



INFORME FINAL

Convenio de Desempeño 2014:

Desarrollo de estadísticas de conectividad para la X y XI
Región basados en resultados de modelos Mike3D, I Etapa

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Julio 2015



INFORME FINAL

Convenio de Desempeño 2014:

Desarrollo de estadísticas de conectividad para la X y XI Región
basados en resultados de modelos Mike3D, I Etapa

SUBSECRETARÍA DE ECONOMÍA Y EMT / Julio 2015

REQUIRENTE

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

Subsecretaria de Economía y
Empresas de Menor Tamaño
Katia Trusich Ortiz

EJECUTOR

INSTITUTO DE FOMENTO PESQUERO, IFOP

Director Ejecutivo
Leonardo Núñez Montaner

Jefe División Investigación en Acuicultura
Leonardo Guzmán Méndez

JEFE DE PROYECTO

Elías Pinilla Matamala

AUTORES

Pablo Reche García
Elías Pinilla Matamala
Cristian Ruíz Soto



RESUMEN EJECUTIVO

El medio físico de los sistemas marinos costeros y su dinámica actúan y son gobernados por tres motores principales: la transformación de la energía potencial a cinética de la oscilación del nivel medio del mar (mareas) debido a la acción gravitatoria del Sol y La Luna sobre los océanos en la rotación terrestre, los balances de masas y gradientes termohalinos que se producen por la entrada en dichos sistemas de flujos de agua dulce por parte de ríos y glaciares y el empuje en las capas superficiales por efecto de la fricción del viento. Estos agentes provocan que el sistema marino sea dinámico y que una partícula que en un tiempo inicial se encuentra en un lugar, al cabo de cierto tiempo se encuentre en otro distinto. Conocer cuáles son las conexiones y cómo funciona el transporte entre distintos áreas de un sistema es fundamental para entender el medio marino y dar una medida de sus dinámicas a las que se pueden dar diversas aplicaciones.

El objetivo principal del presente proyecto fue dar una medida (en forma de porcentaje) de las probabilidades de arribo y dispersión de partículas entre distintas áreas. Con esto se pretende crear una herramienta de gestión que permita establecer cuáles son las áreas más susceptibles de recibir la llegada de un contaminante, patógeno, etc. o cuáles son las más propensas a dispersar los mismos agentes hacia otras áreas. En el caso concreto de la acuicultura la atención se centra primordialmente en el transporte de patógenos de influencia en la salmoneicultura, tal como el virus ISA. Para que proliferen un brote de virus en un área debe llegar una cantidad suficiente conocida como “carga viral efectiva”. Este proyecto no considera si la cantidad o concentración de partículas (virus) que llegan o salen de un área alcanza la “carga viral efectiva”, sino de cuáles son las probabilidades de tales arribos y dispersiones, independientemente de si la cantidad que llega presupone un riesgo de contagio o no. En cualquier caso siendo conocida la cantidad inicial de partículas de un área, también puede ser conocida la cantidad de ellas que llegan y/o se dispersan a/hacia otras áreas.

Por conectividad se entiende la medida 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 otro área (lo que se conoce como conectividad *downstream*) o haya llegado desde cualquier área a un área determinada (conectividad *upstream*) en un tiempo dado (denominado horizonte). Por tanto, para establecer la conectividad de una zona es necesaria primeramente la obtención de la modelación hidrodinámica, para posteriormente recrear la modelación de dispersión de partículas y finalmente obtener las matrices de probabilidad en el post-procesamiento estadístico de los resultados de los modelos.

Para el presente proyecto se implementó un modelo hidrodinámico regional que cubre el mar interior de las regiones de los Lagos y Aysén y parte del océano Pacífico adyacente. Este modelo fue calibrado y evaluado contra mediciones recopiladas desde el año 2011 por IFOP. Posteriormente y con el objetivo de dar inclusión a la variabilidad de la hidrodinámica en la escala anual, se generaron



una serie de modelos hidrodinámicos a partir del anterior modelo regional y que representan los escenarios ambientales más representativos de la variabilidad intra-anual, de manera que se pueda analizar como el sistema responde a los distintos tipos de forzantes como son: variaciones estaciones del viento, cambios en la marea (sicigias y cuadraturas) y cambios estacionales en los caudales de ríos. Cada uno de los resultados de estos escenarios ambientales será sometido a procesamiento en estadísticas de conectividad dando lugar a sucesivos mapas de probabilidad de conectividad.

Las probabilidades de conectividad se determinaron para todas y cada una de las áreas en que se divide el dominio y a su vez tanto para la dispersión upstream (arribo de partículas) como downstream (dispersión o emisión de partículas) y cada uno de los horizontes que se consideraron. En el caso de dispersión upstream las probabilidades de arribo a un área objetivo desde otras áreas se calcularon como el porcentaje de las partículas iniciales de cada uno de esas otras áreas que al término de un horizonte terminan en el área objetivo. En la conectividad downstream las probabilidades de dispersión desde un área emisario hacia otras se establecieron a partir del porcentaje de las partículas iniciales del área emisario que hubiesen llegado a cada una de las otras áreas al cabo de un horizonte.

El concepto de “caja” que son todas aquellas sub-áreas individuales en que se subdivide el área total donde se estableció la conectividad. Se generaron un total de 3417 cajas a razón de 51 en el eje longitudinal por 67 en el eje latitudinal, con un tamaño de lado de 0.1° , (11×11 km) empezando desde la esquina inferior izquierda del dominio (77.1° W, -46.9° S). Cabe señalar que no todas las cajas contienen superficie acuática en ninguna proporción y, por tanto, no serán tomadas en cuenta dentro de los cálculos estadísticos de conectividad; además en muchas cajas la superficie que corresponde a superficie acuática es muy pequeña y puede que ninguna de las partículas liberadas (10 por cada caja) caiga en el agua y por tanto estas cajas no sean incluidas en los cálculos de conectividad.

Además de generar resultados de estadísticas de conectividad en términos de matrices numéricas, se generó un geoportal web basado en un sistema de información geográfica que permite una rápida visualización y fácil interpretación de los resultados, de manera que la información e conectividad sea fácilmente utilizable para la gestión de la acuicultura u otras actividades.



ÍNDICE GENERAL

RESUMEN EJECUTIVO	i
ÍNDICE GENERAL	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
ÍNDICE DE TABLAS	viii
1. ANTECEDENTES	1
2. OBJETIVOS	6
2.1 Objetivo general	6
2.2 Objetivos específicos.....	6
3. METODOLOGÍA	7
3.1 Objetivo N°1	9
3.2 Objetivo N°2	15
3.3 Objetivo N°3	16
3.4 Objetivo N°4	17
4. GESTIÓN DEL PROYECTO	19
5. RESULTADOS	21
5.1 Objetivo N°1	21
5.2 Objetivo N°2.....	25
5.3 Objetivo N°3.....	26
5.4 Objetivo N°4.....	27
6. DISCUSIÓN	29
7. CONCLUSIONES	34
8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

FIGURAS

TABLAS

ANEXO: Base de Datos



ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Campo de corriente superficial en el mar del Norte visto a través de los vectores promedio anuales.
- Figura 2.** Número de partículas incluidas en las estadísticas de conectividad en el ejemplo del mar del Norte.
- Figura 3.** Mapa mostrando las probabilidades de la conectividad *upstream* a 4 semanas de una única caja en el ejemplo del mar del Norte.
- Figura 4.** Mapa mostrando las probabilidades de la conectividad *downstream* a 4 semanas de una única caja en el ejemplo del mar del Norte.
- Figura 5.** Diagrama de flujo mostrando las etapas de desarrollo en las estadísticas de conectividad.
- Figura 6.** Archivo nativo de MIKE3 mostrando las probabilidades de la conectividad *upstream* de una caja (en negro) en mapa y su matriz correspondiente.
- Figura 7.** Archivo nativo de MIKE3 mostrando las probabilidades de la conectividad *downstream* de una caja (en negro) en mapa y su matriz correspondiente.
- Figura 8.** Diagrama mostrando cómo el horizonte dictamina qué partículas son incluidas y cuáles excluidas de los cálculos de conectividad.
- Figura 9.** Archivo nativo de MIKE3 mostrando el número de partículas que son incluidas dentro de los cálculos de conectividad *upstream*.
- Figura 10.** Archivo nativo de MIKE3 mostrando el número de partículas que son incluidas dentro de los cálculos de conectividad *downstream*.
- Figura 11.** Definición de caja dentro de un área de conectividad englobada a su vez dentro del dominio de un modelo hidrodinámico.
- Figura 12.** Posición de los equipos cuyos registros han sido utilizados en la evaluación del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Figura 13.** Dominio y batimetría interpolada del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Figura 14.** Zoom del modelo regional Chiloé-Aysén mostrando anidamientos de resolución horizontal de malla la malla flexible de elementos triangulares.
- Figura 15.** Perfil vertical de un transecto mostrando la resolución vertical de 20 capas sigma.
- Figura 16.** Estaciones de muestreo CTD del crucero CIMAR1 en Octubre-Noviembre 1995.
- Figura 17.** Condición inicial de temperatura del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Figura 18.** Condición inicial de temperatura del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Figura 19.** Condición de borde del nivel del mar a partir del modelo global TOPEX-POSEIDON.
- Figura 20.** Componente U de la velocidad del viento WRF a 10 metros sobre la superficie sobre el dominio del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Figura 21.** Componente V de la velocidad del viento WRF a 10 metros sobre la superficie sobre el dominio del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Figura 22.** Archivo de capas y metadata de cuencas hídricas que desembocan a cota cero. En imagen cuenca del río Carihueico en Chiloé.



