en el dominio del modelo de Magallanes Sur es cercana a los 15.000 km².

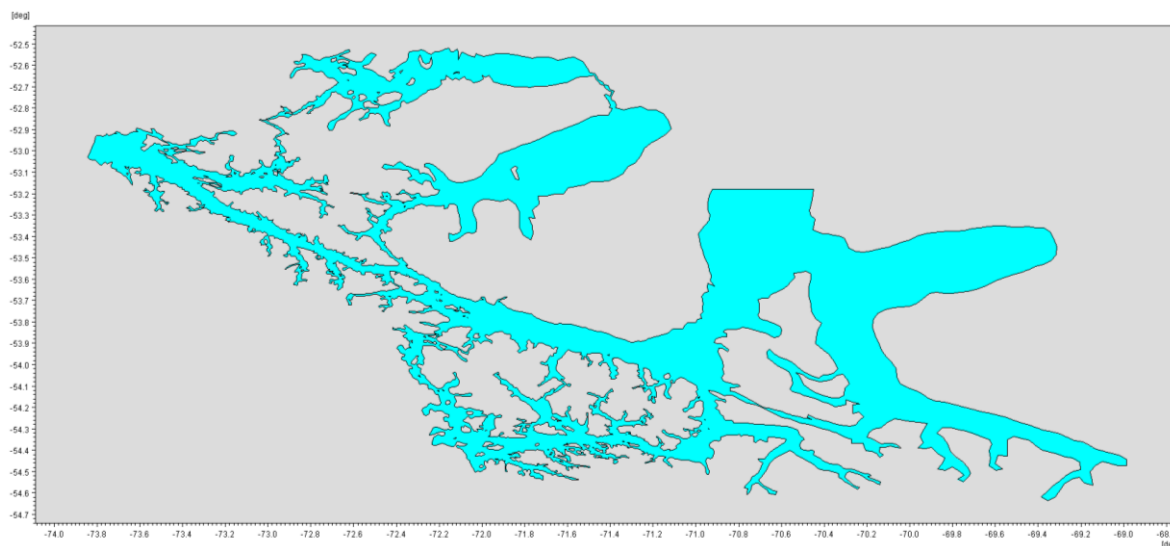


Figura 14. Extensión del dominio del modelo de MIKE3 FM de Magallanes Sur.

- **III) MALLA FLEXIBLE:** la malla flexible es el esquema de discretización espacial en que el modelo subdivide el dominio horizontal y verticalmente (**Figura 15**). Este es un criterio fundamental siendo que en el centro de cada uno de los elementos resultantes de esta discretización es donde el modelo resuelve las ecuaciones de estado y entrega las soluciones numéricas. La malla flexible se define mediante la resolución horizontal variable en anidamientos y la resolución vertical en capas.

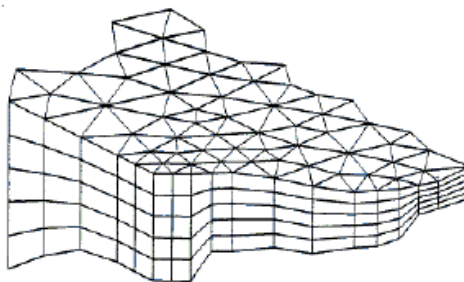


Figura 15. Malla flexible 3D.

- **III.A) RESOLUCIÓN HORIZONTAL:** Esta malla flexible es desestructurada en la horizontal y conformada por elementos triangulares (y opcionalmente cuadrangulares). Se prefirieron los elementos triangulares por su mejor capacidad para adaptarse a la línea de costa y por resolver flujos transversales a la dirección principal de un canal o estero mejor que los elementos cuadrangulares. Éstos últimos se emplearon para resolver canales estrechos y unidireccionales (despreciable efecto de flujos transversales) y por motivos de ahorro de elementos y tiempo de cómputo.

El tamaño de los elementos o resolución horizontal, determina el número de elementos necesarios para cubrir el dominio del modelo, y esto a su vez en el volumen y tiempos de cómputo, porque a más elementos se requiere de más cálculos y también porque un menor tamaño de los elementos requiere de un mayor número de cálculos y de un paso de tiempo de cómputo interno menor (para esto último ver más adelante en “Resolución Temporal”). Sin la limitante computacional se elegirían los menores tamaños posibles, pero dentro de un escenario real se debe buscar un compromiso entre el volumen y tiempo de cómputo y la escala de los procesos que queremos que el modelo resuelva, siendo que el principal objetivo del estudio es la dispersión de patógenos, y los procesos principales y de mayor magnitud en su dispersión son los flujos advectivos producto de la circulación estuarina (ver antecedentes bibliográficos). Así pues, la resolución horizontal la definimos en función de la escala de los cuerpos de agua y de la complejidad batimétrica, factores influyentes en la naturaleza de los patrones de circulación. Igualmente, se debe prestar atención a la relevancia de estos cuerpos de agua en el transporte de masas de agua entre ellos y si estos mismos cuerpos de agua son sectores clave para la acuicultura, lo cual demandará de una mejor resolución. La distribución espacial de los elementos por tamaños se hace mediante el anidamiento de polígonos de diferente resolución (**Figura 16**), respetando una relación de 3:1 en el tamaño promedio para evitar inestabilidades numéricas que den lugar a flujos irreales.

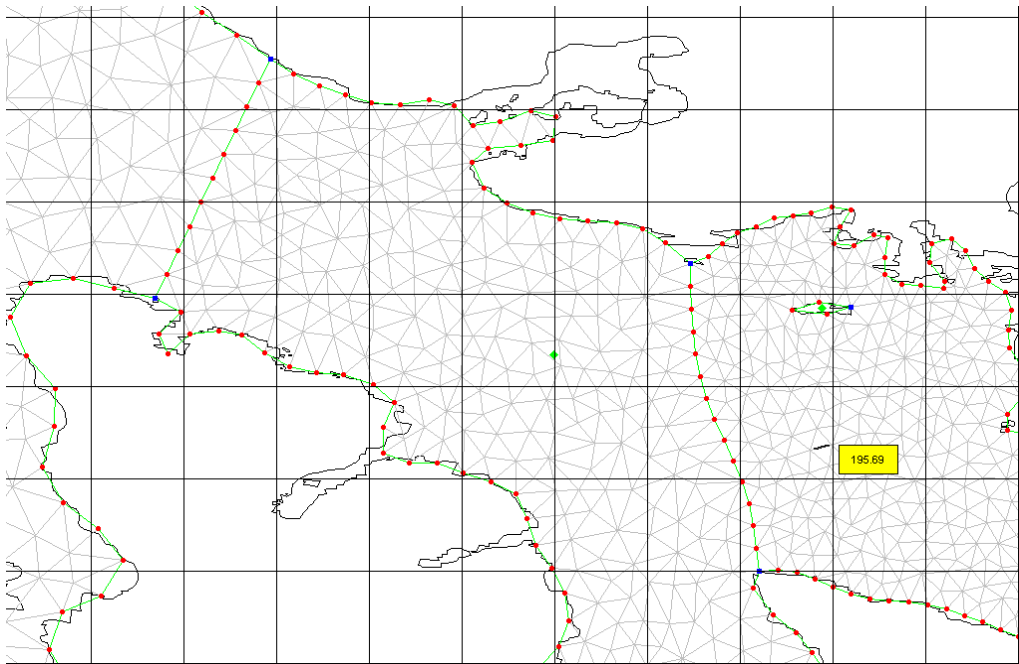


Figura 16. Ejemplo de 3 anidamientos de la malla flexible de distinta resolución horizontal y tamaño de sus elementos triangulares (estrecho de Magallanes – paso Largo).

A lo largo de las distintas pruebas de calibración (ver adelante en “Pruebas de sensibilidad del modelo de Magallanes Sur”) se han utilizado dos esquemas de resolución horizontal. El primero de ellos fue diseñado en función de la escala de los cuerpos de agua y la importancia de estos cuerpos en la circulación y la acuicultura. El segundo esquema, modificado a partir del primero, tuvo por objeto una mejor representación de la batimetría local, especialmente en sectores de alta complejidad como constricciones y *sill*. En ambos casos las mallas flexibles estuvieron compuestas por cerca de 30.000 elementos (99% triangulares) y los elementos más pequeños son de 200-300 m de lado en anidamientos de alta resolución en el estrecho de Magallanes (en el Paso Largo), canal Cockburn (cerca de isla Diego) y canal Gajardo (punta Rengo).

- **III.B) RESOLUCIÓN VERTICAL:** existen 2 tipos de esquemas para la discretización vertical de la columna de agua: capas sigma y capas Z. Las capas sigma se caracterizan por distribuir su estructura vertical en función de la batimetría, siguiendo sus interfaces los perfiles batimétricos. Así en zonas someras están más juntas entre sí, mientras que en zonas profundas están más separadas unas de otras (**Figura 17**). A su vez, e independientemente de la profundidad, la separación entre ellas puede ser equidistante, proporcional (cada capa ocupa un % definido de la columna de agua) o variable (dado por un algoritmo de 3 variables).

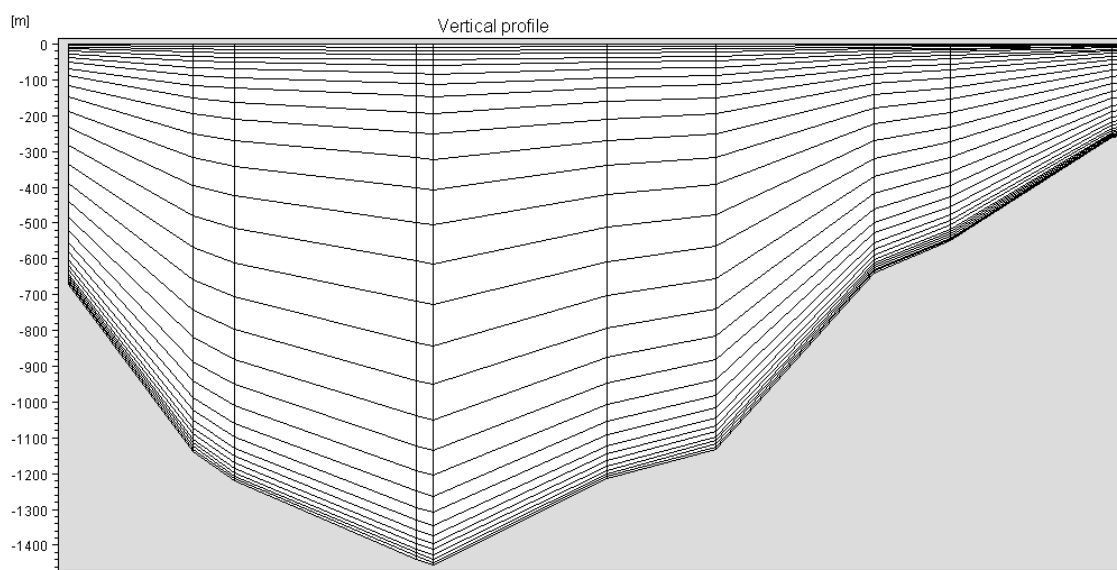


Figura 17. Ejemplo de estructura vertical de capas sigma.

Las capas Z por su parte sólo podrán utilizarse en conjunto con las capas sigma y para ello debe definirse a partir de que profundidad se utilizarán capas Z. Igualmente la separación entre estas capas Z puede ser equidistante o proporcional y definido por el usuario. Al contrario que las capas sigma las capas Z tienen interfaces horizontales y paralelos al nivel medio del mar (**Figura 18**). Otra diferencia es que si bien el número de capas sigma es constante e independiente de la profundidad (se apilan o se engruesan), en las capas Z si se disminuye la profundidad son reducidas en número si:

$(\text{Profundidad fondo} - \text{Profundidad límite capas sigma}/Z) < \Sigma (N^\circ \text{ capas } Z \times \text{Espesor capas } Z)$

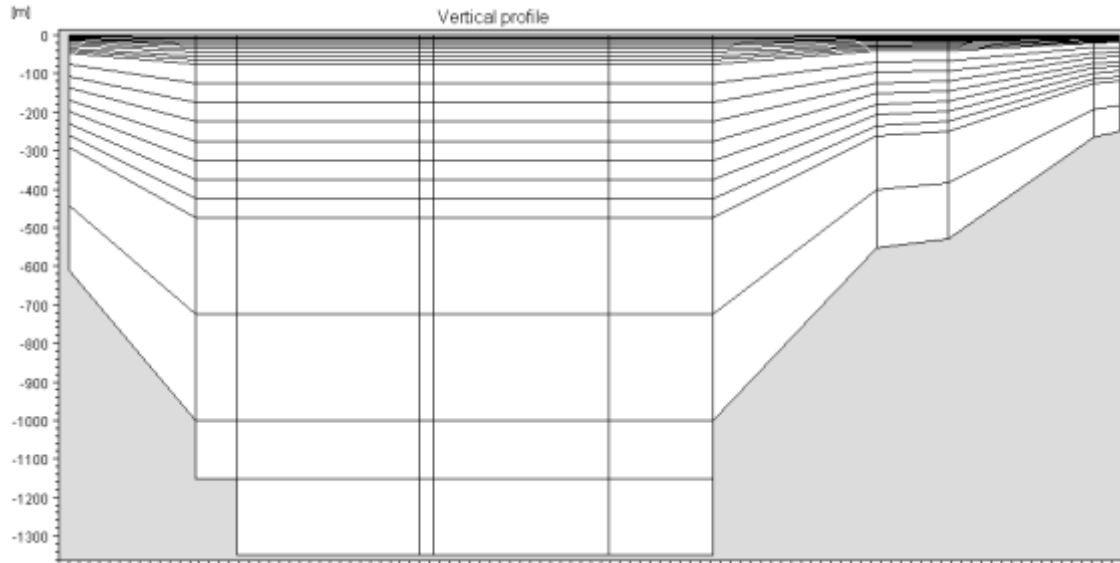


Figura 18. Ejemplo de estructura vertical de capas Z.

Estos diferentes esquemas de resolución vertical se han utilizado en las pruebas de sensibilidad del modelo pues es un parámetro clave en la formación y continuidad de los procesos a través de la columna de agua (estratificación, circulación estuarina por capas, mezcla). Si bien a mayor número de capas mejor es la resolución y por tanto más procesos se incluyen y mejor resueltos serán dichos procesos, el aumento del número de capas conlleva un aumento del tiempo de cómputo y del volumen de información generada y por tanto nuevamente debe buscarse un compromiso de rendimiento entre calidad y eficiencia.

- **IV) RESOLUCIÓN TEMPORAL:** el modelo dispone de su propio paso de tiempo interno para aguas someras y transporte advectivo-difusivo según el esquema semi-implícito de integración del tiempo. Este paso de tiempo, restringido por criterios de estabilidad numérica, es dado por el número CFL (Courant-Friedrich-Lévy) para cada elemento de la malla flexible, según su tamaño y la velocidad de las ondas someras para la profundidad de la columna de agua en que se encuentra cada elemento (**DHI, 2011**).

Además de este paso de tiempo interno, el usuario debe definir el paso de tiempo de los resultados. Al igual que la resolución espacial, la resolución temporal debe seleccionarse en función del objetivo de nuestro estudio. Así, altas resoluciones temporales registrarán procesos de alta y baja frecuencia, pero aumentan el volumen de información (innecesariamente si no son nuestro objetivo los procesos de alta frecuencia), además de impedir observar directamente procesos de baja frecuencia sin post-procesamientos previos. Una baja resolución temporal por el contrario omitirá los procesos de mayor frecuencia. Para nuestro propósito se ha elegido una resolución para la salida de los resultados de 1



hora, la cual dará cuenta de los principales procesos dispersivos por advección (excursión mareal, circulación estuarina, estrés del viento).

- **V) BATIMETRÍA:** la batimetría o topografía submarina es introducida al modelo en forma de puntos individuales georreferenciados (datum internacional WGS-84) por cada sonda batimétrica, expresados por su Longitud-Latitud-Profundidad (referida a partir del nivel histórico más bajo del nivel del mar). La principal fuente de información batimétrica utilizada han sido las cartas náuticas publicadas por el SHOA en su Atlas hidrográfico de Chile (2009).

La mayor parte de la información contenida en las cartas náuticas del SHOA tuvo que ser digitalizada para poder ingresarla al modelo de elevación digital de MIKE (comúnmente conocido como DEM por sus siglas en inglés), pues el SHOA no publica toda esta información, salvo algunas digitalizaciones publicadas por el CENDHOC (Centro Nacional de Datos Hidrográficos y Oceanográficos de Chile). A la fecha de comienzo de actividades del presente proyecto tan sólo se disponía de 16 cartas (28 incluyendo miniaturas) digitalizadas y transferidas al IFOP por el CENDHOC para un total de 45 cartas existentes en el dominio de Magallanes Sur (81 incluyendo miniaturas). De estas 16 cartas (28 miniaturas), tan sólo 3 (5) estaban digitalizadas en datum WGS-84 y listas para trabajar con ellas (**Tablas 6-9, anexo I**). Las otras 13 (23) estaban digitalizadas, pero manteniendo el datum de origen de sus cartas náuticas distinto al WGS-84, que es el internacional y marco de trabajo para nuestro modelo. La escasa proporción de cobertura geográfica que ofrecían las pocas cartas digitalizadas de que se disponían en el momento requirió de la digitalización y conversión de dátum locales y regionales (SAD-69, HITO XVIII, Yendegaia) a WGS-84. Estas tareas se realizaron en conjunto con Geociencias (<http://www.geociencias.cl/>) durante los meses de diciembre 2016 – marzo 2017.

Allá donde faltara cobertura de información por parte de las cartas náuticas del SHOA, especialmente en sectores oceánicos (como cuando se testaron dominios con bordes en océano abierto), se recurrió a batimetrías GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean) de 30 arco segundos de resolución (entre 500 y 1000m). A pesar de la cobertura casi total que ofrece GEBCO su uso debe ser prudente en las zonas interiores pues son muchas las fuentes de origen de esta información, de diferente resolución y sus interpolaciones no son todo lo exactas que demandan estudios de modelación de alta resolución como el presente. En zonas exteriores del océano, su uso es recomendable, pues los errores de exactitud no influyen crucialmente en la hidrodinámica, dada la gran escala a la que ocurren los procesos físicos y a la gran profundidad en el océano.

El modelo asimila la información batimétrica georreferenciada tomando en cada nodo (vértices de cada elemento) de la malla flexible la profundidad de la sonda batimétrica más cercana para después interpolar en un DEM estos valores discretos a toda la extensión del dominio. El método de interpolación utilizado fue el método del vecino natural.

Debido a que el valor que toma cada nodo es el más cercano se debe prestar atención a adecuar la resolución de la malla flexible a la batimetría, aumentando la resolución en aquellas zonas de alta complejidad (constricciones y *sill*) para garantizar su correcta representación. Igualmente, y con el objeto de no aumentar en exceso el número de elementos de la malla, en aquellas zonas consideradas no relevantes (canales y esteros secundarios o sin importancia para la acuicultura) es la resolución de la batimetría la que se debe adecuar a la de la malla flexible y teniendo la precaución de garantizar la representación de las características más significativas de tales zonas (**Figuras 19 y 20, anexo II**). En este sentido, y dado



que la gran mayoría de cartas náuticas se solapan (parcial o totalmente) entre sí, donde hubiera este solapamiento se dio preferencia a las sondas batimétricas de cartas náuticas de menor escala por sobre las de mayor escala, pues las de menor escala son de mayor exactitud en la posición de sus sondas.

- VI) CONDICIONES INICIALES: se refieren al estado inicial de flujo y del campo de masas o densidad en el tiempo inicial ($t=0$) de simulación. Hay dos tipos principales de condiciones iniciales:

- VI.A) CONDICIÓN INICIAL DE FLUJO: la condición inicial de flujo es un campo de velocidades nulo, es decir, el modelo parte del estado de reposo o "*cold start*". En $t=1$ las condiciones de borde y otros forzantes introducen energía al modelo, dando comienzo a la circulación, los cuales en los primeros pasos de tiempo no son realistas, sino hasta alcanzar un "equilibrio dinámico" entre las condiciones iniciales, de borde, forzantes y la batimetría. Este equilibrio se suele alcanzar tras alrededor de 24 horas simuladas.

- VI.B) CONDICIÓN INICIAL DEL CAMPO DE MASAS: Las condiciones iniciales del campo de masas o densidad son dadas por la distribución espacial en el dominio 3D de la temperatura y la salinidad. Similar al caso de la batimetría, la temperatura y la salinidad se introducen como puntos discretos, cuyos valores son tomados por los elementos de la malla flexible 3D mediante el método de interpolación bilineal para una condición inicial de "*hot start*". La correcta definición del campo de masas inicial es crítica, sobre todo en zonas de baja tasa de renovación de aguas, pues la distribución de masas de agua por densidades permite la creación de capas y flujos multidireccionales. Por este mismo motivo es tan importante el esquema de organización de capas verticales de la malla flexible pues de su resolución, y obviamente también de la exactitud de la data ambiental de temperatura y salinidad que en los elementos de la malla se interpola, dependerá cuán acertada sea la distribución de densidades en la columna de agua.

Son varias las posibles fuentes de información ambiental para utilizar como condiciones iniciales de temperatura y salinidad. Al principio de la modelación se utilizó Mercator® (de Mercator France), el cual es un modelo global con una resolución espacial de $1/12^\circ$ (un poco menos de 10 km en estas latitudes) y que ofrece cobertura a casi todo el dominio del modelo (**Figura 21**), pero que debido a esta misma resolución no cubre sectores interiores de fiordos, esteros y senos (Skyring, Otway).

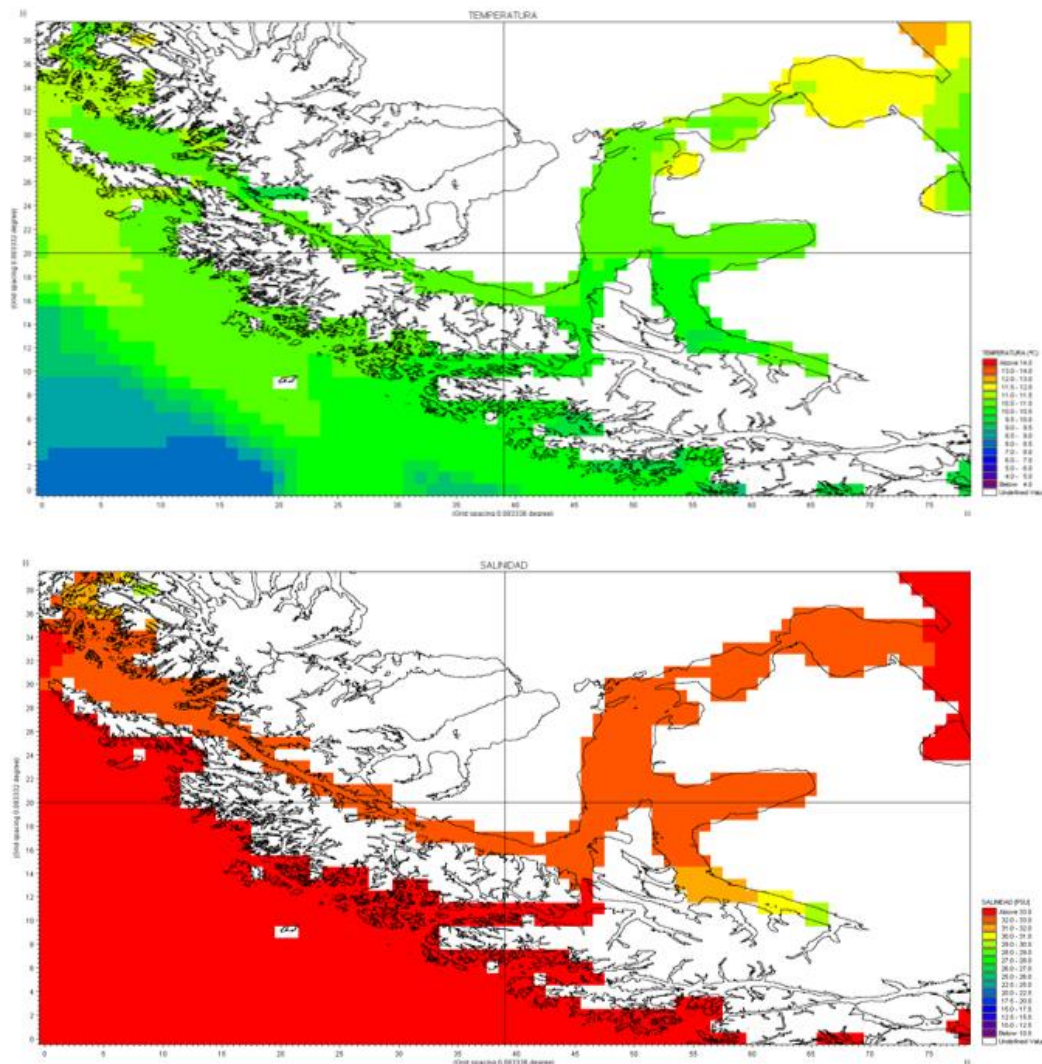


Figura 21. Temperatura (arriba) y salinidad (abajo) en superficie para el 8 de Marzo 2017 de Mercator®.

Sin embargo, el uso de Mercator® se desestimó en cuanto estuvieron disponibles los perfiles de CTD de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”. Si bien la cobertura espacial que ofrecen los datos de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017” es aún más limitada (**Figura 9 y Tabla 2**) que la cobertura espacial de Mercator®, los datos de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017” son las reales condiciones ambientales de temperatura y salinidad. Por este motivo las interpolaciones al resto de la malla flexible de los datos de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017” (**Figura 22**) son más confiables que las de Mercator®, en los cuales se han detectado diferencias entre ambos de hasta 7 PSU en salinidad y por debajo de 2°C de temperatura.

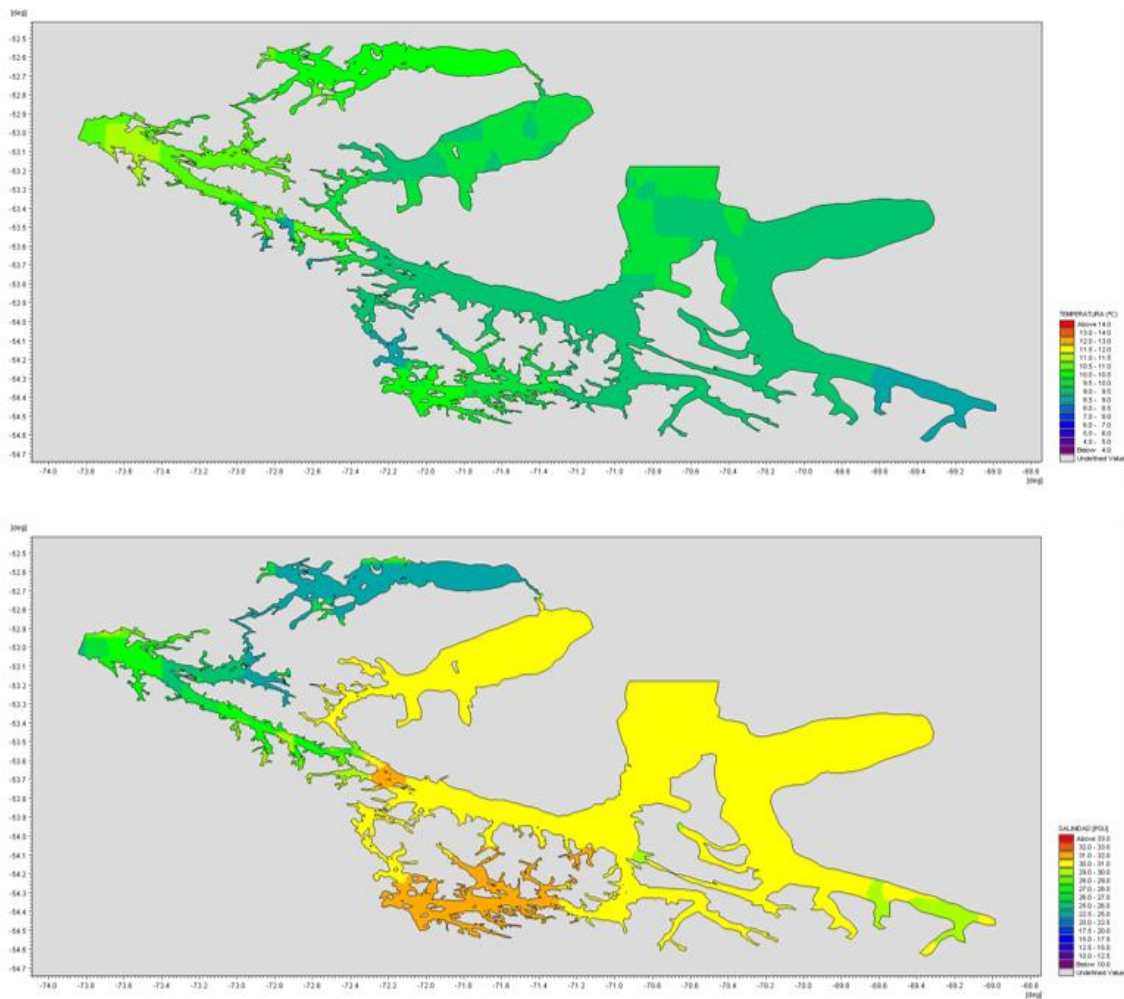


Figura 22. Interpolación en la malla flexible de temperatura (arriba) y salinidad (abajo) en superficie para el 10 de marzo 2017 de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”.

- VII) CONDICIONES DE BORDE: dos son los tipos de condiciones de borde, las cuales junto con el resto de forzantes (viento y agua dulce) serán los componentes del modelo encargados de iniciar y sustentar la circulación. Estas son las condiciones de borde del campo de densidad (temperatura y salinidad) y las de nivel del mar (marea). Las condiciones de borde actúan como su nombre indica en cada uno de los 3 bordes del modelo: boca Nor-Oeste del estrecho de Magallanes a la altura de caleta Meteoro, boca sur del canal Cockburn en su unión al canal Ocasión y estrecho de Magallanes a la altura de Punta Arenas. Al contrario que las condiciones iniciales que solo intervienen en el tiempo $t=0$, actúan durante todo el tiempo de la simulación, variando en sus valores de principio a fin de la simulación.

- VII.A) CONDICIONES DE BORDE DEL CAMPO DE MASAS: dadas por los gradientes de densidad (y estos a su vez dadas por la temperatura y salinidad) a lo ancho y en profundidad del plano vertical que supone el interfaz 2D de



contacto del dominio con el exterior en cada borde. Estos gradientes de densidad introducen forzamientos de baja frecuencia debido a gradientes baroclínicos. Al igual que las condiciones iniciales del campo de masas, las condiciones de borde fueron construidas a partir de los datos de CTD de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano–Otoño 2017”, tras desestimarse el uso de Mercator® por la falta de exactitud que presenta al interior de Magallanes Sur. En esta campaña se hicieron 2 series de lances de perfiles con CTD (**Tabla 2, anexo I**), una al principio de la campaña cuando se instalaron los equipos que se dejarían instalados por cerca de un mes entre el 5 y el 14 de Marzo de 2017, y otra serie de lances al retiro de los equipos entre el 14 y el 22 de Abril de 2017. Con ambas series de CTD se construyeron modelos 3D de temperatura y salinidad (como los que se utilizan en las condiciones iniciales) y de ellos se extrajeron los planos 2D verticales correspondientes a cada borde y para cada periodo. De esta manera cada borde dispone de 2 planos 2D de temperatura y salinidad: uno correspondiente al inicio de la simulación el 10 de Marzo y otro correspondiente al final de la simulación el 15 de Abril (**Figura 23, anexo II**). De esta manera las condiciones de borde van variando de principio a fin de la simulación. Los valores de temperatura y salinidad, georreferenciados en los planos 2D de las condiciones de borde, son asimilados por los elementos de la malla flexible más cercanos mediante interpolación normal. Dado que sólo se proporcionan condiciones de borde en el primer y último paso de tiempo de la simulación, se hace también una interpolación (lineal) entre estos 2 pasos de tiempo que contienen información de temperatura y salinidad a cada paso de tiempo de la simulación.

- **VII.B) CONDICIONES DE BORDE DEL NIVEL DEL MAR:** estas condiciones actúan sobre los mismos 3 bordes del dominio oscilando la superficie libre del mar y forzando al modelo a través de gradientes de presión barotrópicos. El criterio de su selección de entre todas las fuentes posibles de información fue anteriormente en la etapa previa a la calibración del modelo donde se definieron los límites del dominio del modelo, y las condiciones definitivas se muestran en la **Tabla 10 y Figura 23 y 24 (anexo II)**. Según las densidades espectrales podemos ver que caleta Meteoro y canal Ocasión poseen una mayor densidad de componentes diurnas entorno a las 24 h de frecuencia, mientras que en Punta Arenas la señal diurna pierde peso respecto de la señal semidiurna (M2).

Borde 1	Marea Borde 1	Borde 2	Marea Borde 2	Borde 3	Marea Borde 3
C. Meteoro	SHOA	C. Ocasión	IFOP	Punta Arenas	SHOA

Tabla 10. Fuente de información de las condiciones de borde de del nivel del mar en cada borde del dominio.

- **VIII) FORZANTE ATMOSFÉRICO:** el principal forzante atmosférico es el viento a través del estrés que genera por cizalla con la superficie del mar, transfiriendo energía y momentum a la columna de agua. Además del viento también hay que tener en cuenta otras variables como la presión atmosférica en su empuje de la superficie del mar, los balances por pérdida de agua (evaporación) o ingreso de agua dulce (precipitación) y por último la temperatura del aire, radiancia y cobertura nubosa en cuanto a los balances de intercambio de calor en la interfase aire-agua.

El forzante atmosférico actúa sobre toda la superficie del dominio del modelo y es ingresada como un campo horizontal 2D cuyos valores georreferenciados son interpolados bilinealmente a cada elemento de la malla flexible horizontal e interpolados linealmente si los pasos de tiempo del forzante no coinciden con los de la simulación.



A pesar de disponer de información meteorológica de las estaciones meteorológicas instaladas durante la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”, esta fuente de información no se utilizó como forzante del modelo. El motivo se debe a que es conocido que el viento en superficie es direccionado en gran medida por los accidentes topográficos, de manera que la dirección del viento en un canal de cierta orientación difiere en cierto grado de la dirección del viento de otro canal con distinta orientación. Esto es aún más notorio en topografías abruptas como lo son los canales y fiordos de Magallanes que alcanzan altitudes de cientos de metros en algunos sectores. Por esta razón se prefirió utilizar información meteorológica procedente de modelos que garantizan una cobertura total de información en todo el dominio.

Con tal propósito en las instalaciones de IFOP se ejecutaron simulaciones del modelo WRF (*Weather Research Forecast*) con características tales que se ajustaran a los requerimientos del modelo de Magallanes Sur. La resolución espacial del modelo fue de 5km en toda la extensión del dominio y adicionalmente se incluyeron 2 anidamientos de 1km en áreas del estrecho de Magallanes alrededor de la isla Carlos III y en el canal Cockburn (**Figura 25**). En las pruebas de sensibilidad del modelo se testó el desempeño de estas dos diferentes resoluciones de forzante atmosférico. En la prueba **02J** (ver más adelante **Tabla 11**) se utilizó el modelo atmosférico WRF de 5km de resolución, el cual al cubrir toda la extensión del modelo hidrodinámico no precisó de mayor procesamiento para poder ser acoplado. En cambio, en la prueba **02K** se utilizaron tanto el modelo de 5km como los dos anidamientos de mayor resolución en áreas de interés. Dado que el forzante atmosférico debe ser ingresado al modelo hidrodinámico como una malla regular y uniforme en su resolución y que para la prueba **02K** se quieren utilizar ambos modelos WRF de diferentes resoluciones, antes se deben homogeneizar sus resoluciones. Para ello se deben llevar aquellas áreas que sólo contienen información del modelo de más baja resolución (5km) a una mayor resolución (1km) en un post-procesamiento que se conoce como “*downscaling*”, mientras que en las áreas del modelo donde se dispone de ambos modelos WRF sólo utilizaremos el modelo de mayor resolución (1km). El “*downscaling*” se trata de interpolaciones lineales en las 3 dimensiones del modelo WRF (latitud, longitud y tiempo). De esta manera el resultado es una malla regular y de resolución constante de 1km. En definitiva el “*downscaling*” permite utilizar modelos de distinta resolución al igualar ambas resoluciones sin detrimento de perder calidad de resolución, ya que sólo se realizan las interpolaciones sobre las áreas de mayor resolución. Debida a que las estaciones meteorológicas, junto con las demás mediciones de correntometría, se ubicaron en sectores donde la cobertura del modelo WRF es de 1km de resolución (delimitadas en verde – **Figura 25**), el *downscaling* no tiene efecto directo, ni es cuantificable, en estos sectores pues las interpolaciones no se realizaron sobre estas áreas sino sobre las áreas donde el modelo WRF sólo presenta cobertura de información a 5km de resolución (área delimitada en rojo excluyendo las áreas delimitadas en verde – **Figura 25**).

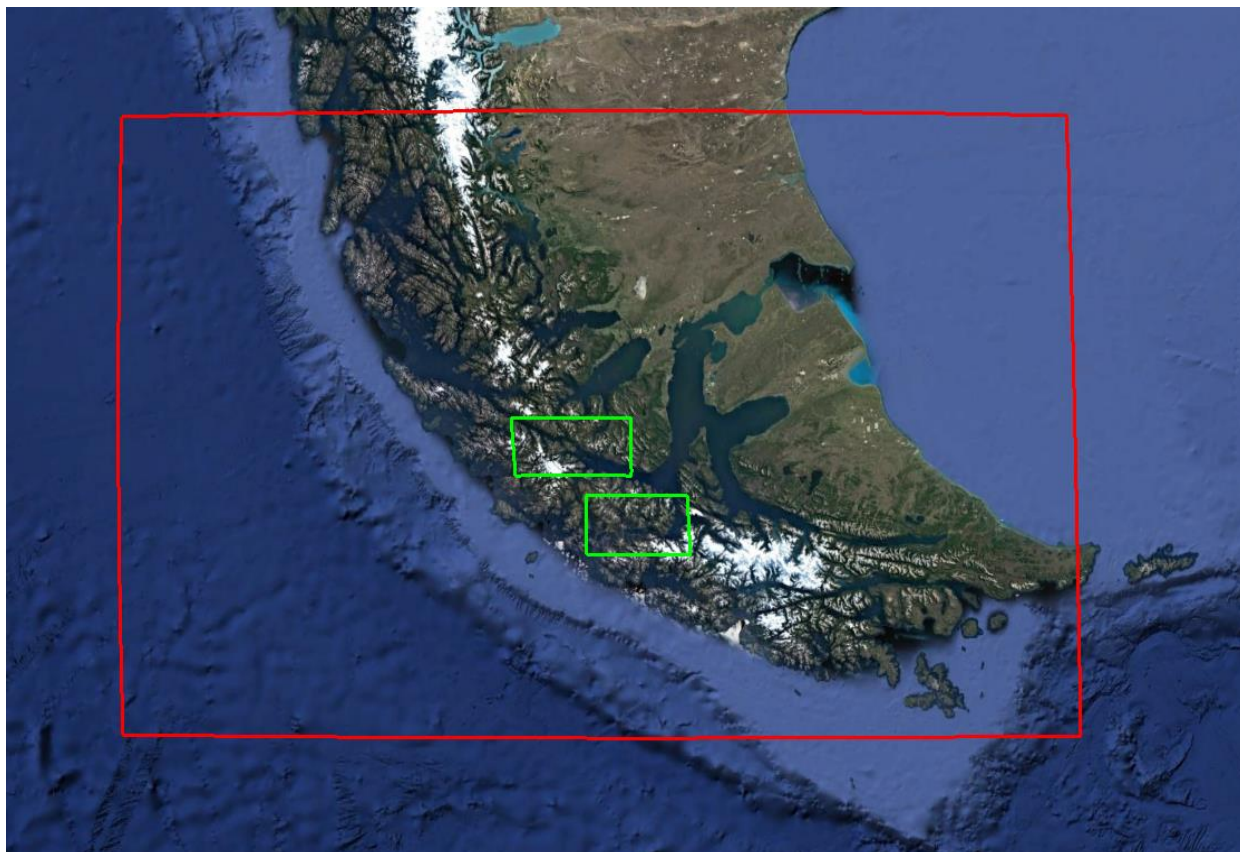
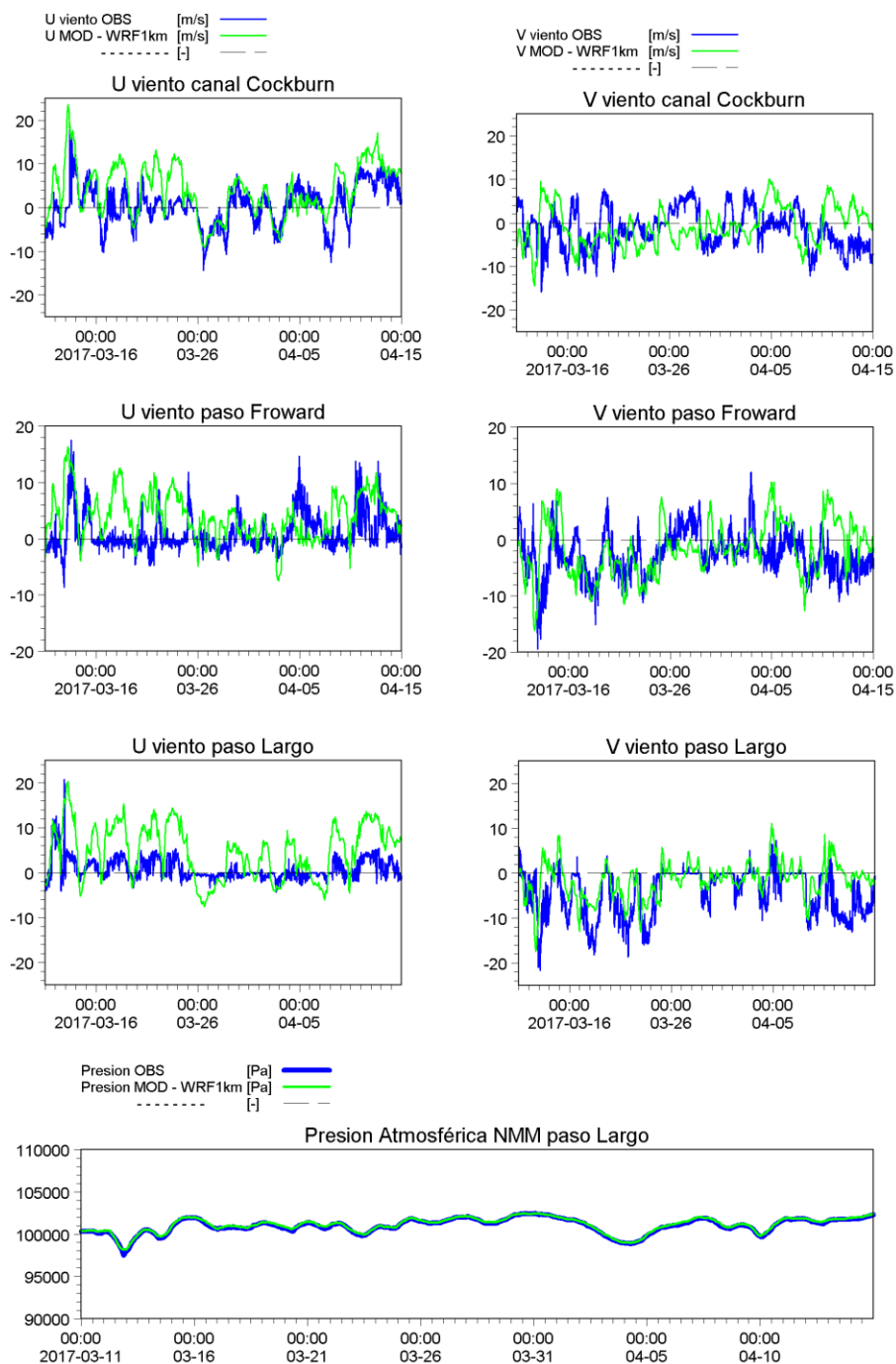


Figura 25. Dominio del modelo WRF de 5km (en rojo) y de los 2 anidamientos de 1km (en verde).

Las salidas de este modelo atmosférico proporcionaron información de dirección del viento, velocidad del viento, presión atmosférica reducida a nivel del mar, precipitación, temperatura del aire, radiancia de onda corta y larga, humedad y cobertura nubosa con una frecuencia de horaria, suficiente para representar los principales procesos atmosféricos que influyen en la hidrodinámica (brisa marina, gradientes térmicos día-noche, etc). La **Figura 26** muestra la evaluación del modelo WRF de 1km de resolución horizontal en sus componentes ortogonales U y V respecto de las observaciones registradas en las 3 estaciones meteorológicas instaladas en la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”. Se puede ver que en general que el modelo es capaz de reproducir los patrones generales de baja frecuencia y la mayor parte de los de más alta frecuencia (las salidas del modelo son cada 1 hora).


Figura 26.

Evaluación del viento y presión atmosférica del modelo WRF 1 km de resolución frente a observaciones de 3 estaciones meteorológicas de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”.

- IX) AGUA DULCE: como indican los antecedentes bibliográficos los aportes de agua dulce al sistema de Magallanes Sur, bien a través de la precipitación directa o de los aportes de ríos y glaciares, son muy significativos en el sector Oeste del área de Magallanes Sur (donde se concentra el interés de la modelación y la acuicultura). Estos ingresos de aguas menos densas y de alta boyantez son muy importantes al dominar la dinámica estuarina de la zona de fiordos y canales introduciendo gradientes gravitatorios en la capa superior de mayor boyantez.

Actualmente se están desarrollando esfuerzos conjuntos con universidades nacionales a fin de desarrollar un modelo hidrológico para el Sur de Chile. A la fecha la única data real a la que se tiene acceso procede de las estaciones de aforo de la DGA (Dirección General de Aguas), la cual cuenta con una red de monitoreo a lo largo del país y que en el sector que ocupa nuestro dominio aporta información de tan sólo 5 estaciones de aforo en su desembocadura al mar (**Figura 27**), ninguna de las cuales cuenta con registro para marzo-abril 2017 ni para caudales medios mensuales ni diarios.



Figura 27. Estaciones de aforo de caudal en su desembocadura al mar de la DGA.

Ante esta perspectiva se optó por un método de aproximación llevado a cabo para tratar de mejorar las resoluciones espaciales y temporales de la información hidrológica recogida en el *Balance Hídrico de Chile, 1987*. En este glosario se da información, entre otros parámetros, de la escorrentía anual media para una serie de cuencas administrativas de todo Chile entre 1951 y 1980 (i.e.: isla de Chiloé, costeras entre río Aysén y río Baker, etc). Algunas de estas cuencas administrativas pertenecen a una única cuenca hídrica, esto es al caudal de un único río en su desembocadura en el mar (lo que ocurre especialmente para aquellas cuencas hídricas importantes i.e.: río Baker, Pascua, Serrano, Aysén, Puelo). Sin embargo, en muchos otros casos, donde hay multitud de pequeños y medianos ríos, los datos de escorrentía media anual por cuencas administrativas engloban a más de un único río o cuenca hídricas, no pudiendo saber a través de este glosario



qué valor de escorrentía media anual corresponde a cada una de las múltiples cuencas hídricas que se agrupan bajo la misma cuenca administrativa.