- Figura 23.** Ordenamiento territorial por Sernapesca de las agrupaciones de concesiones (barrios) al norte del golfo del Corcovado.
- Figura 24.** Ordenamiento territorial por Sernapesca de las agrupaciones de concesiones (barrios) al sur del golfo del Corcovado.
- Figura 25.** Disposición de las cajas que conforman el área donde se determinará la conectividad sobre el dominio del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Figura 26.** Evaluación de la anomalía del nivel del mar en el canal Chacabuco entre el registro del mareógrafo (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.
- Figura 27.** Evaluación de la anomalía del nivel del mar en la isla Colorada entre el registro del mareógrafo (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.
- Figura 28.** Evaluación de la anomalía del nivel del mar en la isla Colorada entre el registro del mareógrafo (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.
- Figura 29.** Evaluación de la anomalía del nivel del mar en el islote Quetros entre el registro del mareógrafo (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.
- Figura 30.** Evaluación de la anomalía del nivel del mar en el fiordo Comau entre el registro del mareógrafo (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.
- Figura 31.** Evaluación de la anomalía del nivel del mar en el canal de Chacao entre el registro del mareógrafo (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.
- Figura 32.** Evaluación de la componente U de la velocidad en el canal Chacabuco entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.
- Figura 33.** Evaluación de la componente V de la velocidad en el canal Chacabuco entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.
- Figura 34.** Evaluación de la componente U de la velocidad en el canal Darwin entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 7 y el 26 de Octubre 2011.
- Figura 35.** Evaluación de la componente V de la velocidad en el canal Darwin entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 7 y el 26 de Octubre 2011.
- Figura 36.** Evaluación de la componente U de la velocidad en el paso Casma entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.
- Figura 37.** Evaluación de la componente V de la velocidad en el paso Casma entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.



- Figura 38.** Componente U del flujo residual de la corriente en una sección transversal del fiordo Aysén registrada con ADCP remolcado.
- Figura 39.** Componente U del flujo residual de la corriente en una sección transversal del fiordo Aysén del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Figura 40.** Componente V del flujo residual de la corriente en una sección transversal del estero Quitralco registrada con ADCP remolcado.
- Figura 41.** Componente V del flujo residual de la corriente en una sección transversal del estero Quitralco del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Figura 42.** Componente U del flujo residual de la corriente en una sección transversal del canal Darwin registrada con ADCP remolcado.
- Figura 43.** Componente U del flujo residual de la corriente en una sección transversal del canal Darwin del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Figura 44.** Componente V del flujo residual de la corriente en una sección transversal del canal Costa registrada con ADCP remolcado.
- Figura 45.** Componente V del flujo residual de la corriente en una sección transversal del canal Costa del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Figura 46.** Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en el canal Chacabuco. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.
- Figura 47.** Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en el canal Costa. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.
- Figura 48.** Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en el fiordo Aysén. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.
- Figura 49.** Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en el fiordo Reñihue. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.
- Figura 50.** Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en las cercanías de Dalcahue. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.
- Figura 51.** Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en el seno de Reloncaví. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.
- Figura 52.** Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *upstream* del modelo estacional Invierno-Cuadratura.
- Figura 53.** Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *downstream* del modelo estacional Invierno-Cuadratura.
- Figura 54.** Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *upstream* del modelo estacional Invierno-Sicigia.
- Figura 55.** Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *downstream* del modelo estacional Invierno-Sicigia.



- Figura 56.** Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *upstream* del modelo estacional Verano-Cuadratura.
- Figura 57.** Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *downstream* del modelo estacional Verano-Cuadratura.
- Figura 58.** Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *upstream* del modelo estacional Verano-Sicigia.
- Figura 59.** Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *downstream* del modelo estacional Verano-Sicigia.
- Figura 60.** Vista inicial del geoportal IFOP en el dominio ifop.teramaps.cl.
- Figura 61.** Zoom en el golfo de Ancud.
- Figura 62.** Selección de caja y filtro de ventana emergente.
- Figura 63.** Selección del filtro deseado en la ventana emergente.
- Figura 64.** Mapa de probabilidades asociado a la caja seleccionada (bordes rojos) junto con leyenda de escala de rangos.
- Figura 65.** Información de probabilidad dispersión de la caja ID:2588 con un filtro *downstream* a un horizonte de 48 horas respecto de la caja ID:2538.
- Figura 66.** Presión atmosférica registrada en Puerto Aguirre por IFOP en Octubre 2011.



ÍNDICE DE TABLAS

- Tabla 1.** Posición y periodo de medición de los mareógrafos cuyos registros del nivel del mar han sido utilizados en la evaluación del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Tabla 2.** Posición y periodo de medición de los ADCP fondeados cuyos registros del nivel del mar han sido utilizados en la evaluación del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Tabla 3.** Posición y periodo de medición de los ADCP remolcados cuyos registros del nivel del mar han sido utilizados en la evaluación del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Tabla 4.** Posición y periodo de medición de los derivadores lagrangianos cuyos registros del nivel del mar han sido utilizados en la evaluación del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Tabla 5.** Estadísticos de evaluación de la anomalía del nivel del mar del modelo regional Chiloé-Aysén.
- Tabla 6.** Estadísticos de evaluación de las componentes U y V de la velocidad de la corriente el modelo regional Chiloé-Aysén en el canal Chacabuco.
- Tabla 7.** Estadísticos de evaluación de las componentes U y V de la velocidad de la corriente del modelo regional Chiloé-Aysén en el canal Darwin.
- Tabla 8.** Estadísticos de evaluación de las componentes U y V de la velocidad de la corriente del modelo regional Chiloé-Aysén en el paso Casma.
- Tabla 9.** Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén en el canal Chacabuco.
- Tabla 10.** Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén en el canal Costa.
- Tabla 11.** Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén en el fiordo Aysén
- Tabla 12.** Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén en el fiordo Reñihue.
- Tabla 13.** Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén cerca de Dalcahue.
- Tabla 14.** Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén en el seno Reloncaví.



1. ANTECEDENTES

En el contexto del cultivo de salmones, la problemática asociada a la dispersión de enfermedades ha sido de gran interés tanto para industria como para el estado, en este sentido existen parásitos asociados a enfermedades destacándose de manera especial el virus ISA y el piojo de mar (*Caligus*).

La caligidosis, patología producida por el ectoparásito *Caligus rogercresseyi* durante la engorda de salmonídeos, en aguas marinas y salobres del sur de Chile, ha sido un gran problema para la industria acuícola nacional en los últimos años. Desde el punto de vista económico, el piojo de mar ha generado enormes pérdidas, que se explican principalmente por la mortalidad de los peces, el aumento de la predisposición a las infecciones secundarias, los costos de tratamiento, el alargamiento del ciclo de cultivo, producto de la disminución de la eficiencia de conversión alimenticia y la limpieza de la carcasas durante el procesamiento (Carvajal *et al.*, 1998; Johnson *et al.*, 2004; Costello, 2006). La anemia infecciosa del salmón (ISA) es una seria enfermedad viral que afecta al salmón Atlántico (*Salmo salar*) y que es causado por el virus ISA (ISAV). La mortalidad en las jaulas de cultivo puede variar de 0 a 90%. Esta es posiblemente la enfermedad viral más importante de salmón del Atlántico (*Salmo salar*) debido a las pérdidas socioeconómicas asociadas. (Kibenge, 2012).

El modelamiento de conectividad es cada vez aplicado más ampliamente en intentos de comprender la dinámica de poblaciones de organismos marinos (por ejemplo: Tremblay *et al.* 2008, Fox *et al.* 2009). Un modelo proporciona una línea base bien definida contra el cual comparar las observaciones empíricas, y 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. Varios estudios ya han hecho alusión a este tema (Fox *et al.* 2006, Knights *et al.* 2006). Modelos similares a los que se utilizaran en este estudio ya se han aplicado para investigar la transmisión de caligus en zonas de Escocia (Amundrud y Murray 2009, Salama *et al.* 2011), Noruega (Asplin *et al.* 2004, Johnsen 2011) y Canadá (Stucchi *et al.* 2010). Resultados de modelos por Scheel *et al.* (2007) encontraron sitios infectados dentro de los 5 km con riesgo comparable a los sitios con la propiedad compartida. Lyngstad *et al.* (2008) encontraron que los sitios infectados a 10 km eran propensos a compartir los virus ISA del mismo genogrupo, que indicarían 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 ello fue <10 km. El uso de datos de corrientes estimados a partir de un modelo hidrográfico de Gustafson *et al.* (2007) observaron que los sitios ubicados corriente abajo desde un sitio infectado eran más propensos a recoger a la infección que el situado corriente arriba.

Como resultado de este transporte hidrodinámico uno de los controles principales de ISA en Escocia se basa en un modelo de excursión de la marea. El modelo fue desarrollado durante el brote de ISA en 1998-1999 y 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 (la distancia es el doble de esto en la parte continental de Escocia, donde los rangos de marea son mayores). Sitios que se ubican 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 donde las zonas de excursión mareal no se superponen.

A nivel nacional en temática de dispersión de larvas y a raíz de la misma problemática de dispersión de enfermedades relacionadas con la salmoneicultura en la zona austral de Chile se han llevado a cabo estudios de conectividad como recurso de entender y dar lectura e interpretación a los transportes de masa entre distintas zonas. Entre otros trabajos están los de Porobic *et al* (2012) en “Modelación de la conectividad de las subpoblaciones de la langosta de Juan Fernández a través de un modelo biofísico”, Carolina Parada del Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción también trabaja en modelación de conectividad aplicada en estudios de poblaciones de larvas, Gonzalo Olivares de la Universidad de Los Lagos ha realizado diversos proyectos enfocados al transporte de masas de agua y patógenos y contaminantes en el sur de Chile, Carolina Meruane *et al* (2013) en “Large-scale mass transport in the austral fjords and channels of Chile” utilizando el modelo CWR-ELCOM define qué mecanismos de dispersión controlan el transporte horizontal, entre otros como proyectos privados de consultoras tales como “Medusa” de Innovex.

El desarrollo de la metodología en estadísticas de conectividad empleada por IFOP en el presente proyecto y que servirá de base en futuras etapas, fue realizado y transferido a IFOP por DHI (Danish Hydraulic Institute) en la persona de uno de los desarrolladores del software, Thomas Uhrenholdt. En reunión mantenida en IFOP Castro los días 27 y 28 de Octubre del 2014 Thomas Uhrenholdt capacitó a miembros del IFOP en conceptos, asunciones y metodología de estadísticas de conectividad para resultados de MIKE3D. El Sr Uhrenholdt también expuso un caso real llevado a cabo por el equipo de DHI en Dinamarca en el mar del Norte aplicando la misma metodología para el caso de especies planctónicas pasivas. En este ejemplo del mar del Norte también se empezó por modelar la hidrodinámica por un año completo, como se muestra en la **Figura 1** a través de los vectores promedio anuales de la intensidad y dirección de la corriente en superficie. La **Figura 2** muestra el número de partículas puestas en dispersión e incluidas en los cálculos de conectividad (downstream en este caso). Las **Figuras 3 y 4** son la representación gráfica de los resultados de las probabilidades resultantes de los cálculos de las estadísticas de conectividad upstream y downstream respectivamente, para un horizonte de 4 semanas y de una única caja en concreto. Nótese que el tamaño de las cajas es de 25x25 km de lado. El Sr Uhrenholdt también ha aplicado esta misma metodología de conectividad en estudios de impacto ambiental como son las dispersiones de especies invasivas (Hansen *et al.*, 2014).