Para aumentar la resolución espacial, esto es definir los principales puntos o fuentes de descarga de agua dulce al medio marino de cada una de las cuencas hídricas dadas por la DGA en su *Balance Hídrico de Chile, 1987*, se optó por identificar para cada una de estas cuencas administrativas todas las cuencas hídricas que se incluyen dentro de los límites de cada cuenca administrativa. Para no hacer esta tarea demasiado extensa se fijó un umbral arbitrario de 15km² app., de manera que aquellas cuencas hídricas cuya superficie marcada por la divisoria de aguas estuviera por debajo de dicho umbral no se serían incluidas. Para poder hacer esta subdivisión de las cuencas administrativas en cuencas hídricas, se contó con archivos de capas SIG derivados de modelos de elevación digital topográficos donde se recogen todas las cuencas hídricas que desalojan a cota cero; estos archivos SIG permiten identificar las cuencas hídricas a partir de las divisorias de aguas y además cuantifican su superficie.

Una vez contamos con el glosario de cuencas administrativas (con información de su extensión y escorrentía media anual) y con las cuencas hídricas incluidas dentro de las primeras (con sólo información de su extensión) se hace una extrapolación del valor de la escorrentía media anual de cada cuenca administrativa que le corresponde a cada cuenca hídrica en función de la proporción de superficie de la cuenca hídrica respecto del total de la superficie de su cuenca administrativa.

Para cuantificar la validez de esta metodología tomaremos como ejemplo el río San Juan, que desemboca en el estrecho de Magallanes al Sur de Punta Arenas en la Península de Brunswick, por tratarse de uno de los pocos ríos dentro de la zona de estudio con registro semicontinuo (hasta Septiembre 2016) en su desembocadura y que además en el *Balance Hídrico de Chile, 1987* figura como cuenca independiente y a su vez está englobada dentro de una cuenca administrativa, lo que permite cuantificar el grado de acierto de la aproximación descrita. La **Figura 28** muestra la información registrada durante el periodo 1951-1980 en el *Balance Hídrico de Chile, 1987* para el río San Juan y la cuenca administrativa a la que pertenece (124: Costeras e islas entre río Hollenberg – golfo Almirante Montt – canal Valdez – canal Vicuña – Ancon sin salida - estrecho Smith – estrecho de Magallanes – canal Jerónimo – seno Otway – punta Jorge – laguna Blanca y 125: costeras entre laguna Blanca -seno Otway – canal Jerónimo y estrecho de Magallanes).

ROL	CUENCAS	SUPERFICIE	PRECIPITACION		ESCORRENTIA	
		Km²	m³/s	mm/año	m³/s	mm/año
124	COSTERAS E ISLAS ENTRE R. HOLLENBERG-GOLFO ALMTE. MONTT-CANAL VALDEZ-CANAL MORLA VICUÑA-ANCON SIN SALIDA-ESTRECHO SMITH-ESTRECHO DE MAGALLANES-CANAL JERONIMO-SENO OTWAY-PUNTA JORGE-LAGUNA BLANCA Y					
125	COSTERAS ENTRE LAGUNA BLANCA (inclusive) SENO OTWAY-CANAL JERONIMO Y ESTRECHO DE MAGALLANES					
12582001	R. SAN JUAN	1256	33.5	841	18.9	474
	TOTAL CUENCAS: 124 Y 125	25766	1583	1937	1294	1584

Figura 28. *Balance Hídrico de Chile, 1987* – Detalle en río San Juan (rol 12582001) dentro de las cuencas administrativas de rol 124-125.

Según nuestra aproximación la escorrentía media anual del río San Juan debe ser función directa de la proporción de superficie de su cuenca hídrica respecto del total de la superficie de las cuencas administrativas a la que pertenece. Siendo que la superficie total de las cuencas administrativas 124-125 es 25766 km² y que desalojan un promedio anual de 1294 m³/s, el río San Juan de 1256 km² de superficie, y según la asunción de que la precipitación/escorrentía es uniforme a lo largo y ancho de la cuenca administrativa a la que pertenece, debiera presentar una escorrentía media anual de 63 m³/s. El *Balance Hídrico de Chile, 1987* muestra sin embargo una escorrentía media anual de 18.9 m³/s (muy similar a los 18.54 m³/s según el último año de registro Oct-2015 Setp-2016 de la DGA <http://snia.dga.cl/BNAConsultas/reportes>), lo que es un 30% de la estimación. Si para este cálculo en vez de aplicar el valor de la superficie de la cuenca hídrica del río San Juan del *Balance Hídrico de Chile* (1256 km²) usamos el valor extraído a partir de los archivos SIG de divisorias de aguas (819 km² - **Figura 29**) tal como se hace con el resto de cuencas hídricas desconocidas entonces el valor de la escorrentía media anual del río San Juan es de 41 m³/s, cercano del 100% de sobrestimación sobre la observación, pero aun así un método que ofrece un resultado más acertado.

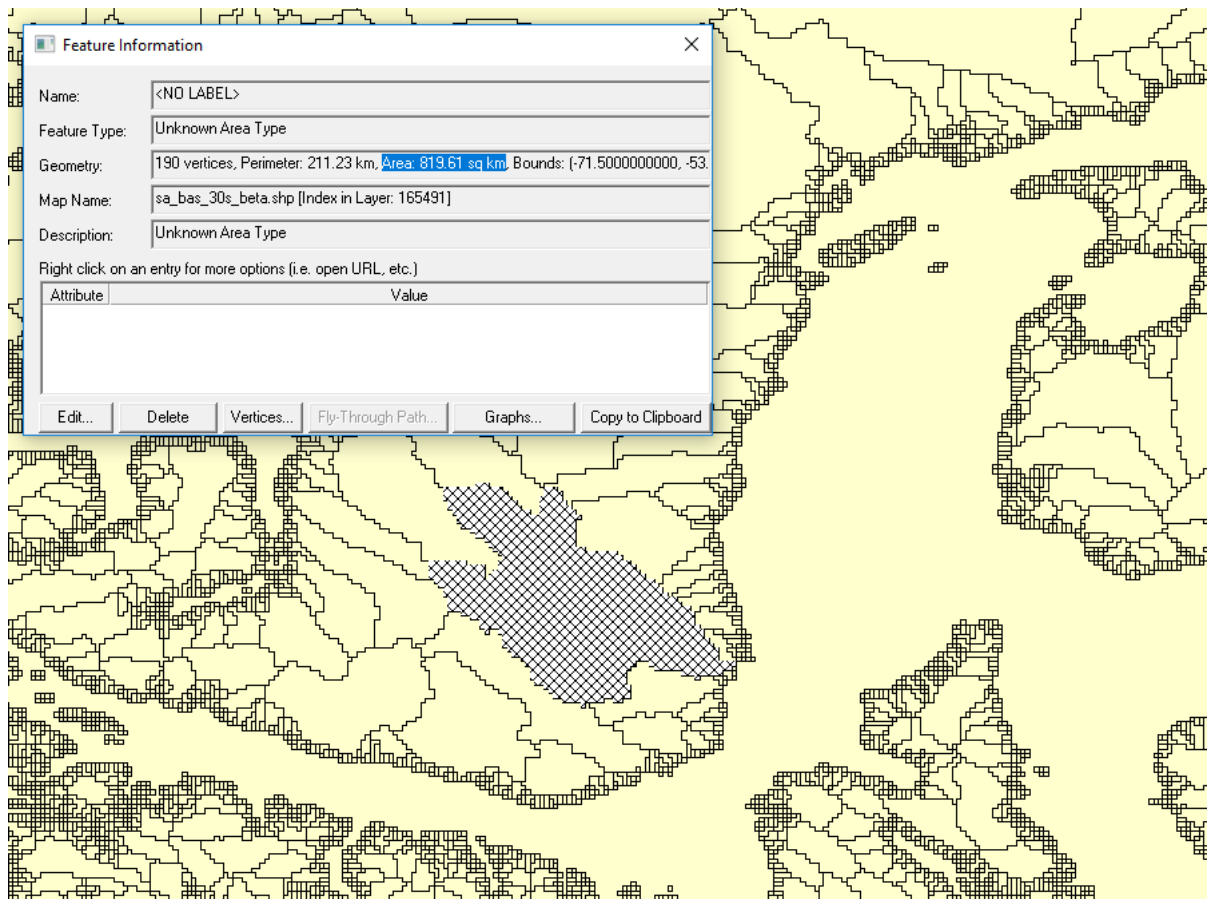


Figura 29. Superficie de la cuenca hídrica del río San Juan según los archivos SIG de divisorias de aguas.

Cabe recordar que este es un ejemplo que tomamos como blanco de validación metodológico y que en la práctica no sabremos la superficie de las cuencas hídricas más que por los archivos SIG de divisoria de aguas. Esta metodología que si bien da información de todas las cuencas y fuentes de agua dulce al mar cuya superficie se mayor al umbral que establezcamos cuenta con el error derivado de asumir de que la precipitación/escorrentía es uniforme por sobre la superficie de una misma cuenca administrativa, lo que puede diferir más o menos pero nunca ser completamente exacto, sobre todo en cuencas tan extensas como la 124-125.

Para aumentar la escala temporal de promedios anuales a promedios diarios nos valemos del registro continuo y diario de la estación de aforo más cercana de la DGA a cada una de estas cuencas hídricas y extrapolamos a promedios diarios los promedios anuales dados por la DGA.

La **Figura 30** muestra en el mapa las 146 fuentes que se identificaron en el dominio de Magallanes Sur y que fueron utilizadas en el modelo de MIKE3.

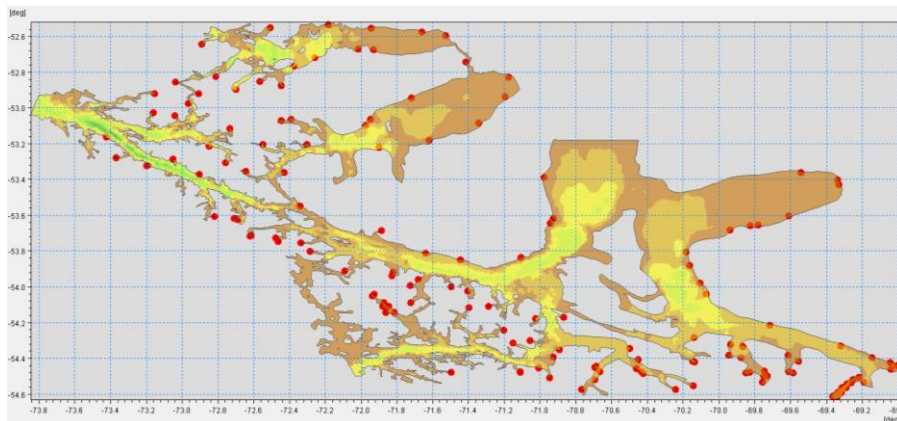


Figura 30. Fuentes de agua dulce en el modelo de Magallanes Sur.

Evaluación, calibración y validación del modelo de Magallanes Sur:

Antes de dar por válido un modelo, los resultados de éste deben ser sometidos a análisis y satisfacer una serie de criterios. Según Murphy (1993), la bondad de un modelo de predicción climático (y aquí podemos incluir también oceanográfico) se basa en los criterios de consistencia, calidad y valor, independientemente unos de los otros. Consistencia se refiere a la relación entre lo esperable y el pronóstico que aporta finalmente el modelo, siendo un buen pronóstico en cuanto a consistencia aquel en el que el pronóstico se corresponde a lo esperable en cuanto a lo que la evidencia científica y experiencias previas sugieren. Por calidad se entiende el grado de acierto entre el pronóstico y las observaciones del terreno para un mismo periodo de tiempo, de manera que en un pronóstico de buena calidad los resultados del modelo son cercanos a las observaciones. El valor del pronóstico de un modelo es variable en función de los beneficios que produzcan sus resultados o productos por parte de cada usuario. Esta metodología de validación está ampliamente difundida y aplicada a numerosos trabajos de modelación y pronóstico en oceanografía (Bosboom et al., 2014; Hernández et al., 2015; Wang et al., 2016) entre otros tipos de estudios (climáticos, económicos, previsión de riesgos, hidrológicos, agrícolas, etc.)



De los tres criterios la calidad es el único del que se puede dar una medida cuantitativa de su grado de acierto/error y lo haremos a partir de los índices estadísticos del error medio cuadrático normalizado (NRMSE) y el coeficiente de correlación (CC), índices que serán aplicados en la evaluación de series de tiempo de parámetros entre los resultados del modelo y las observaciones (**Figura 31**).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}$$
$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{obs,max} - X_{obs,min}} * 100$$
$$R = \frac{Cov_{xy}}{S_x S_y}$$

Figura 31. Ecuaciones para NRMSE (arriba y medio) y CC (abajo).

Pruebas de sensibilidad del modelo de Magallanes Sur

Una vez compilados todas las posibles fuentes de información de los componentes del modelo de Magallanes Sur se procedió a evaluar su desempeño mediante pruebas de sensibilidad de los resultados que aportaron cada uno de ellos.

Entre cada una de estas pruebas o test se enfrentaron diferentes parámetros o componentes, de uno en uno cada vez (**Tabla 11**), con el objetivo de poder identificar cual de cada uno de ellos ofrecía un mejor desempeño en la evaluación de condiciones ambientales verificables mediante comparación con las mismas condiciones registradas en el terreno durante la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”. Estas pruebas de sensibilidad se simularon por periodos cortos (10/03/2017 – 18/03/2017) a fin de agilizar la tarea sin que ello supusiera pérdida alguna de sensibilidad.

Todas estas pruebas de sensibilidad se realizaron a partir del estado de desarrollo anterior en que se identificaron cuáles eran los bordes, y la extensión del dominio (**Figura 12 y Tabla 4**), más adecuados en función del desempeño de la evaluación del nivel del mar (**Figura 13 y Tabla 5**).



TEST	Batimetría y Malla	Otros Malla	Capas Verticales	Densidad	Meteo	Agua Dulce	Solución técnica
01D	Todas Cartas SHOA malla-06	Depth Cut-off 0m Sigma Depth Ø	30 Sigma	Mercator®	-	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02A	Todas Cartas SHOA 1st reviewed malla-10	Depth Cut-off 0m Sigma Depth Ø	30 Sigma	Mercator®	-	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02B	Todas Cartas SHOA 1st reviewed malla-10	Depth Cut-off -12m Sigma Depth Ø	30 Sigma	Mercator®	-	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02C	Todas Cartas SHOA 1st reviewed malla-10	Depth Cut-off 0m Sigma Depth Ø	30 Sigma	CTD campaña IFOP	-	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02D	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth Ø	30 Sigma	CTD campaña IFOP	-	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02E	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth Ø	30 Sigma	CTD campaña IFOP	WRF 5km	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02G	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth Ø	50 Sigma	CTD campaña IFOP	WRF 5km	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02H	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth Ø	50 Sigma	CTD campaña IFOP	WRF 1km	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02I	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -200m	40 Sigma + 9 Z	CTD campaña IFOP	WRF 5km	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02J	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -200m	40 Sigma + 9 Z	CTD campaña IFOP	WRF 5km	Si Temp=10°C	Alto Orden
02K	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -200m	40 Sigma + 9 Z	CTD campaña IFOP	WRF 1km	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02L	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -100m	40 Sigma + 10 Z	CTD campaña IFOP	WRF 1km	Si Temp=5°C	Bajo Orden
02M	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -100m	40 Sigma + 10 Z	CTD campaña IFOP	WRF 1 km 2 x friction	Si Temp=5°C	Bajo Orden
02N	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -100m	40 Sigma + 10 Z	CTD campaña IFOP	WRF 1 km 2 x friction no heat ex	Si Temp=5°C	Bajo Orden

Tabla 11. Pruebas de sensibilidad del modelo Magallanes Sur con los componentes y parametrizaciones de cada una.

3.2 Objetivo N°2

Llevar a cabo un análisis de la conectividad para los distintos escenarios ambientales necesarios para dar cuenta de la variabilidad ambiental intra-anual del sistema y elaborar una matriz de conectividad para cada escenario ambiental, estableciendo las probabilidades de conexión entre los distintos sectores.

Concepto de conectividad:

Por conectividad se entiende una medida cuantificable de la dispersión de partículas que son transportadas de un lugar a otro por medio de los campos de corrientes. La conectividad *per se* es una variable adimensional que se cuantifica por la probabilidad de que una partícula de un área llegue a cualquier otra área (lo que se conoce como conectividad *downstream*), o bien por la probabilidad de que partículas de cualquier área hayan llegado a un área determinada (lo que se conoce como conectividad *upstream*). Estas conectividades se establecen para un tiempo dado (denominado horizonte). De esta manera para establecer la conectividad de una zona es necesario primeramente realizar la modelación hidrodinámica, de la que obtenemos el campo de corrientes, para posteriormente recrear la modelación de dispersión de partículas sobre dicho campo de corrientes y así finalmente obtener las matrices de probabilidad en el post-procesamiento estadístico de las trayectorias de deriva de las partículas (**Figura 32**).

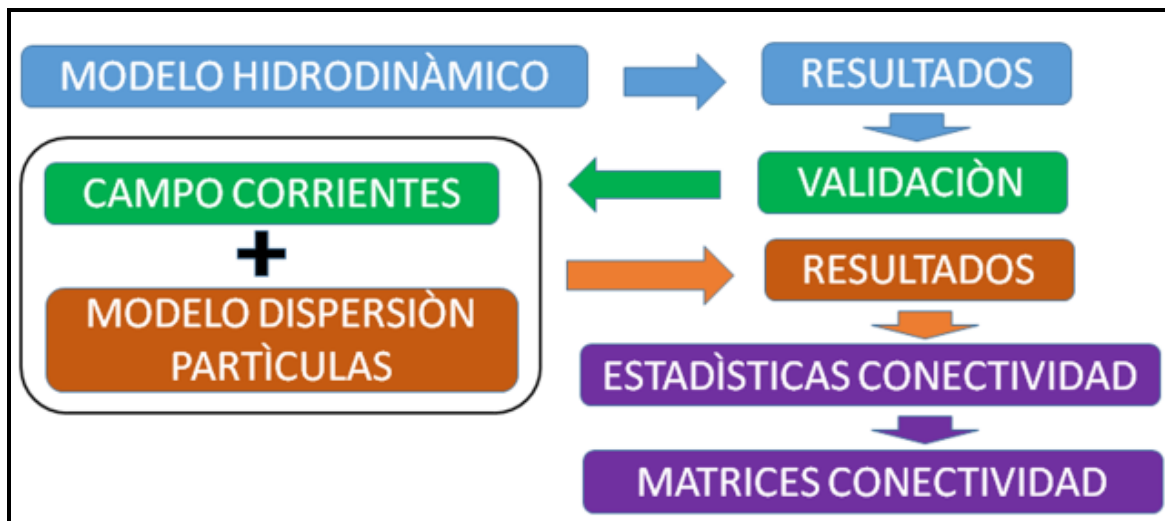


Figura 32. Diagrama de flujo de las etapas de desarrollo en conectividad.

Como la conectividad da cuenta de las conexiones en el transporte de agua entre dos lugares, debemos discretizar el área de estudio para poder cuantificar la conectividad en función de las posiciones que ocupa cada partícula al inicio y final de su deriva. Esta división del área de estudio (el dominio del modelo) en parcelas o sub-áreas (que son las unidades de trabajo básicas de conectividad) se hace en paralelogramos iguales entre sí. Las probabilidades de conectividad se determinan para todas y cada una de dichas áreas o parcelas en que se divide el dominio, y a su vez tanto para la dispersión *upstream* (de arriba de partículas) y *downstream* (dispersión o emisión de partículas), como para cada uno de

los horizontes temporales que se consideren. En el caso de la dispersión *upstream*, las probabilidades de arribo a un área diana (parcela) desde cualesquiera otras áreas, se calcula como el porcentaje de las partículas que desde cada uno de esas otras áreas terminan en el área objetivo al cabo de un horizonte (**Figura 33**). En la conectividad *downstream*, las probabilidades de dispersión desde un área (parcela) emisario hacia cualesquiera otras áreas, se establece a partir del porcentaje de las partículas que desde el área emisario han llegado a cada una de las otras áreas al cabo de un horizonte (**Figura 34**).

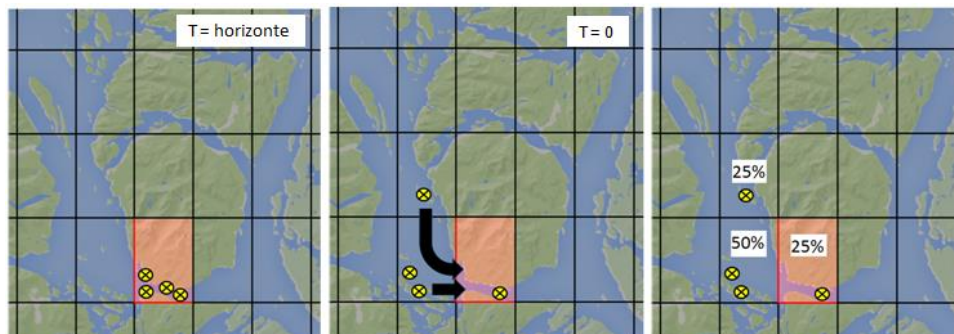


Figura 33. Ejemplo de conectividad para dispersión tipo *upstream*. Unidad de trabajo (caja) diana en rojo.



Figura 34. Ejemplo de conectividad para dispersión tipo *downstream*. Unidad de trabajo (caja) diana en rojo.

Los límites a la conectividad son impuestos por el tiempo de simulación, el máximo horizonte temporal que se quiere conocer y los límites geográficos del dominio del modelo numérico. Puede haber tantos horizontes como se quiera, siempre y cuando el horizonte más largo no exceda el tiempo de simulación, pues ninguna partícula sería tomada en cuenta dentro de los cálculos de conectividad por no haber alcanzado su horizonte antes del fin de la simulación. La conectividad se establece entonces, a partir de cálculos estadísticos georreferenciados sobre las posiciones de inicio y final de las trayectorias que describen las partículas puestas en movimiento por los modelos de dispersión de partículas, y que se mueven merced a los campos de corrientes generados a partir de la modelación hidrodinámica desarrollada previamente.

Las posiciones de las partículas en el dominio son dadas por su ubicación en una u otra de las unidades de trabajo o sub-áreas en que se divide el área de estudio, a las que simplemente llamaremos “cajas”. Cajas son todas aquellas sub-áreas individuales en que se subdivide el área total y que representan las unidades de trabajo sobre las cuales se establece la

conectividad (en ejemplo acotado de la **Figura 35** en azul). El tamaño de estas cajas es igual entre todas ellas y se define según la aplicación o finalidad que se le vaya a dar a la conectividad. Es decir, el tamaño de las cajas es determinado en función del tamaño de las áreas del terreno en que queremos establecer la conectividad, siendo la premisa de que la caja es la unidad fundamental y menor de información de conectividad. Es decir, dentro de una caja no se conoce la posición exacta de una partícula, sólo se sabe que esa partícula (y cualquier otra) se encuentra dentro de sus límites. Así se emplea un tamaño de caja de igual o menor tamaño que las parcelas del terreno cuya conectividad queremos conocer.

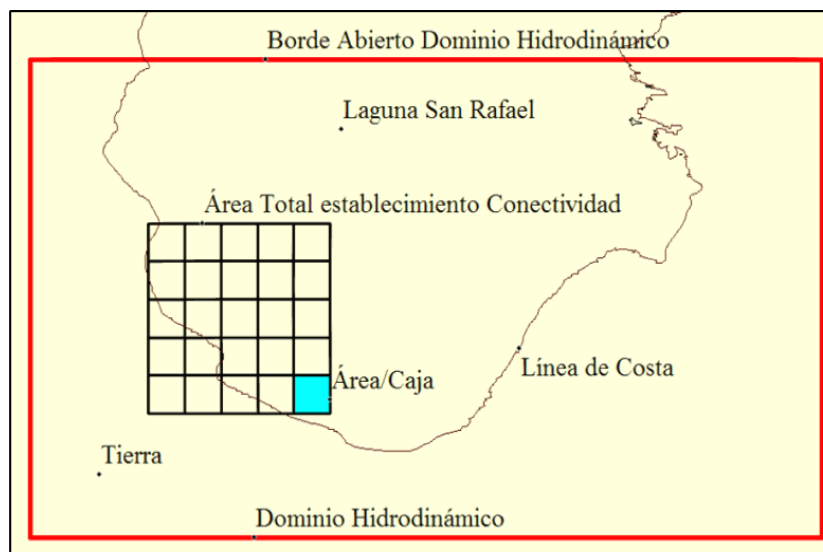


Figura 35. Definición de caja (unidad de trabajo) y área de conectividad dentro del dominio del modelo. Ejemplo acotado de la laguna San Rafael.

El número de partículas que ingresan al dominio es definido por el usuario, y siempre buscando un compromiso entre representatividad estadística y carga de trabajo: un alto número de partículas da mayor robustez a la estadística de conectividad, pero ralentiza considerablemente los cálculos, además de aportar poco valor añadido; un número demasiado bajo no garantizaría que todas las cajas o parcelas susceptibles de albergar partículas cuenten con el número necesario de éstas para dar representatividad de todas las distintas conectividades potenciales que se pueden establecer. Igualmente debe ser fijada la tasa de ingreso de las partículas, pudiendo ser constante en cada paso de tiempo, variable, único ingreso, etc. En cualquier caso, hay que considerar que aquellas partículas que se encuentren en circulación en un paso de tiempo distante del final de la simulación menor que su horizonte no serán contabilizadas para los cálculos de conectividad *downstream* ni *upstream* (**Figura 36**). Así mismo cada partícula puede establecer tantas conectividades como horizontes pueda completar antes del final de la simulación. Dicho de otra manera, en cada paso de tiempo una partícula puede establecer una nueva conectividad siempre y cuando el horizonte de esa partícula en cada uno de esos pasos de tiempo no exceda el límite final de la simulación (**Figura 36**); esto es lo que se conoce por “reciclaje” de partículas, el cual optimiza el desempeño de la metodología, permitiendo un mayor número de conectividades con menos partículas en movimiento.

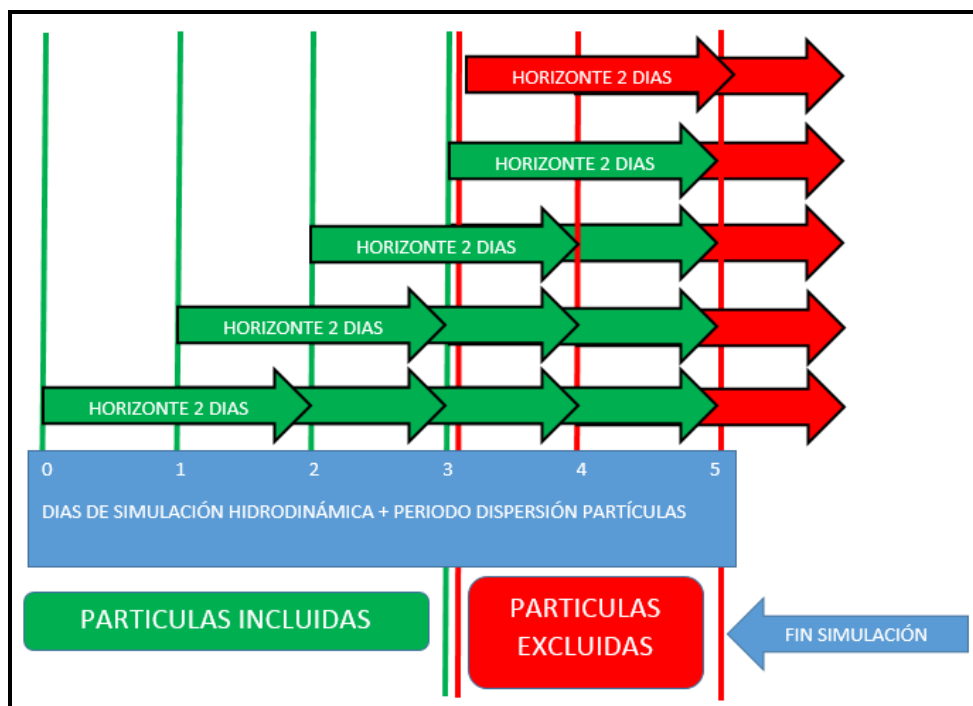


Figura 36. Cronograma que explica cómo las partículas se excluyen / incluyen (y el “reciclaje de éstas últimas”) en base a la relación horizonte / tiempo de simulación.

Si bien el número de partículas que ingresa al dominio es conocido y definido por el usuario, no lo es el lugar específico por donde ingresa cada una de ellas. Estas nuevas partículas que ingresan lo hacen sobre toda la superficie del dominio de forma aleatoria, habiendo unidades de trabajo o cajas donde ingresan más partículas que en otras, lo cual no es relevante mientras garanticemos un número significativo de ellas por unidad espacial de trabajo. Las unidades de trabajo, parcelas o cajas cuya superficie sea mixta terrestre/acuática igualmente podrán recibir partículas y por tanto participar en la conectividad, pero aquellas partículas que caigan sobre terreno terrestre serán excluidas de posteriores cálculos. Así las sub-áreas o cajas cuya superficie sea íntegramente terrestre no participarán de manera alguna de posteriores cálculos de conectividad (cajas “inactivas”), mientras que las que reciban partículas sí lo harán (a las que denominaremos cajas “activas”).

Al tratarse de dominios abiertos en sus bordes, aquellas partículas que salen de los límites del dominio son excluidas de todo cálculo. También debe considerarse que las masas de agua que acceden al interior del dominio a través de sus bordes no portan partículas. Es debido a estas dos singularidades que el número total de conectividades que participan de los cálculos estadísticos de conectividad, a pesar de partir del mismo número de partículas, no son iguales para las dispersiones *upstream* y *downstream*, según las partículas se intercambian entre sub-áreas, entrando y saliendo de éstas, o al hacerlo del dominio del modelo (**Figura 37**).

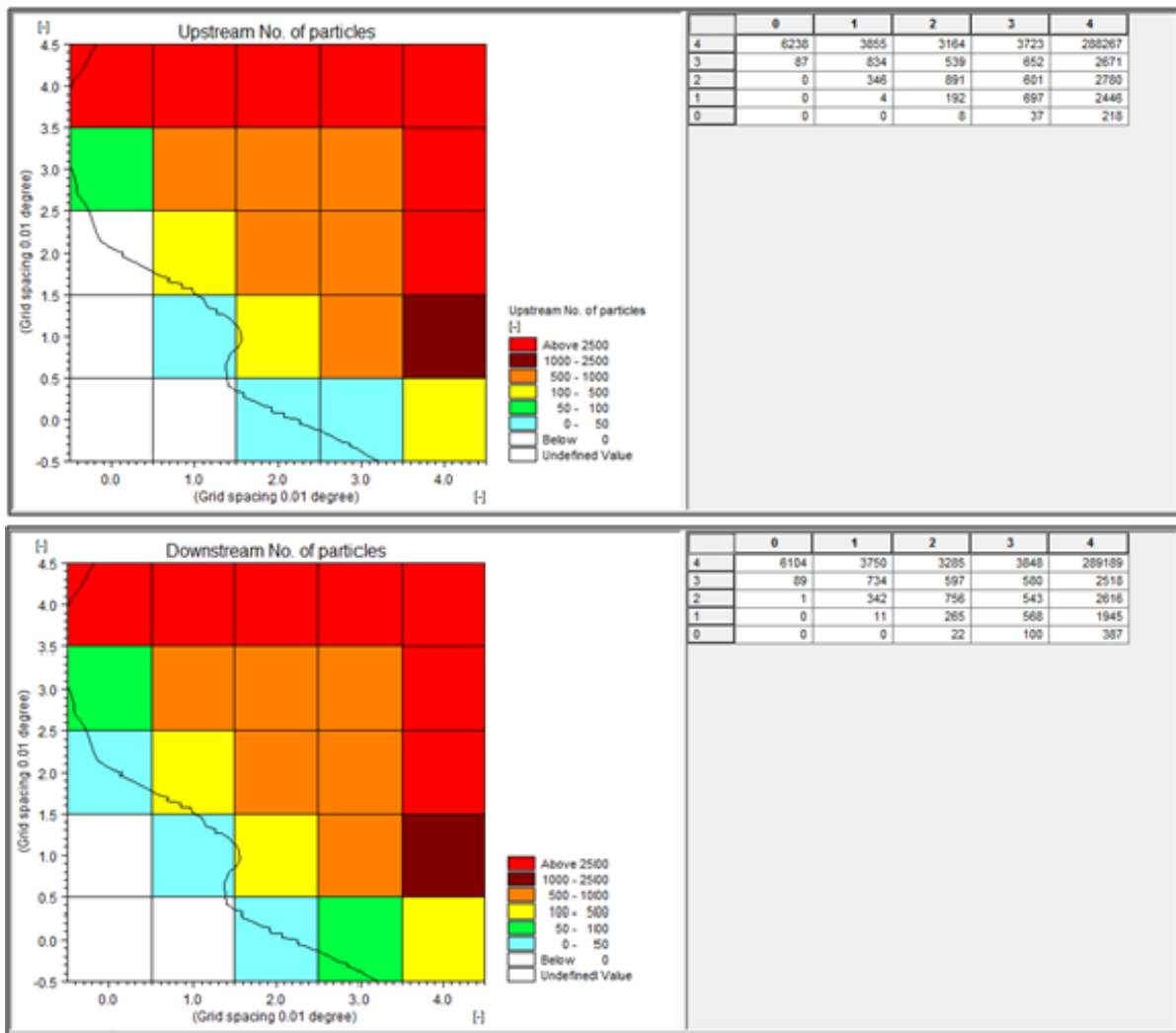


Figura 37. Comparativa del número de partículas para un mismo modelo entre las dispersiones *upstream* y *downstream*. Mapa mostrando número de partículas de la matriz que georreferencia dicha información.

El que las partículas que salen del dominio sean excluidas y que las masas de agua que ingresan por los bordes abiertos no contengan partículas implica que hay una pérdida de información en los límites del dominio. Cuanto mayor sea el número total de partículas en el dominio menos significativo es esta pérdida de información, la cual puede ser asumida en dichos bordes por estar éstos alejados de las zonas interiores de interés. Otra opción es establecer la conectividad en un área de menor superficie al dominio del modelo hidrodinámico (como en el ejemplo de la **Figura 35**), de manera que aquellas partículas que salen del área de conectividad (pero no de la superficie del dominio total del modelo) no se pierden y pueden volver a entrar posteriormente.

Productos de conectividad:

- I) MATRICES DE CONECTIVIDAD: se obtienen a partir del post-procesamiento estadístico de los resultados de los modelos de dispersión de partículas (ver “Concepto de Conectividad”). Por cada estudio de conectividad, como el que nos ocupa de Magallanes Sur, se genera un set de matrices conteniendo tantas matrices como:

$$n^{\circ} \text{ matrices} = (n^{\circ} \text{ escenarios}) \times (n^{\circ} \text{ horizontes}) \times (n^{\circ} \text{ dispersiones}) \times (n^{\circ} \text{ cajas})$$

Es decir, para un estudio dado hay un set A de matrices. Del set A habrá un sub-set B de matrices para cada escenario y para cada escenario habrá otro sub-set C de matrices por cada horizonte temporal, y a su vez otro sub-set D para cada tipo de dispersión (*downstream / upstream*) y finalmente habrá una matriz por cada caja activa de cada sub-set A-B-C-D como se muestra en la **Figura 38**.

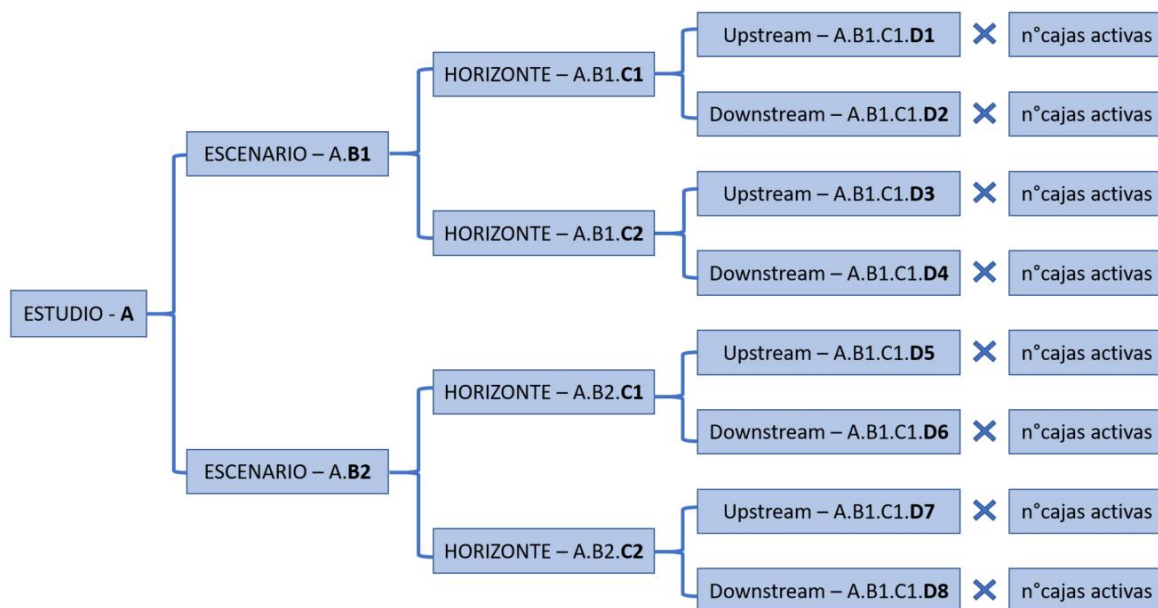


Figura 38. Set principal y sub-sets de matrices para un estudio de conectividad.

En el estudio de Magallanes Sur consideramos, como veremos a continuación, 6 escenarios ambientales, lo que sumado a 3 horizontes temporales y 2 dispersiones (*downstream / upstream*) supone un total de 36 sub-sets de matrices. Cada uno de estos 36 sub-sets contendrá su vez tantas matrices como cajas activas haya, de manera que cada matriz contiene la información de conectividad de cada caja activa. En cada matriz cada uno de sus elementos contiene la información probabilística de conectividad de la parcela de agua que se corresponde con dicho elemento georreferenciado en el dominio del modelo (**Figura 39**).



Figura 39. Ejemplo de una matriz de 5x5 elementos conteniendo probabilidades de conectividad y georreferenciada al estrecho de Magallanes (Punta Arenas). El recuadro rojo indica el elemento al cual hacen referencia las probabilidades de conectividad de los demás elementos.

El tamaño de las cajas o parcelas (elementos georreferenciados de las matrices) se escogió en función del tamaño de los lugares donde se emplazan los centros de cultivo dentro de un barrio. El barrio más pequeño de los barrios que se encuentra en Magallanes Sur es el 60 en la confluencia de los canales Magdalena y King (**Figura 6**) y tiene un tamaño de 6.5x10km aproximadamente. Sin embargo, la mayor parte de los 65km² de superficie de dicho barrio (y de los demás) corresponde a superficie terrestre, por lo que resultaría inadecuado definir el tamaño de las cajas en función del tamaño del barrio. Un criterio más acertado es hacerlo en función del tamaño de los sectores interiores donde realmente se ubican los centros de cultivo, es decir, senos, bahías, puertos y esteros. Idealmente se seleccionaría el menor tamaño posible, pero ello implicaría aumentar significativamente el volumen de información; al disminuir un tamaño de caja dado a la mitad supone aumentar por 4 el volumen (aumenta exponencialmente). Por ello se ha de buscar un compromiso entre el menor tamaño posible de caja y la capacidad de cómputo para procesar estos grandes volúmenes de información, en este caso el criterio computacional se estableció en un máximo de 1GB por cada uno de los 36 sub-sets de matrices.



Según el límite de 1GB de volumen de información por sub-set y las características morfológicas de la costa (ancho de esteros, bahías, etc.), finalmente se optó por un tamaño de caja de 2.75 km², a razón de 0.015° de latitud por 0.025° de longitud. La razón de estos tamaños se basa en que el modelo opera las distancias en coordenadas geográficas, y en donde 0.015° de latitud son 1.668km en cualquier parte del dominio (la latitud es constante), mientras que la longitud (que sí varía con la latitud) 1.668km a la latitud promedio del dominio del modelo (53.55°) equivalen a 0.025°. De esta forma, a medida que nos alejamos de la latitud promedio del dominio, la longitud aumenta hacia el Norte y disminuye hacia el Sur. Esta es una aproximación que debe tenerse en cuenta y que es ineludible al trabajar en un sistema de referencia de coordenadas geográficas. Sin embargo, el hecho de que las cajas no sea perfectamente iguales no significa pérdida alguna de exactitud o sesgo, pues las probabilidades son establecidas a partir del número de partículas que se mueven entre cajas, y no en referencia al tamaño de éstas últimas.

Con estos tamaños de caja, y puesto que la conectividad se estima para el total del dominio del modelo entre las latitudes -54.6° / -52.53° y las longitudes -73.8° / -69°, resultan un total de 26827 cajas en total. De estas 26827 cajas, un promedio de 7650 son cajas activas por cada uno de los 36 sub-sets de datos de 1GB para un total de 275.000 matrices y 36 GB.

Como se explicó en la metodología de conectividad una de las limitantes es que no se puede conocer la posición de las partículas entre su tiempo inicial en que se liberan y el final de su horizonte. Siendo que el horizonte máximo de las partículas que simulan el virus ISA es de 3 días, estimación extraída según las tasas de decaimiento dadas por Murray (2005), se consideró que es un periodo de tiempo demasiado largo para no tener información de lo que sucede entre tanto. Por ello se consideró que fueran 3 los horizontes temporales que dieran cuenta de la evolución de la dispersión (y de la conectividad) con el discurrir del tiempo a partir de un momento inicial (equivalente al inicio de un brote). Estos horizontes se establecieron a 24, 48 y 72 horas del inicio de la liberación de las partículas.

El número de partículas en circulación también es un criterio que requiere de precaución en cuanto a que un alto número de partículas significa aumentar los tiempos de cómputo. Teniendo en cuenta el “reciclaje de partículas” (**Figura 36**) no es necesario ingresar un alto número de ellas, pero sí un número suficiente que garantice que las partículas que ingresen por toda la superficie del modelo ocupen la mayor área posible y durante la cantidad de tiempo suficiente que garantice que en sus trayectorias de deriva registran el mayor número posible de procesos dispersivos. Teniendo en cuenta que las partículas ingresan al modelo aleatoriamente por toda la superficie del dominio y a una profundidad que definimos entre -1 y -30 metros (rango de profundidad habitual de las jaulas de cultivo), se consideraron que ingresaran un promedio de 5 partículas por caja activa (7650 cajas activas app.), lo que supone un total de 38.000 partículas. Un número mayor de partículas otorgaría mayor robustez a la estadística de conectividad, pero el “reciclaje de partículas” optimiza el desempeño de estas partículas, entregando tantas conectividades por cada partícula como número de pasos de tiempos cuyo horizonte temporal no exceda el límite de la simulación haya. También se tuvo en cuenta el criterio de 1GB de volumen máximo para el cómputo y post-procesamiento estadístico de cada uno de los 36 sub-sets de matrices.

Estas 38.000 partículas se liberaron a diferentes tiempos para cada horizonte temporal. Debido al mencionado “reciclaje de partículas”, si se ingresaran las partículas de cada horizonte al mismo tiempo (o si se utilizaran las trayectorias de deriva de las mismas partículas para establecer conectividades a diferentes horizontes) aquellas partículas con un horizonte más corto podrán completar más veces su horizonte en cada paso de tiempo que se encuentren en circulación antes del final de la simulación. Como veremos a continuar en “Escenarios de variabilidad ambiental intra-anual”, estos escenarios son de 5

días de duración, donde las primeras 24 horas se descartan pues son para que el modelo alcance su equilibrio dinámico a partir de las condiciones iniciales de flujo “cold start”. A fin de que las partículas de los horizontes de 24, 48 y 72 horas completen un número igual de horizontes a través de sucesivos “reciclajes” las partículas de 24 horas de horizonte se liberaron a las 00:00 del inicio del 4° día de los 5 totales, las partículas de 48 horas de horizonte se ingresaron a las 00:00 del inicio del 3° día y las partículas de 72 horas de horizonte se ingresaron a las 00:00 del inicio del 2° día. De este modo, y considerando un paso de tiempo de 1 hora, las partículas de los distintos horizontes completaron su horizonte 24 veces antes del final de la simulación de 5 días (**Figura 40**)

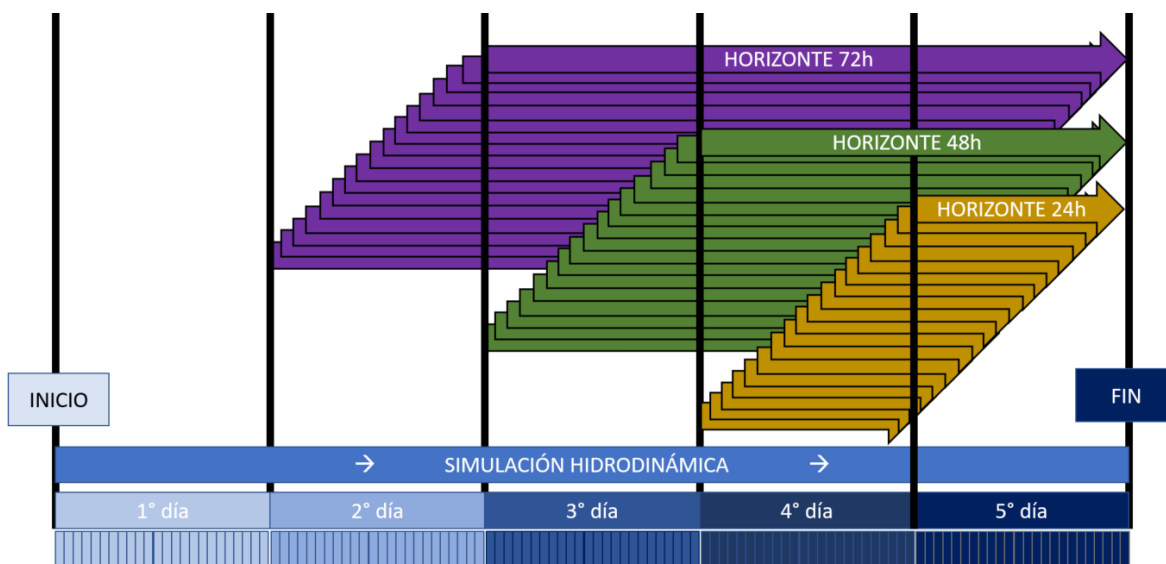


Figura 40. Ingreso partículas en el modelo de dispersión de partículas de Magallanes Sur para los distintos horizontes y número de conectividades que establecen.

- **II) CONECTIVIDAD INTER-BARRIO:** dado que los barrios de cultivo o agrupaciones de centros de cultivo no tienen un tamaño ni forma igual entre sí y que las cajas de las matrices de conectividad (es decir, los elementos georreferenciados de parcelas de agua) sí que tienen un tamaño y forma igual y constante, no es posible saber por método directo cuál es la probabilidad de conectividad total y exacta de cada barrio. Para ello habría que integrar las probabilidades de todas las cajas o parcelas que componen un barrio.

Actualmente se está llevando a cabo el desarrollo de una metodología que permita identificar la conectividad total de un barrio a partir de las conectividades individuales de varias cajas o parcelas. Por el momento y para eliminar esta incertidumbre se propone un método alternativo que permite estimar cualitativamente a qué barrios van las partículas de un barrio dado (conectividad *downstream*) o de dónde vienen (conectividad *upstream*). Este método de identificación de conectividades inter-barrio es cualitativo en cuanto que permite visualizar qué barrios están conectados entre sí, pero no aporta un valor probabilístico de tal conectividad.