IFOP adoptó esta metodología y la adaptó a los requerimientos específicos de la zona Sur Austral de Chile y de las problemáticas a las que se pretende dar solución mediante esta herramienta. De esta manera y tal cómo se explicará en su correspondiente apartado, el tamaño de las cajas se disminuyó, mejorando la resolución en la zona de canales y fiordos; también se utilizó un horizonte más cercano que diera respuesta a la dispersión de patógenos; y por último se construyó una plataforma interactiva de visualización vía web desde la cual el usuario pueda visualizar aquellos parámetros de interés de una forma fácil, rápida y comprensiva.



El presente proyecto se trata de la primera de 3 etapas que pretenden dar una cobertura total a la zona Sur de Chile abarcando las regiones X, XI y XII. En esta I etapa se da cobertura a la conectividad en la X y XI Región desde el límite de la XIV-X Región por el Norte hasta la península de Taitao por el Sur. El área de estudio está inserta en el sector septentrional de la zona de fiordos y canales del sur de Chile, considerada esta última, como una de las más extensas del planeta y conformando una de las mayores zonas estuarinas del mundo (Cameron & Pritchard, 1963). En general estas zonas estuarinas son altamente productivas (Wolff, 1980), presentando características topográficas que conforman áreas protegidas de las condiciones meteorológicas.

La presencia de profundos canales y fiordos que comunican numerosos cuerpos de agua genera la existencia de complicados patrones de circulación, los cuales son un resultado de la influencia de forzantes meteorológicos y oceanográficos, los cuales son a su vez consecuencia de la influencia regional 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 extratropicales que generan la presencia de fuertes vientos oceánicos, junto a la formación de sistemas frontales que continuamente generan uno de los ambientes de mayor pluviosidad en el planeta. Asimismo, la penetración de energía hacia aguas interiores, proveniente de la propagación de ondas de marea hacia la zona estuarina, generan la existencia de diversas estructuras hidráulicas, que en fiordos y canales, determinan patrones de transporte de agua complejos de caracterizar.

Desde el punto de vista geográfico, se observa como uno de los detalles característicos la presencia de constricciones batimétricas que, si bien no actúan como límites absolutos para la circulación entre cuencas, si 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 necesario la descripción de éstas como parte de la estimación de parámetros relevantes, tales como el tiempo de residencia de una cuenca.

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 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 modelo numérico implementado por IFOP en proyectos anteriores es MIKE 3 HD FM; éste 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 (Tehepikova & Chuvarenko, 2001). Fue desarrollado por DHI (Instituto de Hidráulica y Medio Ambiente Danés (www.dhigroup.com/)).

De los modelos desarrollados por IFOP desde el año 2011, a la fecha se han implementado varios en la X y XI región. Durante la ejecución del proyecto “Determinación de los Patrones de Circulación en los mares interiores de la Región de Magallanes” (2013-2014) se implementó un modelo hidrodinámico de MIKE3 de escala regional que daba cobertura espacial al mismo área de interés del presente proyecto (X-XI región hasta península de Taitao). El desarrollo de dicho modelo regional partió de la consecución de sus componentes de diversas fuentes: nivel del mar (modelo global TOPEX-POSEIDÓN), forzantes atmosféricos (modelo global de reanálisis NCEP/NCAR), agua dulce de ríos (Dirección General de Aguas de Chile), campo de masas y densidad (cruceos oceanográficos CIMAR); ensamblaje de dichos componentes bajo estándares propios del modelo numérico MIKE3; evaluación de resultados - calibración de sus componentes - evaluación de resultados y posterior validación del modelo. A la fecha de ejecución de aquel proyecto la mejor información de forzantes meteorológicos con cobertura espacial y temporal para las características específicas del modelo eran los procedentes del modelo global NCEP/NCAR de resolución espacial horizontal de 2° y resolución temporal de 6 horas. Desde la fecha de implementación de aquel modelo y el presente y gracias a la colaboración del Departamento de GEOfísica de la Universidad de Concepción con el IFOP se ha podido contar con una fuente adicional de información meteorológica del modelo *Weather Research and Forecasting* que aumenta tanto la resolución espacial (3 km) como temporal (dato horario) de la anterior fuente. Este cambio en la mejora de la calidad de la información se ha tomado en favor de una mejora en la calidad de los resultados y validación del modelo, lo cual se evalúa en el objetivo N°1.

En esta etapa I en el desarrollo de estadísticas de conectividad basados en modelos de MIKE3 no sólo se da cobertura espacial a una de las 3 áreas en que se ha dividido la zona austral de Chile, también es la etapa en que se ha desarrollado una metodología que será posteriormente aplicada en las siguientes etapas II y III que extenderán la cobertura a sectores más al Sur (entre península de Taitao y canal Beagle). Esto no quiere decir que en las siguientes etapas se limiten a aplicar la misma metodología en diferentes zonas, sino que además se trabajará en la mejora de los resultados de hidrodinámica previos a las estadísticas de conectividad, tanto en los modelos por venir de la XI-XII región como en el actual de la X-XI región.

Estos modelos han sido validados por controles de calidad, índices estadísticos (e.g RMSE, NRMSE, CC) y por mediciones en terreno de parámetros hidrográficos (temperatura, salinidad), corrientes, mareas, aporte fluvial y de viento. Estas mediciones han sido realizadas en distintas campañas oceanográficas, orientadas a la obtención de datos de carácter estacional (campañas de invierno/verano), de modo de poder configurar modelos bajo distintos escenarios, en los cuales el viento, la marea y aportes fluviales (o deshielos directamente) presentan distinto grado de influencia en el campo de corrientes.



Limitaciones de la modelación hidrodinámica en la región de fiordos patagónicos de Chile

En general, la evaluación de los modelos hidrodinámicos en la región de fiordos y canales del sur de Chile realizadas en proyectos anteriores por el Instituto de Fomento Pesquero (Pinilla *et al* 2012; 2013; 2015) han presentado enormes complejidades y limitaciones, uno de estos aspectos se refiere a la calidad de los datos batimétricos, estos datos provienen principalmenete de las cartas nauticas de SHOA, debido a la función de cumplen, están enfocados a navegación en la parte central de los canales, dejando los sectores costeros sin densidad de datos suficientes para poder caracterizar las zonas mas someras en donde usualmente de instalan los centros de cultivo y ademas donde se realizan las mediciones de correntometría, sumado a esto existen amplios sectores en que no existe siquiera información de cartas nauticas, por tanto, el error que se ingresa en el modelo batimétrico puede llegar a ser bastante grande. La escasa disponibilidad de datos de alta resolución tiende a mermar los efectos reales de batimetría sobre las corrientes, en algunos casos, siendo representada con un alto grado de error por los modelos.

Otra limitación importante sucede con la cuantificación de los flujos de agua dulce, debido a que actualmente la única información en la zona de Chiloé y Aysén disponible y de utilidad es operada por la Dirección General de Aguas (DGA), y solamente con los ríos más importantes (Puelo, Palena, Cisnes y Aysén), mientras que para el resto de fuentes cuantificadas solo existen algunos archivos históricos. Con solo esta información es difícil poder aproximar cual es el volumen total de agua dulce que ingresa al sistema marino.

Los patrones de circulación, sobre todo en esta zona por las características atmosféricas, son extraordinariamente dependiente de una buena forzante viento, en este sentido, aun no se ha logrado validar un modelo atmosferico ya sea de escala global o local que logre reproducir la variabilidad en estos sistemas complejos. La compleja topografía de la zona, compuesta por islas de tamaños variables, canales y mares interiores, requiere de una resolución espacial muy alta para ser representada por el modelo atmosférica WRF, en ocasiones podemos encontrar en un mismo punto de grilla (incluso a 1km de resolución) parte de un canal y de una isla con bosque nativo y una baja altitud y parte de otra isla con fuertes pendientes. Probablemente se requiera de una resolución cercana a los 200m para tener una topografía representativa en el modelo, esto evidentemente hace que el costo computacional para resolver esta dinámica presente complejidades para su desarrollo.

Finalmente, los modelos hidrodinámicos requeridos para poder simular las características de zonas tan complejas como la sur austral de Chile, necesitan de una alta capacidad de computo, debido a que se requieren resolver detalles de la geometría que solo es posible aumentando la cantidad de elementos en donde se resuelven la ecuaciones dentro del modelo, esto hace que el sur de Chile en particular se transforme en una de las zonas de mayor complejidad en el mundo para la resolución de los patrones de circulación marina mediante modelos hidrodinámicos.



2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Determinar estadísticas de conectividad para los centros de cultivo existentes en la X y XI regiones, incluyendo en dicho estudio aquellos resultados de los proyectos de modelación numérica desarrollados a la fecha.

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. Dichos modelos deberán tomar en cuenta la variabilidad anual de estos sistemas de acuerdo a las condiciones específicas de cada época del año.

2.2.2 Objetivo N°2

Utilizando los modelos actualmente implementados y evaluados en las dos regiones objetivo, llevar a cabo un análisis de la conectividad para los distintos sectores seleccionados e individualizados en el estudio. Dicho análisis deberá desarrollarse tomando en cuenta la variabilidad anual de estos sistemas de acuerdo a las condiciones específicas de cada época del año. Se deberá seleccionar el tamaño de las unidades de trabajo sobre las que buscará la conectividad, las cuales deberán ser mayor que un centro de cultivo pero menor a una agrupación de concesiones (barrios).

2.2.3 Objetivo N°3

Elaborar una matriz de conectividad entre las diferentes unidades de trabajo por cada macrozona incluida en el área geográfica del proyecto, estableciendo las probabilidades de contaminación entre estas distintas unidades.

2.2.4 Objetivo N°4

Proveer la información obtenida de acuerdo a la compatibilidad necesaria para permitir su uso por los actuales sistemas implementados en la Subsecretaría de pesca, especialmente para el caso de modelos hidrodinámicos e información compatible con sistemas de información geográfica.



3. METODOLOGÍA

Concepto de conectividad:

Por conectividad se entiende la medida 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 otro área (lo que se conoce como conectividad downstream) o haya llegado desde cualquier área a un área determinada (conectividad upstream) en un tiempo dado (denominado horizonte). Por tanto, para establecer la conectividad de una zona es necesaria primeramente la obtención de la modelación hidrodinámica, para posteriormente recrear la modelación de dispersión de partículas y finalmente obtener las matrices de probabilidad en el post-procesamiento estadístico de los resultados de los modelos (**Figura 5**). Estas matrices de probabilidad serán los resultados que son representados a través del geoportal.

Las probabilidades de conectividad se determinan para todas y cada una de las áreas en que se divide el dominio y a su vez tanto para la dispersión upstream (arribo) como downstream (dispersión o emisión) y cada uno de los horizontes que se consideren. En el caso de dispersión upstream las probabilidades de arribo a un área diana desde otras áreas se calculan como el porcentaje de las partículas iniciales de cada uno de esas otras áreas que al término de un horizonte terminan en el área objetivo (**Figura 6**). En la conectividad downstream las probabilidades de dispersión desde un área emisario hacia otras se establece a partir del porcentaje de las partículas iniciales del área emisario que han llegado a cada una de las otras áreas al cabo de un horizonte (**Figura 7**).

Los límites a la conectividad son impuestos por el tiempo de simulación, el máximo horizonte y los límites geográficos del dominio del modelo numérico. Pudiendo haber tantos horizontes como conectividades quieran establecerse, el horizonte más lejano no debe exceder 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, como dijimos, a partir de cálculos estadísticos sobre las trayectorias que describen las partículas puestas en acción por los modelos de dispersión de partículas, que a su vez utilizan la hidrodinámica desarrollada previamente.

En cada paso de tiempo del modelo de dispersión de partículas se libera un número constante de partículas. El número de partículas introducido en cada paso de tiempo es definido por el usuario, que debe buscar 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. Si las partículas son liberadas a igual ritmo desde el primer hasta el último paso de tiempo, siempre habrá un determinado número de partículas que se no serán incluidas en los cálculos de conectividad, tanto se trate de conectividad downstream como upstream. El número de partículas excluidas será el equivalente a las partículas que se introducen al dominio



en un periodo de tiempo igual al horizonte temporal, por no haber estado en circulación el mínimo tiempo requerido que es el que se establece con el horizonte más lejano (**Figura 8**).

Si bien el número de partículas que ingresa al dominio es conocido y definido por el usuario, no así es el lugar específico a donde ingresan cada una de ellas. Como se ha dicho, en cada paso de tiempo del modelo de dispersión de partículas ingresa un número constante de partículas, adicionándose a las anteriores de pasos de tiempo previos. Estas nuevas partículas que ingresan lo hacen en número constante y sobre toda la superficie del dominio de forma aleatoria, habiendo áreas donde hay más partículas que en otras, lo cual no es relevante. Sí lo es en cambio el hecho de que aquellas partículas que caen en áreas (cajas) cuya superficie corresponde a terreno terrestre son excluidas de posteriores cálculos. Además, al tratarse de dominios abiertos en sus bordes oceánicos, aquellas partículas que salen de los límites del dominio son excluidas de todo cálculo; también debe considerarse que las parcelas 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 partículas que participan de los cálculos estadísticos de conectividad no son iguales para las conectividades upstream y downstream respectivamente (**Figuras 9 y 10**).

El que las partículas que salen del dominio sean excluidas y que las parcelas 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 significativa es esta pérdida de información, la cual puede ser asumida en dichos bordes. Otra opción es establecer la conectividad en un área de menor superficie al dominio del modelo hidrodinámico (**Figura 11**), de manera que aquellas partículas que salen del área de conectividad (pero no de la superficie del dominio total) no se pierden y pueden volver a entrar posteriormente; además las parcelas de agua que ingresen desde afuera del área de conectividad (pero desde dentro de los límites del dominio hidrodinámico) contienen partículas que serán consideradas en cálculos de conectividad, porque el ingreso de las partículas se establece en el modelo de dispersión de partículas.

Por último está el concepto de “caja”. Cajas son todas aquellas sub-áreas individuales en que se subdivide el área total donde se establece la conectividad (**Figura 11** en azul). El tamaño de estas cajas es igual entre ellas y se establece según el tipo de conectividad que se quiere conocer. 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 las cajas de igual o menor tamaño que las áreas del terreno, a fin de poder conocer la conectividad una vez las partículas hayan abandonado la caja que representa el área real en el terreno. Se puede saber la probabilidad de que las partículas no hayan salido de su caja inicial tras un horizonte, pero no podremos saber en qué posición dentro de dicha caja se encuentran, pues por así decirlo, la caja es la mínima unidad de superficie de la que se puede obtener información probabilística de conectividad.



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.

El primer paso en el desarrollo de las estadísticas de conectividad guarda relación con la estimación de la capacidad de acierto del modelo hidrodinámico. La confiabilidad del modelo y sus resultados son testados a través de la comparación de series de tiempo de correntometría euleriana y nivel del mar, estructuras espaciales de flujos residuales de correntometría euleriana y derivas de correntometría lagrangiana con mediciones tomadas en terreno. Para alcanzar los resultados finales que nos darán el grado de confianza de un modelo y por último su validación, se deben completar una serie de fases en la elaboración del modelo.

En primera instancia se deben reunir los componentes externos del modelo que definen las condiciones iniciales y los forzantes. La características de estos componentes en su resolución espacio/temporal junto con la confianza propia de aquellos componentes que proceden a su vez de modelos globales definirán la calidad de los resultados del modelo hidrodinámico. Estos componentes deben estandarizarse (propiedades geográficas) para poder ser asimilados correctamente por el modelo. Una vez contemos con los componentes necesarios para cómo se ha ideado el modelo se procede a ensamblar estos componentes y ejecutar el modelo. Estos primeros resultados son evaluados frente a las respectivas mediciones de terreno. En función del grado de acierto/error de las primeras evaluaciones bien se toman estos resultados como definitivos para validar el modelo, o se buscan nuevos componentes de condiciones iniciales y forzantes que mejoren la respuesta del modelo o se inicia la siguiente fase de calibración del modelo. En la calibración del modelo se modulan ciertos parámetros y coeficientes de influencia en la dinámica de pequeña (turbulencia y difusión) y gran escala (fricción del viento y rugosidad del fondo) y se vuelven a evaluar los resultados, sucesivamente hasta lograr el mejor grado de confianza posible.

Implementación de modelo regional Chiloé-Aysén de alta resolución para conectividad

A fin de realizar el estudio de conectividad se implementó un modelo hidrodinámico de escala regional en la X y XI regiones que diera cobertura tanto a la evaluación del modelo como a la conectividad, de manera que se pueden establecer conectividades entre todas y cada una de las zonas en que se divide el espacio marítimo de las X y XI regiones. Este modelo fue construido a partir del modelo homólogo del proyecto “Determinación de los Patrones de Circulación en los mares interiores de la Región de Magallanes” (2013-2014) con la salvedad de que el presente modelo tiene lugar su simulación durante fines del invierno y principios de la primavera del año 2011, por ser las fechas cuando se contaba con datos de viento WRF (en vez del viento del modelo global NCEP/NCAR del año 2014 del anterior proyecto).

Mediciones

El modelo ha sido ejecutado entre el 19 de Septiembre y el 26 de Octubre del año 2011 en 2 simulaciones, periodo que se solapa con las mediciones registradas en terreno de correntometría



euleriana, lagrangiana y nivel del mar en tales fechas. Las mediciones empleadas para la evaluación del modelo proceden de diversas fuentes: campaña IFOP invierno-primavera 2011 en Chonos Sur, campaña IFOP invierno-primavera 2011 en el mar interior de Chiloé y pronósticos de nivel del mar de mareógrafos de otras campañas. La posición y tiempo de registro se detallan en las Tabla 1, 2, 3 y 4 y la Figura 12.

Para medir y registrar las variaciones del nivel del mar, se instalaron mareógrafos RBR, modelo TGR-1050HT Hydrotide por al menos 30 días, para mediante análisis armónico poder extraer todas las componentes astronómicas principales y posteriormente poder construir series pronóstico del nivel del mar y extender la cobertura de la información. Estos mareógrafos fueron configurados para registrar datos cada 10 minutos y fueron instalados a 10 metros de profundidad.

La correntometría euleriana se midió con equipos ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) remolcados en tiempo real durante un ciclo mareal completo (24.5 hrs) a través de un perfilador acústico Doppler (ADCP) RDI Workhorse Sentinel de 150 kHz para extraer los flujos residuales en transectos específicos y con un ADCP RDI Workhorse Sentinel de 300 kHz anclado a una profundidad aproximada de 60 m para las series de tiempo de sus componentes U y V. Los flujos residuales de cada componente de la corriente horaria (U y V) fue filtrada mediante un filtro de paso bajo Lanczos de 121 pesos con un periodo de corte de 40 horas para separar la señal diurna y semidiurna de la marea de aquellas otras señales de menor frecuencia. A tal efecto fueron empleados programas de Matlab. Por otra parte, y de manera análoga a las mediciones de ADCP remolcado, a los registros de corrientes se les realizó un análisis armónico utilizando como entrada el algoritmo de Pawlowicz (2002a) el vector complejo de la forma: $w = u+vi$. El algoritmo utilizado para estimar la amplitud y fase y se basa en el algoritmo descrito por Godin (1972), Foreman (1977) y Foreman (1978) implementado por Pawlowicz (2002).

La correntometría lagrangiana fue medida mediante boyas derivadoras cuya vela de arrastre estaba situada 4 metros por debajo de la superficie y con una superficie aproximada de 1 m². La trayectoria seguida por las boyas es enviada mediante aparato de radio que transmite su posición a intervalos mínimos de media hora por un periodo máximo de 24 horas.

Componentes modelo regional Chiloé-Aysén:

- a) Dominio: El dominio de este modelo abarca desde el límite Norte de la X región por el Norte hasta el extremo occidental de la península de Taitao por el Sur, y desde el margen continental por el Este hasta los 77° W (**Figura 13**). Así se da cobertura a la zona oceánica de influencia y a las aguas interiores del mar interior de Chiloé y a los canales y fiordos de la región de Aysén.
- b) Resolución horizontal: la resolución es variable en la horizontal, habiéndose realizado anidamientos de mayor resolución allá donde la batimetría y línea de costa (constricciones) requieren de un mayor grado de resolución para dar representación a aquellos procesos de mesoescala (eddies). Se propone un mínimo de 5 elementos triangulares en estos sitios singulares (constricciones y canales principales) lo que resulta en elementos de un tamaño



promedio mínimo de 400 metros de lado (**Figura 14**). Por el contrario en zonas oceánicas los elementos triangulares tienen un tamaño promedio de 12 km de lado.