Para ello, al igual que para la obtención de las matrices de conectividad, se desacoplan los respectivos modelos de dispersión de partículas por cada escenario. A las partículas de estos modelos desacoplados se les asigna un marcador, que permite identificarlas y distinguirlas entre sí. El marcador que lleve cada partícula será el propio del barrio en el cual las liberemos. La **Figura 41** muestra los límites de barrios de Magallanes Sur en el dominio del modelo desacoplado de dispersión de partículas. En cada uno de estos barrios se introducirán (aleatoriamente y por sobre toda su superficie) las partículas respectivas de cada uno de dichos barrios (y con su marcador de identificación propio).

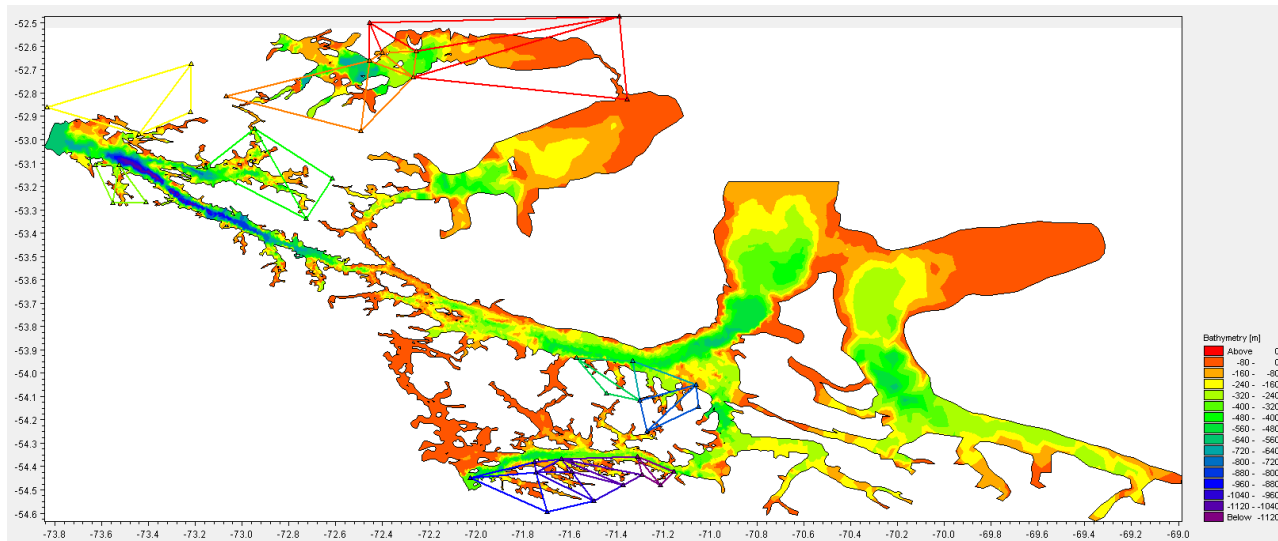


Figura 41. Barrios en el modelo de dispersión de partículas de Magallanes Sur.

De esta manera podemos identificar si hay partículas de un barrio que se dispersan hacia otros e identificar qué barrios se comunican entre sí y cuántas conectividades (*downstream* y *upstream*) establece cada barrio con otros barrios. Las conectividades que por este método se determinen lo hacen independientemente de la ubicación real de los centros de cultivo en cada barrio, es decir, los resultados suponen el mayor riesgo de infección posible de un barrio, pues habrá partículas que ingresen al modelo en los mismos bordes de un barrio (que puede estar colindado con otro barrio vecino), aumentando las probabilidades de conexión (y de riesgo por contaminación) entre barrios. Por tanto, es una buena aproximación para conocer el potencial máximo de contagio entre barrios o agrupaciones de concesiones.

Además de introducir cada partícula en el barrio que le corresponde según su marcador, las partículas (al igual que en la metodología de matrices de conectividad) ingresan aleatoriamente al modelo por toda la superficie de sus barrios y a una profundidad entre -1 y -30 metros (rango de profundidad habitual de las jaulas de cultivo).

En la conectividad inter-barrio el horizonte de las partículas es dado por el tiempo de vida máximo promedio dado en la literatura de 3 días (Murray, 2005). Considerando escenarios de variabilidad ambiental de 5 días (120 horas) de duración, las partículas se introducen al cabo de 1 día para permitir al modelo estabilizarse en las primeras 24 horas y alcanzar su equilibrio dinámico. Entre las 24 y 48 horas del inicio se introducen 10 partículas / hora en cada uno de los barrios. Todas estas partículas alcanzarán su horizonte de 3 días (72 horas) antes del final de la simulación. Después de las primeras 48



horas y hasta el final del escenario se siguen introduciendo partículas a una tasa de 1 partícula / hora por cada barrio. Este protocolo de liberación de partículas al modelo se hace en busca del resultado final que es conocer cuál es el alcance máximo de la dispersión espacial de las partículas desde cada barrio, sin importar el momento en que se establecen las conectividades, siempre que las partículas solo puedan establecer conectividades durante 3 días tras su ingreso al modelo, lo cual se garantiza determinando su tiempo de vida máximo igual al máximo horizonte (3 días).

Escenarios de Variabilidad Ambiental Intra-Anual:

Una vez satisfechos los criterios de validación del modelo de Magallanes Sur, la conectividad no se aplica sobre el mismo modelo, sino sobre modelos análogos al validado, llamados escenarios que derivan del modelo parental de Magallanes Sur y del que toman sus mismos componentes, parametrizaciones y calibraciones, pero cuyos forzantes representan condiciones ambientales de variabilidad intra-anual “ideales”. Si bien dichos escenarios “ideales” nunca van a ocurrir en la realidad exactamente tal cual los definimos y por un periodo de tiempo igual, sí que representan las condiciones ambientales de variabilidad intra-anual más características de la región de estudio. De esta manera se obtiene una herramienta de aplicación a cualquier época y momento por su carácter climatológico donde las variables ambientales “ideales” dan cuenta de fenómenos de escala regional de baja frecuencia (patrones estacionales verano-invierno).

Los escenarios que se plantean cubren la variabilidad estacional de los 3 forzantes principales: marea, agua dulce y viento. Con los antecedentes bibliográficos (descritos al inicio del objetivo 1. Antecedentes) y simplificando la variabilidad ambiental intra-anual de la región de Magallanes Norte, se distinguen 4 escenarios principales:

- Invierno Cuadratura (IC): dirección y velocidad del viento más habitual en invierno (270° y 3.5 m/s). Fuentes de agua dulce de régimen glaciar en sus niveles mínimos anuales. Fuentes de agua dulce de régimen pluvial en sus niveles máximos anuales. Ciclo mareal en periodo de cuadratura (mínima amplitud).
- Invierno Sicigia (IS): dirección y velocidad del viento más habitual en invierno (270° y 3.5 m/s). Fuentes de agua dulce de régimen glaciar en sus niveles mínimos anuales. Fuentes de agua dulce de régimen pluvial en sus niveles máximos anuales. Ciclo mareal en periodo de sicigia (máxima amplitud).
- Verano Cuadratura (VC): dirección y velocidad del viento más habitual en verano (270° y 4 m/s). Fuentes de agua dulce de régimen glaciar en sus niveles máximos anuales. Fuentes de agua dulce de régimen pluvial en sus niveles mínimos anuales. Ciclo mareal en periodo de cuadratura (mínima amplitud).
- Verano Sicigia (VS): dirección y velocidad del viento más habitual en verano (270° y 4 m/s). Fuentes de agua dulce de régimen glaciar en sus niveles máximos anuales. Fuentes de agua dulce de régimen pluvial en sus niveles mínimos anuales. Ciclo mareal en periodo de sicigia (máxima amplitud).

A estos 4 escenarios (IC, IS, VC, VS) se suman otros 2 escenarios que representan las condiciones más extremas a lo largo de la variabilidad intra-anual a las que denominaremos como “Tormenta”:



- Tormenta Cuadratura (TC): dirección y velocidad del viento más intenso dentro de un año (270° y 16 m/s). Todas las fuentes de agua dulce en sus caudales máximos anuales. Ciclo mareal en periodo de cuadratura (mínima amplitud).
- Tormenta Sicigia (TS): dirección y velocidad del viento más intenso dentro de un año (270° y 16 m/s). Todas las fuentes de agua dulce en sus caudales máximos anuales. Ciclo mareal en periodo de sicigia (máxima amplitud).

Al simular escenarios extremos de cada estacionalidad se está simulando el “peor escenario posible”, lo cual, a pesar de ser poco probable de producirse en la realidad, tiene la función de servir de medida de eventos extremos de cada forzante de variabilidad intra-anual (viento y agua dulce). Debido a la mayor energía que se aporta al sistema es presumible una mayor dispersión de las partículas en estos escenarios de tormenta y, por tanto, si se logran tomar medidas de actuación para estos eventos extremos también se está dando solución a cualquier otro posible evento de menor entidad.

La dirección e intensidad del viento de cada escenario se asumen constantes en toda la superficie del dominio del modelo por estar trabajando dentro de la escala sinóptica. Para determinar cuál es el viento de cada escenario y más característico del periodo que representan (invierno, verano y tormenta) se consideraron fuentes de información de largo registro para describir más adecuadamente los patrones climatológicos del viento. Debido a la escasez de registros de larga duración en el área, la mejor opción fueron datos de la Red Agrometeorológica de INIA (<http://agromet.inia.cl/estaciones.php#estaciones>) en su estación de Punta Arenas Rural (70.874°W / 53.068°S) cuyos reportes a promedios horarios, diarios y mensuales cuenta con registros desde el 2011. De entre las demás estaciones disponibles se prefirió Punta Arenas por estar emplazada en un lugar sin grandes accidentes topográficos alrededor, lo cual evita perturbaciones y que la dirección del viento sea lo más similar posible a la del viento geostrófico de escala sinóptico. Si bien hay fuentes de información con datos de más largo registro, como el caso del Aeropuerto de Punta Arenas con datos desde 1970-2000 (Dirección Meteorológica de Chile, 2008), el detalle de la información es menos preciso que la de la Red Agromet, al solo haber disponible rosetas de viento mensuales que no especifican la frecuencia de muestreo, y cuyos rangos de dirección y velocidad son poco precisos.

Para seleccionar cuál sería el viento (dirección y velocidad) que definiera las condiciones “ideales” de cada escenario se prefirió el análisis de los registros horarios por los promedios diarios y mensuales de la Red Agromet. En registros de mayor frecuencia es más probable que aparezcan mayor número de patrones (mayor variabilidad en la dirección y mayor intensidad) que en registros de menor frecuencia donde estos patrones son promediados y “absorbidos” por la baja frecuencia. Con estos datos se estimó que a fin de introducir en los escenarios ambientales las características más representativas de cada periodo para los escenarios de verano (VC, VS) e invierno (IC, IS) el viento tipo “ideal” sería aquel de dirección más habitual, y de entre estos vientos de cierta dirección la velocidad sería la media de todas ellas. Para los escenarios de Tormenta (TC, TS) en cambio, y a fin de incluir los fenómenos más extremos, se eligió el viento de mayor intensidad del año (es decir, el viento más veloz en promedios horarios) y la velocidad con que sopló dicho viento.

El tiempo de simulación de estos escenarios será determinado en función del mayor horizonte empleado en los cálculos de conectividad. Según Murray (2005) el virus ISA experimenta una tasa de decaimiento del 10% a la hora, la cual para una



concentración mínima infectiva estimada en 10 ISAV TCID₅₀ mL⁻¹ supone que en un periodo de 72 horas (3 días) las concentraciones infectivas debieran estar por debajo de este umbral. De este modo a los 3 días de máximo horizonte para la infección hay que sumar 1 día para garantizar que se alcance un equilibrio hidrodinámico a partir de los forzantes “ideales” de cada escenario, más 1 día extra para la dispersión de partículas, para un total de 5 días de simulación. Durante este día extra las partículas establecerán tantas conectividades como pasos de tiempo de 1 hora contabilicen (“reciclaje de partículas”), es decir, cada partícula podrá establecer 24 conectividades. Así, las 38.000 partículas que introduzcamos al modelo (5 partículas por caja para una estimación de 7650 cajas activas) podrán establecer hasta 912.000 conectividades en cada escenario.

3.3 Objetivo N°3

Proveer la información obtenida a través de un sistema de información geográfica montado en plataforma web.

Durante la elaboración del presente informe de avance se han mejorado las metodologías de implementación de herramientas SIG con las que dar soporte y visualización online de las matrices de conectividad. Si en anteriores etapas de conectividad, etapa I (Chiloé-Aysén) y etapa II (Magallanes Norte), el soporte era prestado por Teramaps Ltda a través del geoportal disponible en <http://ifop.teramaps.cl/>, ahora es Meteodata Ltda quien ha desarrollado y ofrece el soporte técnico a la nueva versión del geoportal. El motivo de esta transición en el soporte web está basado en la búsqueda de una herramienta que, manteniendo las mismas ventajas de la anterior versión, fuera más rápida reduciendo los tiempos de consulta, más segura gracias a una mejor conexión del servidor que soporta la información de conectividad y más eficiente y rentable gracias a la reducción de los volúmenes de información que deben ser subidos al servidor. Además se ha ganado en flexibilidad y capacidad de edición para la inclusión de nuevos estudios de conectividad que se vayan sumando a los 3 ya existentes de Chiloé-Aysén, Magallanes Norte y Magallanes Sur.

En la anterior versión del geoportal se precisaba de generar un archivo shape por cada matriz de conectividad, siendo el número de matrices producto de:

$$n^{\circ} \text{ matrices} = (n^{\circ} \text{ escenarios}) \times (n^{\circ} \text{ horizontes}) \times (n^{\circ} \text{ dispersiones}) \times (n^{\circ} \text{ cajas})$$

Lo que para el tamaño de dominio de los modelos de escala regional (Chiloé-Aysén, Magallanes Norte Y Magallanes Sur) y los tamaños de caja (aproximadamente 2.5-5 km²) arrojaba un total de hasta 216.000 archivos shape entre los 6 escenarios que ocupaban hasta 500 GB de información.

Actualmente, con los desarrolladores de Meteodata, no es necesario generar un archivo *shape* por cada matriz, sino que pueden georreferenciarse directamente los archivos ASCII resultantes del post-proceso de las estadísticas de conectividad. Cada uno de estos archivos ASCII contienen las matrices de conectividad de un horizonte (24 ó 48 ó 72 horas) para un escenario (IC, IS, VC, VS, TC, TS) y un tipo de dispersión (*downstream* / *upstream*), que se corresponde con lo que anteriormente denominamos como un sub-set de matrices, y que en el caso de estudio de Magallanes Sur son 36. Estos 36 sub-sets en conjunto promedian un volumen de 36 GB, que supone unas 15 veces menos el volumen de información de los *shapes* que se derivarían de los mismos ASCII según la metodología empleada en la versión anterior del geoportal.



El geoportal de conectividad se encuentra en <http://ifop.meteodata.cl/conectividad/>, pero a fin de darle una mayor accesibilidad y promoci3n de cara al p3blico se ha insertado dentro de la web de la lnea de investigaci3n en Oceanograf3a F3sica del IFOP en Putem3n, llamada IPROACH (Informaci3n, Pron3sticos y Observaciones Oceanogr3ficas Australes de Chile), disponible en <http://www.iproach.cl>.



4. GESTIÓN DEL PROYECTO

a) Reuniones de coordinación con SUBPESCA

Estas reuniones, entre el ejecutor del proyecto (División Investigación en Acuicultura, IFOP) y la contraparte técnica (Departamento de Acuicultura, Subsecretaría de Pesca y Acuicultura), tienen como propósito reforzar y conducir el desarrollo del proyecto hacia los temas más relevantes y que dieron origen a este estudio (e.g., metodologías y grado de avance de las principales actividades asociadas al proyecto). Por otra parte, para un mejor desarrollo de las actividades comprometidas y para lograr una mayor cobertura participativa, se utilizaron los distintos medios al alcance (correo electrónico, telefonía y teleconferencia). La aplicación de esta modalidad de trabajo facilita la posterior colaboración ante requerimientos específicos que se generen en el desarrollo del proyecto. A continuación detalle de las reuniones presenciales mantenidas con SUBPESCA durante el periodo de desarrollo del presente proyecto (Enero 2016 – Agosto 2017):

a.1) Reunión coordinación con SUBPESCA

Fecha: 11 de Enero de 2016

Lugar: sala de reuniones, Hotel Los Ñires, Coyhaique.

Asistentes:

- Susana Giglio, Subpesca
- Gabriel Soto, IFOP
- Elías Pinilla, IFOP
- Pablo Reche, IFOP
- Cristian Ruiz, IFOP

Objetivo de la reunión: Estado Ejecución de Proyecto / Taller Agua Dulce

- Se presenta estado de avance del proyecto y las posibles soluciones a limitaciones actuales para la completa y correcta ejecución del proyecto (escasez de mediciones de valor para el objetivo principal del proyecto).
- Esta reunión se acordó en Coyhaique en paralelo a un taller organizado por IFOP para exponer a la comunidad local y científica la relevancia de la cuantificación de los aportes de agua dulce al medio marino por parte de ríos y glaciares, el estado del arte, perspectivas y metodologías. En este taller participaron activamente miembros de consultoras ambientales, SERNAPESCA, SEREMI de Medio Ambiente, autoridades del Gobierno Regional de Aysén, Dirección General de Aguas e IFOP.

a.2) Reunión coordinación con SUBPESCA

Fecha: 25 de Enero de 2017

Lugar: Sala de reuniones dependencia CTPA IFOP Castro

Asistentes:

- Susana Giglio, Subpesca
- Elías Pinilla, IFOP
- Pablo Reche, IFOP

Objetivo de la reunión: Estado Ejecución de Proyecto



- Se presenta estado de avance del proyecto y las posibles soluciones a limitaciones actuales para la completa y correcta ejecución del proyecto.

b) Actividades y desarrollo externo

Actividades clave para el desarrollo adecuado de los objetivos del proyecto y que por carga de trabajo y/o competencias técnicas fueron externalizadas a consultores nacionales, primando en la selección de un consultor su experiencia y compromiso. Se mantuvieron reuniones donde se acuerdan aspectos concernientes a los resultados esperados conforme al objetivo a realizar, metodologías para su consecución y compromiso de entrega dentro de plazos que garanticen el desarrollo funcional del proyecto. A continuación se detallan las principales actividades realizadas con consultores externos:

b.1) Consultoría Digitalización Cartas Náuticas SHOA

Fecha: Diciembre 2016 – Abril 2017

Consultor: Geociencias.

Objetivo: digitalización de todas las cartas náuticas correspondientes a la X, XI y XII regiones de Chile que el Servicio Hidrográfico de la Armada tiene actualmente publicadas en el Atlas Hidrográfico de Chile. Entrega de las cartas náuticas digitalizadas como archivos ASCII XYZ.

b.2) Licitación campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017”

Fecha: Marzo - Abril de 2017

Oferta pública: en www.mercadopublico.cl a través de los llamados 1049-43-LP16 publicado el 01/08/2016 (desierta) y 1049-1-LP17 publicado el 06/01/2017 (adjudicada)

Consultor adjudicado: Costa Sur Bravo y Mackenney Consultores Asociados Limitada

Objetivo: medición de parámetros ambientales físicos en el área de Magallanes Sur por 1 mes, incluyendo correntometría euleriana, nivel del mar, temperatura y salinidad y condiciones atmosféricas.

b.3) Consultoría Geoportal de Conectividad

Fecha: Enero de 2017 – Agosto 2017

Consultor: Meteodata.

Objetivo: modificaciones y mejoras del geoportal web que soporta la información de conectividad.

- Planteamiento de posibles mejoras sobre la versión anterior del geoportal desarrollado en las etapas I y II de conectividad.
- Elaboración de una propuesta de desarrollo conjunta entre los puntos de vista y requerimientos de IFOP y el asesoramiento y capacidades del equipo técnico de Meteodata.



5. RESULTADOS

5.1 Objetivo N°1

Realizar una evaluación de los modelos hidrodinámicos que se utilizarán para el cálculo de conectividad, detallando la exactitud y las limitaciones del mismo mediante evaluaciones frente a mediciones de campañas oceanográficas y pruebas de sensibilidad.

A continuación, se presentan las pruebas de evaluación y calibración del modelo para su validación. En cada una de las pruebas se fueron modificando parámetros o *input* del modelo de uno en uno según se detalla en la **Tabla 11**, para así poder evaluar el desempeño de cada tipo de componente uno frente al otro, descartando aquellos con peor desempeño y manteniendo para siguientes pruebas aquellos cuyos resultados fueran más cercanos a la observación. Estas pruebas se realizaron por periodos acotados de tiempo (10/03/2017 – 18/03/2017) a fin de tener una rápida estimación del buen desempeño (o no) de los cambios que introducimos en el modelo.

5.1.1 Prueba batimetría: modelos 01D – 02A

Partimos del modelo **01D**, cuyas condiciones de bordes mejor representaron el nivel del mar al interior del dominio en la etapa previa de determinación de bordes y extensión del dominio del modelo. Sobre este modelo se testó una mejora en la batimetría en base a la detección de errores en la digitalización de la batimetría de las cartas náuticas del SHOA. El error más frecuente y relevante (dada la magnitud del error) fue la posición equivocada del divisor decimal. El escaneo de muchas de las cartas más antiguas y de peor calidad en su tipografía llevó a una incorrecta lectura por parte del escáner, omitiendo en ocasiones el signo decimal donde lo había y viceversa. Estas malas digitalizaciones significan errores de hasta el 1000% y obligaron a una revisión manual de miles de sondas batimétricas. Una vez corregido este error se construyó un nuevo DEM que se interpoló sobre una nueva malla (la malla-10) del modelo **02A**.

Como indicador de la idoneidad de una batimetría u otra se utilizó el nivel del mar, pues éste es fuertemente dependiente de la batimetría debido a las modificaciones que fuerzan a la distorsión de la onda de marea. En la comparación de las series de tiempo de la anomalía del nivel del mar en 7 estaciones del modelo (canal Gajardo, canal Jerónimo, bahía Escondida, estero Staples, isla Wren, seno Chasco y Punta Arenas – **Figura 42, anexo II**) podemos observar a simple vista que la modificación a la batimetría del modelo **02A** no aporta ninguna mejora respecto del modelo **01D**, produciendo incluso una elevación anómala del nivel del mar entre el 16 y 17 de Marzo en las estaciones bahía Escondida, estero Staples e isla Wren. Estas estaciones se ubican en las inmediaciones del paso Froward y península de Brunswick (**Figura 11**).

5.1.2 Prueba batimetría: modelos 01D – 02B

En la siguiente prueba para mejorar la batimetría se probó con la calibración del parámetro *depth cut-off* de 0 m en el modelo **01D**, fijándolo a -12m en el modelo **02B**. *Depth cut-off* es un parámetro que lleva a la profundidad indicada todas



aquellas otras profundidades por encima de dicho límite. En el modelo **02B** se marcó un límite a -12m, lo que hace que todas aquellas profundidades por encima (más someras) sean reubicadas a la cota -12m. Esta prueba se realizó para identificar y descartar en caso de éxito cualquier profundidad demasiado somera que estuviera provocando una elevación irregular del nivel del mar. Como vemos en la **Figura 43 (anexo II)**, este parámetro no resultó tener ningún efecto positivo, resultando contraproducente incluso.

5.1.3 Prueba batimetría y campo de masas: modelos 01D – 02C – 02D

A estas alturas de la modelación ya se disponía de la información de CTD de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn verano – otoño 2017”. Así pues, en el modelo **02C** se introdujeron condiciones iniciales del campo de masas según la distribución de densidades que se registró en el terreno para el periodo en que se están realizando las simulaciones. Hasta entonces se estaba representando el campo de densidades con los datos del modelo Mercator®. Las evaluaciones de CTD se realizaron en 8 estaciones de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn verano – otoño 2017” (estaciones 6, 14, 17, 28, 41, 45, 54 y 58 – **Figura 44, anexo II**) mediante comparación con los perfiles de temperatura y salinidad al inicio (5-14 marzo) y al final (22-14 abril) de dicha campaña, para de esta manera poder estimar la evolución del campo de densidades (**Figuras 45-46, anexo II**). Por esto hay que tomar con precaución la evolución del campo de densidades en estas pruebas cortas entre el 10-18 marzo, pues los CTD de final de la campaña fueron tomados un mes más tarde en abril.

Los *inputs* del campo de densidades construido a partir de la data procedente de la propia campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn verano – otoño 2017” tuvieron un mejor desempeño, especialmente en los perfiles de temperatura donde la data de Mercator® estaba más alejada de la observación y reflejaban una condición de perfil inverso de temperatura donde hay mezcla y homogeneidad en la columna de agua. Por ello las condiciones iniciales (y forzantes) en las venideras pruebas serían las mismas del modelo **02C**.

En el modelo **02D**, que ya contaba con las condiciones iniciales de los CTD de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn verano – otoño 2017”, se realizó una nueva prueba de batimetría. En la **Figura 47** se muestra la comparativa de la anomalía del nivel del mar de los modelos **01D**, **02C** y **02D**, para identificar si una posible mejora fuese debida a la introducción de un campo de masas mejor detallado o gracias a la modificación batimétrica que se explica a continuación. Dado que muchas de las cartas se solapan entre sí, y que las cartas de mayor escala contienen errores mayores en las posiciones exactas de sus sondas, además de una menor resolución, se construyó un nuevo DEM a partir del que se usó en la malla-10 del modelo **02A**. En este nuevo DEM y para cada área del dominio solo se incluirían las sondas de aquella carta náutica del SHOA de menor escala respecto de las otras cartas de mayor escala con las que se solapan en tal área. De esta manera se reducen los errores de posicionamiento de las sondas y se mejora en resolución batimétrica, pudiendo adaptarse esta mejor resolución a una alta resolución de la malla flexible en aquellos lugares en que así se requiera. Esta mejora en la batimetría se incluyó en la malla-12 del modelo **02D**.

Se observaron algunas mejoras en los modelos **02C** y **02D** respecto de los anteriores **02A** y **02B**, y una ligera mejora respecto del modelo **01D** (nótese en bahía Escondida). Con la introducción del campo de masas mejor definido (**Figuras 45 y 46**) se esperaba el desarrollo de circulación por capas en caso de existencia de una marcada circulación estuarina.



Para ello en esta prueba de batimetría y campo de masas se hizo una comparativa más, esta vez de correntometría euleriana frente a las principales y más energéticas componentes de la velocidad a distintas profundidades en las estaciones de fondeo de ADCP de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017” (**Figura 9 y Tabla 1, anexo I**). Estas mediciones se realizaron con fondeos a media agua, debido a la gran profundidad de los sectores de interés y a que el foco del estudio está sobre la dispersión de patógenos entre centros de cultivo salmonícola para lo que se debe estudiar la correntometría en las capas superiores donde se ubica la actividad productiva y por donde se dispersarán los patógenos. El hecho de que los fondeos contaran con una gran longitud de cabo desde el anclaje en el fondo hasta el equipo (hasta 550 m en el fondeo de paso Largo) sumado a que el consultor (Costa Sur Bravo y Mackenney Consultores Asociados Limitada) no equipara los fondeos con la suficiente flotabilidad provocó que en los 3 fondeos (especialmente en canal Cockburn y paso Largo) el ADCP se hundiera y volviese a la posición en que se diseñó que permaneciera el equipo (90-100 m) sucesivamente con el flujo y reflujo mareal (**Figura 48, anexo II**). Este hecho no tuvo repercusión en la calidad de los datos registrados, más allá de que el tiempo en que el equipo estuvo recopilando información de las capas superiores estuvo acotado y segmentado. Este movimiento *yo-yó* además obligo a un post-procesamiento de la data del ADCP para identificar en cada paso de tiempo a que profundidad corresponde una celda (*bin*) y llevar el registro completo a un sistema de referencia donde cada celda corresponda a una profundidad constante.

Las **Figura 49, 50 y 51 (anexo II)** muestra la comparativa de las series de tiempo de la componente U en el canal Cockburn, paso Froward y paso Largo respectivamente. Podemos observar como el modelo **02D** es el que mejor reproduce los patrones de flujo, especialmente en canal Cockburn y paso Froward. En canal Cockburn los resultados **02C y 02D** son idénticos y mejores que **01D** (obsérvese al final de la simulación) lo que indica que las condiciones del campo de masas de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017” son más adecuadas. En paso Froward sin embargo, es el modelo **02D** el que más cerca está de la observación y esto sólo se debe a la mejora en la batimetría mediante el descarte de sondas de cartas náuticas de mayor escala. En paso Largo ningún modelo se acerca a la observación ni tan siquiera en la dirección del flujo.

5.1.4 Prueba forzante atmosférico: modelos 02D – 02E

En el modelo **02E** se introdujo el forzante del viento procedente del modelo WRF a una resolución horizontal de 5km. Los efectos de este componente se comprueban en comparativa entre los modelos **02D** (sin viento) y **02E** (con viento) de la correntometría euleriana de la componente más energética en el canal Cockburn, paso Froward y paso Largo en las **Figuras 52, 53 y 54 (anexo II)** respectivamente.

En general, el ingreso del forzante del viento a través del estrés que genera este sobre la superficie, provocó una ligera mejora en la modificación de corrientes residuales (dirección promedio del flujo) que aparecen en las capas superficiales (hasta los 30 metros) en el paso Froward y paso Largo (**Figuras 53 y 54, anexo II**) entre el 12 y el 14 de Marzo.

5.1.5 Prueba esquema vertical de capas: modelos 02E – 02G – 02I

En esta nueva prueba se inspeccionó el posible efecto que la distribución y el número de las capas verticales provoca en la adecuada formación de los flujos residuales por capas. En la anterior prueba 5.1.4 se comprobó que la introducción del



estrés del viento produjo ligeras modificaciones positivas en este sentido, y con esta nueva prueba se quiso identificar si un nuevo esquema de las capas verticales podría mejorar la transferencia de energía desde la superficie hacia capas más profundas y la generación de flujos residuales como los observados.

Las **Figuras 55, 56 y 57 (anexo II)** muestran las series de tiempo de correntometría euleriana por capas en el canal Cockburn, paso Froward y paso Largo respectivamente. Podemos comprobar cómo el aumento del número de capas a 49, y sobre todo el concentrar las 40 capas sigma en la parte superior de la columna (*sigma depth* indica la profundidad a partir de la cual se ubican capas sigma hacia la superficie y capas Z hacia el fondo), beneficia el surgimiento de flujos residuales como los que se observan el paso Froward y paso Largo en el modelo **02I (Figuras 56 y 57, anexo II)**.

5.1.6 Prueba forzante atmosférico: modelos 02G – 02H

El modelo WRF que provee el forzante atmosférico al modelo de Magallanes Sur, además de utilizar una resolución espacial de 5km en todo el dominio, también incluyó 2 anidamientos de mayor resolución a 1 km en los alrededores de la isla Carlos III y en canal Cockburn (**Figura 25**). Tras realizar un *downscaling* que equiparara la resolución de la malla general a la de los anidamientos se procedió en esta prueba a evaluar si una mejor resolución del forzante atmosférico produce mejores resultados. En el modelo 02G se empleó el forzante WRF de 5 km de resolución horizontal, mientras que en el modelo 02H el *downscaling* del mismo más los mencionados anidamientos a 1 km de resolución horizontal. La comparativa de las corrientes eulerianas, parámetro donde más se van a notar los efectos del estrés del viento, se presentan en las **Figuras 58, 59 y 60 (anexo II)** en el canal Cockburn, paso Froward y paso Largo respectivamente. Como vemos no hay efectos significativos, ni a favor ni en perjuicio. En las sucesivas pruebas se mantendrá el forzante atmosférico de mayor resolución pues en vista de que no supone detrimento alguno en la calidad de los resultados en las 3 estaciones de evaluación, es de suponer que tal vez resuelva mejor los patrones locales de viento (y circulación marina) en algún otro lugar del modelo.

5.1.7 Prueba esquema de solución numérica: modelos 02I – 02J

La solución numérica de bajo o alto orden determina el grado de precisión en que el modelo resuelve la integración del tiempo y el espacio. Según la teoría el alto orden debiera mejorar la resolución de los procesos físicos que determinan los patrones de circulación. Sin embargo, como vemos en las **Figuras 61, 62 y 63 (anexo II)** vemos que el esquema de alto orden (modelo **02J**) no mejora de por sí los resultados obtenidos en un esquema de bajo orden (modelo **02I**), incluso se aleja de la corriente residual positiva que se forma en el paso Forward entre el 12 y 14 de Marzo (**Figura 60**) y en el paso Largo desde el 14 de Marzo en adelante (**Figura 61**). Incluso en el paso Forward a 90 m se puede ver que altera incorrectamente el flujo marea que anteriormente en un esquema de bajo orden estaba correctamente representado. Por estos motivos, sumado al hecho de que la utilización de parametrizaciones de alto orden eleva el tiempo de cómputo al doble llevó a la desestimación de su uso en sucesivas pruebas.

5.1.8 Prueba temperatura fuentes agua dulce: modelos 02K – 02L



Para esta prueba en el modelo **02K** se implementaron todas aquellas mejoras que se identificaron en las pruebas anteriores (forzante atmosférico, esquema vertical de capas, batimetría, ...). Se observó que la temperatura en superficie era consistentemente más alta de lo normal al final de los 8 días de modelación. Se probó modular la temperatura de descarga de las fuentes de agua (modelo **02L**) y reducirla a 5° en vez de los 10°C iniciales del modelo **02K**, pues esa es la temperatura de la mayoría de las fuentes de agua dulce a finales de verano, principios de Otoño de cuya temperatura tenemos información a través de la DGA. En la **Figura 64 (anexo II)** se muestran los perfiles de temperatura en 8 estaciones del dominio del modelo de Magallanes Sur. Podemos ver que, al menos en las estaciones situadas al oeste de la constricción del paso Tortuoso entre el paso Largo y Froward (estaciones 6 y 14) esta reducción de temperatura en los flujos de alta boyantez que ingresan al modelo por superficie tuvo un efecto positivo. Sin embargo en el resto de estaciones la mencionada termoclina superficial (< 5m) se mantuvo en mayor o menor grado.

5.1.9 Prueba fricción viento: modelos 02L – 02M

Con la prueba de fricción del viento mediante el aumento al doble del coeficiente de fricción en el modelo **02M**, se trató de simular un mayor proceso de mezcla que pudiera eliminar la termoclina superficial de las estaciones del paso Froward y canal Cockburn mediante el aumento de la transferencia de energía al medio marino desde la atmósfera. Si bien este aumento de energía no tuvo el efecto esperado de mezcla superficial de la temperatura como se ve en los perfiles de la **Figura 65 (anexo II)**, sí que mejoró, aunque en menor grado la magnitud de la dirección de la componente U de la velocidad en los pasos Froward y Largo acercando más las corrientes simuladas a la observación (**Figuras 67 y 68, anexo II**). La corriente del canal Cockburn permaneció sin cambios respecto del modelo 02L de menor fricción del viento (**Figura 66, anexo II**).

5.1.10 Prueba intercambio calor atmósfera-océano: modelos 02M – 02N

En el modelo **02N** se probó a eliminar las transferencias de calor entre la atmósfera y la superficie del mar, es decir no habría pérdidas ni ganancias de temperatura por temperatura del aire ni radiancia solar. Esto se hizo como último recurso para identificar cuál pudiera ser la causa de la termoclina superficial persistente en estaciones del paso Froward y canal Cockburn a lo largo de las distintas pruebas que se hicieron. Como se aprecia en la **Figura 69** al eliminar este componente del modelo igualmente desaparece la termoclina superficial que persistía en las otras pruebas (**02M**).

Modelo Magallanes Sur 10/03/2017 – 16/04/2017

A lo largo de las 10 pruebas en que se evaluaron los distintos componentes del modelo se pudo ir viendo como los distintos parámetros indicadores de su desempeño (nivel del mar, correntometría euleriana, perfiles temperatura y salinidad) fueron mejorando de principio a fin, conservando aquellas implementaciones que supusieron mejoras y descartando las que no. Este proceso de evaluación y calibración de parámetros permitiría en última instancia obtener una configuración válida del



modelo de Magallanes Sur a partir de las mejoras identificadas (**Tabla 12**). Con esta configuración del modelo se procedió la evaluación final del modelo de Magallanes Sur en una simulación por un periodo más largo que las anteriores pruebas cortas e igual al que estuvieron todos los equipos de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn verano – otoño 2017” entre el 10 de Marzo y el 14 de Abril. A partir de esta simulación más larga se extrajeron los resultados de cuyas evaluaciones frente a los mencionados parámetros ambientales se pudo estimar el grado de confiabilidad del modelo de Magallanes Sur y también de los escenarios de variabilidad ambiental que de él se derivan.

TEST	Batimetría y Malla	Otros Malla	Capas Verticales	Densidad	Meteo	Agua Dulce	Solución técnica
01D	Todas Cartas SHOA malla-06	Depth Cut-off 0m Sigma Depth 0	30 Sigma	Mercator®	-	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02A	Todas Cartas SHOA 1st reviewed malla-10	Depth Cut-off 0m Sigma Depth 0	30 Sigma	Mercator®	-	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02B	Todas Cartas SHOA 1st reviewed malla-10	Depth Cut-off -12m Sigma Depth 0	30 Sigma	Mercator®	-	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02C	Todas Cartas SHOA 1st reviewed malla-10	Depth Cut-off 0m Sigma Depth 0	30 Sigma	CTD campaña IFOP	-	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02D	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth 0	30 Sigma	CTD campaña IFOP	-	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02E	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth 0	30 Sigma	CTD campaña IFOP	WRF 5km	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02G	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth 0	50 Sigma	CTD campaña IFOP	WRF 5km	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02H	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth 0	50 Sigma	CTD campaña IFOP	WRF 1km	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02I	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -200m	40 Sigma + 9 Z	CTD campaña IFOP	WRF 5km	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02J	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -200m	40 Sigma + 9 Z	CTD campaña IFOP	WRF 5km	Si Temp=10°C	Alto Orden
02K	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -200m	40 Sigma + 9 Z	CTD campaña IFOP	WRF 1km	Si Temp=10°C	Bajo Orden
02L	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -100m	40 Sigma + 10 Z	CTD campaña IFOP	WRF 1km	Si Temp=5°C	Bajo Orden
02M	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -100m	40 Sigma + 10 Z	CTD campaña IFOP	WRF 1 km 2 x friction	Si Temp=5°C	Bajo Orden
02N	Solo Cartas SHOA menor escala malla-12	Depth Cut-off -5m Sigma Depth -100m	40 Sigma + 10 Z	CTD campaña IFOP	WRF 1 km 2 x friction no heat ex	Si Temp=5°C	Bajo Orden

Tabla 12. Componentes del modelo de Magallanes Sur que supusieron mejoras en la calidad de los resultados identificadas durante las pruebas de evaluación del desempeño del modelo.

- ANOMALÍA NIVEL MEDIO DEL MAR

La **Figura 70** muestra las series de tiempo de anomalía del nivel del mar en 7 estaciones del dominio del modelo Magallanes Sur: canal Gajardo, canal Jerónimo, bahía Escondida, estero Staples, isla Wren, seno Chasco y Punta Arenas (**Figura 11, Tabla 3**). La **Tabla 13** contiene los índices estadísticos de comparación de dichas series de tiempo frente a las observaciones y que dan cuenta del error y el acoplamiento de fases entre ambas.



Figura 70. Evaluación de la anomalía del nivel del mar del modelo de Magallanes Sur.

ESTACIÓN	NRMSE%	CC%
Canal Gajardo	25.75	87.36
Canal Jerónimo	21.81	85.20
Bahía Escondida	15.81	93.40
Estero Staples	17.28	92.01
Isla Wren	15.63	94.11
Seno Chasco	28.14	78.61
Punta Arenas	9.45	97.68

Tabla 13. Índices estadísticos de la evaluación de la anomalía del nivel del mar del modelo de Magallanes Sur.



Las **Figuras 71-77 (anexo II)** muestran los espectros de densidad de frecuencia para cada una de las 7 comparativas del nivel del mar. En ellas se comprueba cómo el modelo resuelve adecuadamente la señal armónica de la marea (al menos de las más bajas frecuencias) en su progresión desde los bordes al interior del dominio del modelo.

- CAMPO DE MASAS

Se extrajeron perfiles de temperatura y salinidad para 8 estaciones de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn verano – otoño 2017” (estaciones 6, 14, 17, 28, 41, 45, 54 y 58) los cuales se compararon frente a perfiles correspondientes al final de la simulación (**Figuras 78 y 79**). En las 8 estaciones elegidas a lo largo del área de estudio el modelo ha sido capaz de reproducir en buen grado la característica principal de mezcla y homogenidad de temperatura y salinidad que se observa hasta los perfiles más profundos a 200m. Tan solo las estaciones 6, 14 y 17 que se encuentran en la subcuenca occidental del estrecho entre el paso Tortuoso y la boca Oeste al Pacífico experimentaron un patrón ligeramente distinto al de mezcla.

La estación 6 situada en la salida del golfo Xaltegua presenta una haloclina (5 PSU) entorno a los 50m de profundidad, fruto posiblemente de los flujos de alta boyantez y baja salinidad procedentes del canal Gajardo (y a su vez del seno Skyring). En esta estación el modelo de Magallanes logra reproducir una leve haloclina de casi 2 PSU, pero mucho más somera, que indica que el modelo bien subestima los ingresos de agua dulce de ríos y glaciares entorno a la península Muñoz Gameiro e isla Riesco o bien no estima en buen grado los flujos de baja salinidad del seno Skyring que puedan salir por el canal Gajardo. Esto último pudiera deberse a que las condiciones iniciales de salinidad del seno Skyring, y debido a la falta de información ambiental, fueron construidas a partir de extrapolaciones de los perfiles de salinidad al interior del golfo Xaltegua al ser las más cercanas a Skyring y también las de menor salinidad de toda la campaña de medición. Estas extrapolaciones sobreestimaron la salinidad en el seno Skyring (al igual que Otway) que son cuerpos de agua semi-encerrados de baja salinidad (18-23 PSU) con características físicas distintas a las del resto del sistema de Magallanes Sur (Pickard, 1971).

Las estaciones 14 y 17 muestran como característica principal un aumento de la salinidad a partir de los 80 m en la estación 14 y más gradual desde la superficie en la estación 17. Respecto de la temperatura sólo la estación 17 presenta un perfil inverso (temperaturas más altas en profundidad) por debajo de los 100m. Todas estas características indican la influencia del agua ASSA que penetra por la boca Oeste del estrecho de Magallanes y se ubica por debajo de los 75m como ASSAM, mientras entre la superficie y tal cota encontramos AE resultante de la mezcla de los influjos de baja salinidad de AD al mezclarse con ASSA (Valdenegro y Silva, 2003). El modelo de Magallanes Sur no fue capaz de reproducir las entradas de agua desde el océano y es por ello que sus perfiles son homogéneos en la columna de agua y no presentan gradientes de densidad.

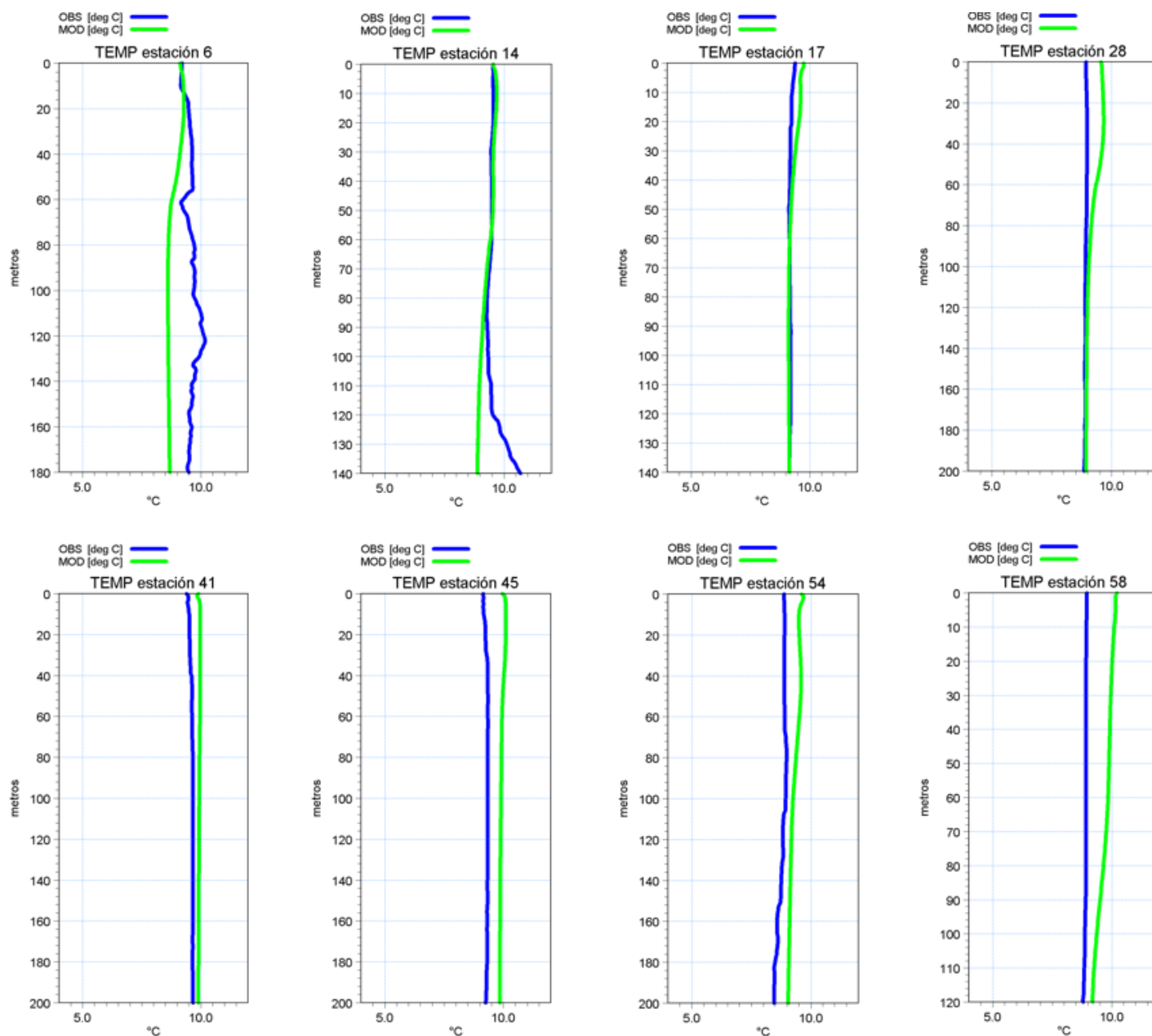


Figura 78. Evaluación de perfiles de temperatura del modelo de Magallanes Sur.