- c) Resolución vertical: En cuanto a la discretización del espacio en la vertical se impusieron 20 capas de tipo sigma cuya característica es que siguen el contorno del fondo marino. Estas 20 capas se distribuyeron con alta densidad en la superficie y el fondo para poder representar los importantes fenómenos de escala (fricción) que tiene lugar en estas interfases, dejando la parte central de la columna de agua, donde los fenómenos relevantes ocurren a mayor escala, con capas de mayor espesor (**Figura 15**).
- d) Condiciones iniciales: La condición inicial de flujo es denominada “arranque en frío”, la cual es un campo de flujo nulo al comenzar la simulación que se estabilizará luego de ciertos pasos de tiempo hasta alcanzar un equilibrio asociado a los forzantes; generalmente esto tarda menos de 24 horas, por lo cual estos resultados son descartados de los análisis. La condición inicial de temperatura y salinidad se obtuvo a través de información de CTD del crucero CIMAR fiordos 1, en etapa primavera en Octubre-Noviembre (**Figura 16**), si bien es cierto este crucero se realizó el año 1995, dentro de la recopilación de información fue esta campaña la que presentaba mayor densidad de datos, lo que permitiría definir en mejor grado las estructuras de temperatura y salinidad en todo el sistema (sobre todo la estratificación). De esta forma se construyeron archivos mediante un método de interpolación bilineal tanto vertical como horizontal, de estos perfiles CTD en zonas interiores de canales y fiordos junto con condiciones iniciales de temperatura y salinidad constantes en zonas oceánicas. En zonas oceánicas sólo interesa el comportamiento barotrópico de la onda de marea en su ingreso hacia aguas someras por lo que valores constantes de temperatura (10°C) y salinidad (33 PSU) simplifican las condiciones de borde y evita inestabilidades debidas a flujos baroclínicos que desencadenan *blow-up* (reventón) que precipitan el fin de la simulación por valores anómalos tanto en flujo como nivel del mar. Estos archivos iniciales de temperatura y salinidad son sometidos a forzamiento por balance de masas y evolucionan hacia un equilibrio dinámico con los componentes del modelo. En sucesivas corridas del modelo la condición inicial de temperatura y salinidad de un modelo es la salida del modelo anterior, de manera que la nueva condición inicial es más cercana al equilibrio que la anterior. Las **Figuras 17 y 18** muestran las condiciones iniciales de temperatura y salinidad en superficie respectivamente.
- e) Condiciones de borde: Al tratarse de un modelo regional de bordes oceánicos, las condiciones de borde de nivel del mar fueron obtenidas del modelo global TOPEX-POSEIDON a una resolución de 0.25° (**Figura 19**). En el caso de la temperatura y salinidad y al ser constantes las condiciones iniciales cercanas a los bordes, éstos también son constantes en profundidad y a lo largo del borde.
- f) Forzantes atmosféricas: Los forzantes atmosféricas provienen de modelos atmosféricos cuyos datos varían espacial y temporalmente. En este caso los datos provienen del modelo atmosférico WRF (Weather Research Forecast), modelado por los responsables en el área del Departamento de Geofísica de la Universidad de Concepción. Este modelo de mesoescala



(abarca aproximadamente el mismo área del dominio del modelo hidrodinámico) tiene una resolución de 3 km y cubre todo el año 2011 a promedios de una hora. El viento ingresa al modelo descompuesto en sus componentes ortogonales U y V a 10 metros sobre la superficie (**Figuras 20 y 21**). La presión atmosférica utilizada es constante (1013 kPa) y es entregada de referencia por el modelo. El hecho de utilizar la presión atmosférica constante responde a que la mitad de los registros de nivel del mar empleados en la evaluación del modelo son series pronóstico construidas a partir de las componentes astronómicas y que obvian los efectos de la presión atmosférica. Los otros registros de nivel del mar con mareógrafo y que sí tienen en cuenta la presión atmosférica pueden ser entendidos en sus anomalías a través de los registros de presión atmosférica *in situ* de las estaciones meteorológicas de IFOP en dicha campaña. Una vez que los datos son ingresados al modelo, este interpola linealmente los datos a cada elemento triangular definido en la malla.

- g) Agua dulce: El método de aproximación llevado a cabo trata de mejorar las escalas espaciales y temporales de la información hidrológica recogida en *Balance Hídrico de Chile, 1987*, incrementando sus resoluciones. Para aumentar la resolución espacial, esto es definir los principales puntos/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 dentro de cada una de esas sub-cuencas de escala sub-regional todas las cuencas hídricas individuales de relevancia. Así en zonas insulares, donde la superficie de las cuencas es sustancialmente menor en extensión a las que se pueden encontrar en el continente, el umbral a partir del cual una cuenca individual se considera de relevancia es menor que en su homólogo continental. Este criterio umbral es proporcional a la extensión promedio de todas las cuencas de una sub-cuenca de escala sub-regional. Para poder hacer esta discretización, se contó con archivos de capas SIG derivados de modelos de elevación digital topográficos. Estos DEM engloban las áreas que se encuentran dentro de una misma divisoria de aguas común que desalojan a cota cero. El criterio a utilizar para determinar el umbral de relevancia de cada una de estas áreas es expresado en la metadata en unidades de superficie (**figura 22**). De esta manera se extrapolan los caudales conocidos de una cuenca a las cuencas cercanas de las cuáles no se dispone información, siendo la relación que guardan las superficies de ambas cuencas la que determine cuál será el caudal estimado de la cuenca de la que no tenemos información de descarga. Una metodología similar fue utilizada por Meruane *et al.* (2013) en la misma latitud. Para resolver el problema planteado por una baja resolución temporal de promedios anuales, se tomaron como referencia estaciones de aforo de la DGA con promedios diarios durante todo un año. Allí donde no había información (no superiores a un mes) se interpoló linealmente para completar la serie temporal. De estas series temporales con promedios diarios durante un año se extrajo el porcentaje que supone cada día en la descarga total anual y tal porcentaje se aplicó a los ríos/sub-cuencas de la cuenca hídrica en la cual se encuentra dicho río con registro de promedio diario. De esta manera, las sub-cuencas presentan una curva de distribución de la descarga diaria durante un año de distinta magnitud pero que siguen el mismo patrón de distribución.



Índices estadísticos

Error Medio Cuadrático (RMSE)

Es una medida cuadrática que mide la media de la magnitud del error, no muestra la dirección de las desviaciones.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_{obs,i} - X_{model,i})^2}{n}}$$

En donde,

x = dato del pronóstico
 y = dato de la observación
 n = número de datos.

Error medio cuadrático normalizado:

Forma no-dimensional del RMSE, está normalizado al rango de datos observados.

$$NRMSE = \frac{RMSE}{X_{obs,max} - X_{obs,min}} * 100$$

Coefficiente de Correlación

Es una medida estadística que trata de medir la relación entre dos variables, oscila entre -1 y 1, siendo el signo, la dirección de la relación (proporcional o inversamente proporcional) y la cifra, la magnitud de la relación

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

Cov_{xy} = covarianza entre el modelo y la observación,
 S_x = desviación estándar del modelo
 S_y = desviación estándar de la observación.

Escenarios de Variabilidad Anual

A fin de representar todos aquellos escenarios ambientales característicos de cada época o estación de un año promedio se tomó una alternativa a la propuesta inicial de simular 1 año entero. En su lugar se decidió, a partir de un modelo hidrodinámico validado, realizar 4 simulaciones que representaran los factores ambientales típicos más extremos de cada estacionalidad (invierno - verano). Este cambio en el planteamiento obedece a las siguientes razones:



- Al simular escenarios ideales y característicos de cada estacionalidad se está representando 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. Si se logran tomar medidas de actuación para estos eventos extremos también se está dando solución a cualquier otro posible evento de menor entidad.
- Estos escenarios ambientales debido a su diseño (especificación de sus forzantes) y su corta duración (4 días) permiten identificar individualmente los procesos que controlan la dispersión.
- El tiempo de cómputo es reducido considerablemente (hasta 15 veces menor).

Los 4 escenarios que se plantean tienen en cuenta la variabilidad estacional de los 3 forzantes principales: marea, agua dulce y viento. La marea es incluida dentro de la variabilidad en periodos de cuadratura (mínima amplitud del nivel del mar) y sicigia (máxima amplitud del nivel del mar). El agua dulce en la X y XI regiones procede principalmente de aportes de agua dulce, aunque en el sector del estero Elefantes (Laguna San Rafael) el aporte glaciario es el mayoritario. Sin embargo, a la fecha aún no se dispone de cuantificación de cómo, cuándo y cuánto aportan los glaciares al medio, por lo que la estacionalidad en los flujos de agua dulce al medio marino se basa en el comportamiento de los ríos que en esta latitud son de un amplio rango de regímenes: pluvial, nival, glaciario y mixto (Dussailant *et al.*, 2012). En su gran mayoría el régimen de caudal y su variabilidad estacional corresponde a ríos de carácter pluvial y/o mixto, por lo que haciendo una aproximación simplista tomaremos los mayores caudales en invierno y los menores en verano. En cuanto al viento (ya que la presión atmosférica es constante y de referencia en el modelo) la estacionalidad invierno - verano es marcada por la posición del centro de altas presiones del pacífico sur meridional y su migración hacia el Norte durante el invierno (Batten *et al.*, 1995). El cambio en posición relativa de este centro de altas presiones respecto de centros de bajas presiones más al sur a través de las estaciones condiciona la dirección del viento característico de estas latitudes. En invierno el viento promedio es noroeste, mientras en verano es de procedencia suroeste (Letelier *et al.*, 2011).

Con estos antecedentes de la variabilidad estacional de los forzantes, los modelos que representan los distintos escenarios ambientales de variabilidad intra-anual son:

- Invierno Cuadratura: viento NW, aporte agua dulce aumentado en un 50%, ciclo mareal en periodo de cuadratura.
- Invierno Sicigia: viento NW, aporte agua dulce aumentado en un 50%, ciclo mareal en periodo de sicigia.
- Verano Cuadratura: viento SW, aporte agua dulce reducido en un 50%, ciclo mareal en periodo de cuadratura.
- Verano Sicigia: viento SW, aporte agua dulce reducido en un 50%, ciclo mareal en periodo de sicigia.