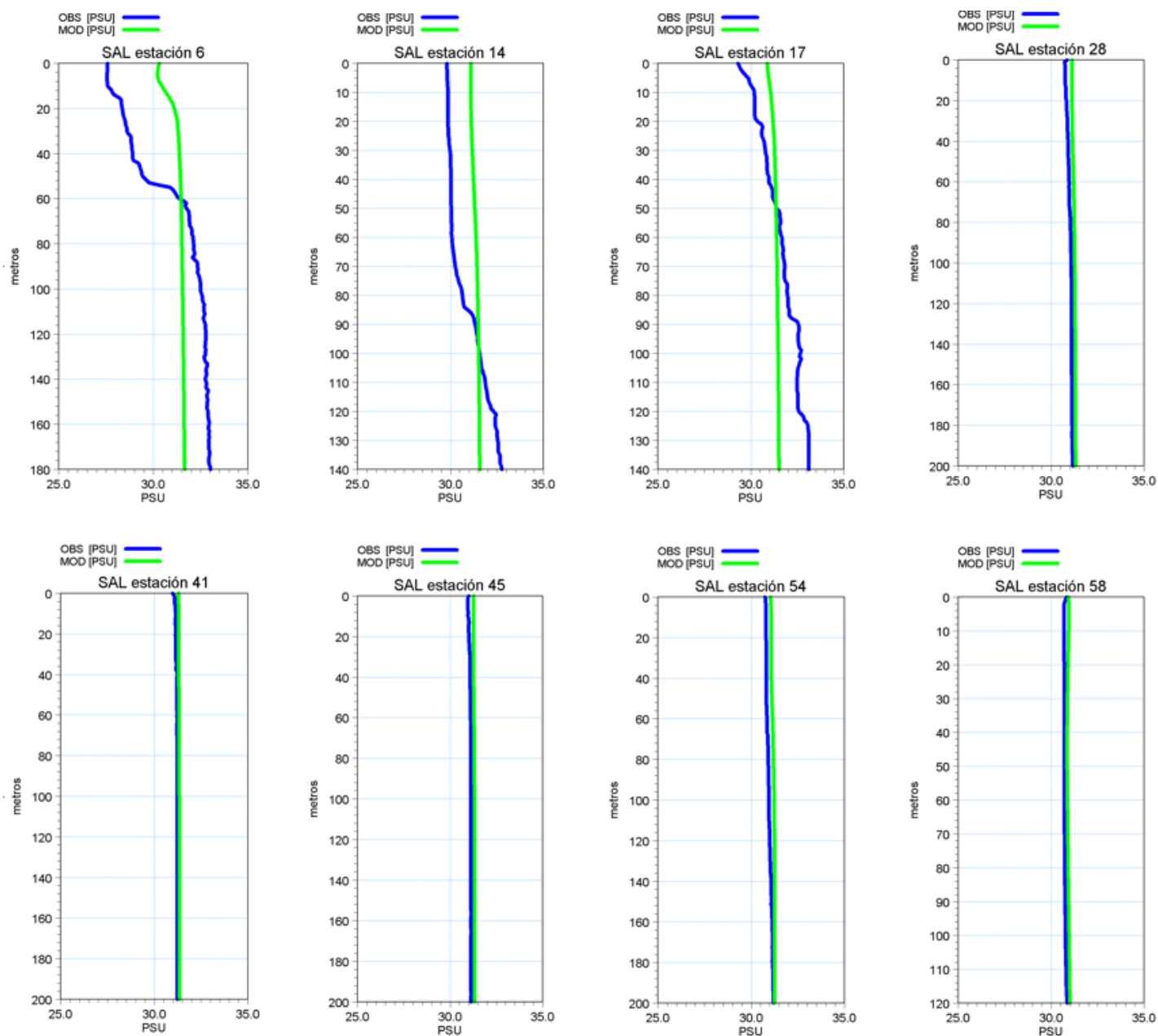


Figura 79. Evaluación de perfiles de salinidad del modelo de Magallanes Sur.

- CORRENTOMETRÍA EULERIANA

La evaluación de correntometría euleriana es el mejor de los indicadores para estimar el grado de confianza de los modelos de dispersión de partículas, pues es este parámetro el agente (de los aquí evaluados) que mejor da cuenta de los



transportes advectivos. Los resultados del modelo de Magallanes Sur se compararon frente a series de tiempo de ADCP fondeado de la campaña “estrecho de Magallanes - canal Cockburn Verano– Otoño 2017” en 3 estaciones: canal Cockburn, paso Froward y paso Largo a 5 profundidades distintas de capas superficiales y para ambas componentes U y V de la velocidad de la corriente.

Las **Figuras 80 y 81** muestran las componentes ortogonales descompuestas de la velocidad U y V, en sus corrientes totales y el residual (filtrado bajo un coseno Lanczos de 40 horas) a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el canal Cockburn. Ambas componentes se muestran en la misma escala para ponderar el valor de cada una en la dispersión advectiva de las partículas. La componente U es la más energética y si bien la amplitud de la circulación es mayor que la observada, las correlaciones de fase (**Tabla 14**) se encuentran por encima del 50%. El flujo residual observado es casi neutral a lo largo de la simulación, mientras que el modelo de Magallanes Sur es casi netamente positivo y hacia el Este de entrada desde el océano Pacífico al interior del estrecho de Magallanes. De este hecho podemos esperar una sobre-estimación de los flujos de entrada de agua desde el canal Cockburn hacia el canal Magdalena. La componente V es despreciable en cuanto a la magnitud de la corriente. El modelo no consigue reproducir la alta frecuencia en la variabilidad de la señal, pero esto no es relevante en cuanto a la circulación general.

Las **Figuras 82 y 83** muestran las componentes ortogonales descompuestas de la velocidad U y V, en sus corrientes totales y el residual (filtrado bajo un coseno Lanczos de 40 horas) a 20, 30, 40, 50 y 90 m de profundidad en el paso Froward. La componente U es más energética que la componente V. El modelo simula en buen grado con errores entorno al 20% y correlaciones superiores al 70% la señal de la componente U (**Tabla 15**). Los flujos residuales que son los responsables últimos de determinar el transporte advectivo neto están altamente correlacionadas entre la observación y el modelo tanto para la componente U como V. Durante el mes de marzo en la componente U el residual es positivo hacia el Este del paso Froward hacia el seno Magdalena, mientras que durante el mes de abril este flujo es cercano a neutro. El modelo responde positivamente a esta variabilidad y con especial acierto durante la segunda quincena de marzo con perfiles casi idénticos. Igualmente el flujo residual de la componente V es neutro durante todo el periodo de simulación y el modelo responde adecuadamente a la marcada direccionalidad del flujo en el paso Froward en la componente U.

Las **Figuras 84 y 85** muestran las componentes ortogonales descompuestas de la velocidad U y V, en sus corrientes totales y el residual (filtrado bajo un coseno Lanczos de 40 horas) a 10, 20, 30, 40 y 50 m de profundidad en el paso Largo. La componente U es más energética que la componente V. El modelo subestima la amplitud de la corriente total respecto de la observación en la componente U, no así para la componente V, pero aporta unos índices estadísticos razonablemente buenos con errores entre el 20-40% y correlaciones entre 50-60%. En este punto de control es donde mejores flujos residuales se han logrado con perfiles solapados durante la mayor parte de la simulación para ambas componentes. Durante el mes de marzo la componente residual U es positiva y hacia el Este y en el cambio de mes se registra un evento que invierte el flujo neto de sentido hacia el Oeste y que el modelo igualmente marca en su señal. Tan sólo al final de la simulación entre el 10 y el 15 de abril los flujos residuales de la componente U son divergentes.

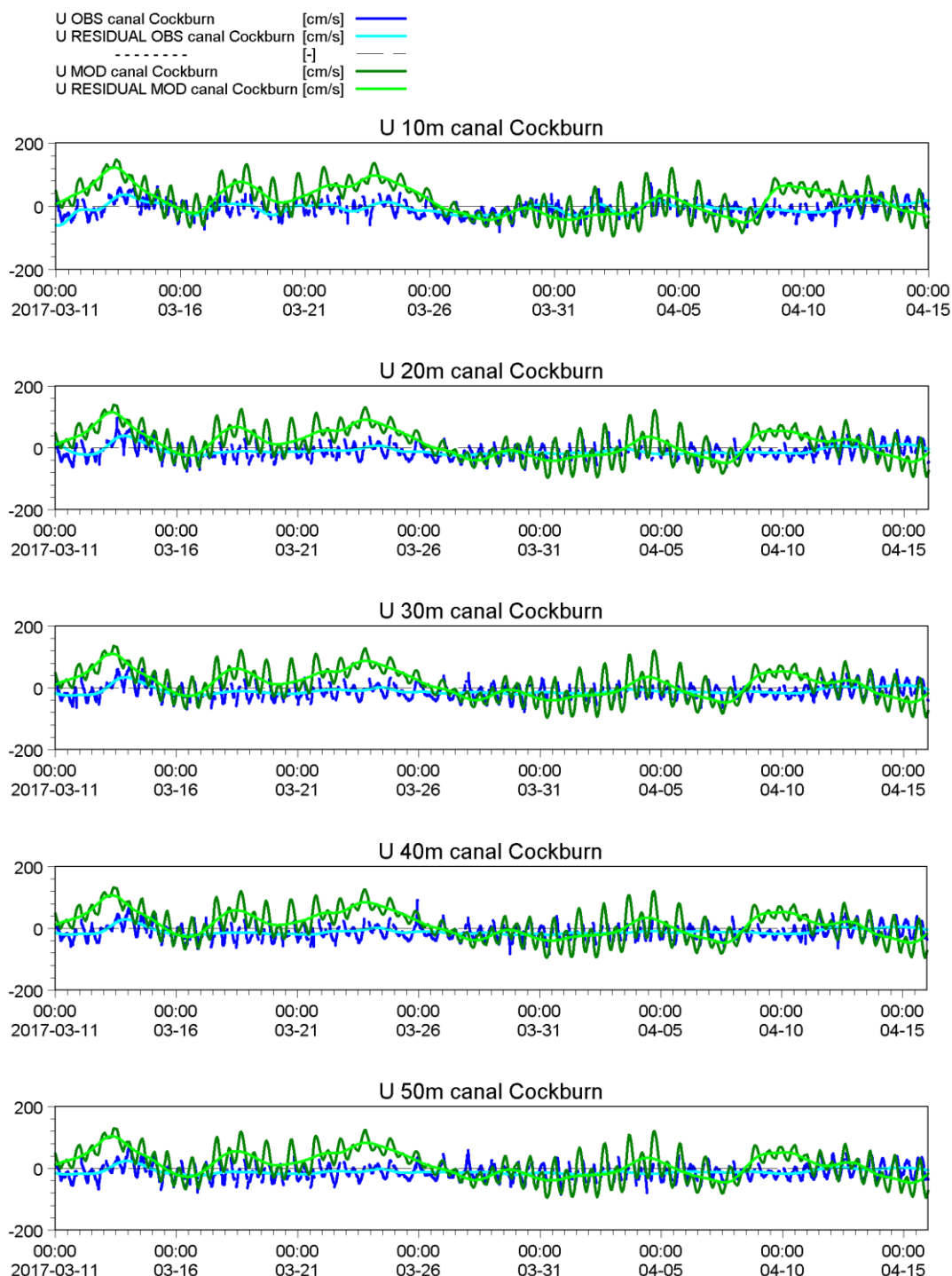


Figura 80. Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente U de la velocidad total y residual en el canal Cockburn.

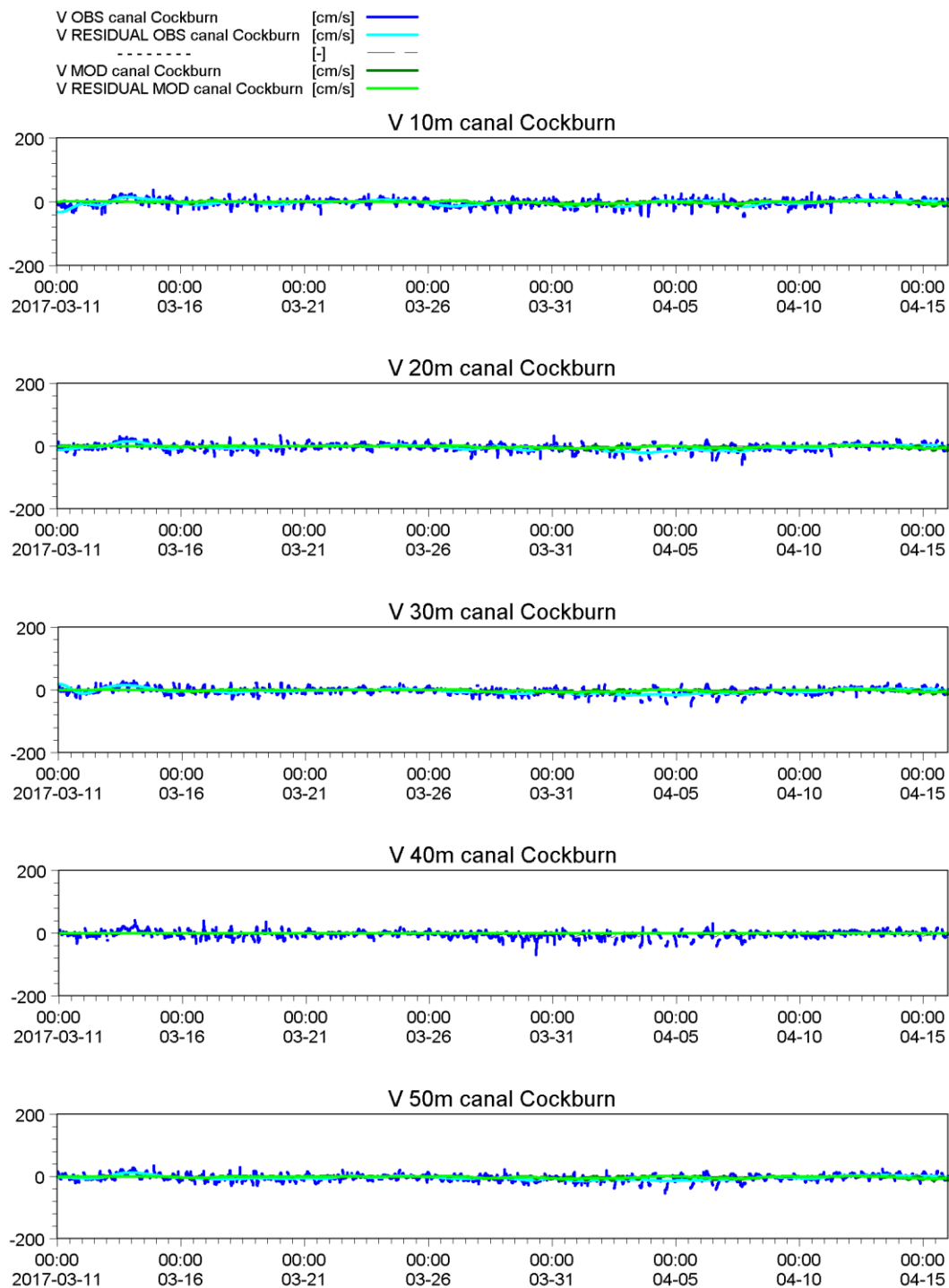


Figura 81. Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente V de la velocidad total y residual en el canal Cockburn.

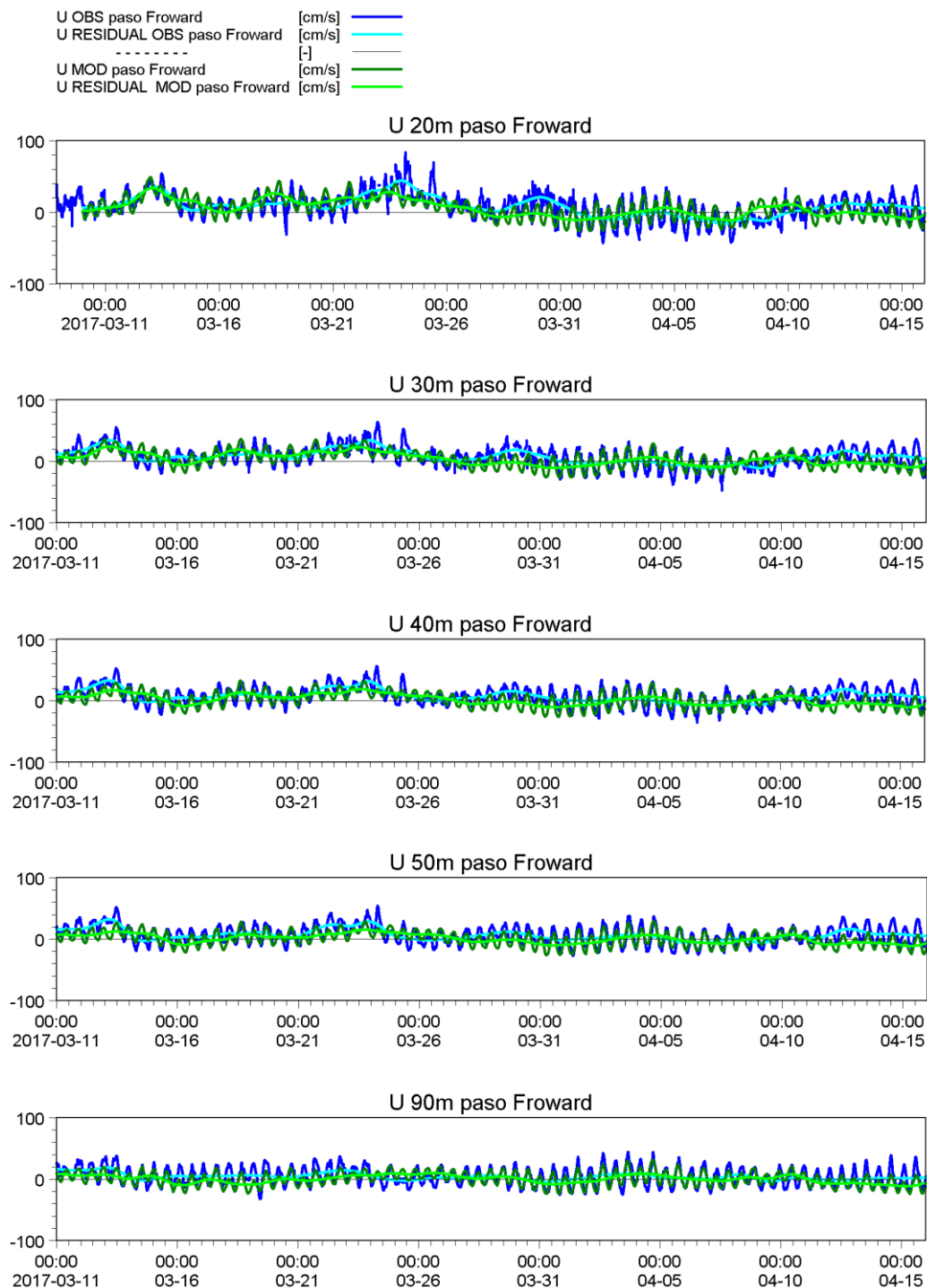


Figura 82. Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente U de la velocidad total y residual en el paso Froward.

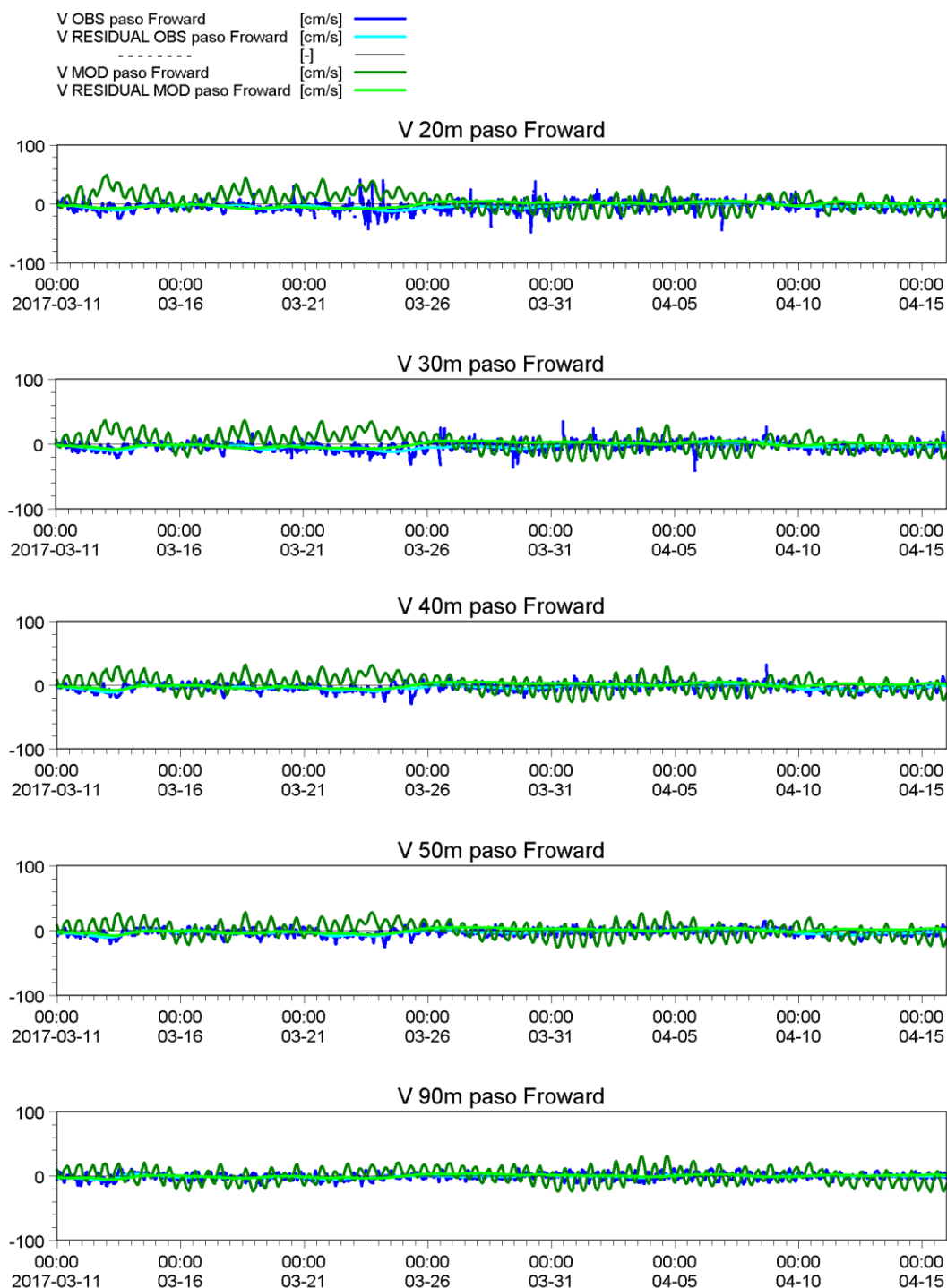


Figura 83. Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente V de la velocidad total y residual en el paso Froward.

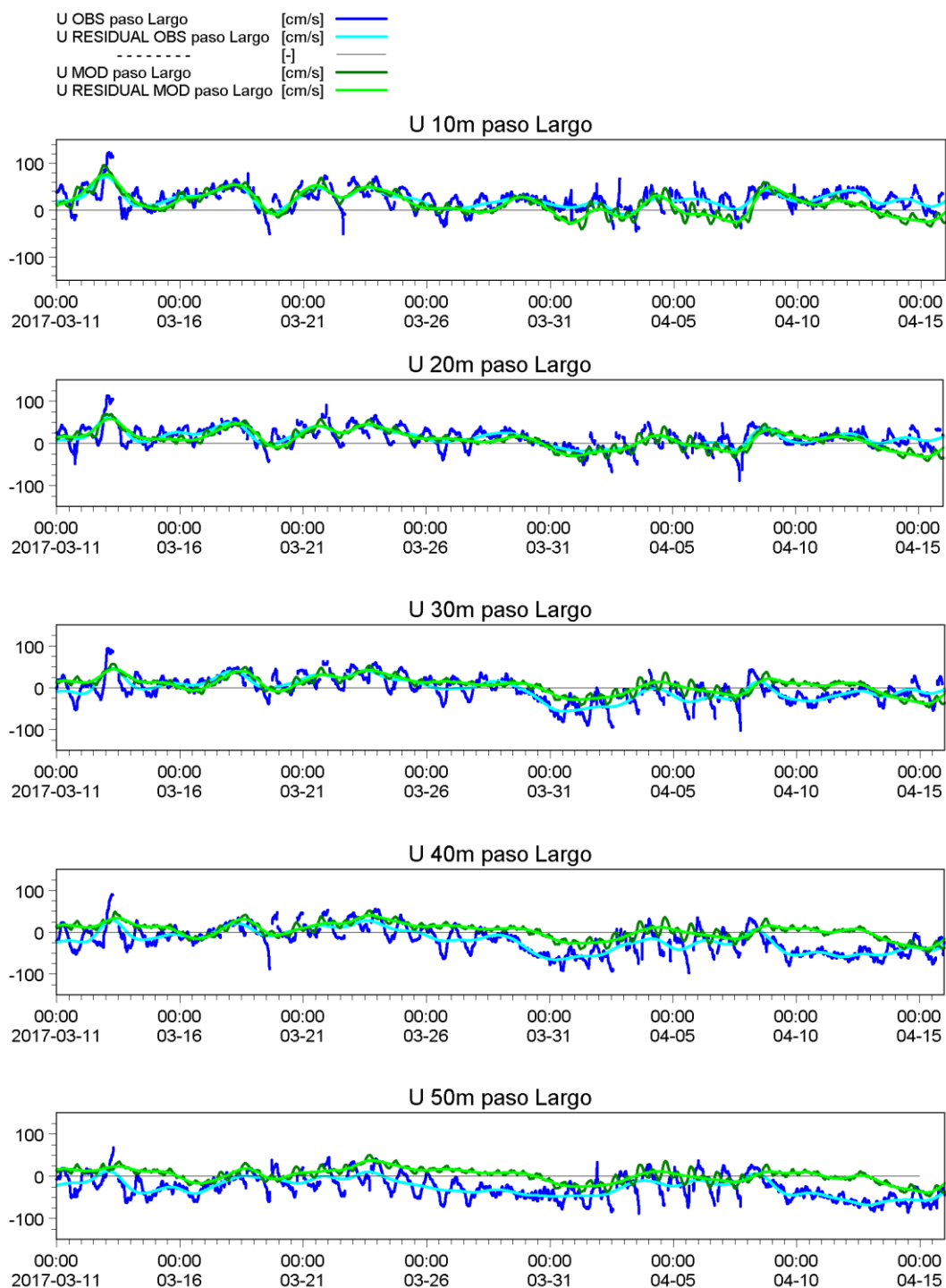


Figura 84. Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente U de la velocidad total y residual en el paso Largo.

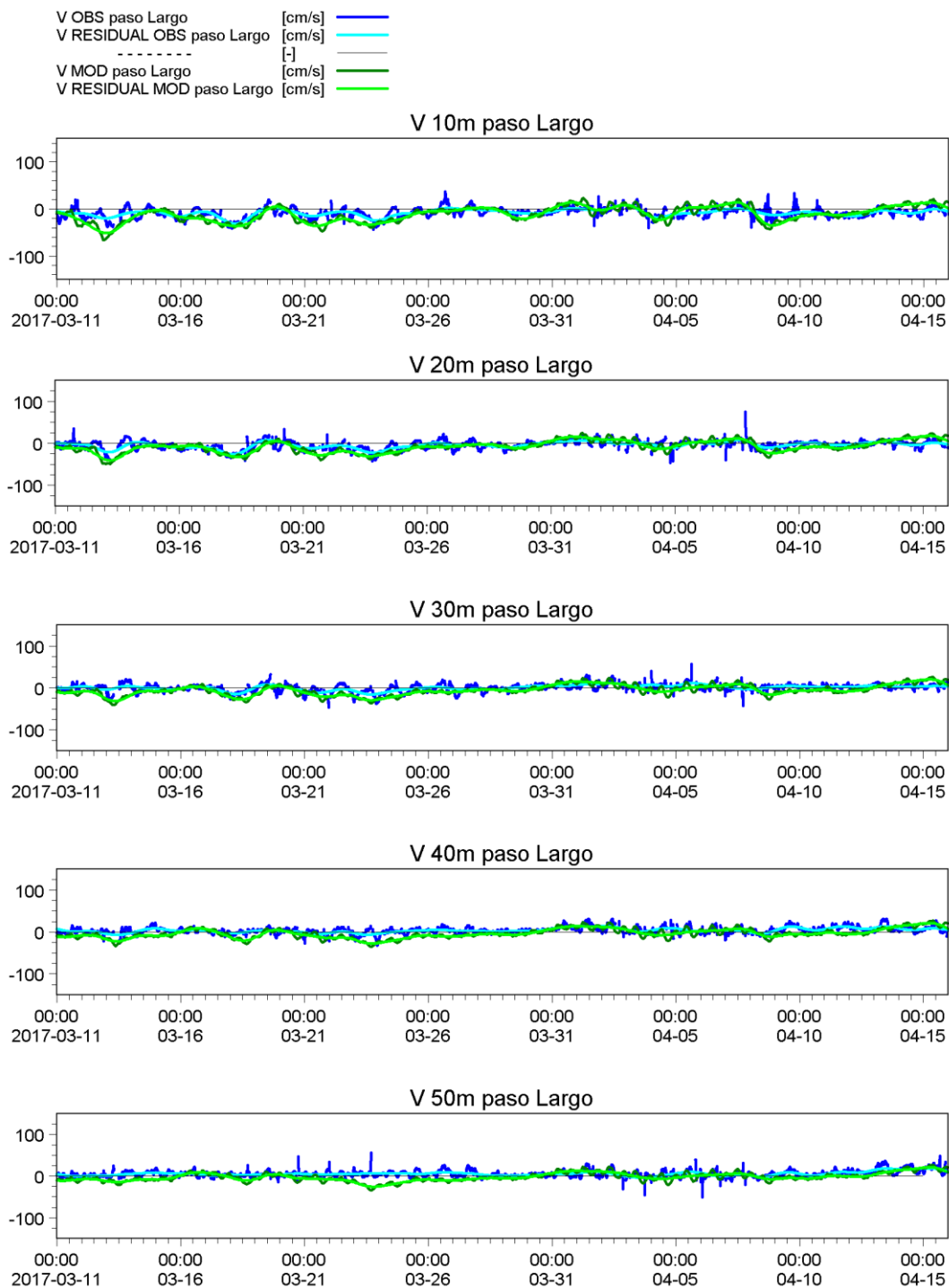


Figura 85. Evaluación de las series de tiempo del modelo de Magallanes Sur de la componente V de la velocidad total y residual en el paso Largo.



ADCP PROFUNDIDAD	NRMSE%	CC%
U canal Cockburn 10m	70.85	45.15
U canal Cockburn 20m	58.25	50.13
U canal Cockburn 30m	60.92	51.95
U canal Cockburn 40m	70.94	51.26
U canal Cockburn 50m	69.74	50.85
V canal Cockburn 10m	27.47	7.16
V canal Cockburn 20m	20.18	21.57
V canal Cockburn 30m	24.62	22.17
V canal Cockburn 40m	26.80	22.99
V canal Cockburn 50m	26.75	20.17

Tabla 14. Índices estadísticos de la evaluación de la corriente euleriana en el canal Cockburn.

ADCP PROFUNDIDAD	NRMSE%	CC%
U paso Froward 20m	20.49	66.96
U paso Froward 30m	21.84	67.39
U paso Froward 40m	22.72	70.06
U paso Froward 50m	22.45	72.38
U paso Froward 90m	23.03	75.25
V paso Froward 20m	27.30	33.45
V paso Froward 30m	17.93	30.93
V paso Froward 40m	22.49	32.74
V paso Froward 50m	23.86	36.74
V paso Froward 90m	27.92	53.06

Tabla 15. Índices estadísticos de la evaluación de la corriente euleriana en el paso Froward.

ADCP PROFUNDIDAD	NRMSE%	CC%
U paso Largo 10m	18.79	58.54
U paso Largo 20m	19.36	58.55
U paso Largo 30m	28.45	55.04
U paso Largo 40m	38.98	47.10
U paso Largo 50m	45.63	35.45
V paso Largo 10m	37.42	45.50
V paso Largo 20m	31.51	51.62
V paso Largo 30m	36.74	43.84
V paso Largo 40m	43.53	39.06
V paso Largo 50m	39.86	20.04

Tabla 16. Índices estadísticos de la evaluación de la corriente euleriana en el paso Largo.



5.2 Objetivo N°2

Llevar a cabo un análisis de la conectividad para los distintos escenarios ambientales necesarios para dar cuenta de la variabilidad ambiental intra-anual del sistema y elaborar una matriz de conectividad para cada escenario ambiental, estableciendo las probabilidades de conexión entre los distintos sectores.

En el estudio de Magallanes Sur y para cada uno de los 6 escenarios de variabilidad ambiental intra-anual, se han obtenido 2 productos de aplicación en la estimación: las matrices de conectividad y la conectividad inter-barrio. tan sólo presentaremos este último producto o resultado.

Las 7650 matrices que hay en cada uno de los 36 sub-sets de conectividad hacen inviable un análisis individual de la información contenida en todos ellos con la metodología aquí expuesta y que permita estimar las conectividades de Magallanes Sur en un único archivo. Actualmente se está haciendo una revisión de la bibliografía y el estado del arte entre la comunidad científica internacional especializada en transmisión de patógenos. Entre las posibles metodologías se está analizando cuáles se adaptan a la problemática sanitaria de la acuicultura en Chile y que cómo solventar sus limitantes y las complejidades que surgen de su implementación para el escenario nacional. La metodología resultante de este análisis deberá ser traducida a un código de programación capaz de procesar volúmenes tan grandes de información, que si actualmente es de 36GB, en un futuro se espera aumentar al aumentar las escalas de resolución espacial (disminuyendo el tamaño de las parcelas o cajas). En la discusión metodológica se tiene pensado seguir trabajando con la estimación de conectividades mediante cajas que ocupan toda la superficie del área de estudio, integrando en un único set de archivos la información resultante de todas las matrices de los distintos sub-sets de escenarios, horizontes y tipos de dispersión. De esta manera un único análisis permitirá identificar parcelas de menor o mayor riesgo para la transmisión de patógenos. Por el momento este análisis debe hacerse individualmente sobre las áreas de interés a través de la inspección de las matrices que contienen la información de conectividad de dichas áreas o parcelas. Para ello es que se dispone de la herramienta del geoportal web en <http://ifop.meteodata.cl/conectividad/>, con la cual podemos filtrar y visualizar fácilmente entre los miles de matrices y sub-sets aquella información de conectividad de nuestro interés.

Por este motivo es que se propone el resultado de conectividad inter-barrio, como alternativa para una comprensión cualitativa, rápida y sencilla de las conectividades potenciales entre barrios del área de Magallanes Sur.

Conectividad Inter-barrio

A continuación, se muestran los resultados de conectividades inter-barrio para cada uno de los 6 escenarios de variabilidad ambiental intra-anual. Las conectividades se presentan gráficamente como la máxima dispersión alcanzada por las partículas de cada barrio al cabo de 72 horas (3 días) tras el ingreso de éstas al modelo. Igualmente, para cada escenario se adjunta una tabla de contingencia con las conectividades efectivas que se hayan llegado a establecer entre los barrios y una estimación del grado de conexión inter-barrio si la dispersión de partículas de un barrio en otro es total (en **rojo**) o si sólo afecta a los límites o a las zonas exteriores de esteros, fiordos y canales donde no se emplazan los centros de cultivo dentro de un barrio (en **amarillo**).

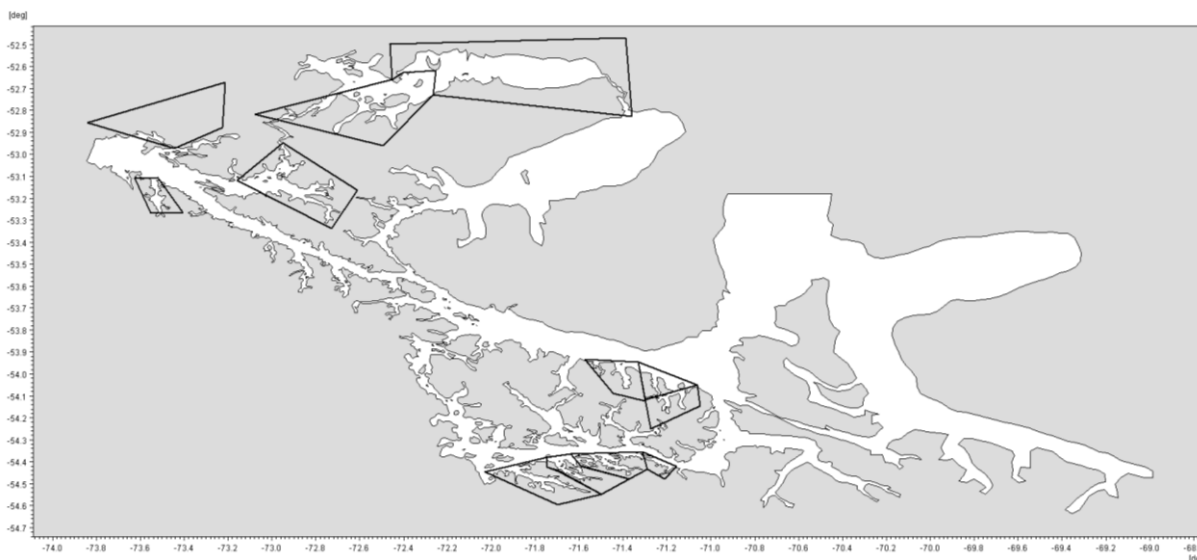


Figura 86. Condición inicial antes de liberarse ninguna partícula y límites de los barrios 49-60 en el dominio del modelo de dispersión de partículas de Magallanes Sur.

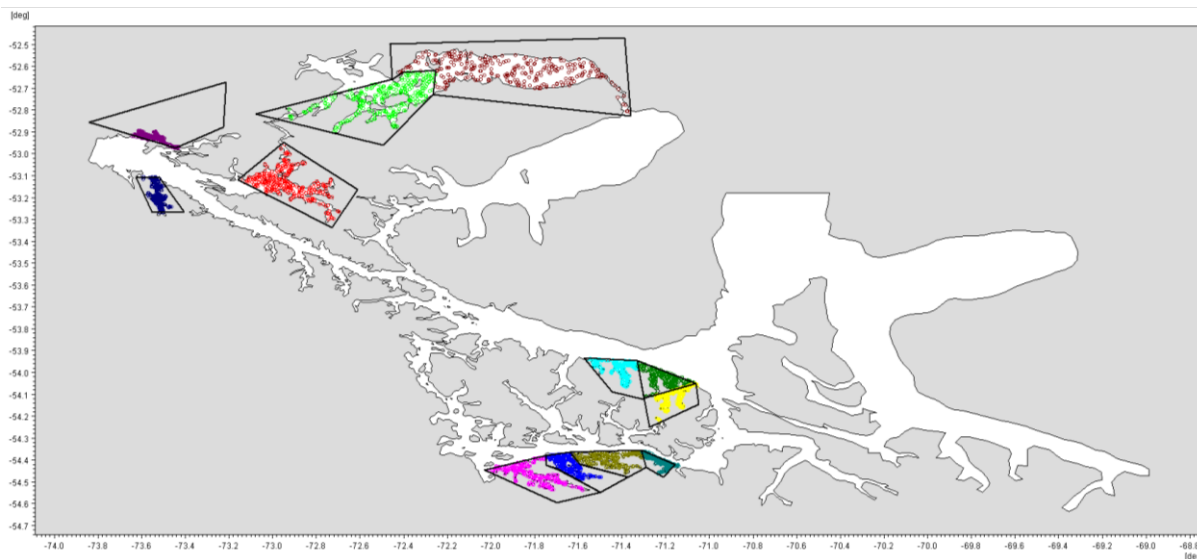


Figura 87. T=0 horas tras el ingreso de las partículas en cada uno de los barrios 49 - 60 en el dominio del modelo de dispersión de partículas de Magallanes Sur.

- INVIERNO CUADRATURA

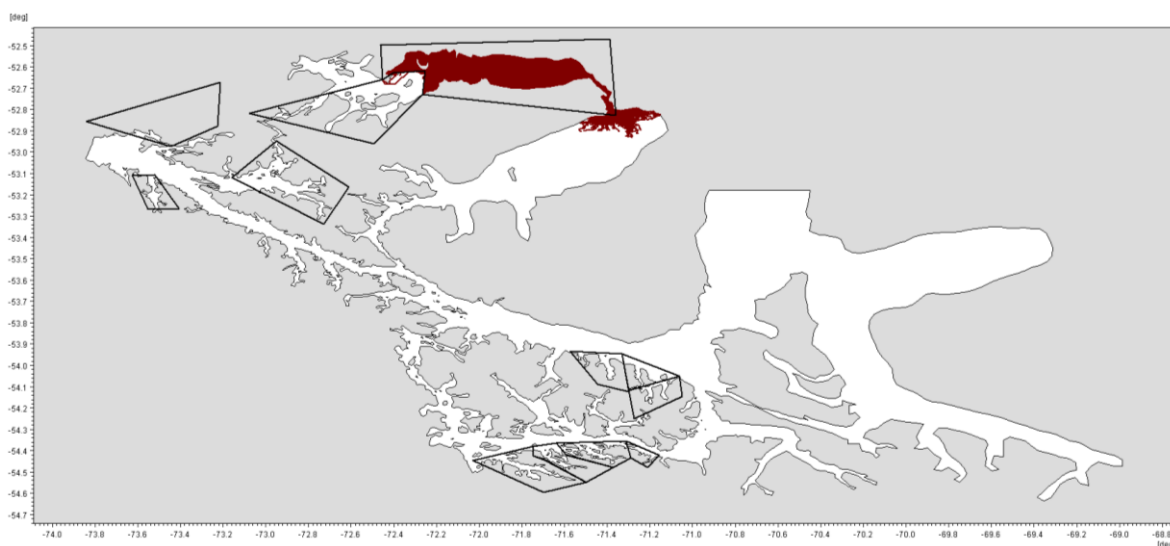


Figura 88. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 49 en escenario de Invierno Cuadratura.

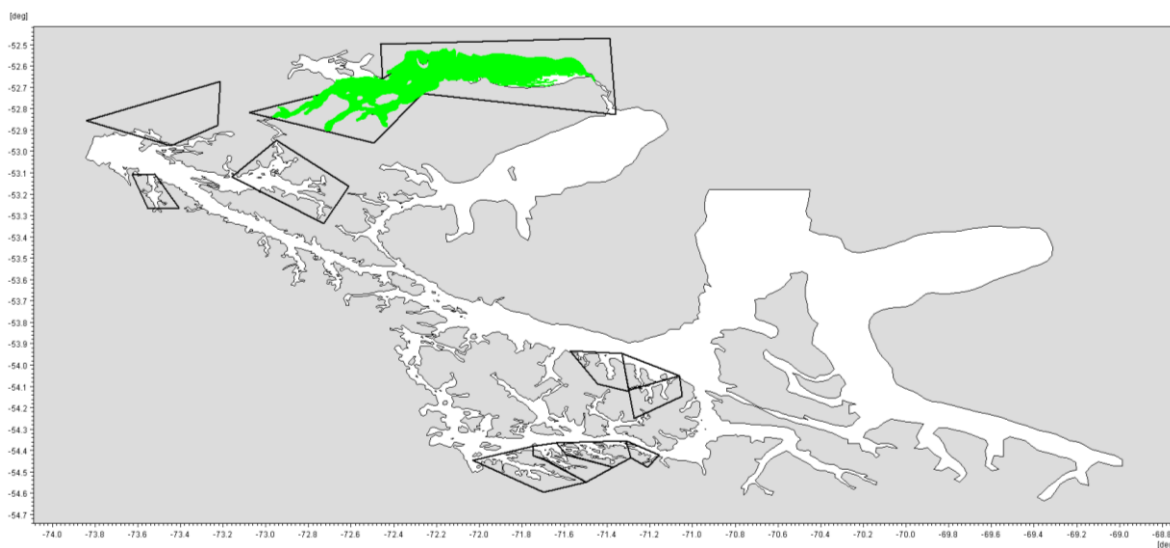


Figura 89. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 50 en escenario de Invierno Cuadratura.

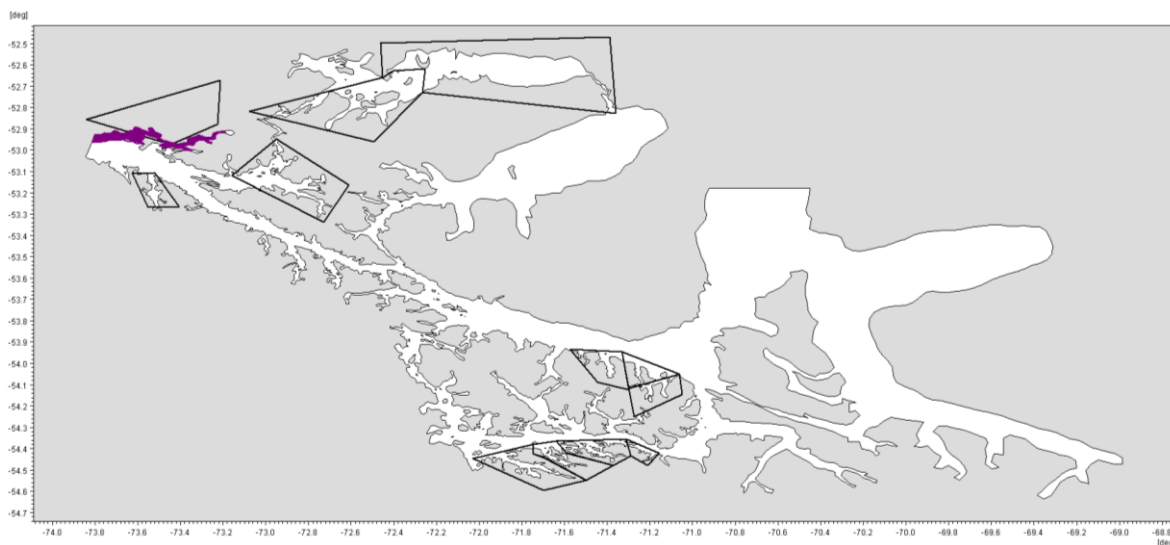


Figura 90. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Invierno Cuadratura.

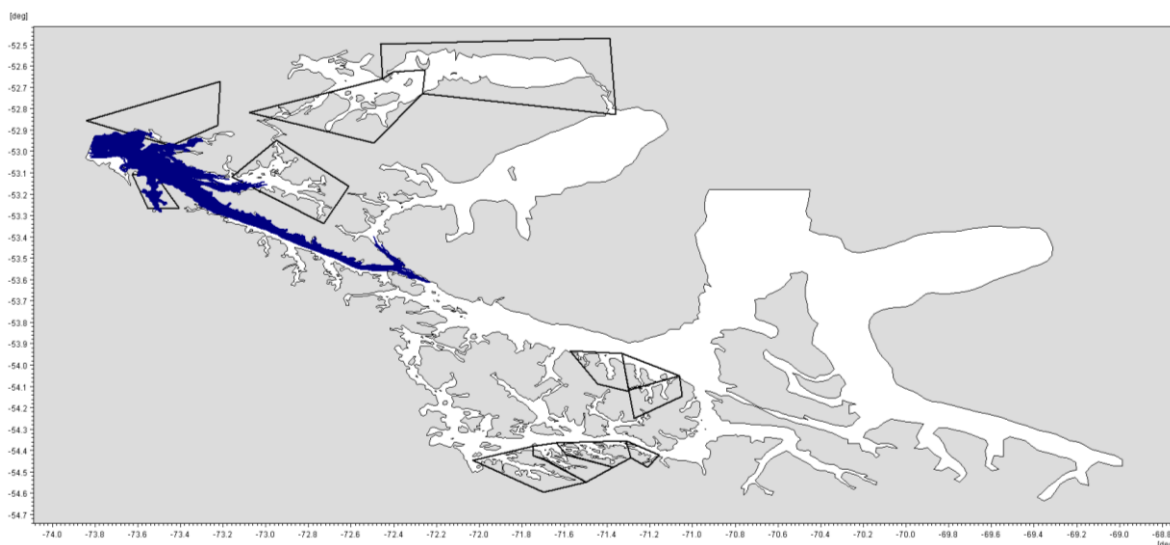


Figura 91. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Invierno Cuadratura.