3.2 Objetivo N°2

Utilizando los modelos actualmente implementados y evaluados en las dos regiones objetivo, llevar a cabo un análisis de la conectividad para los distintos sectores seleccionados e individualizados en el estudio. Dicho análisis deberá desarrollarse tomando en cuenta la variabilidad anual de estos sistemas de acuerdo a las condiciones específicas de cada época del año. Se deberá seleccionar el tamaño de las unidades de trabajo sobre las que buscará la conectividad, las cuales deberán ser mayor que un centro de cultivo pero menor a una agrupación de concesiones (ACS).

Para dar un orden consecuente dentro de la lógica metodológica de este informe, en este objetivo se aborda la metodología relacionada al transporte de partículas, quedando para el objetivo siguiente los análisis de conectividad y tamaño de las unidades de trabajo.

Sobre los resultados obtenidos de los 4 modelos hidrodinámicos realizados con MIKE3 que representan los escenarios estacionales se desacoplaron sendos modelos de dispersión de partículas, paso previo al cálculo de las estadísticas de conectividad, que den una medida cuantitativa de la dispersión de las partículas en cada punto del dominio (determinado por la escala de las celdas de las matrices de conectividad).

Los 4 modelos de dispersión de partículas están diseñados igual. En ellos las partículas son liberadas en igual cantidad (10) en cada paso de tiempo de inicio a fin, para un total de 7200 pasos de tiempo. Cada paso de tiempo es 1 minuto, por lo que el tiempo simulado en cada modelo es de 5 días. Por lo tanto habrá un máximo de 72000 partículas en dispersión. No obstante de esos 5 días el primero es descartado por ser el tiempo necesario estimado para la estabilización del sistema, y de los 4 días restantes y dado el horizonte empleado (72 horas), 14400 partículas serán tomadas en cuenta en los cálculos estadísticos de conectividad en la siguiente etapa.

Con el objetivo de dar una cobertura geográfica total del dominio y de dar mayor robustez a la probabilística, las partículas que se liberan dentro del dominio lo hacen por toda la superficie del área que queremos dividir en sub-áreas o cajas y no en locaciones discretos (las cuales podrían corresponder con los centros de cultivo o barrios). Esto es así para que haya un mayor número de partículas en movimiento, aumentando el número de dispersiones y datos que soportan las estadísticas de conectividad. En el caso particular del modelo regional Chiloé-Aysén, el área del dominio hidrodinámico se corresponde con el área que se tomará para determinar la conectividad y que se subdividirá en cajas y es por tanto sobre todo esta área (igual al dominio hidrodinámico) por donde se esparcirán las partículas a una tasa de 10 por paso de tiempo. Estas mismas partículas al ser incorporados por el modelo de dispersión sobre el área especificada lo hacen de manera aleatoria, sin un patrón establecido; esto no debe suponer un problema pues lo importante no es así el número bruto de partículas que van de la caja A a B (o al revés), sino la proporción o porcentaje de ellas. Todas las partículas ingresan al dominio a una profundidad de 1 metro bajo la superficie. El motivo de seleccionar esta profundidad es porque es la capa más superficial a la que un patógeno de un centro de cultivo salmonícola podría empezar su dispersión y además es la capa más sujeta a la acción de motores en la hidrodinámica por forzantes meteorológicos y aportes fluviales.



3.3 Objetivo N°3

Elaborar una matriz de conectividad entre las diferentes unidades de trabajo por cada macrozona incluida en el área geográfica del proyecto, estableciendo las probabilidades de contaminación entre estas distintas unidades.

Las unidades de trabajo sobre las que se buscará la conectividad son, como se definió anteriormente, las sub-áreas o cajas en que se dividió el área total que en este caso se corresponde con el dominio del modelo hidrodinámico. Siendo el objetivo del proyecto determinar cuál es la conectividad existentes entre agrupaciones de concesiones de centros salmoneros (o barrios) y desde estas agrupaciones hacia/desde cualquier otro lugar, el tamaño de las unidades de trabajo o cajas debe ser igual o menor a la extensión promedio de dichos barrios. El tamaño de un barrio es variable oscilando entre los 200 y los 1000 km² (Figuras 23 y 24). Por tanto el tamaño de las cajas debe ser inferior a 200 km²; en el presente proyecto elegimos cajas de una superficie de 120 km² aproximadamente (0.1° de latitud/longitud) para con este tamaño poder determinar la conectividad del barrio más pequeño con creces.

Además del tamaño también varía la forma de los barrios, adquiriendo formas irregulares en muchos casos; sin embargo al definir el tamaño y forma de una caja en los cálculos de conectividad sólo podemos dar una forma igual para todas las cajas, y esta forma debe ser la de un paralelepípedo regular. Se eligió una forma de cuadrado por no primar un eje de dirección sobre otro. Por tanto siempre habrá alguna caja que en el terreno comparta su superficie entre dos (o puede que incluso más) barrios. Este es un motivo más para haber elegido un tamaño de caja bastante menor (60% aprox.) del tamaño más pequeño de un barrio, para minimizar estas inevitables imprecisiones entre las cajas y los barrios que representan.

Las cajas ocupan todo la superficie que supone el dominio hidrodinámico y que da cobertura tanto oceánica como a las zonas de canales y fiordos de todo el área propuesta como objetivo de conectividad en el presente proyecto. Hay un total de 3417 cajas que se distribuyen en 51 en el eje longitudinal por 67 en eje latitudinal, con un tamaño de lado de 0.1°, empezando desde la esquina inferior izquierda del dominio (77.1° W, -46.9° S) tal como se muestra en la Figura 25. Como se aprecia en la Figura 25 no todas las cajas contienen superficie acuática en proporción alguna y, por tanto, no serán tomadas en cuenta dentro de los cálculos estadísticos de conectividad.

Con la hidrodinámica ya evaluada, los modelos que dan representación a la variabilidad estacional elaborados y sus correspondientes modelos desacoplados de dispersión de partículas sólo resta dar la información geográfica de las unidades de trabajo arriba detalladas (tamaño y posición de las cajas) junto con los pasos de tiempo que se van a someter a análisis estadístico y el horizonte/s upstream/downstream dentro de los script de Visual Basic (Microsoft® Windows Based Script Host) en que se ejecutan. Como dijimos de los 5 días de duración de cada uno de los 4 modelos estacionales el primero se elimina por ser el tiempo aproximado que necesita el sistema para alcanzar el equilibrio hidrodinámico. El horizonte, dado por el tiempo de vida promedio entre



huéspedes de uno de los patógenos de mayor influencia como es el virus ISA, es de 3 días (72 horas).

Una vez obtenidas las matrices de conectividad (tantas como número de cajas o unidades de trabajo activas haya multiplicadas por el número de horizontes que se quieran conocer, tanto para la conectividad upstream como downstream) la información probabilística contenida en estas matrices es transformada en archivos de formato shape que georreferencian dicha información. Estos archivos shape serán empleados en la visualización de los resultados.

3.4 Objetivo N°4

Proveer la información obtenida de acuerdo a la compatibilidad necesaria para permitir su uso por los actuales sistemas implementados en la Subsecretaría de pesca, especialmente para el caso de modelos hidrodinámicos e información compatible con sistemas de información geográfica.

Para cumplir con este objetivo específico y dada la falta de competencias propias en materia de creación y gestión de bases de datos georreferenciadas y visualización por medio de un sistema de información geográfica (SIG) montado en una página web o geoportal, se decidió recurrir a externalizar esta tarea.

Se realizó una prospección entre consultoras nacionales para decidir cuál ofrecía una propuesta más adecuada a las necesidades del proyecto. Entre los diferentes criterios de elección se dio prioridad a aquella propuesta técnica que facilitara en posteriores etapas la autogestión y administración de la base de datos y geoportal web por parte de IFOP, todo ello dentro de los límites económicos dados por el presupuesto del proyecto; para ello la base de datos ojalá debiera estar soportada por algún software de formato libre y en la asesoría debería incluirse una capacitación a personal de IFOP para la gestión y administración de la base de datos y geoportal web. También se tuvieron en cuenta aspectos como ajustarse a plazos de ejecución y entrega y localización de la consultora (en caso de eventuales desplazamientos y capacitación). Además de la visualización de la información a través de un geoportal se ha pensado en transferir la información a un soporte portable como pueden ser archivos compatibles con Google Earth.

Se realizaron contactos con hasta 6 consultores externos: de los cuales 3 consideraron que la propuesta de IFOP no estaba al alcance de sus recursos y competencias, 1 no pudo comprometerse con los plazos de entrega y 2 presentaron sus propuestas técnicas detalladas.

- TERAMAPS: Teramaps Limitada es una consultora con domicilio en el área metropolitana de Santiago de Chile. Se puede visitar en el sitio web <http://www.teramaps.cl>. Basándose en el sistema Arcgis Server fusiona los diversos archivos Shapefile (ESRI), crea la base de datos geográfica en un geoportal por medio del ingreso de los archivos shape y crea un mapa (junto con una URL válida) para ser montada en la correspondiente web designada por el IFOP. Además también realizarán una transformación de la información a formato KMZ compatible con Google Earth. También contemplan



una capacitación en sus oficinas con el objetivo de instruir a personal IFOP en el uso básico de la herramienta Arcgis, preparación de los datos e ingreso de éstos al geoportal. Teramaps ofrece la garantía de contar con el único profesional en Chile certificado por Google Maps, certificación en Deployment en Google Maps y trabaja en consorcio con Geoinfo (empresa con 17 años de experiencia en ambiente Arcgis).

- GEAINTEC: Geaintec S.A. (<http://www.geaintec.com>) es una consultora de Concepción, que desde el año 2002 da soluciones en materia de información geográfica, avalada por el Instituto de Cartografía Americana a través del Instituto Geográfico Militar. Participa de la plataforma FENIXGIS en la cual se comparten tareas y proyectos entre socios y aliados por todo el mundo. Geaintec trabaja bajo la metodología METRICA V3 en la que se distinguen los procesos principales (planificación, desarrollo y mantenimiento) e interfaces (gestión de proyectos, aseguramiento de calidad y seguridad).

Tanto por propuesta técnica como por coste de asesoría vs presupuesto, IFOP se ha decantado por la propuesta de Teramaps Limitada. Tan pronto se tuvo esta decisión, se procedió a la entrega de la información por nuestra parte.

Teramaps creara entonces el geoportal en un dominio (ifop.teramaps.cl) que estará ligado a la página web que el laboratorio de Oceanografía Física de IFOP en Castro está desarrollando actualmente (<http://www.iproach.cl>). En esta página web además del mencionado geoportal habrá información de las tareas, actividades y proyectos que desde el año 2011 se vienen desarrollando por parte del equipo de oceanografía física, como campañas oceanográficas, caracterización del medio físico, y modelación numérica aplicada a la consecución de pronósticos marinos y conectividad.

Por motivos de seguridad, en una primera etapa los datos no serán de acceso público hasta que se estime conveniente. También se contempla ligar en un futuro próximo la visualización del geoportal a la página web del IFOP (<http://www.ifop.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.

Reunión coordinación N°1

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

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

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

Objetivo de la reunión: Estado Ejecución de Proyecto

- IFOP indica a grandes rasgos la metodología que se va a utilizar en el desarrollo del proyecto, específicamente en la definición del área de las cajas en las cuales se realizará la conectividad acordando que éstas deben ser de un tamaño superior a un centro de cultivo pero inferior a una agrupación de concesiones acuícolas (barrio).
- IFOP indica que los periodos de hidrodinámica que deben ser generados se encuentran en la escala anual, de manera tal que las dispersiones contengan en sus resultados la variabilidad a la que se someten durante los cambios estacionales.

Reunión coordinación N°2

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

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

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



Objetivo de la reunión: Estado: Ejecución de Proyecto

- IFOP indica que se están realizando las calibraciones en todos los modelos hidrodinámicos implementados, por periodos cortos (aproximado 5 días). A estas simulaciones se le están evaluando distintos parámetros para el mejoramiento de la hidrodinámica y por ende a los resultados de dispersión de partículas.

Reunión coordinación N°3

Cuándo: 10 de septiembre de 2014 15:00 – 17:30 (CLST)

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

1. Susana Giglio, Subpesca
2. Gastón Vidal, IFOP
3. Elías Pinilla, IFOP
4. Gabriel Soto, IFOP
5. Cristian Ruiz, IFOP

Objetivo de la reunión: Estado Ejecución de Proyecto

- Ante el cambio de profesionales en la contraparte técnica de Subpesca y la integración de Susana Giglio como reemplazante de Juan Pablo Belmar. Se realiza esta reunión para incorporar e informar a la nueva profesional de Subpesca sobre metodologías y avances en el desarrollo de este proyecto.

Reunión coordinación N°4

Cuándo: 20-21 de abril de 2015

Ubicación: CTPA Putemún- IFOP -Castro

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

Objetivo de la reunión: Estado Ejecución de Proyecto

- Se presenta estado de avance del proyecto y los posibles usos futuros de este tipo de aplicaciones.
- Se explica con mayor detalle la metodología utilizada para
- Se explica que resultados de la aplicación van a estar alojados en un sistema de información geográfica en un sitio web para el uso de la Subsecretaría de Pesca Acuicultura.



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.

Debido a la logística de la campaña oceanográfica IFOP invierno-primavera 2011 en Chonos Sur, los equipos registraron durante un periodo de 45 días (**Tablas 1, 2, 3 y 4**). Con el fin de optimizar los tiempos de cómputo de los modelos numéricos de MIKE3 y aprovechar los resultados para evaluarlos frente al mayor número de mediciones durante el mayor tiempo posible, la simulación del modelo regional Chiloé-Aysén se dividió en 2 simulaciones: la primera entre el 19 de Septiembre y el 11 de Octubre, y la segunda entre el 5 y el 26 de Octubre. Los resultados de la primera simulación (19 de Septiembre al 11 de Octubre) se utilizaron en la evaluación de la correntometría lagrangiana con los derivadores de Chonos Sur y del mar interior de Chiloé y de correntometría euleriana con ADCP remolcado. Los resultados de la segunda simulación (5 al 26 de Octubre), se solapan plenamente con el periodo de registro de mareógrafos y ADCP fondeado, empleándose en la evaluación de las mediciones de estos equipos, series de tiempo de la anomalía del nivel del mar y correntometría euleriana respectivamente.

Anomalía del nivel del mar

La posición y tiempo de registro de los mareógrafos empleados en la evaluación del modelo, y cuyas series de tiempo fueron sometidas a análisis armónico para crear series pronóstico allí donde no ofrecían cobertura temporal, se detallan en la **Tabla 1** y la **Figura 12**.

La evaluación de los resultados comienza el 5 de Octubre en el mínimo de amplitud de oscilación del nivel del mar de una cuadratura, se completa un ciclo de sicigia-cuadratura, y termina el 26 de Octubre en el máximo de amplitud de una nueva sicigia.

CANAL CHACABUCO

En la **Figura 26** se muestran las series de tiempo de la anomalía del nivel del mar correspondiente al mareógrafo (azul) y al modelo regional Chiloé-Aysén (rojo).

Los índices estadísticos entre ambas series de tiempo entre el 5 y el 26 de Octubre del 2011 son un error NRMSE = 7.32 % y un Coeficiente de Correlación = 95.15 % (**Tabla 5**).

ISLA COLORADA

En la **Figura 27** se muestran las series de tiempo de la anomalía del nivel del mar correspondiente al mareógrafo (azul) y al modelo regional Chiloé-Aysén (rojo).

Los índices estadísticos entre ambas series de tiempo entre el 5 y el 26 de Octubre del 2011 son un error NRMSE = 6.28 % y un Coeficiente de Correlación = 97.2 % (**Tabla 5**).



ISLOTE QUETROS

En la **Figura 28** se muestran las series de tiempo de la anomalía del nivel del mar correspondiente al mareógrafo (azul) y al modelo regional Chiloé-Aysén (rojo).

Los índices estadísticos entre ambas series de tiempo entre el 5 y el 26 de Octubre del 2011 son un error NRMSE = 6.29 % y un Coeficiente de Correlación = 97.05 % (**Tabla 5**).

MELINKA

En la **Figura 29** se muestran las series de tiempo de la anomalía del nivel del mar correspondiente al mareógrafo (azul) y al modelo regional Chiloé-Aysén (rojo).

Los índices estadísticos entre ambas series de tiempo entre el 5 y el 26 de Octubre del 2011 son un error NRMSE = 7.01 % y un Coeficiente de Correlación = 97.62 % (**Tabla 5**).

FIORDO COMAU

En la **Figura 30** se muestran las series de tiempo de la anomalía del nivel del mar correspondiente al mareógrafo (azul) y al modelo regional Chiloé-Aysén (rojo).

Los índices estadísticos entre ambas series de tiempo entre el 5 y el 26 de Octubre del 2011 son un error NRMSE = 7.63 % y un Coeficiente de Correlación = 97.82 % (**Tabla 5**).

CANAL CHACAO

En la **Figura 31** se muestran las series de tiempo de la anomalía del nivel del mar correspondiente al mareógrafo (azul) y al modelo regional Chiloé-Aysén (rojo).

Los índices estadísticos entre ambas series de tiempo entre el 5 y el 26 de Octubre del 2011 son un error NRMSE = 7.17 % y un Coeficiente de Correlación = 96.35 % (**Tabla 5**).

Correntometría euleriana ADCP fondeado

La posición y tiempo de registro de los ADCP fondeados se especifica en la **Tabla 2** y la **Figura 12**. La velocidad entregada por el equipo es descompuesta en sus componentes ortogonales U y V y expresada en m/s.

CANAL CHACABUCO

La **Figura 32** muestra las series de tiempo de la componente U de la velocidad a 5, 10, 20 y 40 metros de profundidad correspondientes al registro con ADCP (azul) y al modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre del 2011. La **Figura 33** muestra la componente V. En líneas a trazos se muestran las respectivas series de tiempo del flujo residual.

Los índices estadísticos de cada componente y a cada profundidad se muestran en la **Tabla 6**, figurando entre paréntesis los respectivos índices correspondientes a los flujos residuales.

En la componente U se presentan errores entre el 10 y el 20% y correlaciones entre 80 y 90%. En la componente V los errores fluctúan entre el 10 y el 25% y las correlaciones entre 45 y 80%.



CANAL DARWIN

La **Figura 34** muestra las series de tiempo de la componente U de la velocidad a 5, 10, 20 y 30 metros de profundidad correspondientes al registro con ADCP (azul) y al modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre del 2011. La **Figura 35** muestra la componente V. En líneas a trazos se muestran las respectivas series de tiempo del flujo residual.

Los índices estadísticos de cada componente y a cada profundidad se muestran en la **Tabla 7**, entre paréntesis los respectivos índices correspondientes a los flujos residuales.

En la componente U se presentan errores entre el 15 y el 40% y correlaciones entre -5 y 30%. En la componente V los errores son cercanos a 25% y las correlaciones se sitúan entre 50 y 65%.

PASO CASMA

La **Figura 36** muestra las series de tiempo de la componente U de la velocidad a 5, 10, 20 y 40 metros de profundidad correspondientes al registro con ADCP (azul) y al modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre del 2011. La **Figura 37** muestra la componente V. En líneas a trazos se muestran las respectivas series de tiempo del flujo residual.

Los índices estadísticos de cada componente y a cada profundidad se muestran en la **Tabla 8**, entre paréntesis los respectivos índices correspondientes a los flujos residuales.

En la componente U se presentan errores entre el 20 y el 40% y correlaciones hasta el 40%. En la componente V los errores son cercanos al 15% y las correlaciones fluctúan entre el 15 y 40%.

Correntometría euleriana con ADCP remolcado

En la correntometría con ADCP remolcado se muestran secciones transversales de la componente ortogonal principal del flujo residual correspondientes a las transectas que realizó la embarcación durante el tiempo en que el equipo estuvo registrando. Para ello la componente principal de la velocidad es sometida a un filtro de paso bajo Lanczos a fin de eliminar las frecuencias asociadas a los flujos mareales, quedando el flujo residual asociado a las más bajas frecuencias.

La evaluación de los resultados del modelo con este tipo de mediciones no está basada en índices estadísticos ni cuantitativos, sino más bien propiedades cualitativas como la formación de capas y estructuras verticales y transversales.

Las coordenadas de los vértices de los transectos y el tiempo de registro de los ADCP remolcados se especifican en la **Tabla 3** y la **Figura 12**.