Figura 92. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Invierno Cuadratura.



Figura 93. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Invierno Cuadratura.

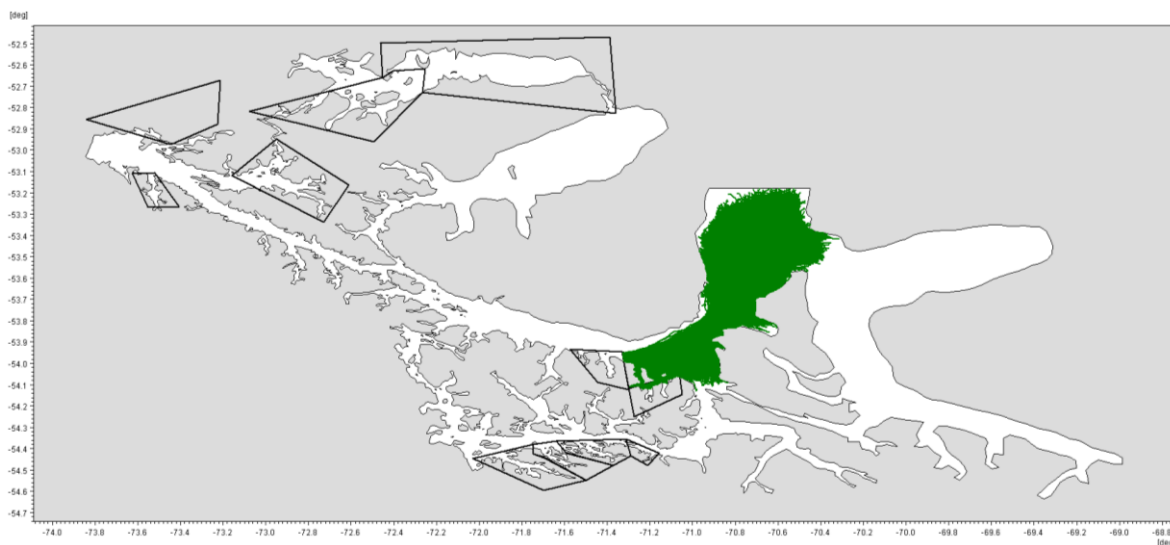


Figura 94. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Invierno Cuadratura.

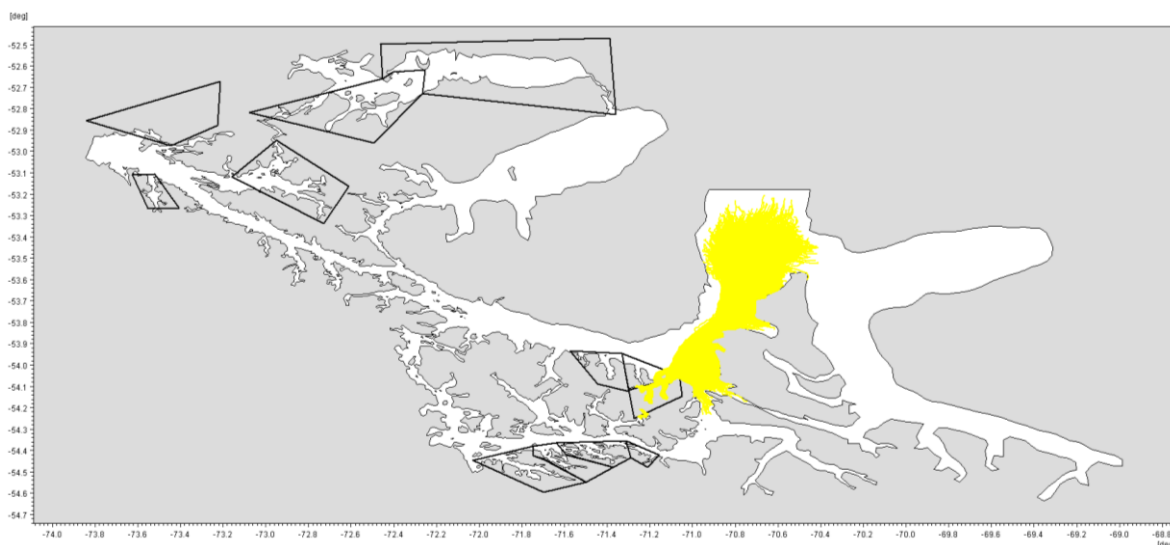


Figura 95. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Invierno Cuadratura.

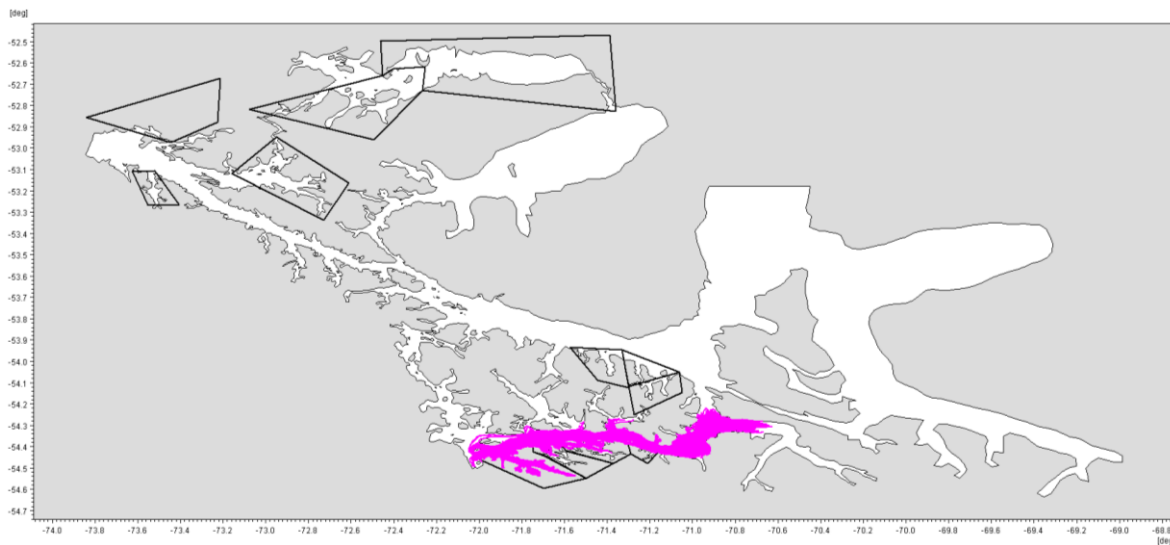


Figura 96. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Invierno Cuadratura.

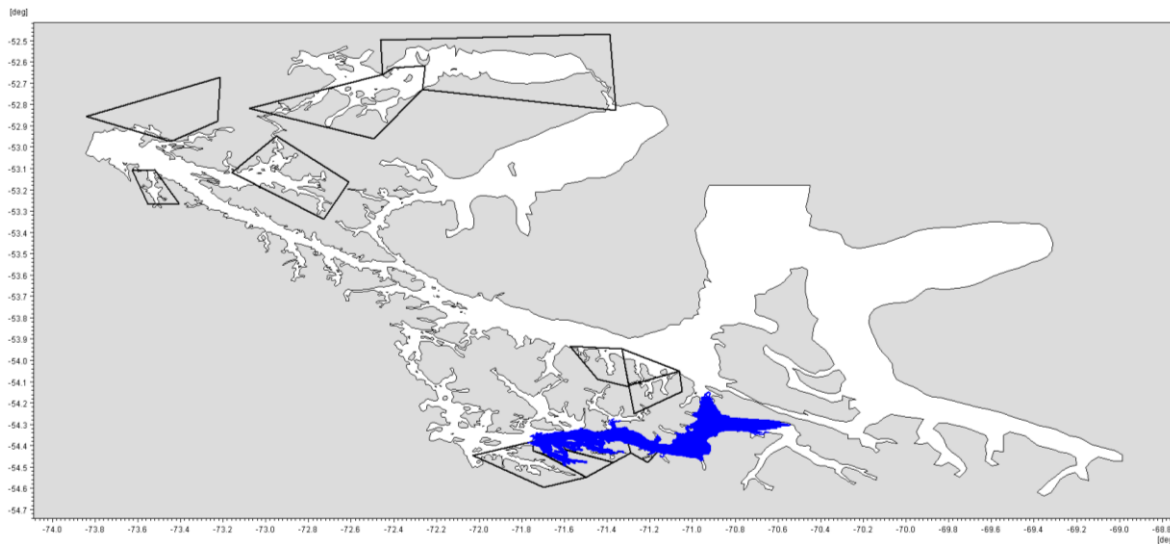


Figura 97. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Invierno Cuadratura.

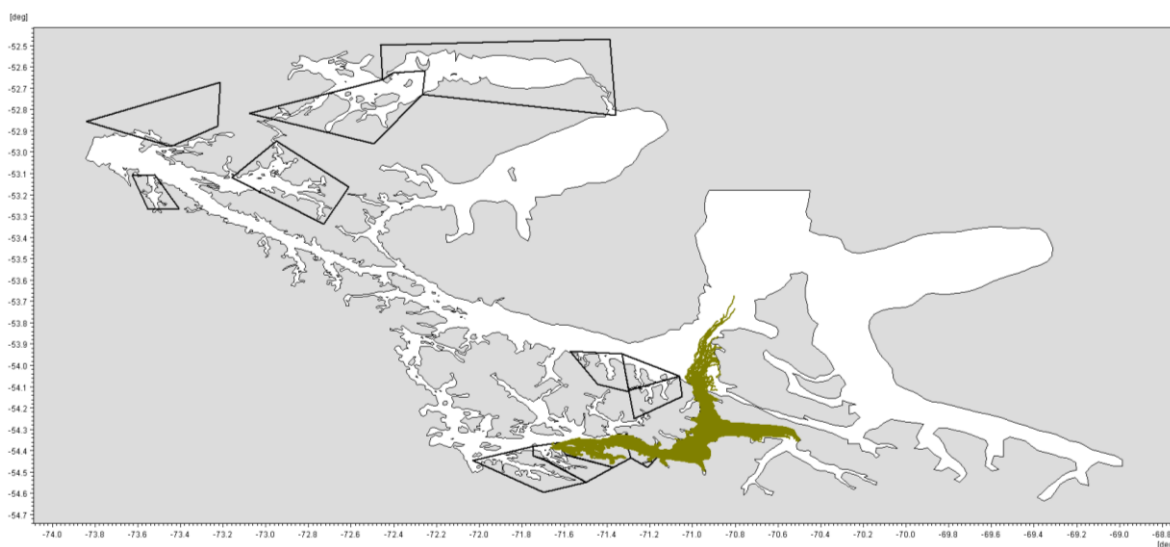


Figura 98. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Invierno Cuadratura.

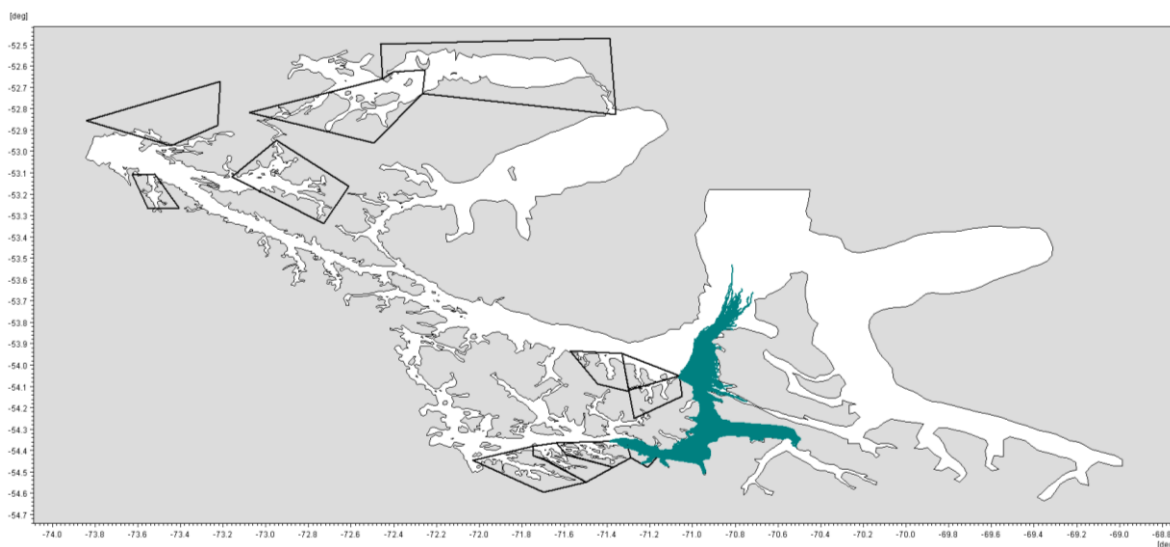


Figura 99. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Invierno Cuadratura.



Escenario IC	a CC 49	a CC 50	a CC 51	a CC 52	a CC 53	a CC 54	a CC 55	a CC 56	a CC 57	a CC 58	a CC 59	a CC 60
de CC 49												
de CC 50												
de CC 51												
de CC 52												
de CC 53												
de CC 54												
de CC 55												
de CC 56												
de CC 57												
de CC 58												
de CC 59												
de CC 60												

Tabla 17. Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en un escenario de Invierno Cuadratura.

En este escenario de invierno cuadratura el viento Oeste controla la dispersión de manera que barrios contiguos entre sí solo dispersan al que se encuentra al Este suyo (caso de Cockburn e isla Capitán Aracena). Las partículas de los barrios 51 y 53 en la sub-cuenca Oeste se mueven hacia el Oeste en contra del viento, lo cual puede ser debido a la mayor excursión mareal o a los flujos gravitacionales generados por los máximos de descarga de las fuentes de agua dulce de los glaciares de la península Muñoz Gameiro que dirigen la capa superficial donde se encuentran las partículas hacia el exterior de las cabeceras donde ingresan estos pulsos de agua dulce.

- INVIERNO SICIGIA

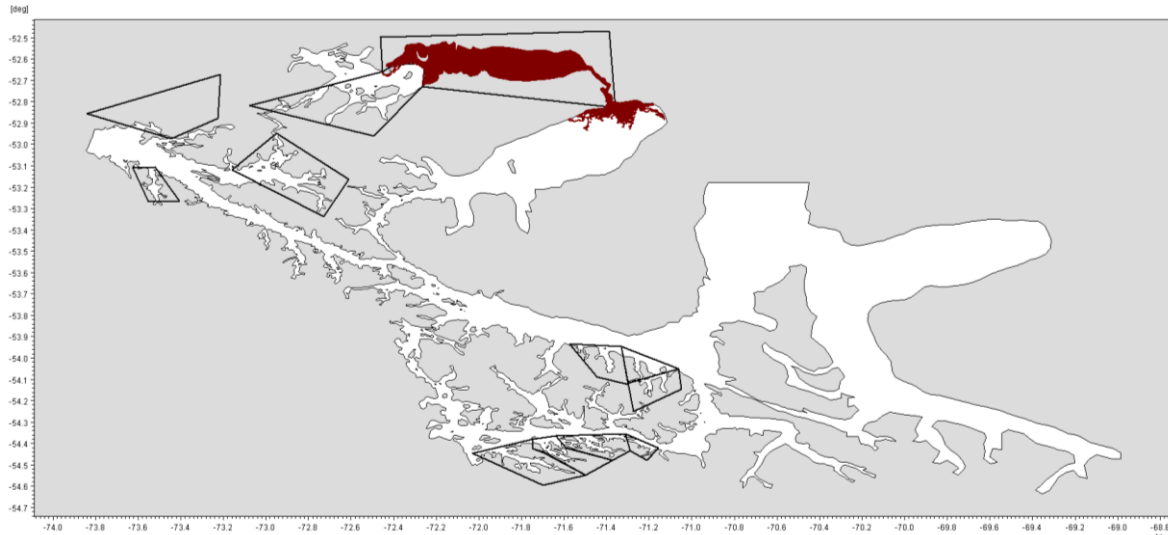


Figura 100. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 49 en escenario de Invierno Sicigia.

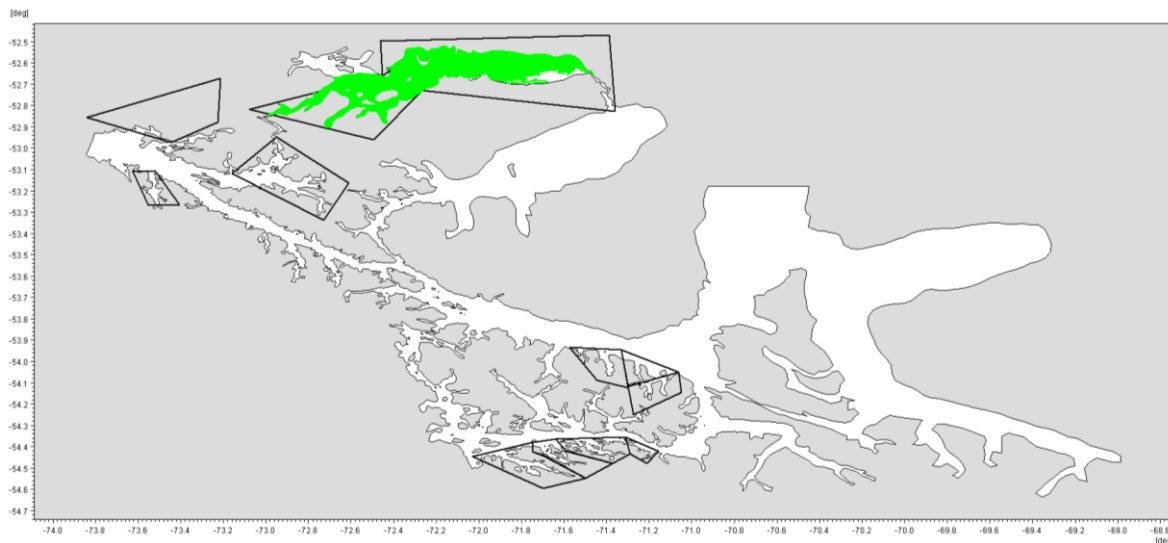


Figura 101. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 50 en escenario de Invierno Sicigia.

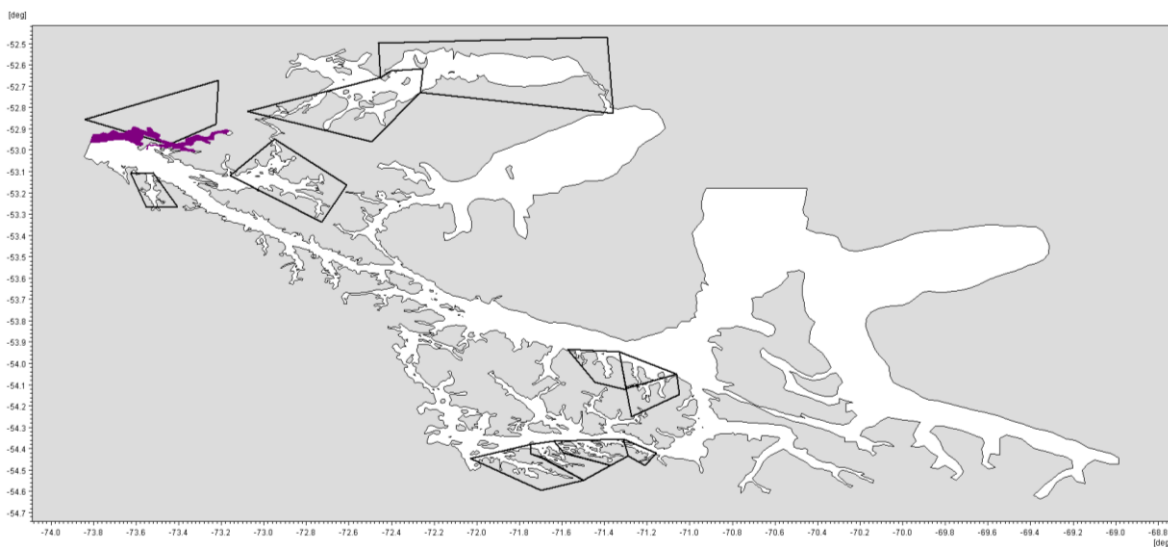


Figura 102. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Invierno Sicigía.

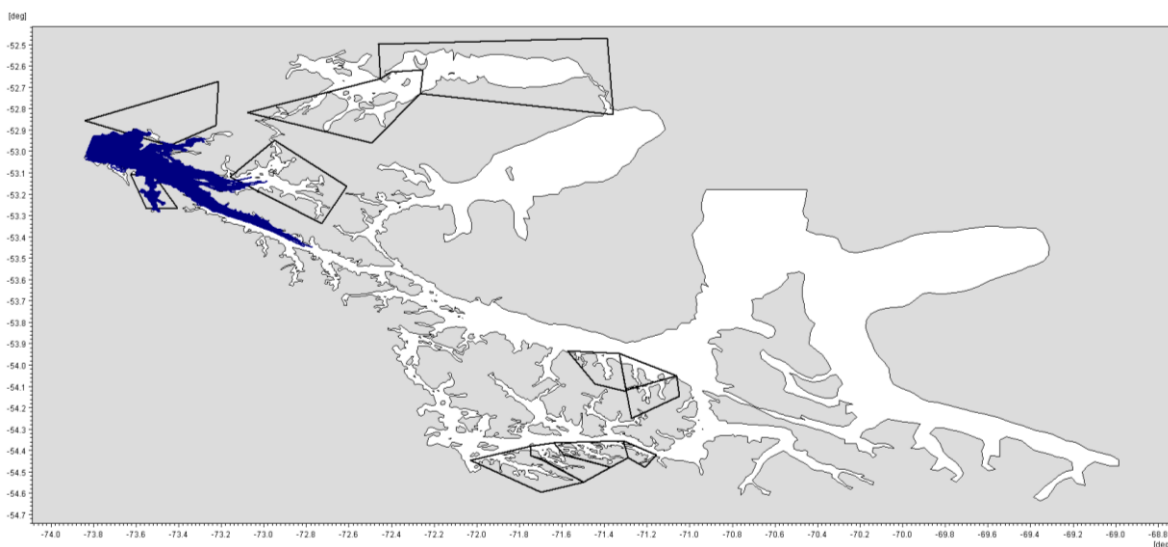


Figura 103. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Invierno Sicigía.



Figura 104. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Invierno Sicigía.

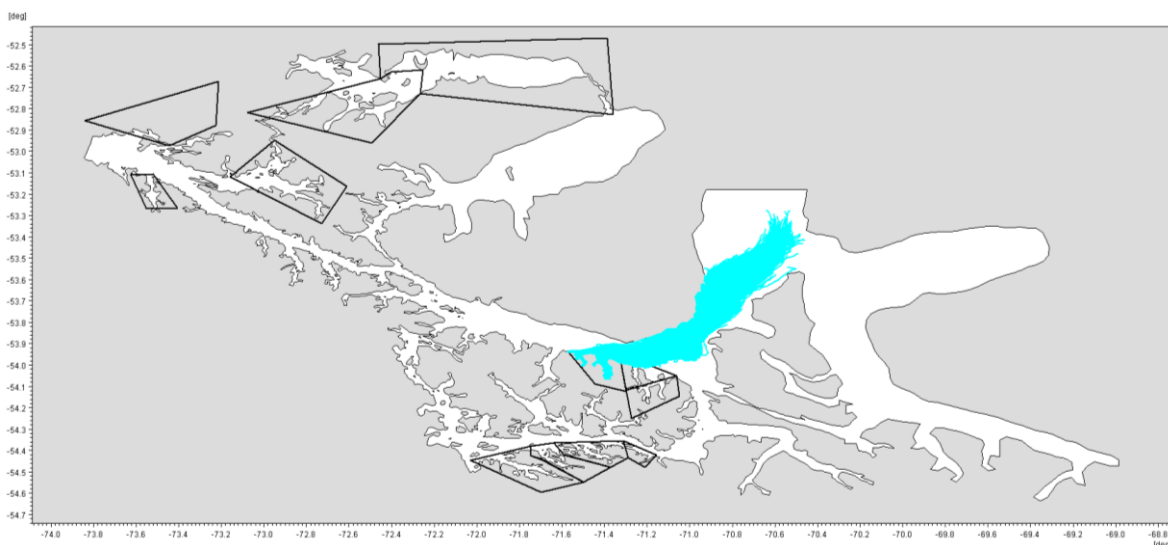


Figura 105. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Invierno Sicigía.

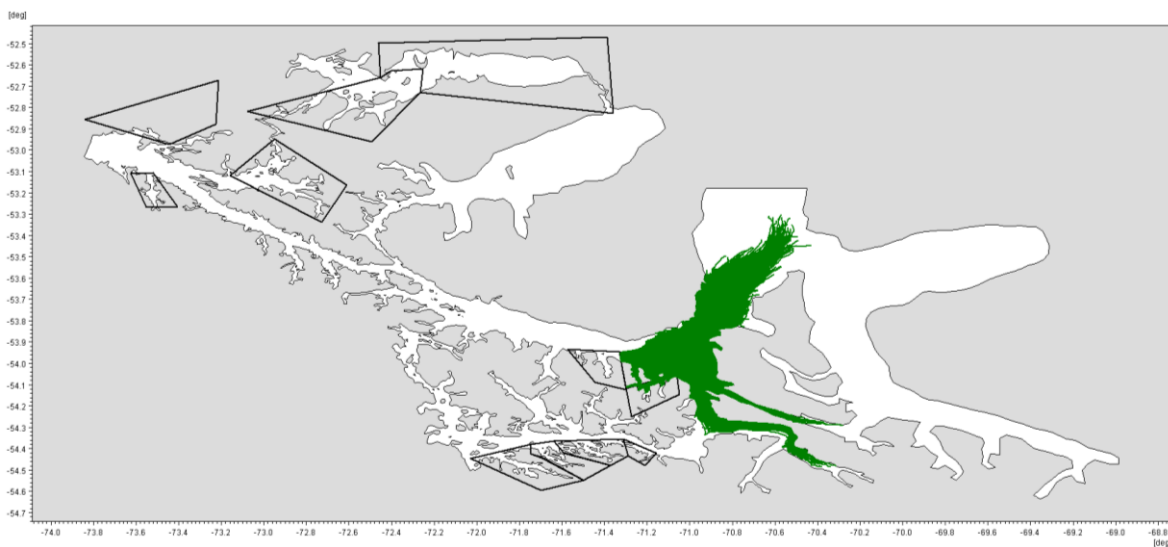


Figura 106. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Invierno Sicigüa.

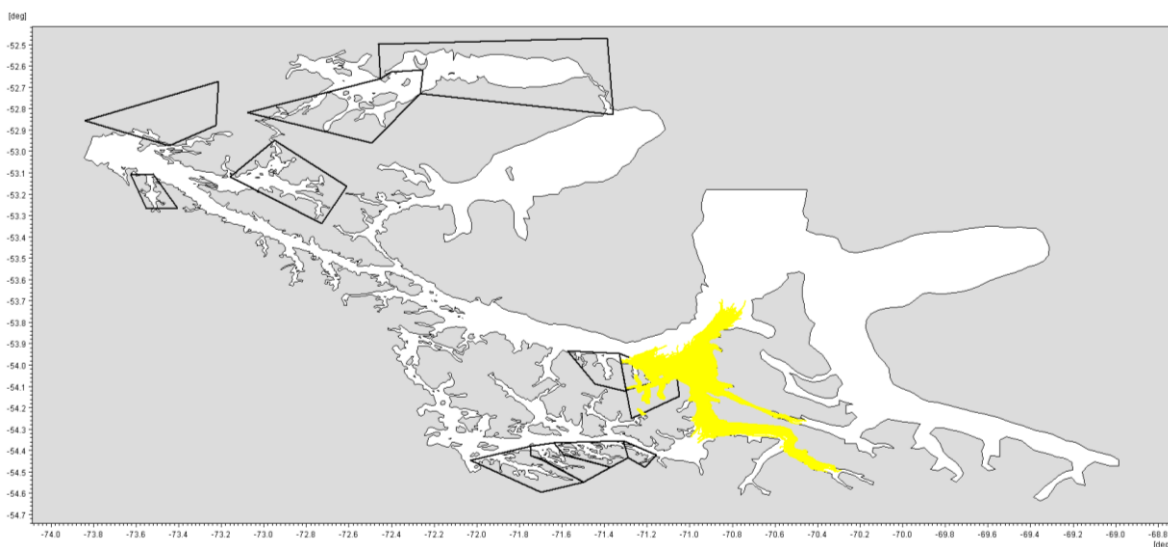


Figura 107. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Invierno Sicigüa.

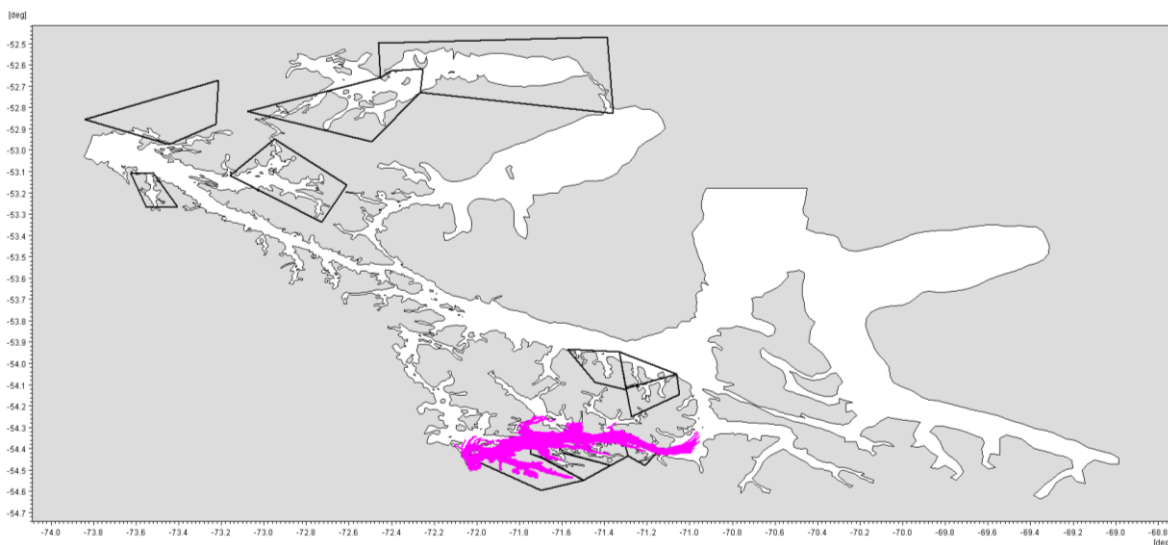


Figura 108. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Invierno Sicigüa.

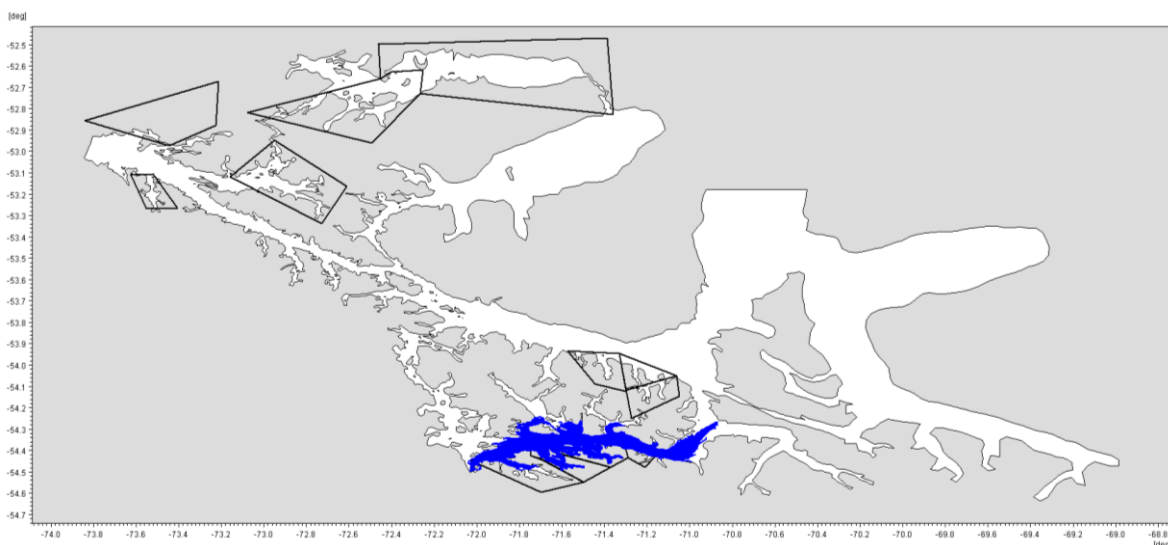


Figura 109. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Invierno Sicigüa.

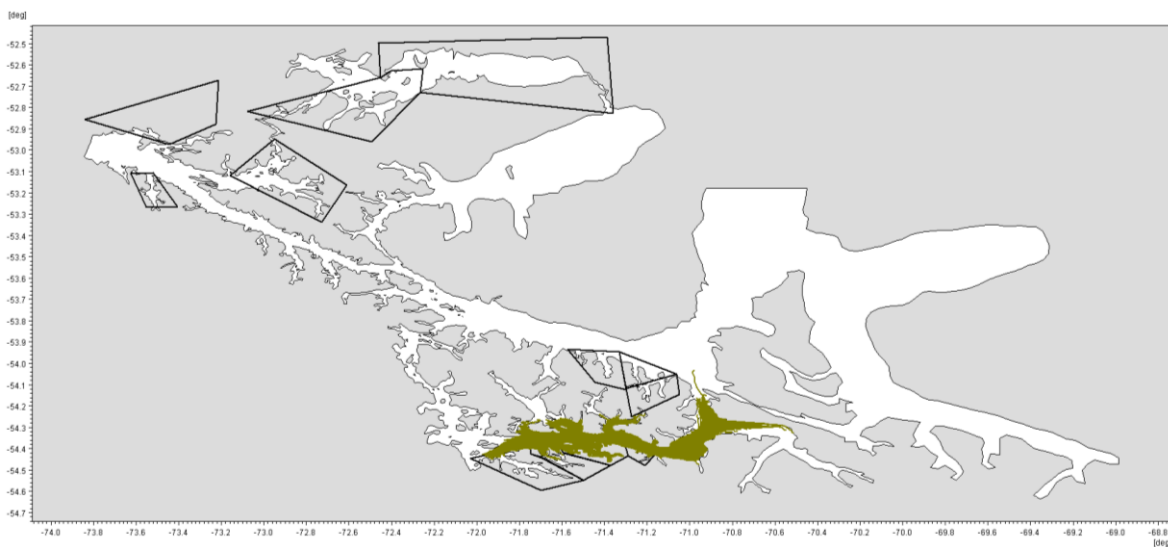


Figura 110. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Invierno Sicigia.

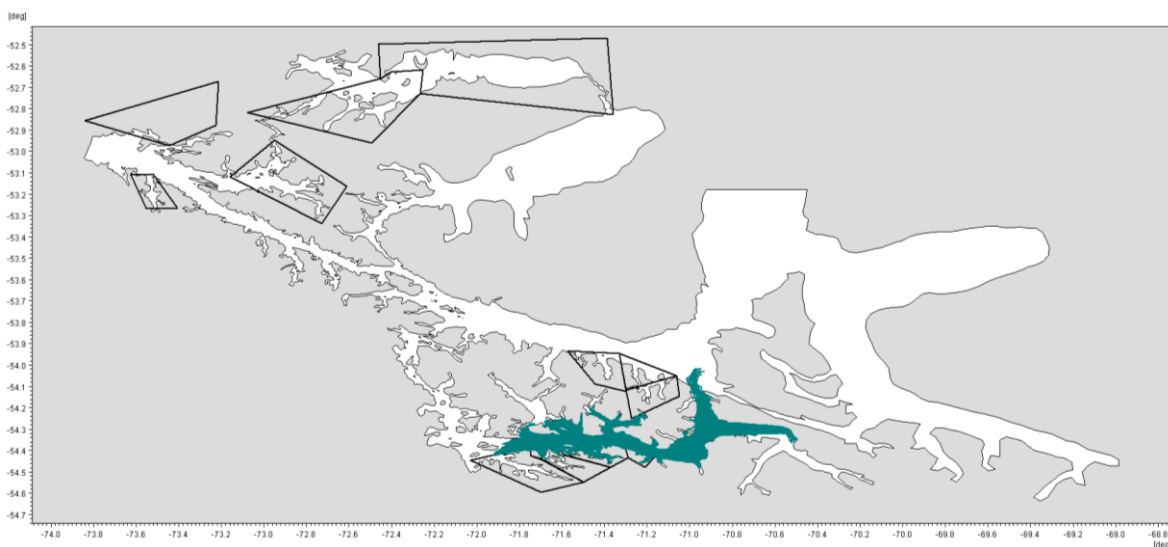


Figura 111. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Invierno Sicigia.



Escenario IS	a CC 49	a CC 50	a CC 51	a CC 52	a CC 53	a CC 54	a CC 55	a CC 56	a CC 57	a CC 58	a CC 59	a CC 60
de CC 49												
de CC 50												
de CC 51												
de CC 52												
de CC 53												
de CC 54												
de CC 55												
de CC 56												
de CC 57												
de CC 58												
de CC 59												
de CC 60												

Tabla 18. Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en un escenario de Invierno Sicigia.

En el escenario de invierno sicigia la mayor energía que introduce la marea en sicigia, provoca que la excursión mareal compita con los otros forzantes que controlaron en mayor grado las dispersiones para el caso anterior de invierno cuadratura. Esta competencia da lugar a que barrios que solo transmitían partículas a su vecino del Este ahora también lo hagan hacia el Oeste (caso de canal Cockburn y los barrios 57, 58, 59 y 60). En la misma manera los barrios 54, 55 y 56 al Norte de la isla Capitán Aracena dispersan partículas hacia el Nor-Este, pero en una menor extensión que en el escenario de invierno cuadratura, lo que parece indicar que la onda de marea procedente del Atlántico, tal y cómo se describe en la literatura, en su entrada hacia el Oeste inhibe en cierto grado la dispersión por parte del viento. Los barrios 51, 52 y 53 también ven restringido el alcance de sus partículas respecto del escenario de cuadratura. Los barrios 49 y 50 al interior de Skyring no experimentan significativos cambios debido a la despreciable acción de la marea en este sistema interior, pues la angostura del canal Gajardo actúa de barrera a la circulación y transmisión de la onda amreal.

- VERANO CUADRATURA

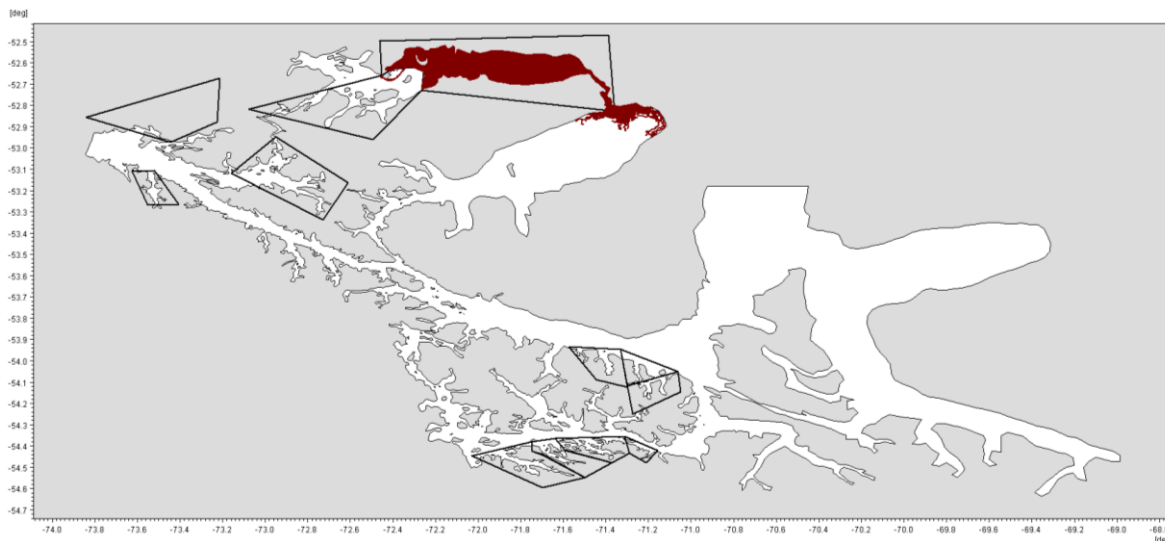


Figura 112. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 49 en escenario de Verano Cuadratura.

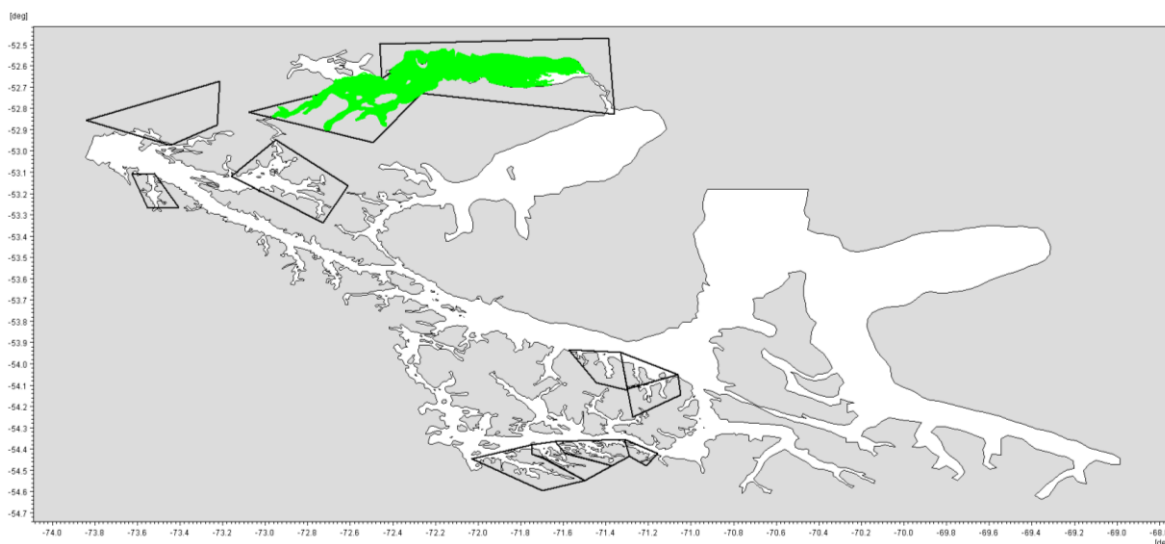


Figura 113. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 50 en escenario de Verano Cuadratura.

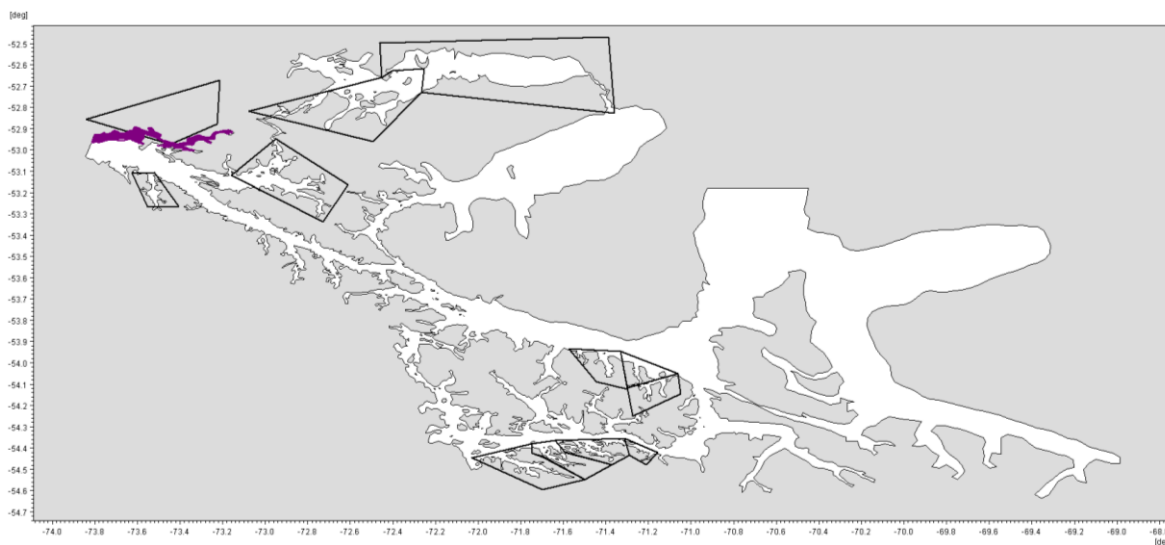


Figura 114. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Verano Cuadratura.

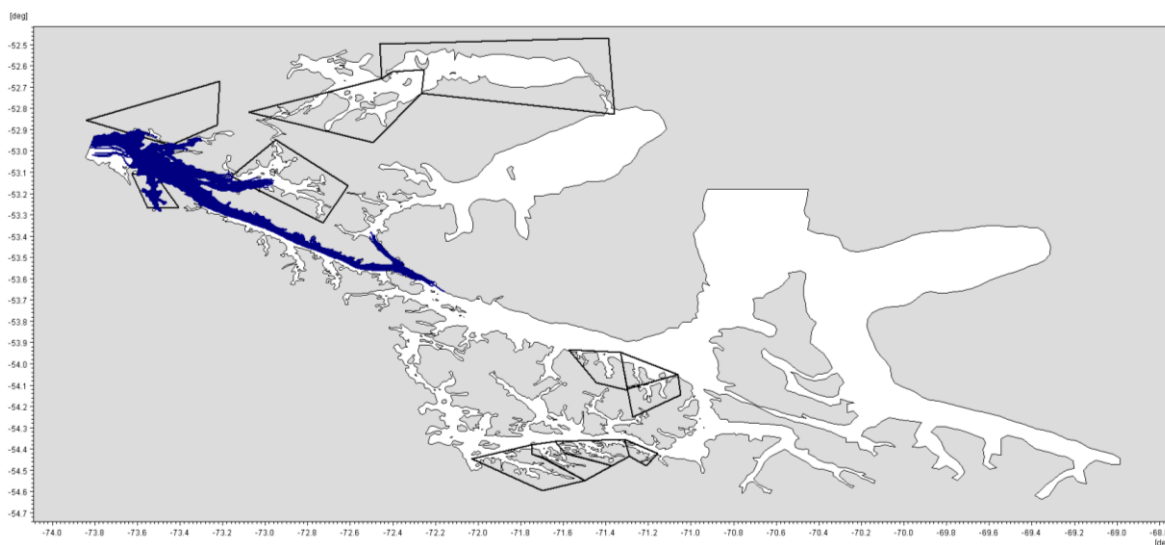


Figura 115. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Verano Cuadratura.



Figura 116. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Verano Cuadratura.

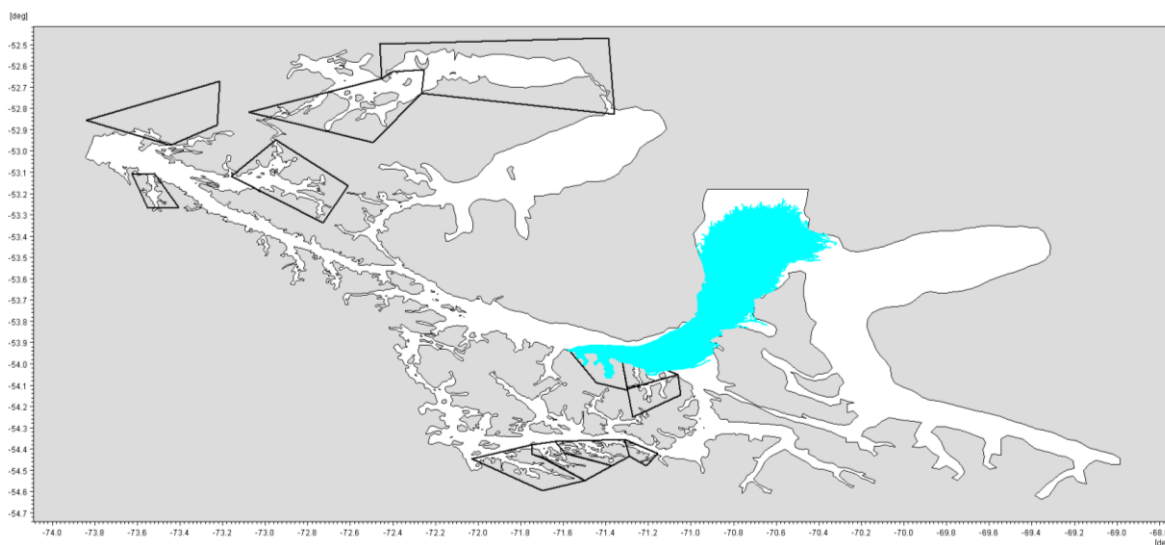


Figura 117. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Verano Cuadratura.

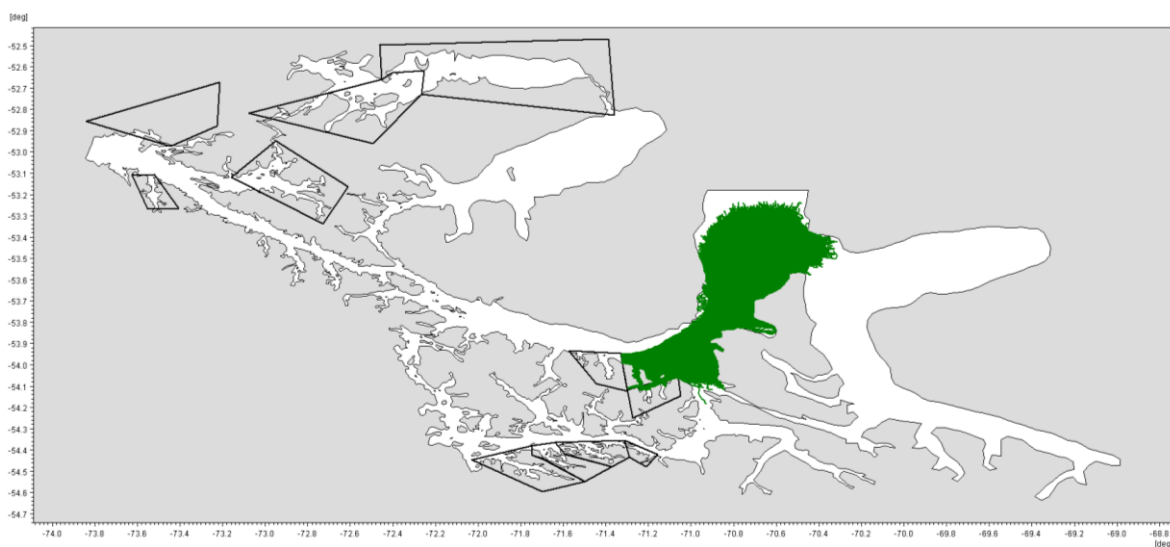


Figura 118. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Verano Cuadratura.

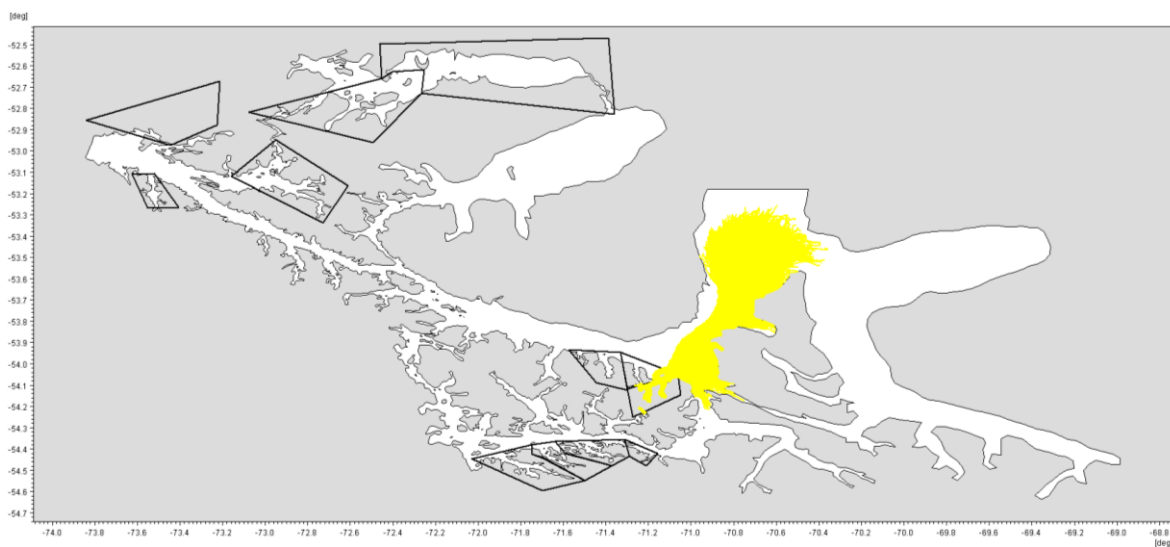


Figura 119. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Verano Cuadratura.

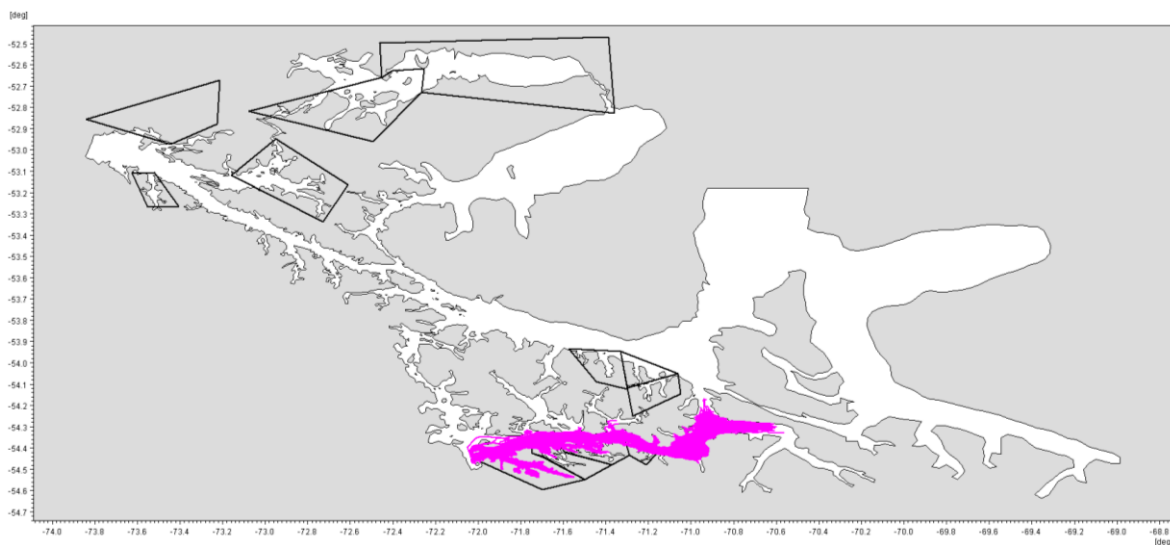


Figura 120. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Verano Cuadratura.

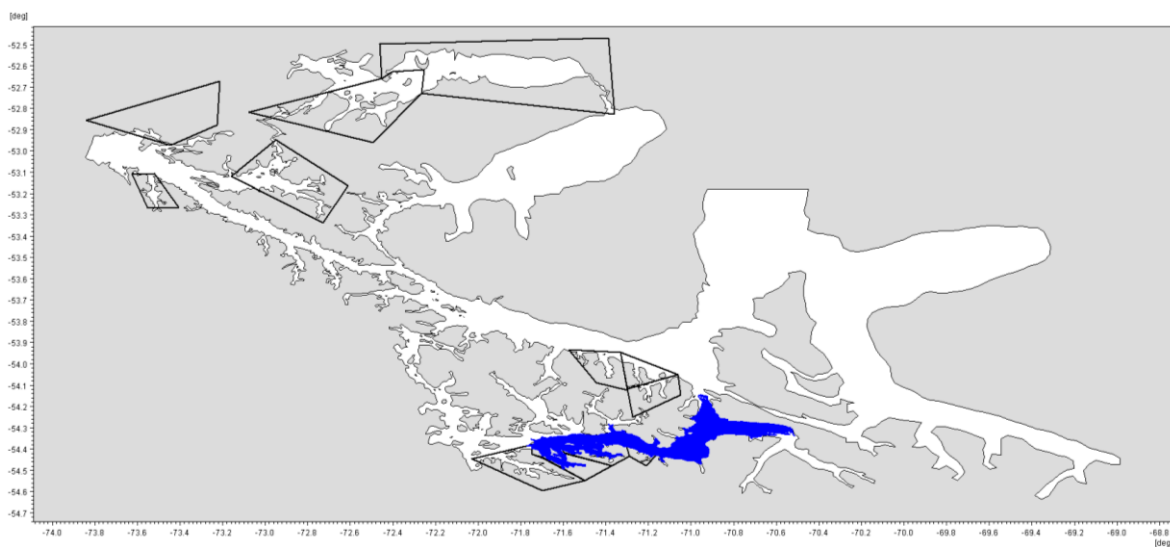


Figura 121. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Verano Cuadratura.

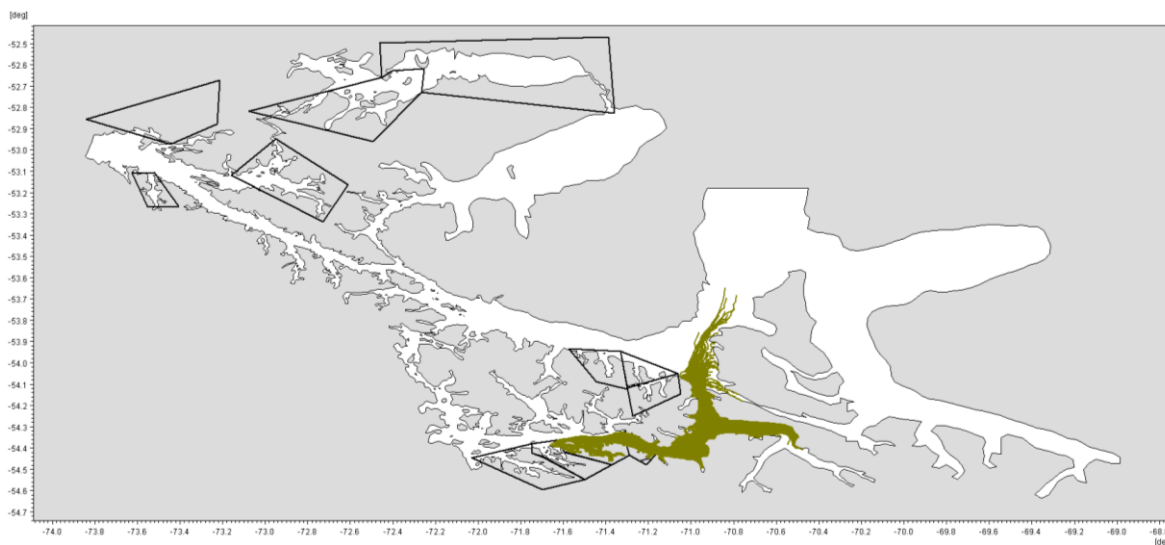


Figura 122. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Verano Cuadratura.

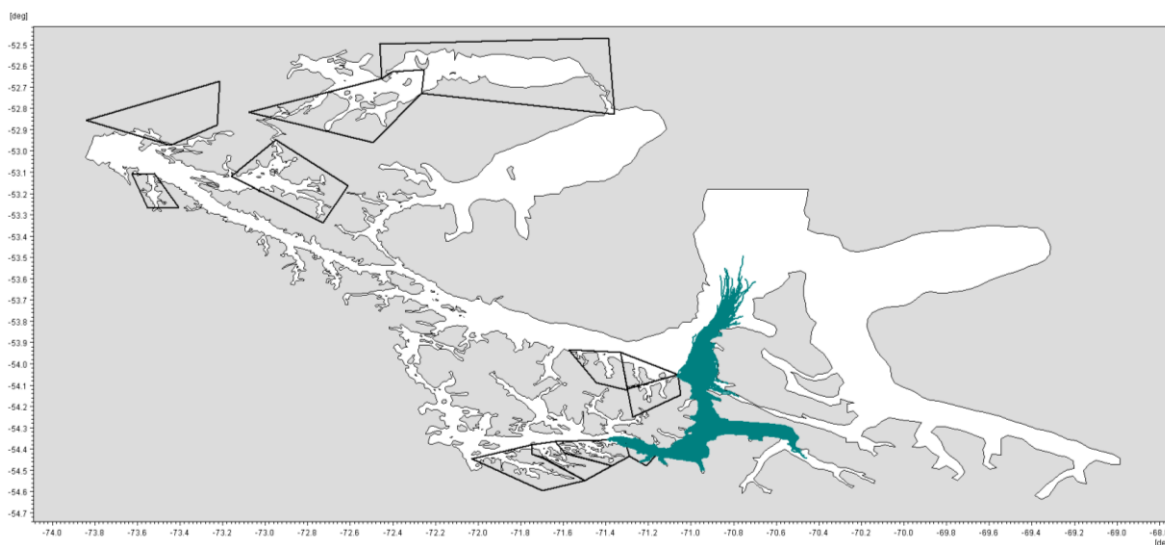


Figura 123. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Verano Cuadratura.



Escenario VC	a CC 49	a CC 50	a CC 51	a CC 52	a CC 53	a CC 54	a CC 55	a CC 56	a CC 57	a CC 58	a CC 59	a CC 60
de CC 49												
de CC 50												
de CC 51												
de CC 52												
de CC 53												
de CC 54												
de CC 55												
de CC 56												
de CC 57												
de CC 58												
de CC 59												
de CC 60												

Tabla 19. Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en Verano Cuadratura.

La similitud del forzante del viento entre los escenarios de invierno y verano hace que las dispersiones de partículas sean similares entre ambos casos con grandes plumas de dispersión hacia el Este, especialmente a lo largo del estrecho de Magallanes y el canal Cockburn.

- VERANO SICIGIA

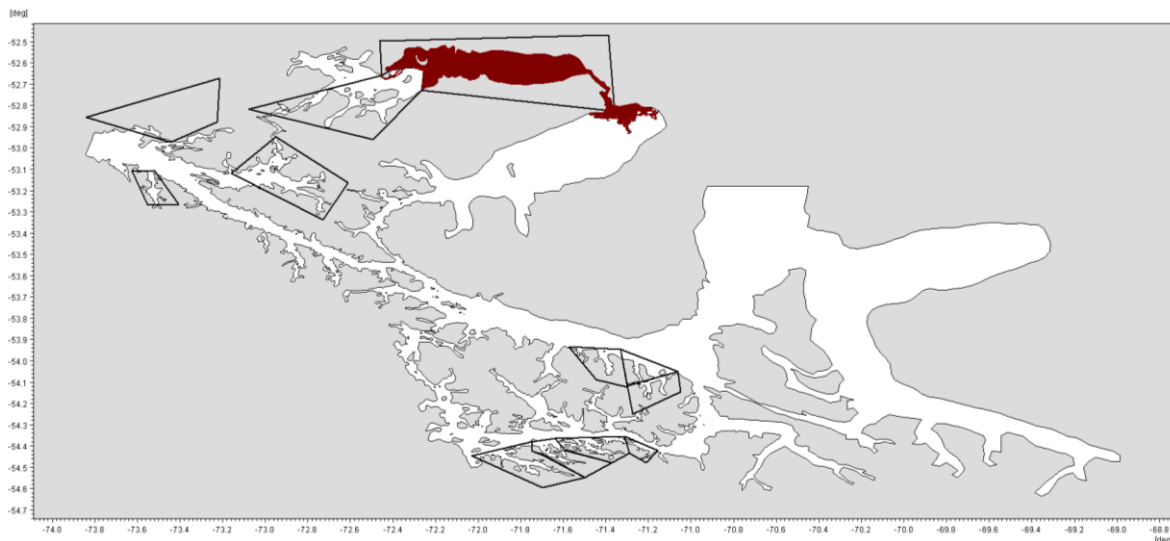


Figura 124. T=72 horas m3xima dispersi3n de las partculas del barrio 49 en escenario de Verano Sicigia.

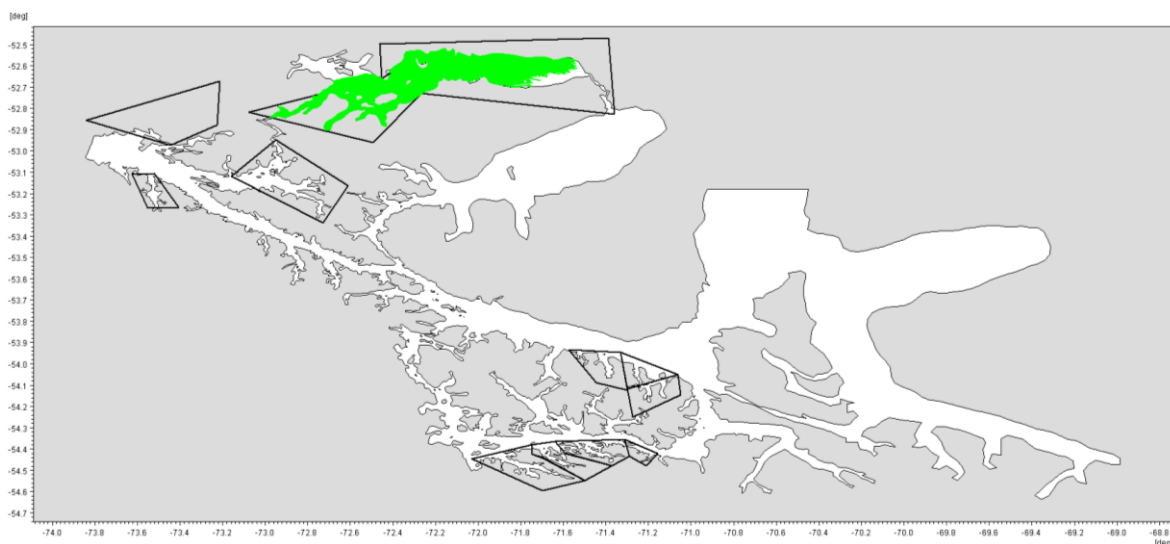


Figura 125. T=72 horas m3xima dispersi3n de las partculas del barrio 50 en escenario de Verano Sicigia.

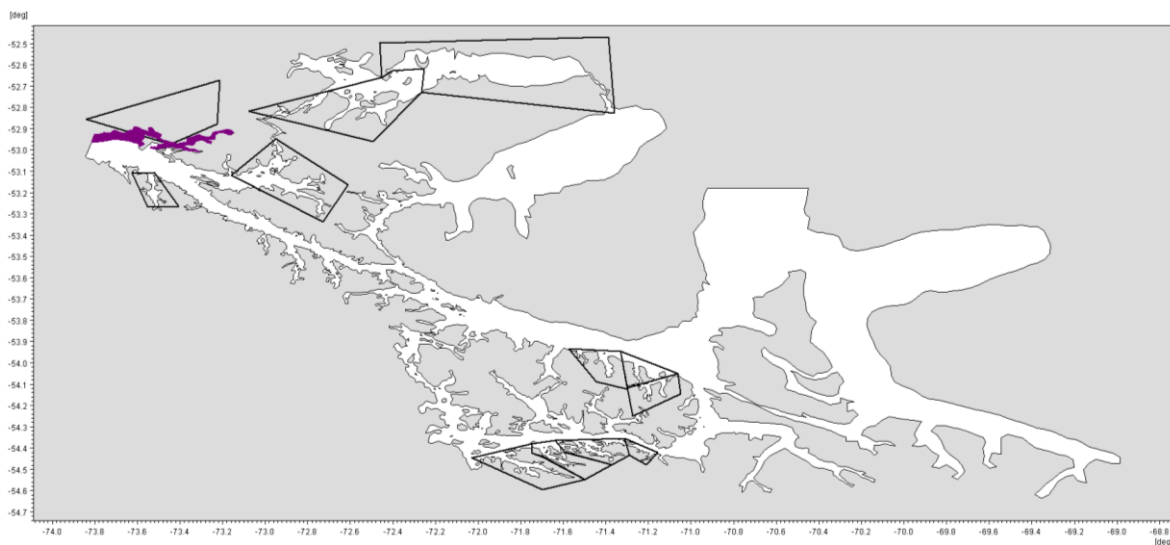


Figura 126. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Verano Sicigia.

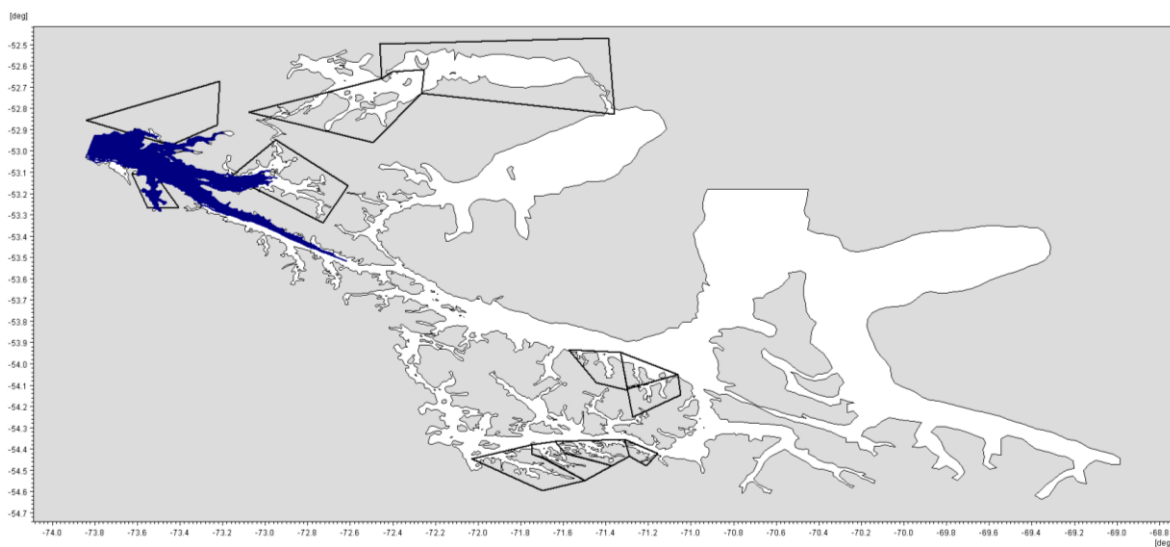


Figura 127. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Verano Sicigia.



Figura 128. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Verano Sicigia.

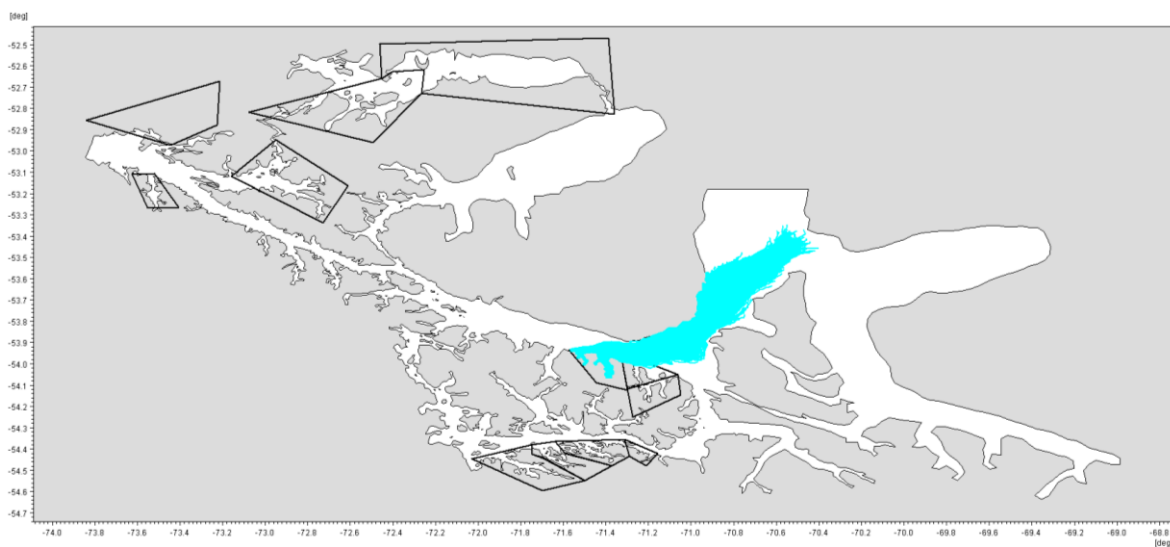


Figura 129. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Verano Sicigia.

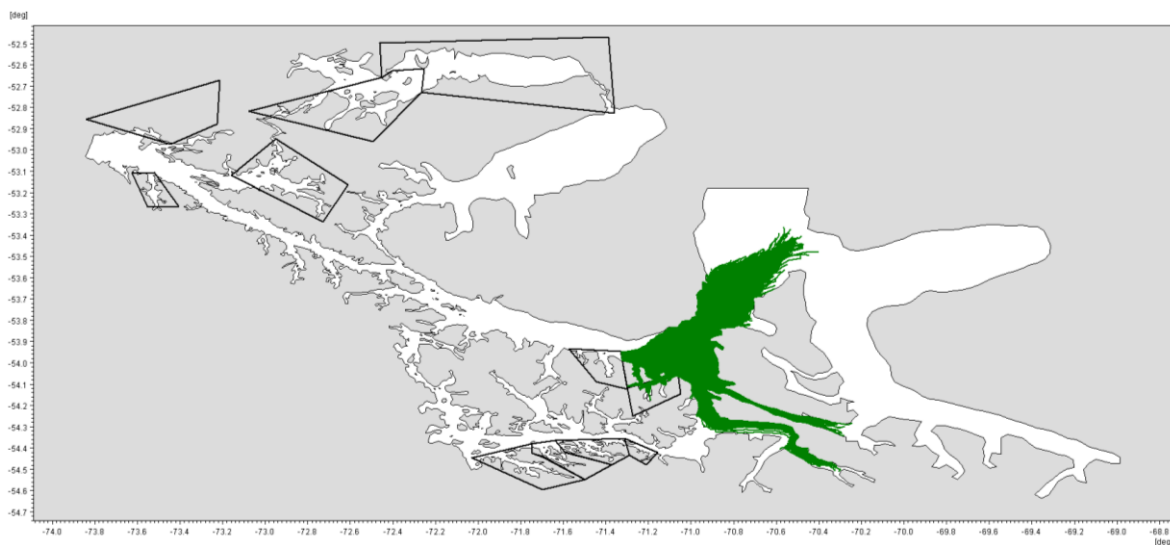


Figura 130. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Verano Sicigia.

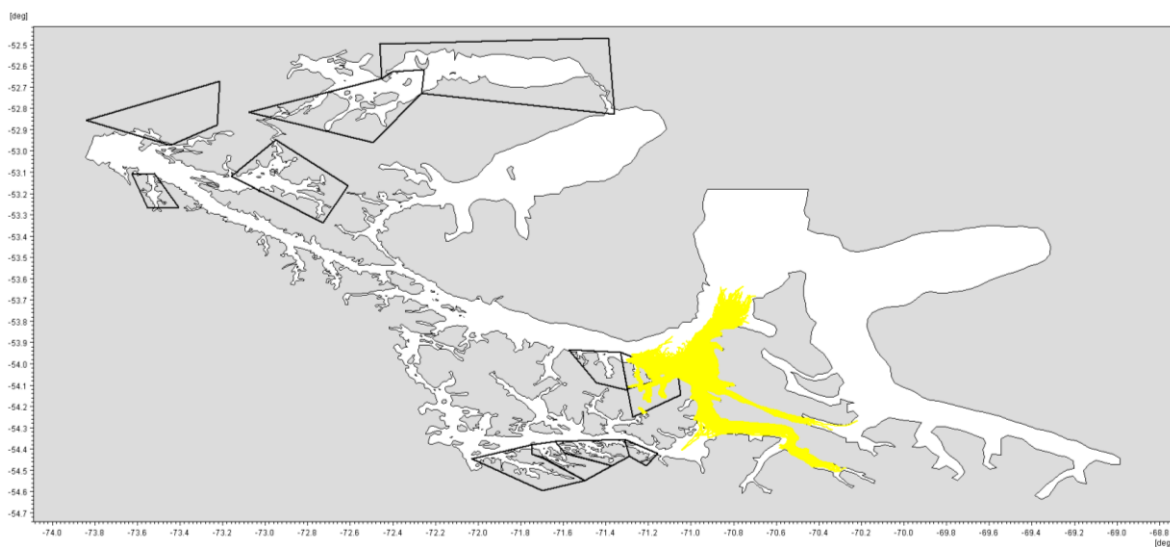


Figura 131. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Verano Sicigia.

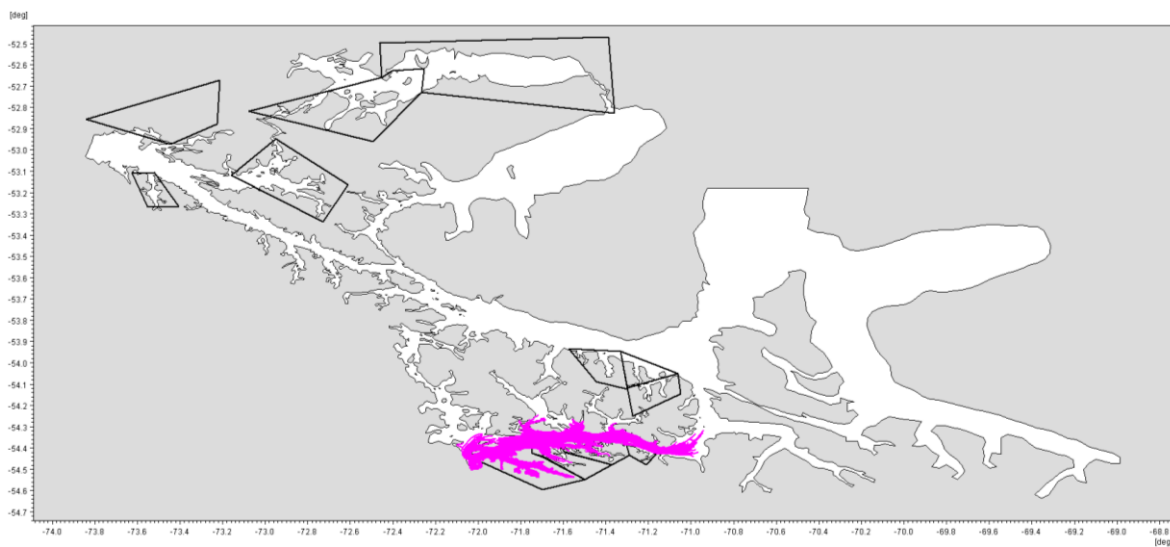


Figura 132. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Verano Sicigia.

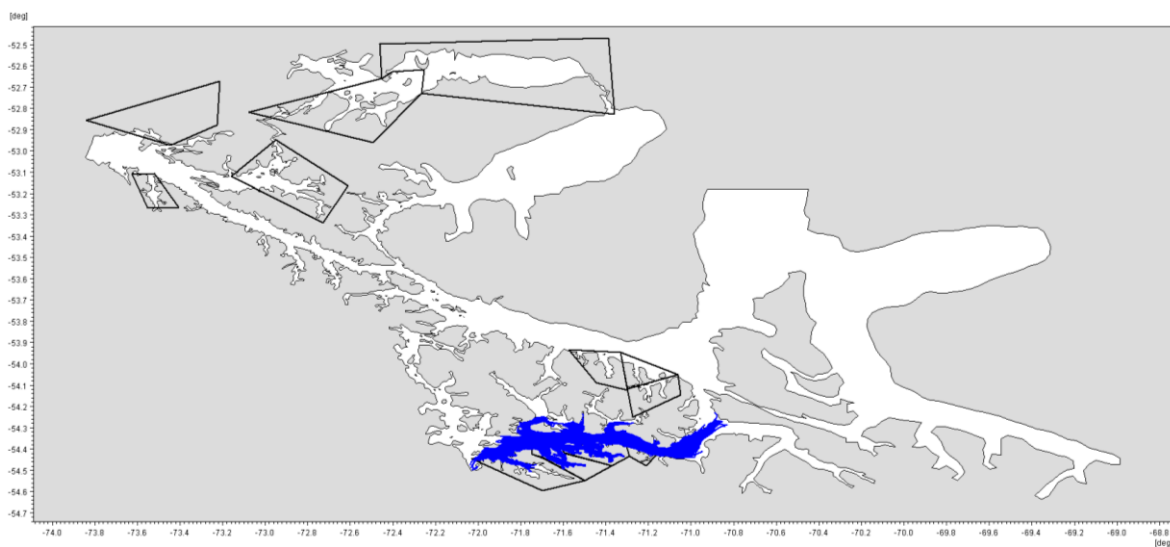


Figura 133. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Verano Sicigia.

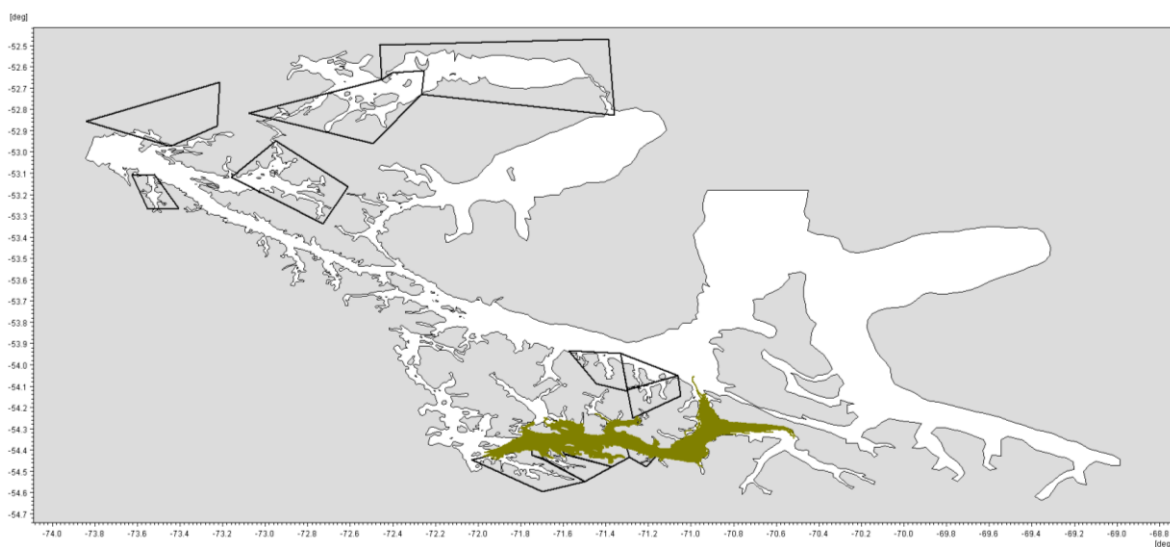


Figura 134. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Verano Sicigia.

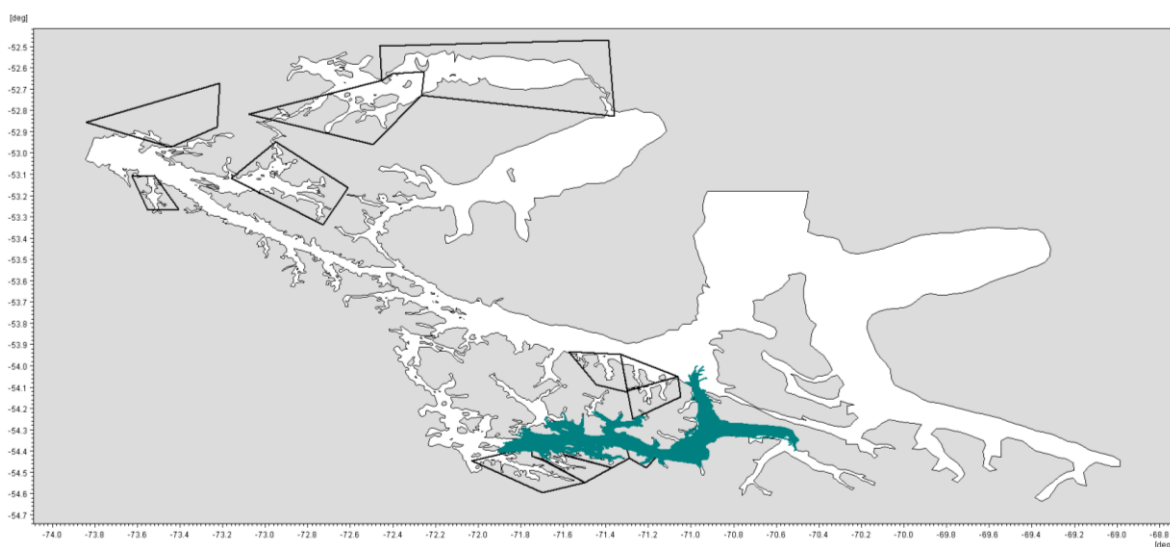


Figura 135. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Verano Sicigia.



Escenario VS	a CC 49	a CC 50	a CC 51	a CC 52	a CC 53	a CC 54	a CC 55	a CC 56	a CC 57	a CC 58	a CC 59	a CC 60
de CC 49												
de CC 50												
de CC 51												
de CC 52												
de CC 53												
de CC 54												
de CC 55												
de CC 56												
de CC 57												
de CC 58												
de CC 59												
de CC 60												

Tabla 20. Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en un escenario de Verano Sicigia.

Análogamente a los escenarios de invierno, durante el ciclo de sicigia de marea, la sectorización de la excursión mareal genera que barrios que en cuadratura están aislados ahora sí reciban partículas de barrios situados al Este, gracias a que la marea rompe el empuje del viento en las capas superficiales (barrios 57, 58, 59 y 60 en canal Cockburn), mientras que en la subcuenca oriental del estrecho de Magallanes la mayor amplitud de la marea en su incursión desde el Atlántico hacia el Oeste introduciría masas de agua que en su avance competiría con el empuje del viento de sentido opuesto reduciendo la superficie del área de dispersión de las partículas de los barrios 54, 55 y 56 de la isla Capitán Aracena.

En los otros *clústers* de barrios, se repite el mismo patrón. El barrio 50 dispersa en gran medida al 49 al interior del seno Skyring, mientras que éste apenas lo hace hacia la cubeta occidental de tal seno, pero sí que sus partículas alcanzan el seno Otway. Partículas del barrio 52 llegan a los barrios 51 y 53, pero estos por su parte no dispersan sus partículas a ningún otro y sus “manchas” son bastante limitadas al entorno local.

- TORMENTA CUADRATURA

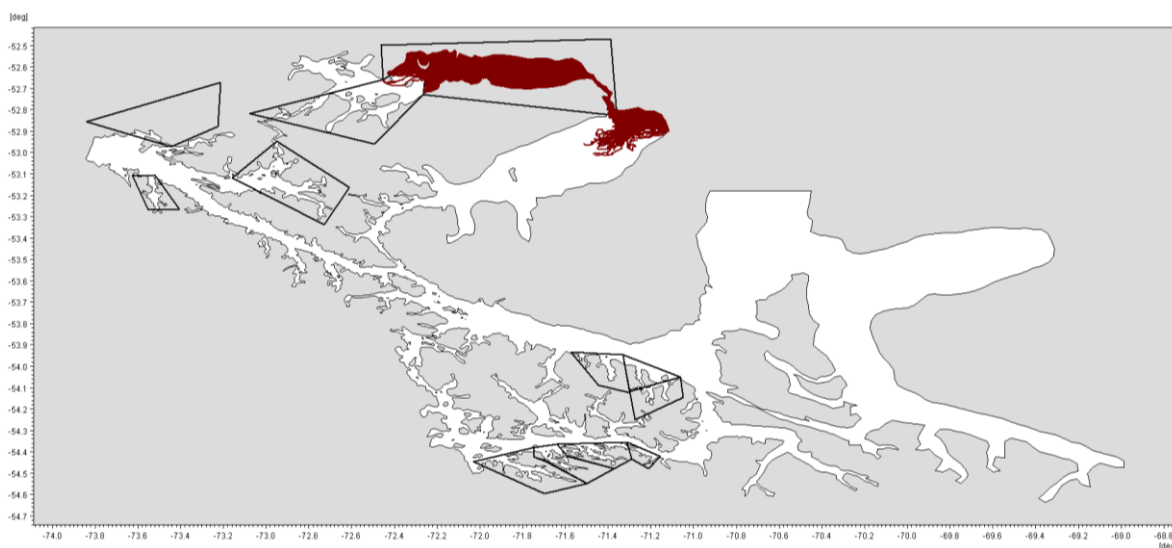


Figura 136. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 49 en escenario de Tormenta Cuadratura.

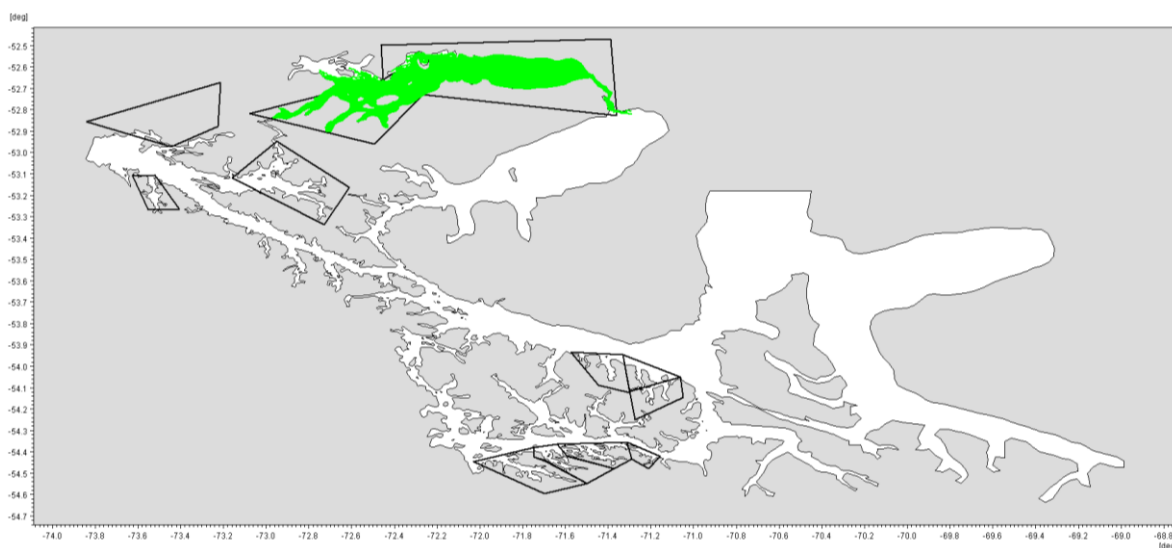


Figura 137. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 50 en escenario de Tormenta Cuadratura.

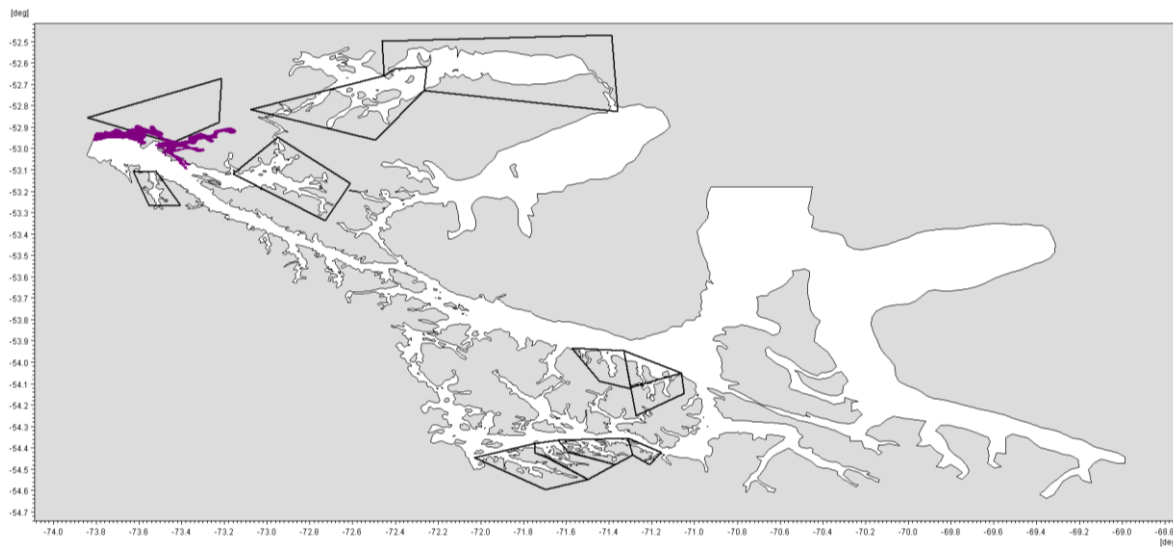


Figura 138. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Tormenta Cuadratura.

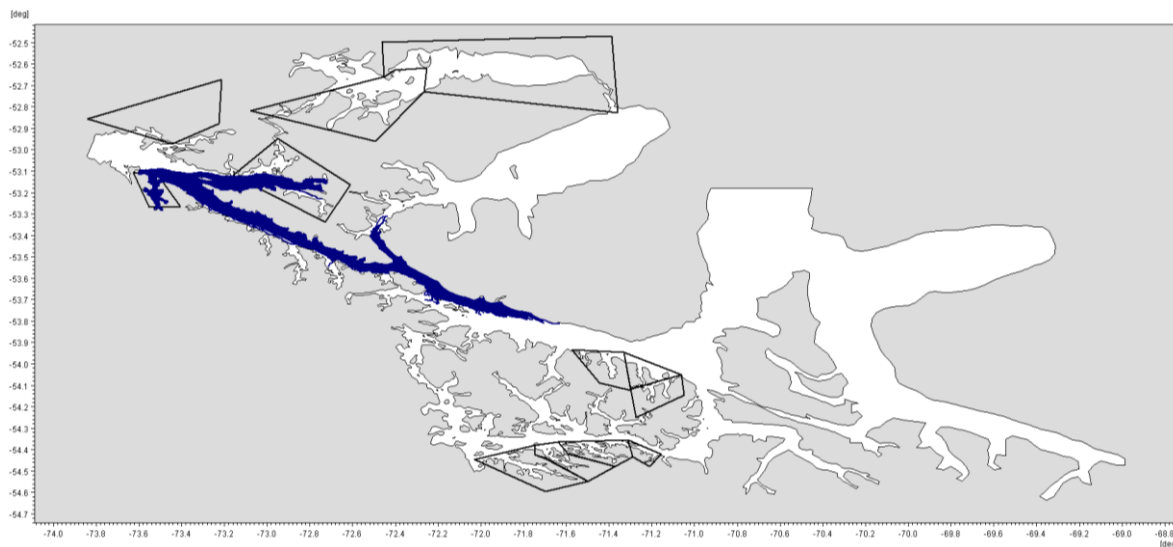


Figura 139. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Tormenta Cuadratura.



Figura 140. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Tormenta Cuadratura.

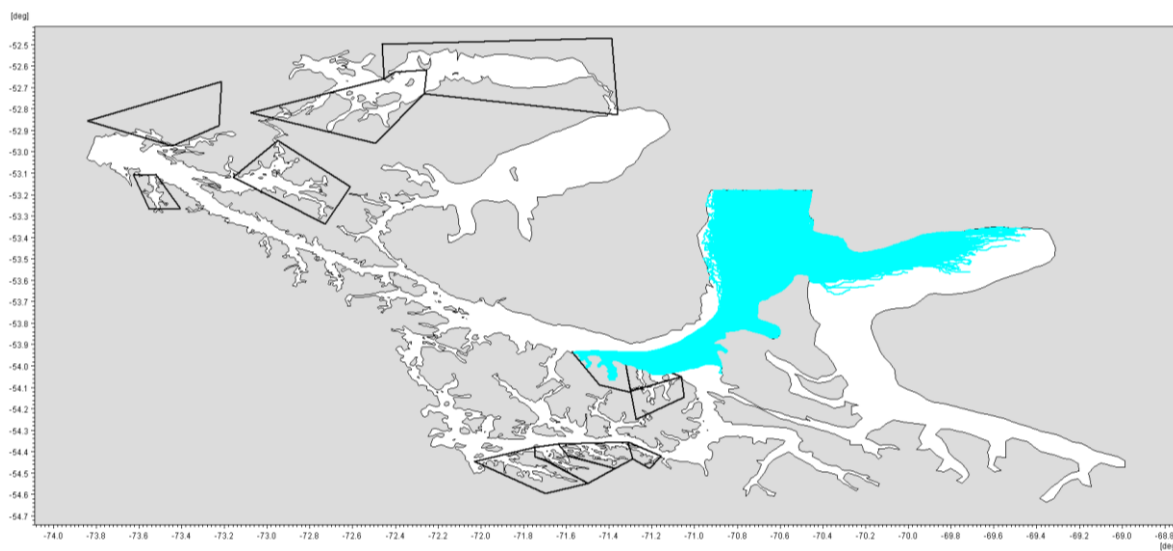


Figura 141. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Tormenta Cuadratura.

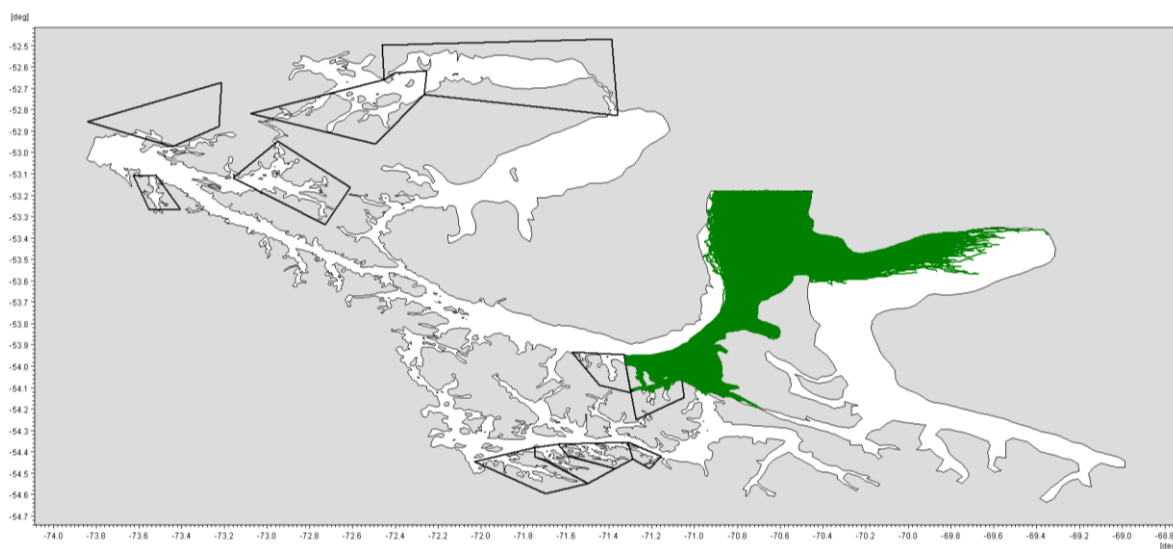


Figura 142. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Tormenta Cuadratura.

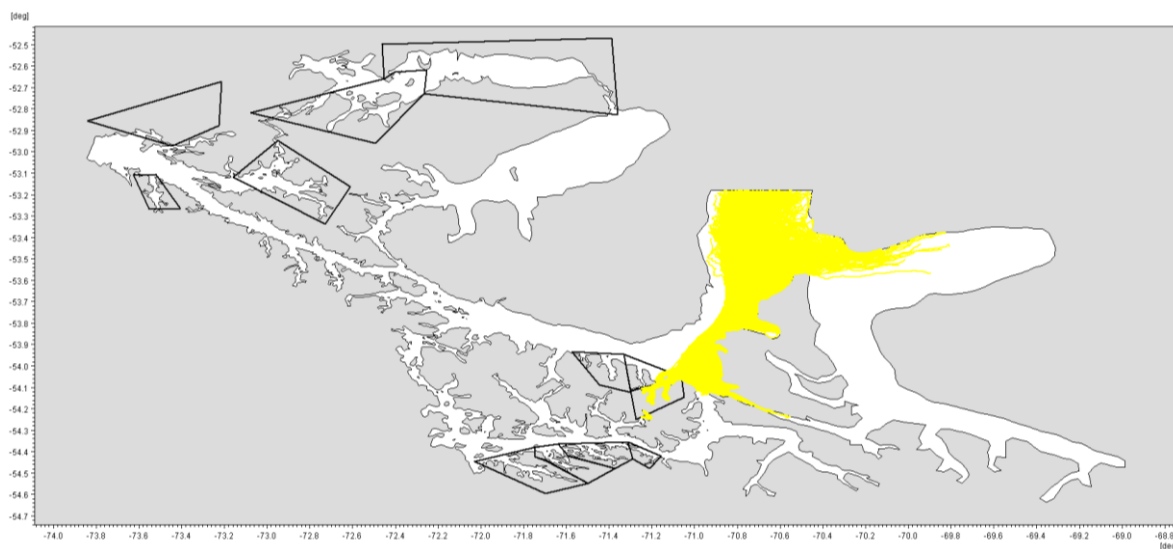


Figura 143. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Tormenta Cuadratura.

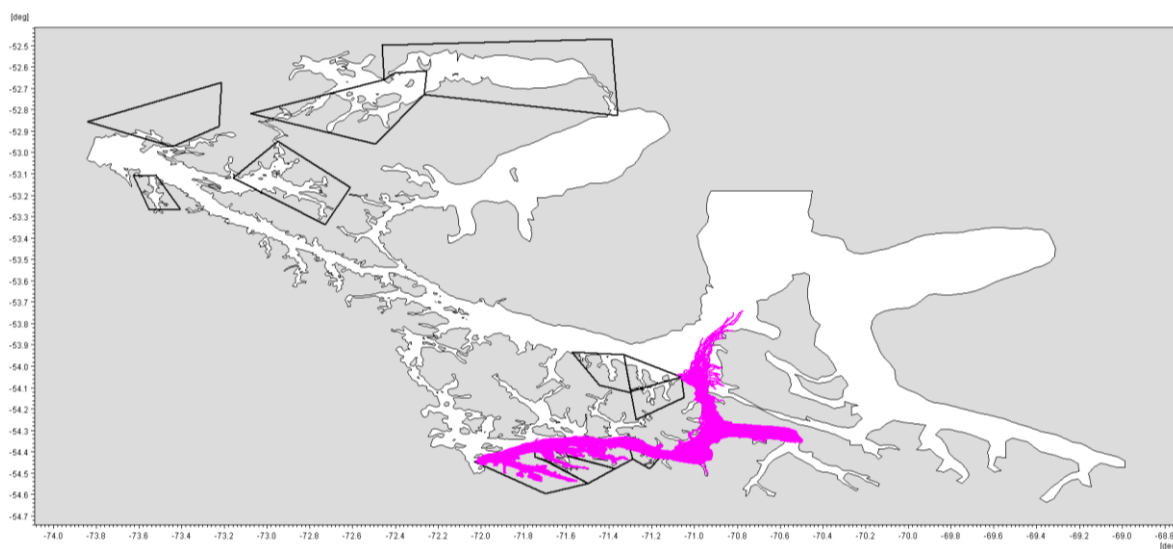


Figura 144. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Tormenta Cuadratura.

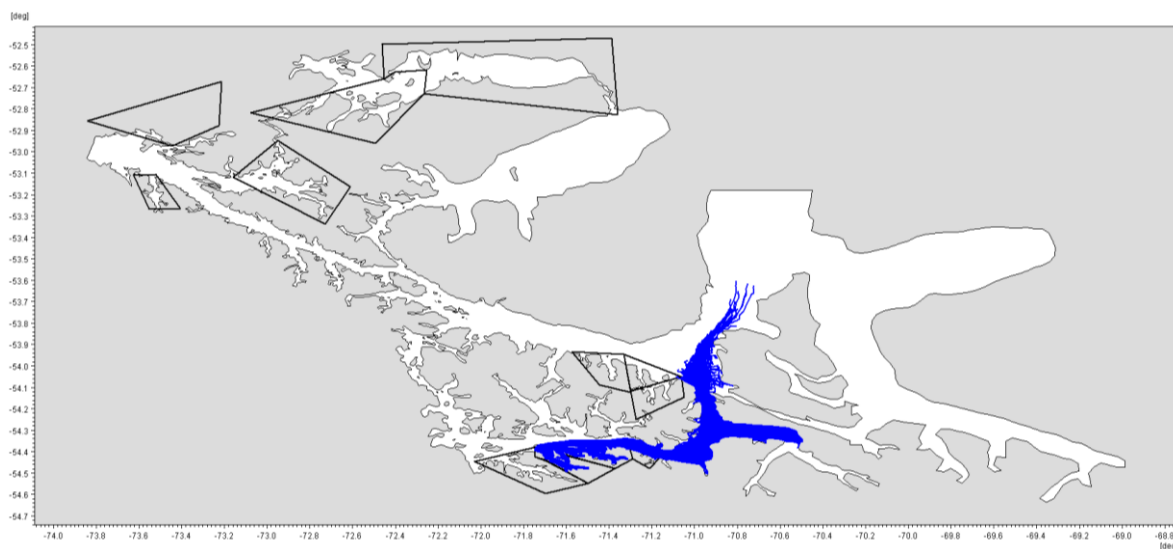


Figura 145. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Tormenta Cuadratura.

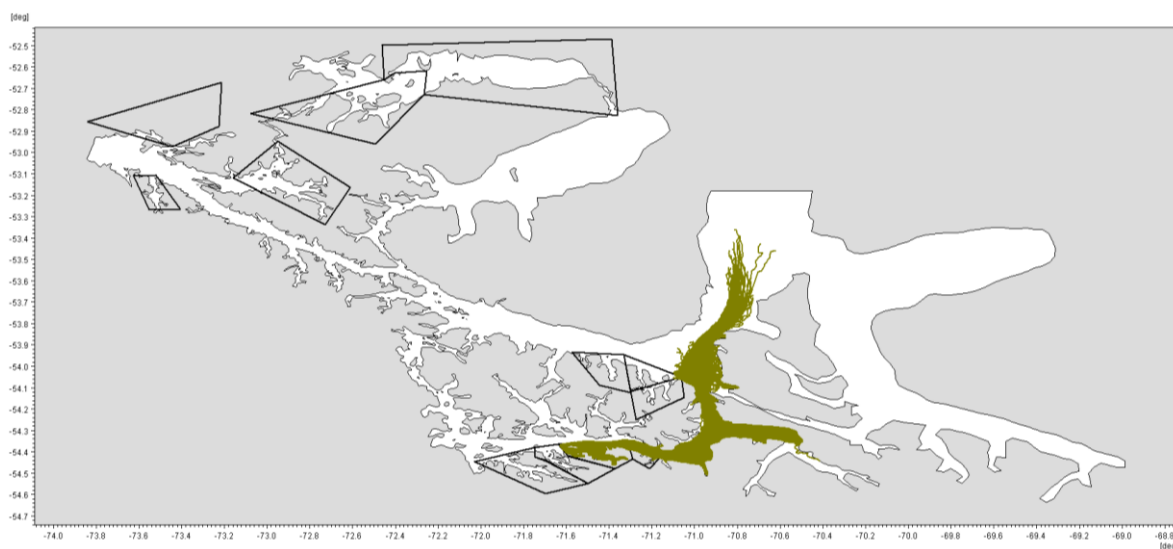


Figura 146. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Tormenta Cuadratura.

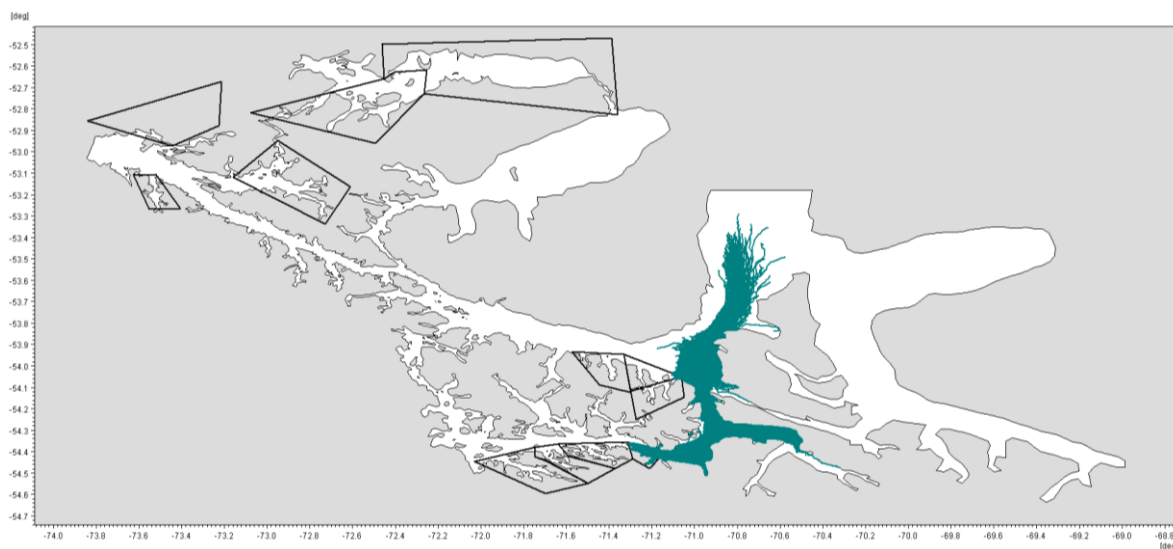


Figura 147. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Tormenta Cuadratura.



Escenario TC	a CC 49	a CC 50	a CC 51	a CC 52	a CC 53	a CC 54	a CC 55	a CC 56	a CC 57	a CC 58	a CC 59	a CC 60
de CC 49												
de CC 50												
de CC 51												
de CC 52												
de CC 53												
de CC 54												
de CC 55												
de CC 56												
de CC 57												
de CC 58												
de CC 59												
de CC 60												

Tabla 21. Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en Tormenta Cuadratura.

La gran intensidad del viento Oeste con unas velocidades sostenidas de 16 m/s (60 km/h) provoca que se vean intensificados las dispersiones que experimentaban las partículas en escenarios anteriores, salvo para el barrio 53 donde el viento represa las partículas al interior del golfo Xaltegua e impide su salida. Partículas del barrio 50 llegan a alcanzar el seno Otway tras recorrer el seno Skyring por completo. El barrio 52 en el estero Córdova dispersa sus partículas tan al Este que éstas atraviesan la constricción del paso Inglés en la isla Carlos III y alcanzan la subcuenca central hasta el paso Froward. Las partículas de los barrios 54, 55 y 56 de isla Capitán Aracena llegan a alcanzar bahía Inútil atravesando el paso Boquerón por primera vez en los demás escenarios. En el canal Cockburn se repite la situación en que el viento gana en la competencia con la marea y transporta las partículas netamente hacia el Este, de manera que los barrios situados contiguos están aislados de sus vecinos al Este.

- TORMENTA SICIGIA

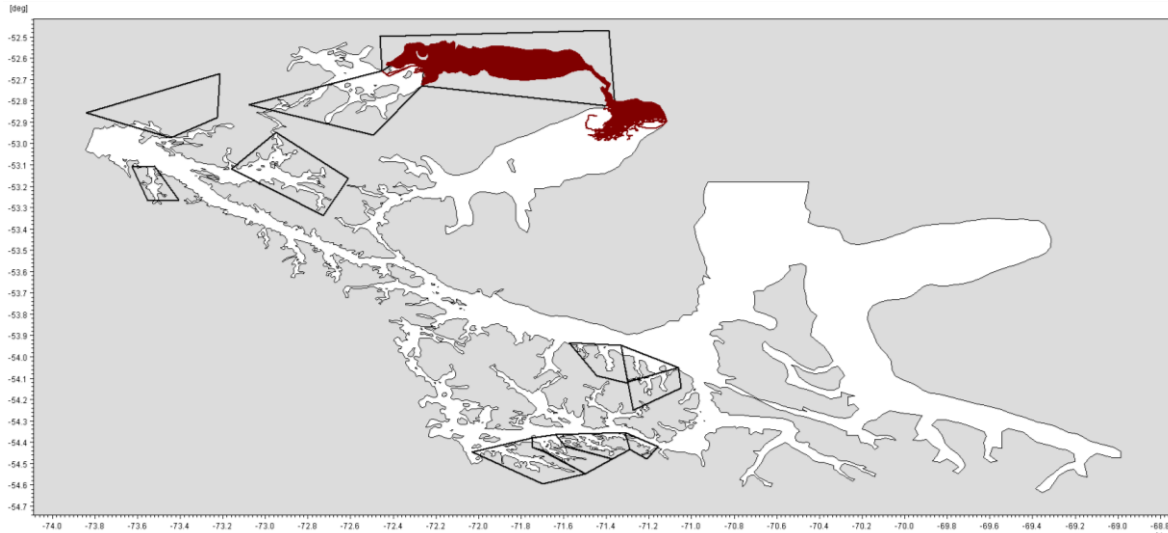


Figura 148. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 49 en escenario de Tormenta Sicigia.

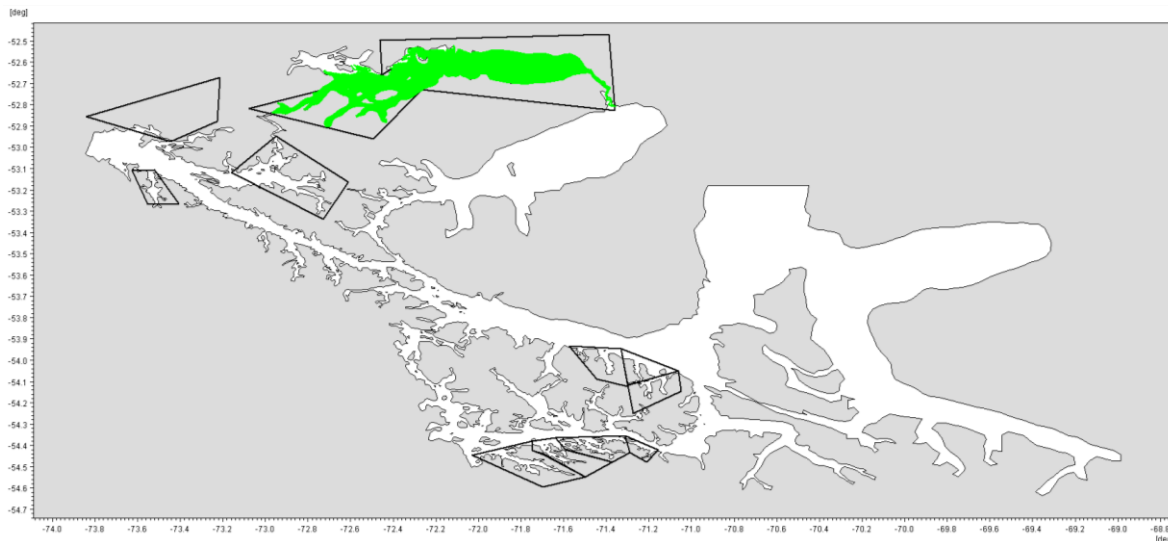


Figura 149. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 50 en escenario de Tormenta Sicigia.

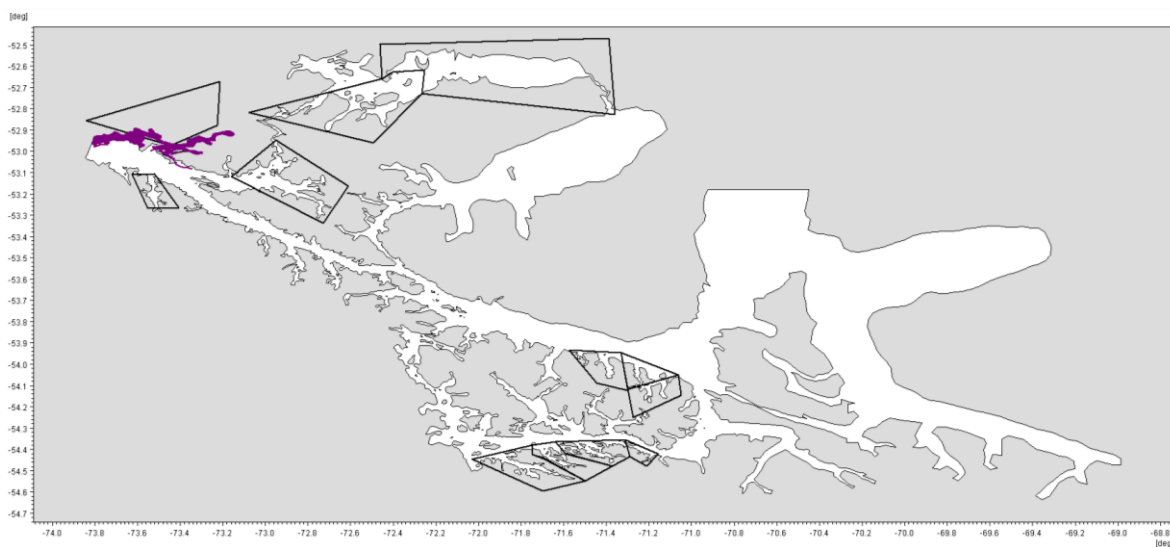


Figura 150. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 51 en escenario de Tormenta Sicigia.

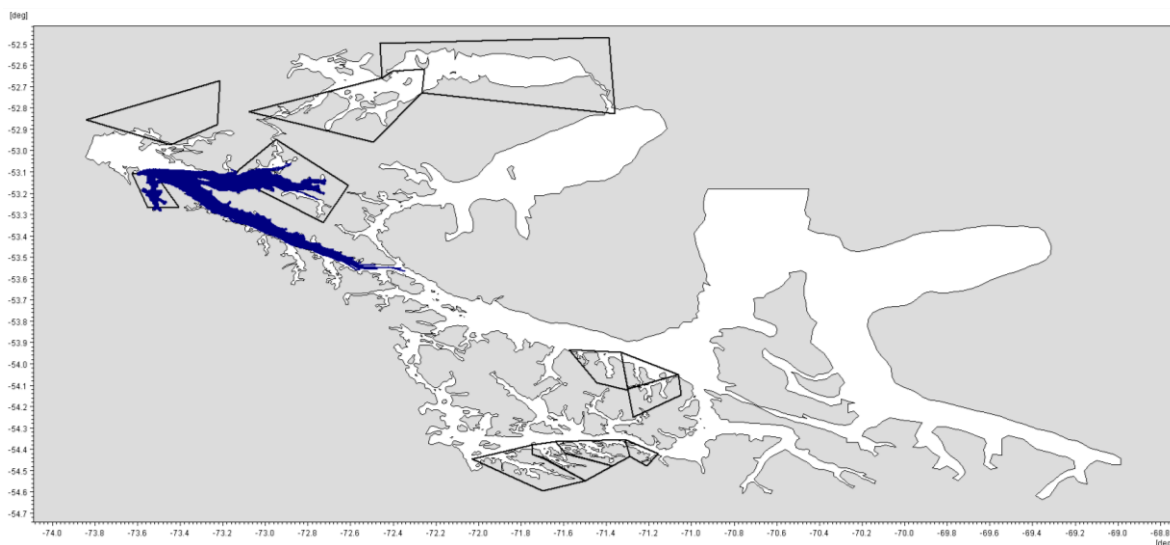


Figura 151. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 52 en escenario de Tormenta Sicigia.



Figura 152. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 53 en escenario de Tormenta Sicigia.

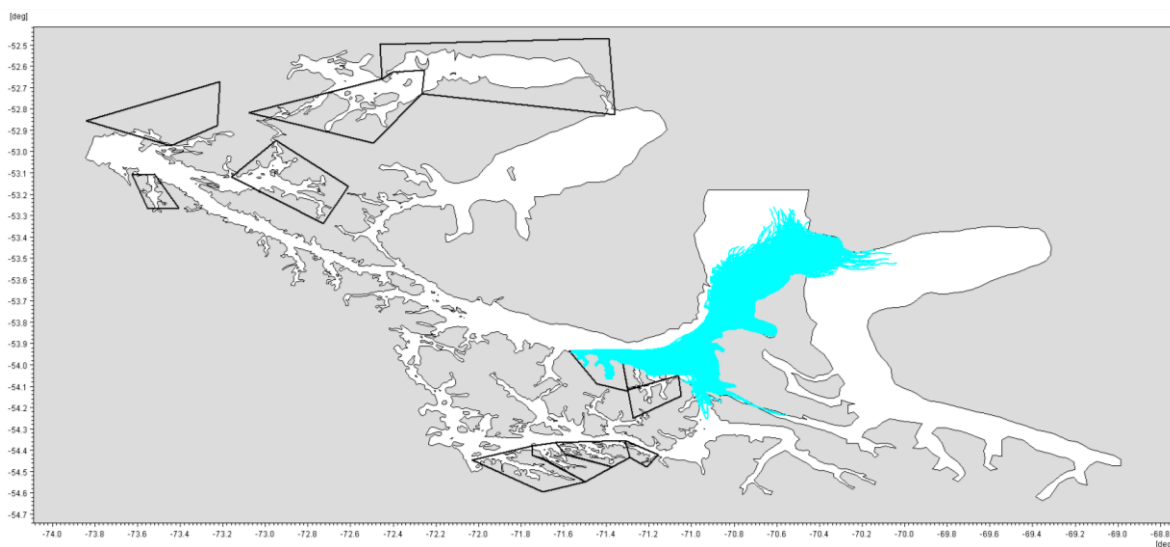


Figura 153. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 54 en escenario de Tormenta Sicigia.

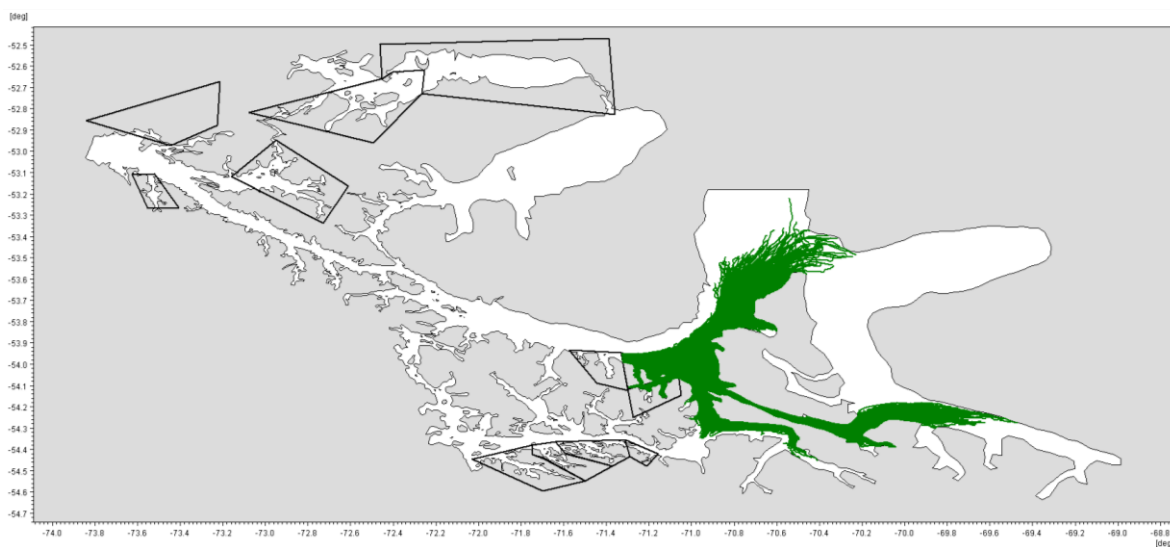


Figura 154. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 55 en escenario de Tormenta Sicigia.

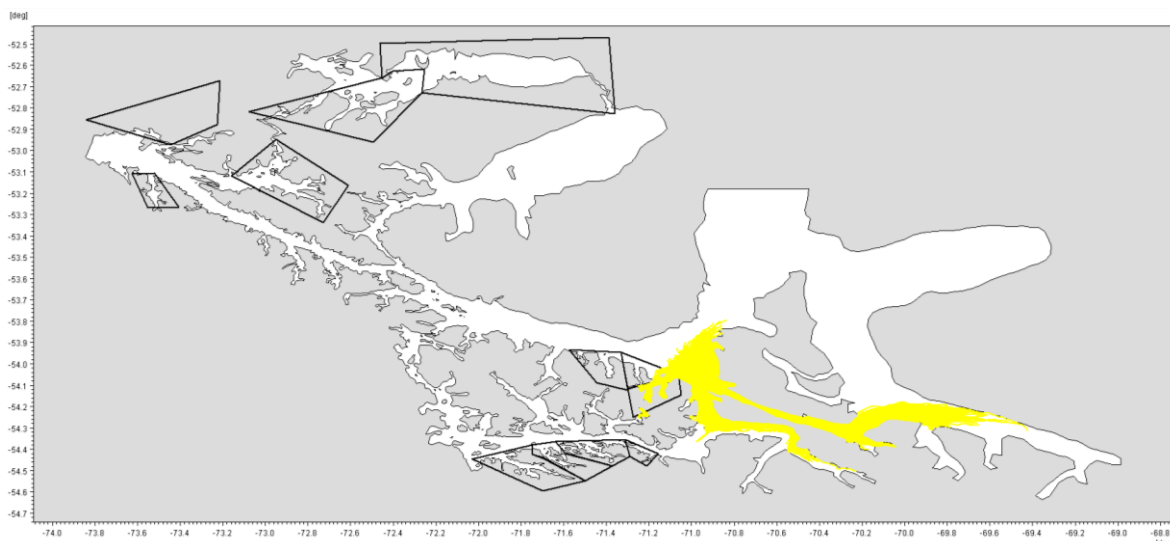


Figura 155. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 56 en escenario de Tormenta Sicigia.

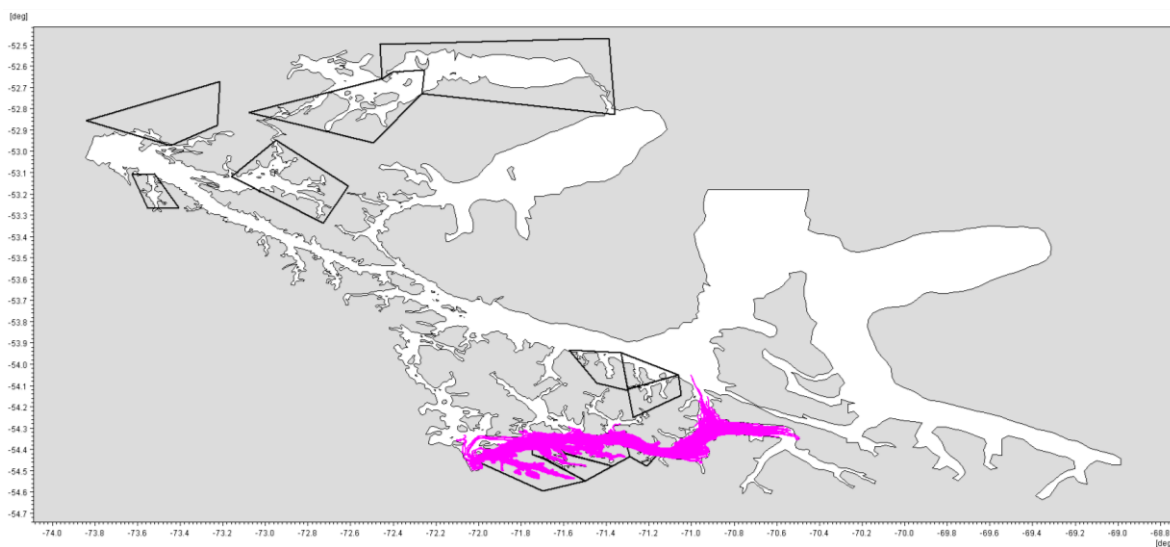


Figura 156. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 57 en escenario de Tormenta Sicigia.

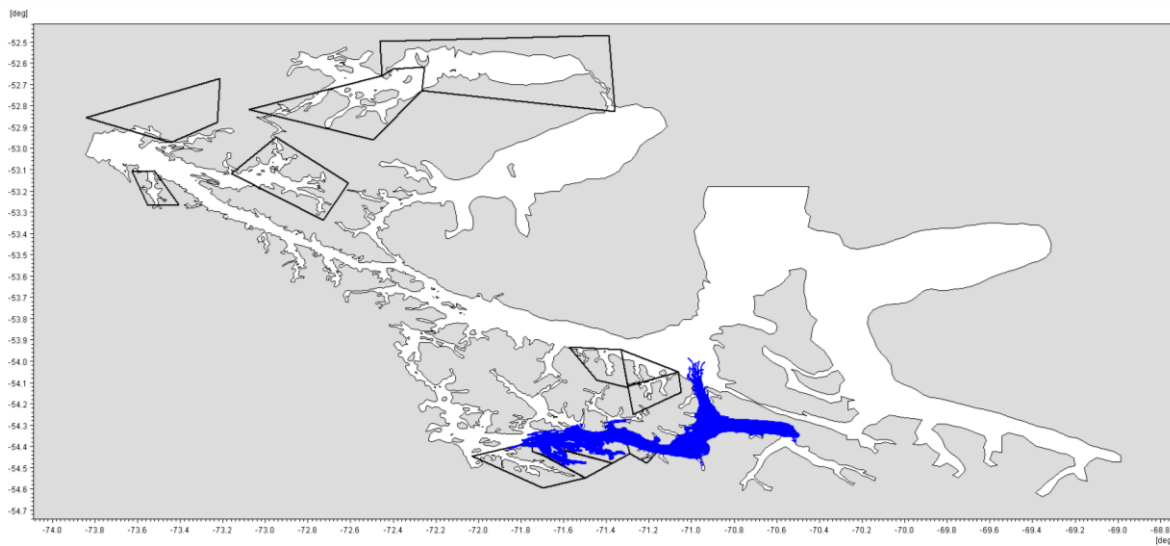


Figura 157. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 58 en escenario de Tormenta Sicigia.

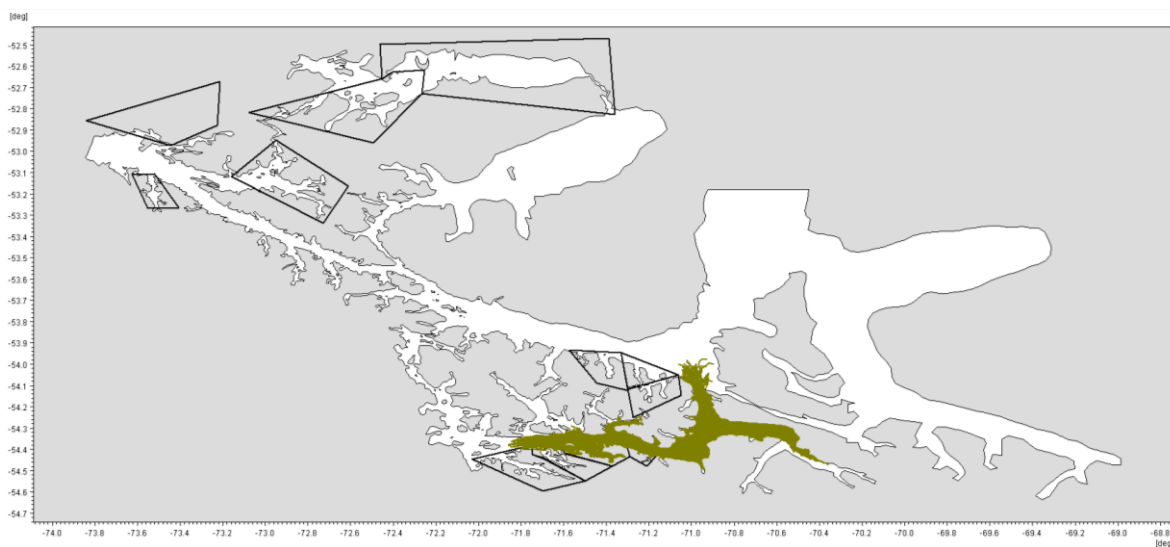


Figura 158. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 59 en escenario de Tormenta Sicigia.

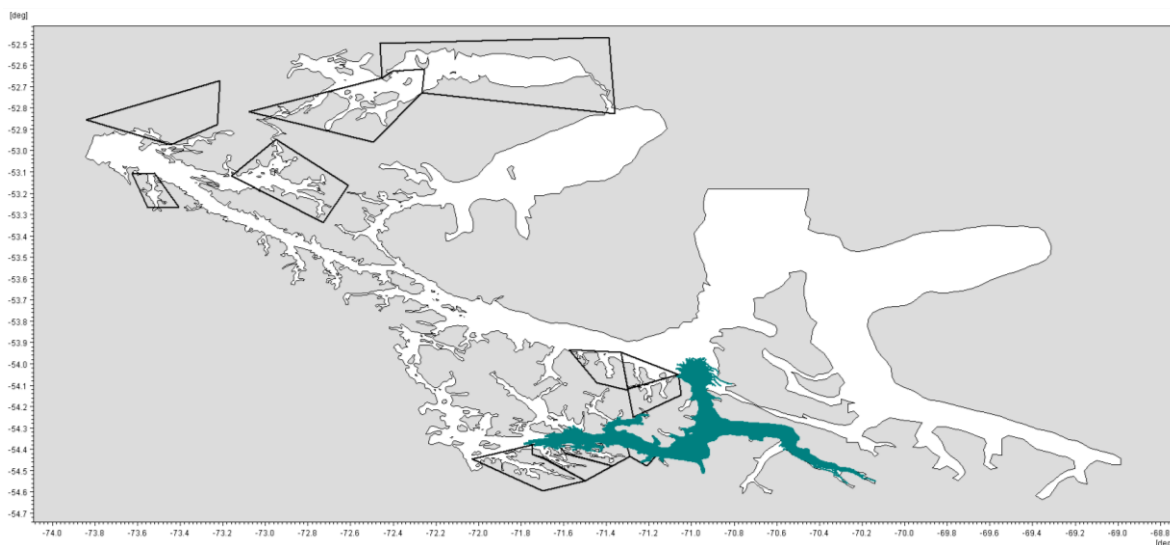


Figura 159. T=72 horas máxima dispersión de las partículas del barrio 60 en escenario de Tormenta Sicigia.



Escenario TS	a CC 49	a CC 50	a CC 51	a CC 52	a CC 53	a CC 54	a CC 55	a CC 56	a CC 57	a CC 58	a CC 59	a CC 60
de CC 49												
de CC 50												
de CC 51												
de CC 52												
de CC 53												
de CC 54												
de CC 55												
de CC 56												
de CC 57												
de CC 58												
de CC 59												
de CC 60												

Tabla 22. Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur en Tormenta Sicigia.

En el escenario de tormenta sicigia de nuevo la competencia de la marea con el viento se decanta de parte de la primera, en cuanto las dispersiones hacia el Este que se observan durante la cuadratura son más limitadas en su alcance y se aprecia cómo se repite el patrón de dispersiones opuestas al sentido del viento (barrios 57, 58, 59 y 60 en el canal Cockburn) aunque no tan acusado como en escenarios de invierno y verano donde los respectivos vientos menos intensos favorecerían que el intercambio de partículas entre barrios adyacentes ocurriera en mayor medida. Una parte de las partículas de los barrios 55 y 56 de la isla Capitán Aracena atraviesan por primera vez el canal Gabriel (entre Tierra del Fuego e isla Dawson) alcanzando el seno Almirantazgo. Los barrios de la subcuenca occidental presentan plumas de dispersión notoriamente más reducidas respecto del escenario de cuadratura. El barrio 52 de estero Córdova, y al igual que en cuadratura, no alcanza el barrio 51, lo cual lograba en los demás escenarios de verano e invierno, debido al efecto del viento que provoca que sus partículas una vez en el estrecho sean conducidas al Oeste hacia el paso Largo donde quedan embolsadas por efecto de la marea en sentido contrario desde el Este.

Integrando todas las conectividades de los 6 escenarios de variabilidad ambiental intra-anual, la tabla de contingencias resultante (**Tabla 23**) muestra la conectividad total de forma cualitativa entre los barrios de Magallanes Sur. Gracias a ello podemos identificar que *clústers* de barrios son más propensos a intercambiar partículas entre sus barrios pero no entre barrios de otros *clústers*.

Por una parte tenemos los barrios 49 y 50 en el seno Skyring, donde la transmisión es principalmente del 50 al 49 y apenas significativa a la inversa.

Los barrios 51, 52 y 53 de la subcuenca occidental están lo suficientemente separados entre sí y sus dispersiones están altamente restringidas por la conjunción de factores ambientales y morfológicos de la línea de costa como para que las



interacciones sólo ocurran unidireccionalmente desde el barrio 52 en estero Córdova a los otros dos y nunca en sentido inverso.

Los barrios 54, 55 y 56 en el paso Froward en el lado Norte de la isla Capitán Aracena sólo dispersan sus partículas hacia el Nor-Este, lo que determina que el barrio 54 no reciba partículas de ningún otro y que el 55 reciba de los otros dos. Estos barrios son los de mayor rango de dispersión de sus partículas, alcanzando los límites del dominio en Punta Arenas por el Nor-Oeste y bahía Inútil y el seno Almirantazgo bajo condiciones extremas de tormenta.

Las conectividades de los barrios 57, 58, 59 y 60 situados en el canal Cockburn y contiguos uno al otro de Oeste a Este, están altamente relacionadas con la competencia entre el viento y la marea, de manera que bajo periodos de cuadratura el efecto del viento prevalece y las dispersiones son unidireccionales hacia el Este llegando en ocasiones a alcanzar el seno Magdalena. En periodos de sicigia en cambio, la intensidad de la marea hace que la excursión mareal transporte partículas hacia el Oeste interconectando todos los barrios entre sí y haciendo de este clúster de barrios el más interconectado de todos.

Todos los Escenarios	a CC 49	a CC 50	a CC 51	a CC 52	a CC 53	a CC 54	a CC 55	a CC 56	a CC 57	a CC 58	a CC 59	a CC 60
de CC 49												
de CC 50												
de CC 51												
de CC 52												
de CC 53												
de CC 54												
de CC 55												
de CC 56												
de CC 57												
de CC 58												
de CC 59												
de CC 60												

Tabla 23. Tabla de contingencia mostrando las conectividades efectivas entre barrios de Magallanes Sur de todos los escenarios de variabilidad ambiental integrados.

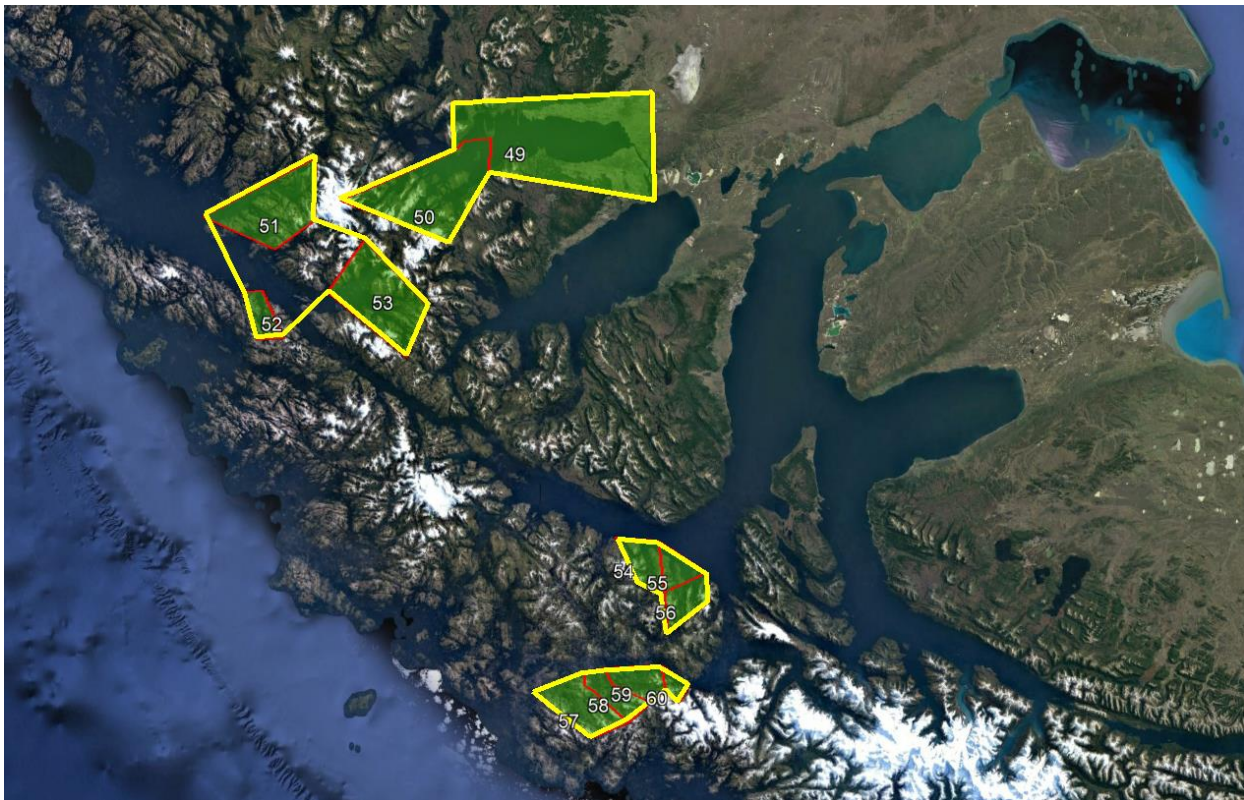


Figura 160. Propuesta de clústers de barrios cuyos barrios (borde amarillo).

5.3 Objetivo N°3

Proveer la información obtenida a través de un sistema de información geográfica montado en plataforma web.

La información de conectividad en forma de matrices georreferenciadas se encuentra disponible para su consulta y visualización en el geoportal web y de acceso libre en <http://ifop.metedata.cl/conectividad/>, o bien a través de la web del grupo de Oceanografía Física del IFOP en Putemún <http://www.iproach.cl>.

En la navegación por el geoportal encontraremos otros dos estudios más correspondientes a anteriores etapas de conectividad (Etapa I Chiloé-Aysén y Etapa II Magallanes Norte). Para visualizar la capa de información de nuestro interés tan solo se tiene que seleccionar en el “Visor de Conectividad” el tipo de dispersión, horizonte y escenario (**Figura 160**) y después ubicar el puntero en la posición de interés.

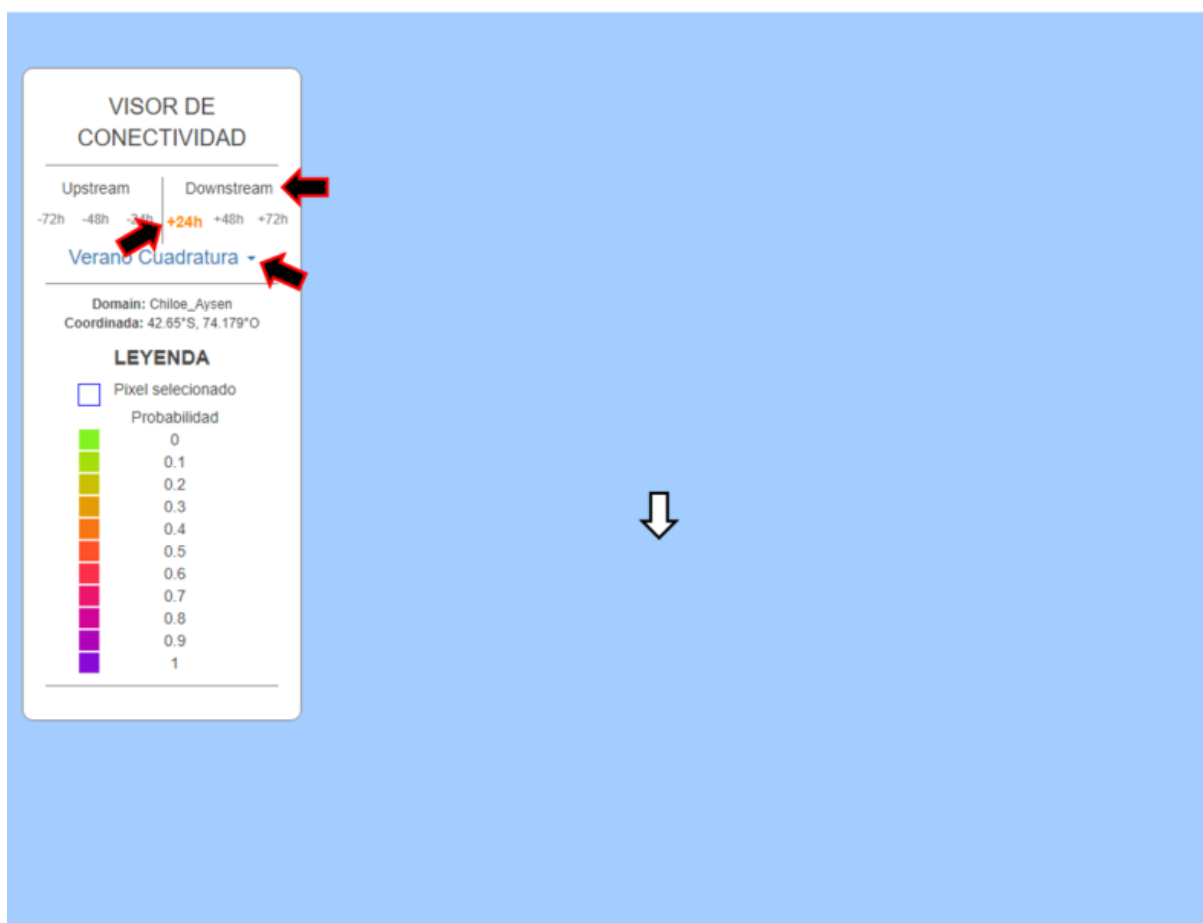


Figura 161. Selección de escenarios, horizontes y tipos de dispersión en el Visor de Conectividad del geoportal <http://ifop.meteodata.cl/conectividad/>.

Tras presionar sobre el mapa se mostrará la capa de información correspondiente a la matriz de conectividad del sub-set cuyo tipo de dispersión, horizonte y escenario se haya seleccionado (**Figura 161**). De entre el sub-set seleccionado la matriz cuya información se muestra en el mapa es aquella cuyo elemento georreferenciado corresponde a la parcela de agua del espacio en que hemos situado el puntero.

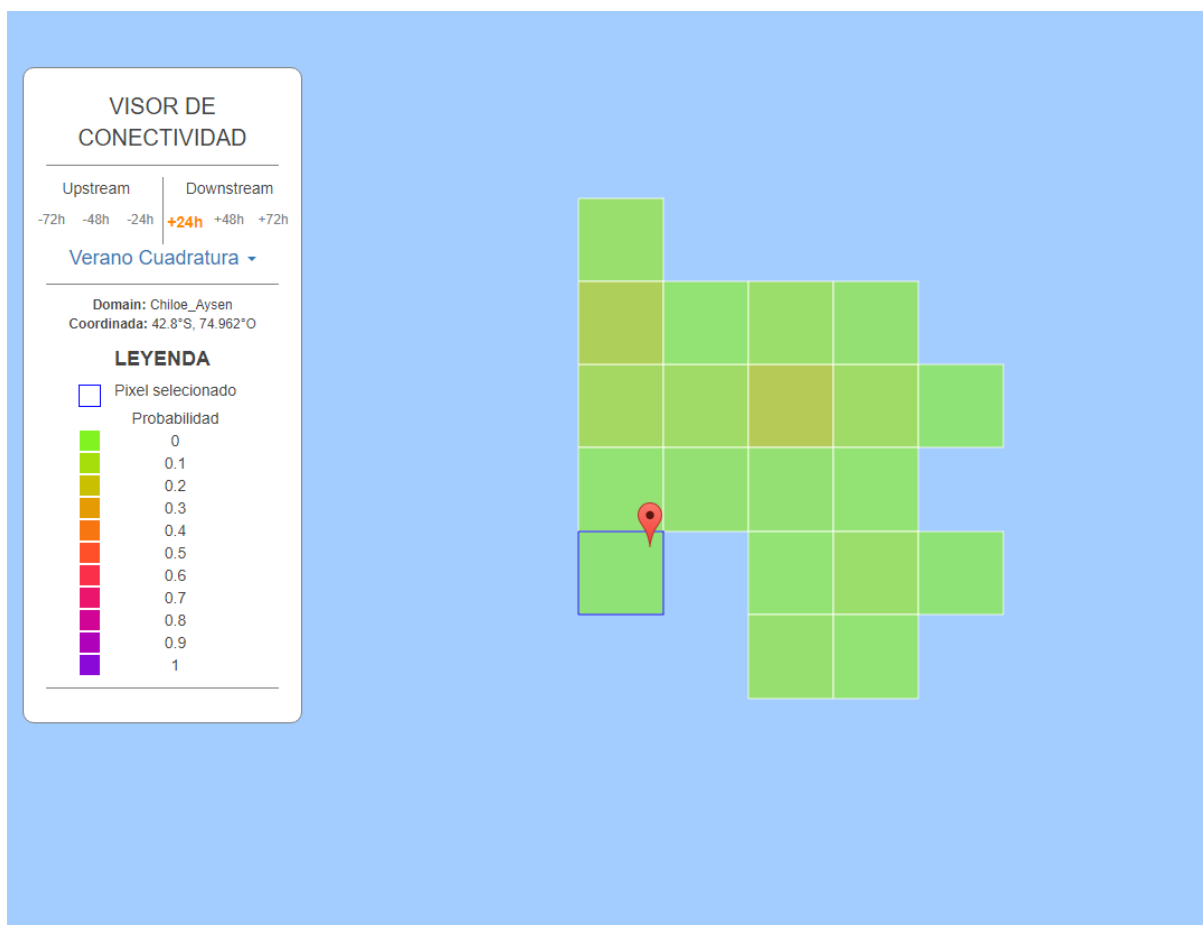


Figura 162. Display de matriz georreferenciada correspondiente a la ubicación elegida y al escenario, horizonte y tipo de dispersión seleccionados en el Visor de Conectividad del geoportal <http://ifop.meteodata.cl/conectividad/>.

Para saber la probabilidad de conectividad de la parcela seleccionada (destacada en recuadro azul) deberemos situar el puntero (sin presionar) encima de cualquier parcela de agua e inmediatamente se mostrará en la parte inferior del Visor de Conectividad la probabilidad de conectividad en base 1 de dicha parcela respecto de la parcela cuya capa de información de conectividad se muestra en el mapa mediante la anterior selección de escenario, horizonte y tipo de dispersión (**Figura 162**).



Figura 163. Probabilidad de conectividad para una caja o parcela de una matriz dada.



6. DISCUSIÓN

Las conectividades que se establecen en el modelo de Magallanes Sur a partir de las dispersiones de partículas simuladas mediante modelación hidrodinámica están altamente relacionadas con los transportes advectivos dados por las corrientes totales y netamente por las corrientes residuales. Magallanes Sur es un modelo que solo contempla las partículas de virus ISA como entes inertes que no responden a condiciones ambientales. Estudios de conectividad que incluyen acoplamiento de modelos biológicos (Murray et al, 2005 y 2010, Aldrin et al, 2011) sí cuentan con la respuesta de las poblaciones de virus ISA en su decaimiento y crecimiento a condiciones ambientales que determinan en cierto grado el alcance de la dispersión de los agentes infecciosos desde el lugar de origen del brote. En el modelo de Magallanes Sur la única variable biológica que se puede otorgar a las partículas para que describan algún carácter del ciclo de vida del virus ISA fue la edad promedio máximo de vida del virus que es capaz de sobrevivir fuera de un huésped para que mantenga unas concentraciones tales que le hagan potencialmente infeccioso y que según Murray (2005) se estima en 3 días, aunque los rangos son muy variables entre cepas y faltan estudios para el caso chileno. En cualquier caso, el tiempo de vida promedio máximo es de gran valor cuando muchos estudios concluyen que las distancias que es capaz de recorrer un virus son el principal vector para su transmisión, y estas distancias son proporcionales a los flujos advectivos y al tiempo que los patógenos sean capaces de mantenerse por encima del umbral de concentraciones infectivas (Aldrin et al., 2011).

También es relevante a la hora de interpretar los resultados de conectividad la consideración del tamaño de sus unidades de trabajo (las cajas o parcelas) en cuanto por debajo de dicha escala no se puede saber cuál es la posición de una partícula. La misma limitante pero llevada a la dimensión temporal ocurre con los horizontes, pues la conectividad se establece entre las posiciones iniciales y finales de una partícula al cabo de un horizonte y por debajo de dicho umbral temporal la posición de una partícula es desconocida. La incertidumbre que crean estas limitantes se puede reducir disminuyendo el tamaño de las cajas y del horizonte, lo cual redundaría también en el volumen de información que debe generarse y analizar, los cuales están limitados por los finitos recursos computacionales debiendo definir unos límites por debajo de los cuales estas tareas se vuelven poco eficientes o inabordables.

Toda vez que la evaluación en terreno para identificar de dónde procede una muestra de virus ISA que se encuentra en el medio (como en un centro de cultivo) o bien *trackear* su deriva para saber hacia dónde va se antoja cuando menos altamente complejo, la única prueba tangible del grado de confianza de los resultados del presente estudio reside en la validez del modelo hidrodinámico y de la evaluación de los resultados de este frente a parámetros ambientales registrados en el área de estudio. Son variadas las aproximaciones que se emplean para satisfacer la validación de un modelo numérico, pero según Murphy (1993) no hay un único valor o índice que así lo demuestre y debe ser el análisis del investigador el que así lo considere en base a una mezcla de criterios objetivos y subjetivos. La consistencia del modelo de Magallanes Norte reside en que este modelo reproduce las características principales del sistema físico del estrecho de Magallanes descritas en la bibliografía como son la homogeneidad de la columna de agua en su temperatura y salinidad y la modificación de la onda de marea en su ingreso desde el Atlántico hacia el Oeste (Valdenegro y Silva, 2003; Medeiros y Kjerfve 1988; Cerda 1993; Salinas et al., 2004). Igualmente, y como se puede ver en los escenarios de variabilidad ambiental la conexión entre las distintas subcuencas que describen estos autores es limitada y los intercambios de masas de agua sólo ocurrirían en escenarios de alta energía y principalmente por forzamiento del viento. Tan sólo parece que la descripción de flujos gravitatorios por gradientes de presión en la cabeza de fiordos y esteros está subestimada, lo cual se debe a la falta de información de caudales y su frecuencia de descarga para las fuentes de agua dulce en la XII región. La



aproximación actualmente implementada consiste en la distribución de caudales a partir del análisis de la superficie de cuencas hidrológicas sobre promedios históricos de escorrentía. Esta aproximación puede ser válida para ríos, pero no para glaciares, cuyos regímenes de descarga al medio marino son tan distintos al de ríos. Esta incertidumbre, junto con la falta de caracterización de las condiciones iniciales de sectores interiores (senos Skyring, Otway y Almirantazgo) y posibles forzamientos remotos de circulación estuarina desde estos sectores han dado lugar a las únicas disimilitudes en la evaluación del desempeño del modelo en los perfiles de temperatura y salinidad en la subcuenca occidental en las inmediaciones del golfo Xaltegua.

La calidad del modelo es dada por los índices estadísticos que se han empleado para dar un valor a este criterio. En un sistema tan altamente relacionado con una compleja batimetría, resolver el ingreso y transición de la onda de marea no es tan asequible como en sistemas más abiertos, pues la onda de marea se ve modificada por las numerosas constricciones batimétricas presentes en Magallanes Sur y que son las mismas que sirven de frontera entre las distintas subcuencas del sistema. En general, la onda de marea es representada con buen acierto, tanto en la frecuencia de su señal a través de los espectros de densidades como en la comparativa de las series de tiempo con errores cercanos al 15-20% y correlaciones superiores al 90% (**Figura 70, Figuras 71-77, anexo II**). Sólo estaciones del nivel del mar al interior de cuerpos de agua de restringido acceso para la onda de marea (canal Gajardo, Jerónimo y seno Chasco) presentaron pobres correlaciones que pueden ser debidas a una insuficiente descripción de la batimetría de las constricciones (*sill*) que separan estos cuerpos de agua. La correntometría euleriana con evaluaciones en 3 de las principales subcuencas, y que como se observa en las **Figuras 90-159** de los escenarios de variabilidad ambiental son las principales vías de comunicación entre los 3 *clústers* de barrios de cultivo identificados, tuvo un desempeño global satisfactorio con errores en el rango del 20-40% y correlaciones entorno a 55-75% para la componente principal y más energética del flujo en cada caso. Tan solo en el canal Cockburn el flujo del modelo supera a la observación en amplitud, magnitud de la corriente de la componente principal y en la magnitud del flujo residual, con un transporte neto hacia el Este cuando la observación indica un flujo residual cercano a nulo. Tanto en el paso Largo como en el paso Froward los flujos residuales siguen los patrones de baja frecuencia observados en el terreno con un generalizado transporte neto hacia el Este durante gran parte de la simulación, lo cual se corresponde con lo indicado por autores con anterioridad (Valdenegro y Silva, 2003; Sievers y Silva, 2006) acerca del ingreso de masas de agua subantártica (ASSA) desde el Pacífico hacia el estrecho de Magallanes. En el camino se va mezclando con agua estuarina (AE) resultando agua subantártica modificada (ASSAM) y que una vez superada la constricción del paso Tortuoso e Inglés inunda el resto de la subcuenca central con perfiles homogéneos de temperatura y salinidad como los observados y perfectamente reproducidos por el modelos (**Figuras 78 y 79**).

Por último, el criterio de valor del modelo se lo debemos dar en función del valor añadido que aporten los resultados que de él se deriven en el cumplimiento del objetivo general. En el caso del modelo de Magallanes Sur el objetivo general es la determinación de la conectividad con fines de gestión sanitaria para estimar cuál es el grado de conexión dentro del sistema y en particular de las unidades de producción de la industria salmonera. A partir del modelo de Magallanes Sur se han desacoplado 6 escenarios de variabilidad ambiental intra-anual que en sus componentes y forzantes recogen las principales características del viento, descargas de agua dulce y ciclo mareal a lo largo del año. A estos escenarios se le acoplaron a su vez modelos de dispersión de partículas que fueron los que a partir de las trayectorias de deriva de las partículas que representan virus ISA permiten obtener los resultados de conectividad. Dentro de los resultados de conectividad está la determinación cuantitativa de la conectividad a través de una metodología que discretiza el espacio en unidades básicas de conectividad (cajas o parcelas) y que da un valor probabilístico de la conectividad de cada una de



estas cajas o parcelas respecto de las demás para cada escenario, horizonte y tipo de dispersión (*downstream / upstream*). La ventaja de esta conectividad en cajas o parcelas es la cobertura espacial total de información de conectividad que se obtiene, además de la cuantificación de las probabilidades de recibir o dispersar patógenos. Como limitantes está el elevado volumen de información que se genera y que por el momento no permite obtener una interpretación global de la conectividad para todo el dominio en un único archivo. Para solventar esto se ha implementado un geoportal que permite filtrar e inspeccionar las capas de información que son las matrices de conectividad georreferenciadas según el tipo de escenario, horizonte, dispersión y ubicación espacial de la consulta (**Figuras 161 – 163**) y disponible en <http://ifop.meteordata.cl/conectividad/>, o bien a través de la web del grupo de Oceanografía Física del IFOP en Putemún <http://www.iproach.cl>. Alternativamente a la conectividad por cajas se propone una visión de la conectividad que permite la dispersión dirigida de las partículas desde cada uno de los barrios o agrupaciones de concesiones de la XII región y mediante la cual podemos identificar de forma cualitativa cuáles son las conectividades que se establecen entre dichas unidades territoriales (**Tablas 17 – 23**). Del análisis de este último producto al que llamamos conectividad inter-barrios se extrae que en el área de estudio de la XII y según las conectividades que se establecen para los 6 escenarios se identifican 4 *clústers* de barrios o concentraciones de agrupaciones de concesiones (**Figura 160**): los barrios 49 y 50 en seno Skyring, los barrios 51, 52 y 53 en la subcuenca occidental del estrecho de Magallanes, los barrios 54, 55 y 56 en el paso Froward (isla Capitán Aracena) y los barrios 57, 58, 59 y 60 en el canal Cockburn (isla de Tierra del Fuego). Los barrios de cada uno de los *clústers* se conectan casi exclusivamente entre ellos, pero no entre barrios de diferentes *clústers*. De esta manera los *clústers* aquí señalados cumplirían la función de macrozonas como regulación sanitaria en el tratamiento y contención de brotes infecciosos de virus ISA.

A lo largo de los distintos escenarios de variabilidad ambiental estacional se observa que los principales agentes dispersivos que se identificaron como tal en la modelación son el viento (muy intenso en Magallanes y de predominancia Oeste) y la marea en su ingreso por cada una de las bocas que conectan el sistema interior con los océanos adyacentes, y especialmente desde el Atlántico hacia el Oeste, donde durante periodos de sicigia induce la entrada de masas de agua que a modo de salto hidráulico superan las constricciones batimétricas hacia la cuenca central (Valdenegro y Silva, 2003; Sievers y Silva, 2006). Entre el viento y la marea surge una competencia que se decide según la intensidad de cada uno de dichos forzantes. En condiciones de sicigia la extensión de la dispersión de partículas de virus ISA en el canal Cockburn se propaga a Este y Oeste de su lugar de origen; mientras que en cuadratura las partículas son transportadas netamente hacia el Este por el viento. Igualmente a lo largo del estrecho de Magallanes la sicigia reduce la dispersión hacia el Este de las partículas procedentes de barrios de la cuenca occidental (estero Córdova) y central (isla Capitán Aracena) que en condiciones de cuadratura son netamente transportadas hacia el Este, alcanzando distancias más lejanas hacia el Este que en sicigia, gracias a la prevalencia del efecto del viento sobre la marea. Esta última dispersión más restringida en el estrecho de Magallanes en periodo mareal de sicigia estaría regulada por la entrada de pulsos de agua y la marea desde el Atlántico que solo logran superar las constricciones batimétricas de la 1° y 2° Angostura en sicigia. Esto se cumple con condiciones de viento moderadas como en verano e invierno, pues en un escenario de tormenta la mayor intensidad del viento se impone por sobre los demás forzantes.



7. CONCLUSIONES

El área de estudio en donde se localiza el modelo de Magallanes Sur que comprende el estrecho de Magallanes, canal Cockburn y otros cuerpos de agua interiores es un sistema de alta complejidad batimétrica que da lugar a la formación de distintas cuencas menores con sus propias características físicas y una limitada conexión entre ellas. El sistema en general está dominado por la entrada de la marea desde el Atlántico y que en periodos de sicigia permite la entrada de masas de agua desde el Este hacia el interior del sistema. Estas masas de agua subantártica que penetran tanto por el Atlántico como por el Pacífico se mezclan con el agua estuarina para dar lugar a agua subantártica modificada, cuya característica principal es la homogeneidad de su perfil vertical.

El modelo de Magallanes Sur es capaz de reproducir de buen grado estas características generales de mezcla de la columna de agua y los principales patrones de flujo del estrecho de Magallanes en su cuenca occidental y central. El modelo muestra limitaciones en el desarrollo de capas superficiales en la cuenca occidental, donde hay una haloclina a los 50 m que el modelo no consigue reproducir en igual gradiente. Esto puede ser debido a una subestimación de los aportes de aguas glaciares de la península Muñoz Gameiro y glaciares cercanos o por la falta de caracterización de las condiciones físicas de temperatura y salinidad del seno Skyring en su salida al golfo Xaltegua por canal Gajardo, aunque esta segunda hipótesis es la menos probable, pues no se llegaron a establecer conectividades entre el barrio 50 y el 53 en ninguno de los escenarios de variabilidad ambiental, por lo que se deduce que la comunicación de los senos interiores con el resto del sistema es muy limitada.

Estos influjos estarían en competencia con los predominantes e intensos vientos del Oeste, que son los más habituales a lo largo del año. Del balance resultante de la interacción de estos dos forzantes junto con los gradientes gravitacionales que dan lugar a circulaciones estuarinas desde la cabecera de los glaciares, resultan los flujos residuales que determinan el transporte neto de las masas de agua dentro del sistema. Estos flujos advectivos son los más importantes para dispersar las partículas que representan al virus ISA y cuyas derivas están limitadas a su tiempo de vida promedio máximo de 3 días para ser considerado potencialmente infeccioso sobre la producción salmonícola. Las trayectorias descritas por las partículas en sus derivas son las que se referencian a un sistema de parcelas de agua sobre las cuales se calcula la conectividad entre ellas para un espectro de escenarios ambientales y horizontes temporales para la dispersión. La elección del tamaño de las parcelas y la longitud del horizonte temporal determinarán la resolución con que se estiman las probabilidades de conectividad. La información probabilística que aportan estas parcelas de agua a la conectividad se georreferencia a las matrices de conectividad. Las matrices de conectividad están disponibles para su consulta a través del geoportal <http://ifop.meteordata.cl/conectividad/>, o bien a través de la web del grupo de Oceanografía Física del IFOP en Putemún <http://www.iproach.cl>. Esta herramienta web permite la selección eficiente de las distintas capas de información de escenarios ambientales y horizontes para cada parcela de agua, que suman cerca de 275.000 matrices.

En el estudio de las conectividades dirigidas desde cada barrio de cultivo se pudo identificar 4 *clústers* de barrios o agrupaciones de macrozonas, que establecen conectividades entre los barrios de cada *clúster* según las condiciones ambientales, pero que entre *clústers* la conectividad es nula o muy puntual. Esta identificación de barrios con conectividades similares pudiera ser una primera idea para la definición de macrozonas de régimen sanitario en prevención de problemáticas con el virus ISA, dado que aún no existe esta figura de regulación sanitaria para Magallanes.



Este proyecto es la última de las 3 etapas con que se planteó calcular las conectividades para fines sanitarios de la industria salmoniculora para las regiones X, XI y XII acerca de las problemáticas que surgieron en el 2007 con la crisis del virus ISA. Llegados a este punto de desarrollo se han identificado las brechas tecnológicas que deben abordarse en futuras revisiones entre las que se incluye el acoplamiento de modelos biológicos que confieran respuesta biológica de los patógenos a condiciones ambientales que afecten a sus poblaciones. Estos modelos biológicos deberán abordar aspectos de los ciclos de vida del virus ISA y de otros patógenos de influencia para la producción como *Caligus* spp y *Piscirickettsia* spp. Además se deben implementar mejoras en el post-procesamiento de los grandes volúmenes de información que se derivan de las matrices de conectividad a fin de poder hacer los cálculos más eficientes, lo que permitirá aumentar las escalas de resolución y entregar resultados que integren todos los sets de matrices en una única matriz que por sí sola permita la decidir la zonificación óptima de un sistema en base a las conectividades individuales de cada parcela.



8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldrin M., Storvik B., Frigessi, A., Viljurgrein H. and Jansen P.A. (2010) A stochastic model for the assessment of the transmission pathways of heart and skeleton muscle inflammation, pancreas disease and infectious salmon anaemia in marine fish farms in Norway. *Preventative Veterinary Medicine* 93, 51-61.
- Aldrin M., Lyngstad T.M., Kristoffersen A.B., Storvik B., Borgan O. and Jansen P.A. (2010) Modelling the spread of infectious salmon anaemia (ISA) among salmon farms based on seaway distance farms and genetic relationships between ISA virus isolates. The Fishery and Aquaculture Industry Research Fund (project no. 199734).
- Al-Rabeh A.H., Cekirge H.M. and Gunay N., 1989. A stochastic simulation model of oil spill fate and transport. *Applied Mathematical Modelling*, Vol.13, issue 6, pp 322-329.
- Adams T, Black K, MacIntyre C, MacIntyre I, Dean R (2012) Connectivity modelling and network analysis of sea lice infection in Loch Fyne, west coast of Scotland. *Aquacult Environ Interact* 3:51-63.
- Adams T., Aleynik D. and Burrows M.T., 2014. Larval dispersal of intertidal organisms and the influence of coastline geography. *Ecography* 37, pp 698-710..
- Amundrud TL, Murray AG (2009) Modelling sea lice dispersion under varying environmental forcing in a Scottish sea loch. *J Fish Dis* 32:27-44.
- Antezana T., 1999. Hydrographic features of Magellan and Fuegian inland passages and adjacent Subantarctic waters. *Science Marine* 63 (supl.1), pp. 23-34..
- Askeland J. I, 2011. Loch Fyne Rivers Project: summary of 2011 fish populations, habitat surveys and potential habitat management initiatives. Argyll Fisheries Trust, Inveraray, Argyll.
- Asplin L, Boxaspen K, Sandvik AD (2004) Modelled distribution of salmon lice in a Norwegian fjord. ICES CM 2004/P: 11. International Council for the Exploration of the Sea, Copenhagen.
- Ayata S., Lazure P. and Thiebaut E., 2010. How does the connectivity between populations mediate range limits of marine invertebrates? A case study of larval dispersal between the Bay of Biscay and the English Channel (North-East Atlantic). *Prog Oceanography* 87: pp 18-36..
- Barton J.R. and Fløysand A., 2010. The political ecology of Chilean salmon aquaculture, 1982-2010: a trajectory from economic development to global sustainability. *Global Environmental Change*, vol.20, pp. 739-752.



- Breuer S., Kilian R., Schorner D., Weinrebe W., Behrmann J. and Baeza O., 2013. Glacial and tectonic control on fjord morphology and sediment deposition in the Magellan region (53°S) Chile. *Marine Geology* 346. Pp 31-46.
- Brostöm G., Carrasco A., Hole L.R., Dick S., Janssen F., Mattsson J and Berger S., 2011. Usefulness of high-resolution coastal models for operational oil spill forecast: the "Full City" accident. *Ocean Science*, 7, 805-820.
- Buschmann A.H., Olivares G., Dempster P., Valerio V. y Godoy M., 2014. Modelo de dispersión del virus ISA (ISAv) basado en simulación numérica del océano y la atmósfera: alcances y desafíos. *Innovación basada en conocimiento científico*, Academia Chilena de Ciencias (cap. 1, Acuicultura). *Graficandes* (editoriales T. Cooper & J.A. Asenjo), Santiago, pp. 15-32.
- Cerda C., 1993. Estudio de la propagación de ondas de marea en el estrecho de Magallanes. Tesis para optar al título de Oceanógrafo. Escuela de Ciencias del Mar, Universidad Católica de Valparaíso, Chile. 101pp.
- Cho Y.S., Kim T.K., Jeong W. and Ha T., 2012. Numerical simulation of oil spill in the ocean. *Journal of applied Mathematics*. Vol.2012, art.681585.
- Chubarenko I. y Tehepikova I., 2001. Modelling of man-made contribution to salinity increases into the Vistula lagoon (Baltic Sea). *Ecological Modelling*, vol. 138, pp. 87-100.
- Cornejo P., Sepúlveda H.H., Gutiérrez M.H. y Olivares G., 2014. Numerical studies on the hydrodynamic effects of a salmon farm in an idealized environment. *Aquaculture*, vol. 430, pp. 195-206.
- Dannevig B.H., Falk K. y Namork E., 1995. Isolation of the causal virus of infectious salmon anaemia (ISA) in a long-term cell line from Atlantic salmon head kidney. *Journal of General Virology* 76, p. 1353-1359.
- Dávila P.M., Figueroa D. y Müller E., 2002. Freshwater input into the coastal ocean and its relation with the salinity distribution off austral Chile (35-55°S). *Continental Shelf Research*, vol. 22, pp. 521-534.
- DHI, 2011. Mike 3 Flow Model FM, Hydrodynamic module User guide. Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- DHI, 2014. Mike 3, User guide and reference manual. Danish Hydraulic Institute, Denmark.
- Dirección General de Aguas, 1987. Balance Hídrico de Chile, 1987. Disponible en <http://sad.dga.cl/>
- Dirección Meteorológica de Chile, 2008. Anemometría de Chile.
- Endlicher W. y Santana A., 1988. El clima del Sur de la Patagonia y sus aspectos ecológicos. Un siglo de mediciones meteorológicas en Punta Arenas. *Anales del Instituto de la Patagonia, Serie Ciencias Naturales Punta Arenas*, Chile 18, pp. 57-86.



- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2010. Regional review on status and trends in aquaculture development in Latin America and the Caribbean - 2010. No. 1601/3.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2015. FAO global aquaculture production statistics database updated to 2013 - summary information.
- Foreman M. 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 77-10: 1-66. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sydney
- Foreman M. 1978. Manual for tidal currents analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 78-6: 1-57. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sydney.
- Fox C.J., McCloghrie P., Young E.F and Nash R.D.M. (2006). The importance of individual behaviour for succesful settlement of juvenile plaice (*Pleuronectes platessa* L.): a modelling and field study in the eastern Irish Sea. Fisheries Oceanography, vol.15, Issue 4, pp. 301-313.
- Fox C.J., McCloghrie P., and Nash R.D.M. (2009). Potential transport of plaice eggs and larvae between two apparently self-contained populations in the Irish Sea. Estuar Coast Shelf Sci 81:381-389.
- Fuentes J., 2014. Evolución del régimen ambiental de la acuicultura en Chile. Revista de Derecho de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, XLII, pp. 441-477.
- Garreaud R.D. and Falvey M., 2009. The coastal winds off western subtropical South America in future climate scenarios. International Journal of Climatology, vol. 29, pp. 543-554.
- Godin, G., 1972. The analysis of tides. University of Toronto Press, p. 65.
- Gregory A., Munro L.A., Snow M., Urquhart K.L., Murray A.G. and Raynard R.S., 2009. An experimental investigation on aspects of infectious salmon anaemia virus (ISAV) infection dynamics in seawater Atlantic salmon, *Salmo salar* L., Journal of Fish Diseases, vol.32, pp.481-489.
- Gustafson, L.L., Ellis, S.K., Beattie, M.J., Chang, B.D., Dickey, D.A., Robinson, T.L., Marengi, F.P., Moffett, P.J. and Page, F.H. (2007) Hydrographics and the timing of infectious salmon anemia outbreaks among Atlantic salmon (*Salmo salar* L.) farms in the Quoddy region of Maine, USA and New Brunswick, Canada. Preventive Veterinary Medicine 78, 35-56.
- Gustafson, L.L., Antognoli M., Lara Fica M., Ibarra R., Mancilla J., Sandoval del Valle O., Enriquez Sais R., Pérez A., Aguilar D., Madrid E., Bustos P., Clement A., Godoy M.G., Johnson C. y Remmenga M., 2014. Risk factors perceived of ISA spread in Chile: Applications to decision support. Preventive Veterinary Medicine, vol. 117, pp. 276-285.



- Historia de la Ley N°20.434, 2010. Historia de la Ley N° 20.434. Modifica la Ley General de Pesca y Acuicultura. Biblioteca del Congreso Nacional.
- Irarrázaval F., 2015. ¿Peces gordos y peces pequeños? Las empresas salmoneras y el cambio institucional en acuicultura post crisis del virus ISA. Tesis de grado en Magister en Ciencia Política, Universidad de Chile (revisado por Baeza J. y Bustos B.).
- Knights AM, Crowe TP, Burnell G (2006) Mechanisms of larval transport: vertical distribution of bivalve larvae varies with tidal conditions. *Mar Ecol Prog Ser* 326:167–174 Krkošek M, Bateman A, Proboyszcz S, Orr C (2010) Dynam.
- Krossøy B., Hordvik I., Nilsen F., Nylund A. y Endresen C., 1999. The putative polymerase sequence of infectious salmon anemia virus suggest a new genus within the Orthomyxoviridae. *Journal of Virology*, Mar. 1999, p. 2136-2142.
- Le Provost C., 1991. Generation of overtides and compound tides (Review). En B.B. Parker (ed.). *Tidal hydrodynamics*. John Wiley & Sons, New York, pp. 269-295.
- Lyngstad, T.M., Jansen, P.A., Sindre, H., Jonassen, C.M., Hjortaas, M.J., Johnsen, S. and Brun, E. (2008) Epidemiological investigations of infectious salmon anaemia (ISA) outbreaks in Norway 2003-2005. *Preventive Veterinary Medicine* 84, 213-227.
- Mjaaland S., Rimstad E., Falk K. y Dannevig B.H., 1997. Genomic characterization of the virus causing infectious salmon anaemia (*Salmo salar* L.): an Orthomyxo-like virus in a teleost. *Journal of Virology* 71: p. 7681-7686.
- Mardones F.O., Pérez A.M. and Carpenter T.E., 2009. Epidemiologic investigation of the re-emergence of infectious salmon anemia virus in Chile. *Diseases of Aquatic Organisms*, vol. 84, pp. 105-114.
- Mardones F.O., Jansen P.A., Valdés-Donoso P., Jarpa M., Lyngstad T.M., Jiménez D., Carpenter T.E. y Pérez A.M., 2013. Within-farm spread of infectious salmon anemia virus (ISAV) in Atlantic salmon *Salmo salar* farms in Chile. *Diseases of Aquatic Organisms*, vol. 106, pp. 7-16.
- Medeiros C and Kjerfve B., 1988. Tidal characteristics of the strait of Magellan. *Continental Shelf Research*, Vol.8 (8), pp. 947-960.
- Meruane C., de la Fuente A. y Contreras M., 2011. Conectividad hidrodinámica entre barrios de salmones en el Sur de Chile. XX Congreso Chileno de Hidráulica – 2011, Sociedad Chilena de Ingeniería Hidráulica.
- Meruane C., de la Fuente A., Contreras M. y Niño Y. 2013. Large-scale mass transport in the austral fjords and channels of Chile. *Proceedings of 2013 IAHR Congress*. Tsinghua University Press, Beijing.



- Murray A., Amundrud T. and Gilibrand P., 2005. Models of hydrodynamic pathogen dispersal affecting Scottish salmon production: modelling shows how Scotland eradicated ISA, but not IPN. Bulletin Aquaculture Association Canada: 105-1.
- Murray A., Munro L., Wallace I., hall M., Pendrey D., Frase D., Berx B., Munro E., Allan C., Snow M., McIntosh R., Bruno D., Noguera P., Smail D. and raynard R., 2010 Report into the epidemiology and control of an outbreak of infectious salmon anaemia in the Shetlands islands, Scotland. Scottish Marine and Freshwater Science Volume 1, n°4..
- Miller A., 1976. The climate of Chile. Climates of Central and South America. W. Schwerdtgefer, Ed., Vol. 12, World Survey of Climatology, Elsevier, pp. 113-145.
- Murphy A.H., 1993. What is a good forecast? An essay on the nature of goodness in weather forecasting. Weather and Forecasting, vol. 8, pp. 281-293.
- Olivares G., Sepúlveda H.H. y Yannicelli B., 2015. Definition of sanitary boundaries to prevent ISAv spread between salmon farms in southern Chile based on numerical simulations of currents. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 158, pp. 31-39.
- Pagnini G, Strada S., Maurizi A. and Tampieri F., 2010. Lagrangian stochastic modelling for oil spills turbulent dispersion on ocean surface. Communication in Applied and Industrial Mathematics, ISSN 2038-0909, 1, 1, pp 185-204.
- Panella S., Michellato A., Perdicaro R., Magazzu G., Decembrini F., and Scarazzato P, 1991. A preliminary contribution to understanding the hydrological characteristics of the strait of Magellan: Austral Spring 1989. Boll. Oceanol. Teor. Appl., 9 (2-3): 107-126.
- Parada C., Colas F., Castro L. y Sato S., 2012. Effects of seasonal variability in across and alongshore transport of anchoveta (*Engraulis ringens*) larvae on model-based pre-recruitment indices off central Chile. Progress in Oceanography, vol. 92, pp. 192-205.
- Parker B.B., 1991. The relative importance of the various nonlinear mechanisms in a wide range of tidal interactions (Review). En B.B. Parker (ed.). Tidal hydrodynamics. John Wiley & Sons, New York, pp. 237-268.
- Pawlowicz, R., Beardsley B. and Lentz S. 2002. Classical tidal harmonic analysis including error estimates in MATLAB using T_TIDE. Computers and Geosciences, 28, 929-937.
- Ponce J.F. y Fernández M., 2014. Climatic and environmental History of Isla de los Estados, Argentina. Springer Briefs in Earth System Sciences.



- Porobic, J., Parada, C., Ernst, B., Hormazábal, S., Combes, V. 2012. Modelación de la conectividad de las subpoblaciones de la langosta de Juan Fernández a través de un modelo biofísico. *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 40(3): 613-632(Scielo).
- Raynard R.S., Snow M. and Bruno D.W., 2001. Experimental infection models and susceptibility of Atlantic salmon *Salmo salar* to a Scottish isolate salmon anaemia virus. *Diseases of Aquatic Organisms*, vol.47, pp.169-174.
- Romero, H., 1985. Geografía de los Climas. Geografía de Chile. Instituto Geográfico Militar. Tómo XI, 243 pp.
- Roughan M., Macdonald H.S., Baird M.E. and Glasby T.M., 2011. Modelling coastal connectivity in a western boundary current: seasonal and inter-annual variability. *Deep-sea Research* 11 58, pp 628-644.
- Salama N.K.G., Murray AG, Rabe B., 2011. Modelling dispersal of salmon lice in a large fjordic system: Loch Linnhe, Scotland. MODSIM2011, 19th International Congress on Modelling and Simulation, 12–16 Dec 2011, Perth, p 2156–2162.
- Salama N.K.G., Murray A.G., 2009. Farm size as factor in hydrodynamic transmission of pathogens in aquaculture fish production. *Aquaculture Environment Interactions*, vol.2, pp. 61-74.
- Salinas S., Contreras M y Fierro J., 2004. Propagación de la onda de marea en el estrecho de Magallanes. *Ciencia y Tecnología Marina*, 27 (2), pp 5-20..
- SalmonChile. <http://www.salmonchile.cl/>.
- Sanhueza I., 2006. Interacción operacional entre wellboats y balsas jaulas. Tesis de Ingeniería Naval. Universidad Austral de Chile (revisado por Luco R.).
- Scheel, I., Aldrin, M., Frigessi, A. and Jansen, P.A. (2007) A stochastic model for infectious salmon anemia (ISA) in Atlantic salmon farming. *Journal of the Royal Society Interface* DOI: 10.1098/rsif.2007.0217.
- Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile (2009). Atlas hidrográfico de Chile, 7° edición. Impreso en los talleres del Servicio Hidrográfico y Oceanográfico de la Armada de Chile, Playa Ancha, Valparaíso, Chile.
- Servicio Nacional de Pesca y Acuicultura, 2015. Anuario 2014 cosecha de centros de acuicultura año 2014 por especie y mes. Valparaíso, Chile.
- Sievers H. y Silva N., 2006. Masas de agua y circulación en los canales y fiordos australes. Comité Oceanográfico Nacional – Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, Valparaíso, pp. 53-58.
- Silva G. 2009. Salmonicultura e ISA: zona de emergencia. *Aqua Magazine*, May 2009, pp 44-48, Santiago, Chile.



- Spickler A.R., 2011. Infectious salmon anemia. The center for food security and public health (Iowa State University).
- Stagg, R.M., Bruno, D.W. Cunningham, C.O., Hastings, T.S. and Bricknell, I.R. (1999) Infectious salmon anaemia epizootiology and pathology. *State Veterinary Journal* 9, 1-5.
- Stucchi DJ, Guo M, Foreman MGG, Czajko P, Galbraith M, Mackas DL, Gillibrand PA (2010) Modeling sea lice production and concentrations in the Broughton Archipelago, British Columbia. In: Jones S, Beamish R (eds) *Salmon lice: an integrated approach to understanding parasite abundance and distribution*. Wiley/ Blackwell, Oxford, p 117-150.
- Sundelöf A. and Jonsson P.R., 2011. Larval dispersal and vertical migration behavior – a simulation study for short dispersal times. *Marine Ecology* 33, pp. 1-11.
- Thorud K., Djupvik H.O., 1988. Infectious anaemia in Atlantic salmon (*Salmo salar* L.). *Bulletin European Association Fish Pathologies* 8: pp. 109-111..
- Tremi E.A., Halpin P.N., Urban D.L. and Pratson L.F., 2008. Modeling population connectivity by ocean currents, a graph-theoretic approach for marine conservation. *Landscape Ecology*, vol.23, supplement 1, pp. 19-36.
- Tuhkanen S., 1992. The climate of Tierra del Fuego from a vegetation point of view and its ecoclimatic counterparts elsewhere. *Acta Botánica Fénica* 125, pp. 4-17..
- Valdenegro A. and Silva N., 2003. Caracterización oceanográfica física y química de la zona de canales y fiordos australes de Chile entre el estrecho de Magallanes y cabo de Hornos (CIMAR 3 fiordos). *Ciencia Tecnología Marina*, 26(2), pp 19-60.
- Viljugrein H., Staalstrøm A., Molvæe J., Urke H.A. and Jansen P.A., 2009. Integration of hydrodynamics into a statistical model on the spread of pancreas disease (PD) in salmon farming. *Diseases of Aquatic Organisms*, vol.88, pp. 35-44.
- Wang G., Zhao C., Xu J., Qiao F y Xia C., 2016. Verification of an operational ocean circulation-surface wave coupled forecasting system for the China's seas. *Acta Oceanología Sinica*, vol. 35, pp. 19-28.
- Wang J. and Shen Y., 2010. Modeling oil spills transportation in seas based on unstructured grid finite-volume, wave-ocean model. *Ocean Modelling* 35 (2010), pp 332-344.
- Ward L.R. and Akin E.W., 1984. Minimum infective dose of animal viruses. *Critical Review in Environmental Control*, vol.14, pp. 297-310.
- Zarein M. y Naderkhanloo V., 2014. Modeling dam-break flows using a 3D flow model. *Journal of Biodiversity and Environmental Sciences*, vol. 5, pp. 1-6.



INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO

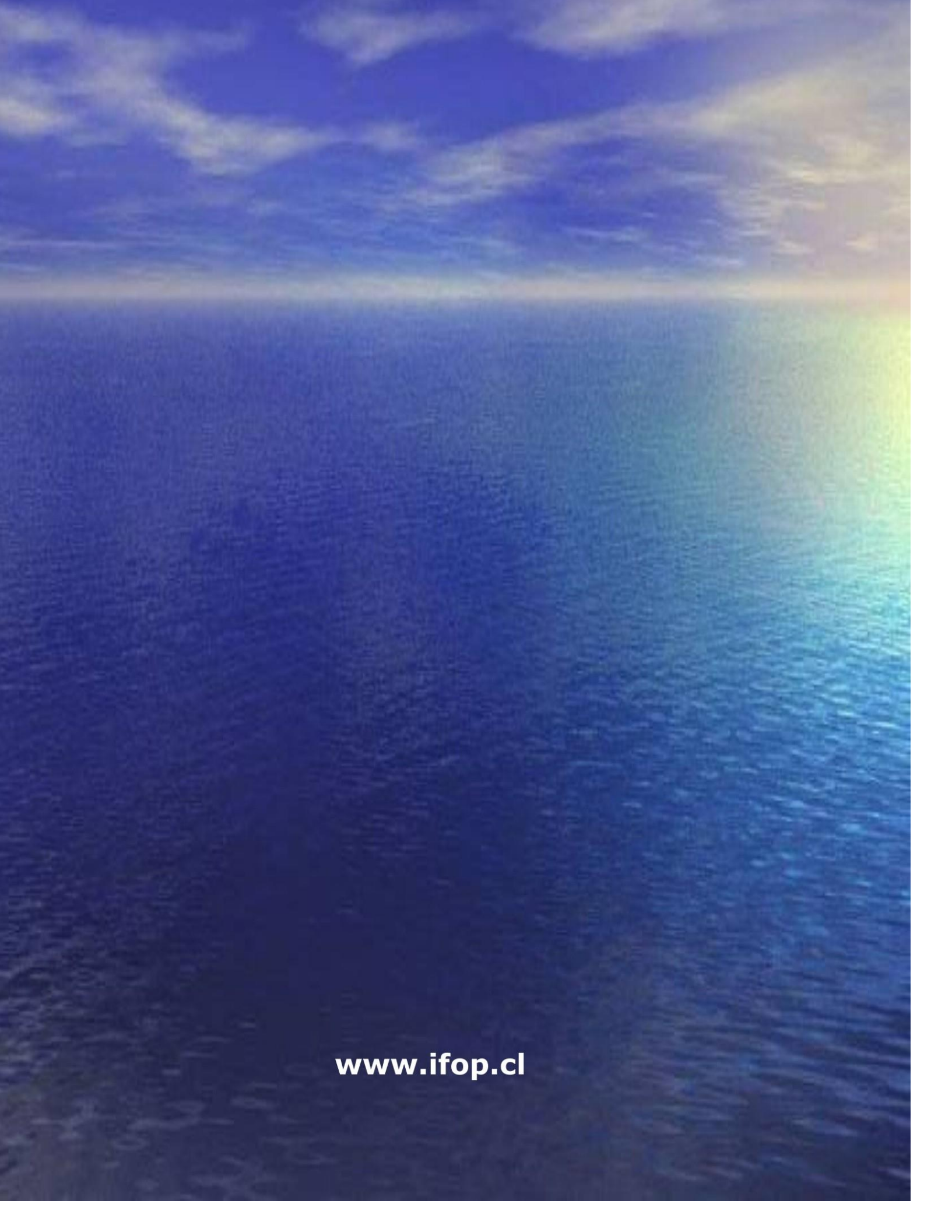
Sección Ediciones y Producción

Almte. Manuel Blanco Encalada 839

Fono 56-32-2151500

Valparaíso, Chile

www.ifop.cl



www.ifop.cl