FIORDO AYSÉN

Las **Figuras 38** y **39** muestran, respectivamente, los flujos residuales de la componente U de la velocidad registrada con ADCP remolcado y en el modelo regional Chiloé-Aysén en un transecto de orientación SW-NE de 2800 metros de longitud y una profundidad de 200 metros aproximadamente.



ESTERO QUITRALCO

Las **Figuras 40 y 41** muestran, respectivamente, los flujos residuales de la componente V de la velocidad registrados con ADCP remolcado y en el modelo regional Chiloé-Aysén en un transecto de orientación NW-SE de 5200 metros de longitud y una profundidad de 100 metros aproximadamente.

CANAL DARWIN

Las **Figuras 42 y 43** muestran, respectivamente, los flujos residuales de la componente U de la velocidad registrada con ADCP remolcado y en el modelo regional Chiloé-Aysén en un transecto de orientación S-N de 3100 metros de longitud y una profundidad de 120 metros aproximadamente.

CANAL COSTA

Las **Figuras 44 y 45** muestran, respectivamente, los flujos residuales de la componente V de la velocidad registrados con ADCP remolcado y en el modelo regional Chiloé-Aysén en un transecto de orientación W-E de 3000 metros de longitud y una profundidad de 280 metros aproximadamente.

Correntometría lagrangiana con derivadores

La evaluación de este tipo de mediciones es determinada por la comparativa de las trayectorias del derivador en el terreno y el derivador simulado, y posición relativa del punto final de la deriva de ambos derivadores respecto del punto de comienzo. Además se aportan datos acerca de la deriva en términos de distancia total recorrida (junto a su velocidad promedio) y distancia neta (distancia en línea recta entre el punto de partida y el punto final).

La posición de liberación de los derivadores y el tiempo de registro se detallan en la **Tabla 4** y la **Figura 12**.

CANAL CHACABUCO

En la **Figura 46** se muestran las trayectorias seguidas por los derivadores de terreno (azul) y simulado (rojo), liberados en la boca oeste del canal Chacabuco. Como se indica en la **Tabla 9**, recorren similares distancias a un promedio de 27 cm/s.

CANAL COSTA

En la **Figura 47** se muestran las trayectorias seguidas por los derivadores de terreno (azul) y simulado (rojo), liberados al interior del canal Costa. Aunque las trayectorias de ambos son de igual largo, la distancia neta en el modelo es algo más del doble que en el terreno (**Tabla 10**).

FIORDO AYSÉN

En la **Figura 48** se muestran las trayectorias seguidas por los derivadores de terreno (azul) y simulado (rojo), liberados en la boca del fiordo Aysén. Ambos derivadores tienen similares distancias netas, en terreno la distancia recorrida es un aproximadamente un 30% mayor, y así la velocidad promedio (**Tabla 11**).



FIORDO REÑIHUE

En la **Figura 49** se muestran las trayectorias seguidas por los derivadores de terreno (azul) y simulado (rojo), liberados en la boca del fiordo Reñihue. El derivador de terreno recorre 14 km por 9 del simulado, aunque las distancias netas son parecidas (**Tabla 12**).

DALCAHUE

En la **Figura 50** se muestran las trayectorias seguidas por los derivadores de terreno (azul) y simulado (rojo), liberados en las cercanías de Dalcahue. Como se indica en la **Tabla 13**, la diferencia en distancia recorrida es cercana al kilómetro.

SENO RELONCAVÍ

En la **Figura 51** se muestran las trayectorias seguidas por los derivadores de terreno (azul) y simulado (rojo), liberados en el sector sur del seno de Reloncaví próximo a su salida por la isla Queullín. Como se indica en la **Tabla 14**, las distancias totales son casi el doble en el terreno, pero la diferencia en distancias netas es menor.

5.2 Objetivo N°2

Sobre los resultados desacoplados de los modelos hidrodinámicos implementar los respectivos modelos de dispersión de partículas cuyas salidas sirvan de base para el desarrollo de los cálculos estadísticos de conectividad.

A partir de la hidrodinámica desacoplada de los 4 modelos estacionales, Invierno-Cuadratura, Invierno-Sicigia, Verano-Cuadratura y Verano-Sicigia, se implementaron los respectivos modelos de dispersión de partículas. Como se especificó anteriormente, en estos modelos desacoplados, las partículas, cuyas derivas van a servir para realizar los cálculos estadísticos sobre los que se determine la conectividad, son diseminadas aleatoriamente por toda la superficie del dominio a una tasa de 10 partículas por paso de tiempo. Si una partícula es liberada sobre superficie terrestre vuelve a ser liberada en el siguiente paso de tiempo y así sucesivamente hasta un máximo de 10 veces. Es por este motivo que el número de cajas activas difiere entre los diferentes modelos estacionales; para cada uno de estos modelos estacionales se desacopla un modelo de dispersión de partículas propio, pero con las mismas características entre ellos. Sin embargo, las partículas que son liberadas en cada uno de los 4 modelos de dispersión de partículas lo hacen a igual ritmo (10 partículas por paso de tiempo) y aleatoriamente sobre toda la superficie del dominio, pero de distinta forma entre un modelo y otro. Cajas cuya superficie acuática sea muy pequeña es posible que no terminen recibiendo ninguna partícula en unos modelos desacoplados de dispersión, mientras que en otros modelos sí que puede que esas mismas cajas reciban alguna partícula, lo que conlleva a la diferencia en número de cajas que participan de la conectividad entre unos modelos y otros (**Figuras 52- 59**).

Los modelos estacionales fueron construidos a semejanza del modelo regional Chiloé-Aysén en sus componentes básicos, salvo aquellos que definirán la variabilidad estacional, dícese los forzantes atmosféricos y la entrada de agua dulce al sistema marino desde ríos y glaciares. Además, siendo la



finalidad del proyecto la determinación de la conectividad en materia de prevención y actuación frente a patógenos relacionado con la salmonicultura, estos modelos estacionales son de una duración acorde al horizonte adecuado. Este horizonte es dado por el tiempo promedio de vida de dichos patógenos como el virus ISA y ha sido estimado en 3 días. Por tanto, el mínimo tiempo requerido para que un modelo y los resultados de su modelo desacoplado de dispersión de partículas, sean válidos será de al menos 3 días. Para garantizar una cantidad razonable de partículas en dispersión, sin compromiso de los tiempos de cómputo y obviando la eliminación de las primeras 24 horas del modelo por los consabidos problemas de estabilidad en un arranque “cold start”, los modelos simularon por 5 días cada uno. De los 4 días restantes, sólo las partículas que se liberen en las primeras 24 horas se utilizarán para el cálculo de la conectividad *upstream/downstream*. A la descrita tasa de 10 partículas por paso de tiempo (60 segundos) habrá un máximo de 14400 partículas en circulación (hay que descartar aquellas partículas que tras 10 sueltas siguen cayendo sobre tierra y son eliminadas). Sin embargo la suma total de partículas es superior a tal cifra. Ello es debido a que cada vez que una partícula entra a una caja (en el caso de conectividad *upstream*) o sale de una caja (para el caso de conectividad *downstream*) esa partícula cuenta una vez para la correspondiente base para el cálculo estadístico de la conectividad de la caja en la que haya entrado o salido. Por lo mismo nótese que el número de egresos (conectividad *downstream*) e ingresos (conectividad *upstream*) de una misma caja no son iguales; ni siquiera el número total de partículas o la suma total de egresos e ingresos porque las partículas que salen de los límites del dominio se pierden y aunque vuelva a entrar algún volumen de agua al dominio (por ejemplo con la marea), ese volumen de agua carecerá de partículas.

Esto es observable en las **Figuras 52 y 53** que representan el número de partículas de la conectividad *upstream* y *downstream*, o mejor dicho el número de egresos e ingresos de cada caja, en el modelo estacional de Invierno-Cuadratura. Las **Figuras 54 y 55** hacen lo propio para el modelo estacional Invierno-Sicigia, las **Figuras 56 y 57** para el modelo estacional Verano-Cuadratura y las **Figuras 58 y 59** para el modelo estacional Verano-Sicigia.

5.3 Objetivo N°3

Definir el tamaño de las unidades de trabajo sobre las que buscará la conectividad, las cuales deberán ser mayor que un centro de cultivo pero menor a una agrupación de concesiones (barrios). Elaborar matrices de conectividad entre las diferentes unidades de trabajo por cada macrozona incluida en el área geográfica del proyecto, estableciendo las probabilidades de contaminación entre estas distintas unidades.

Dado que este objetivo se refiere a la elaboración de matrices de conectividad y que su principal resultado son matrices de datos que pueden ser presentados en forma gráfica para una mejor comprensión, es que estos resultados son presentados en el geoportal interactivo ifop.teramaps.cl y que son detallados de mejor manera en el objetivo 4. Se optó por esta forma de presentación de las matrices de conectividad debido al enorme volumen de resultados (2500 cajas activas aproximadamente en cada modelo) y la difícil interpretación de los resultados al no estar georreferenciados ya que se requieren de códigos informáticos complejos para su lectura.



Sin embargo, de todas formas las matrices de conectividad upstream/downstream a 72 horas de horizonte de los 4 modelos estacionales elaborados a partir del modelo regional Chiloé-Aysén son incluidas en la base de datos adjunta del proyecto en archivos de texto ASCII. También se adjuntan archivos de formato shape (.shp) georreferenciados y creados a partir de dichas matrices, y que son los cuales soportan la información que se muestra en el geoportal.

5.4 Objetivo N°4

Proveer la información obtenida de acuerdo a la compatibilidad necesaria para permitir su uso por los actuales sistemas implementados en la Subsecretaría de pesca, especialmente para el caso de modelos hidrodinámicos e información compatible con sistemas de información geográfica.

Los resultados finales se presentan en forma de mapas interactivos de los cuales el usuario puede obtener la información requerida del box o caja que se quiera consultar seleccionando dicha caja, el tipo de conectividad (*upstream/downstream*) y el horizonte deseado (en este caso un único horizonte a 72 horas al que se añadirán más en siguientes etapas de desarrollo del proyecto). Las cajas se dispondrán sobre un mapa de manera que el usuario sepa en todo momento a que parcela del espacio físico se está refiriendo la información.

Varias han sido las mejoras introducidas en esta herramienta de visualización respecto de las propias de MIKE3D que son utilizadas por ejemplo en el caso del mar del Norte (**Figuras 3 y 4**). En las **Figuras 3 y 4** no sabemos a qué caja se está refiriendo cada una de las conectividades; para saberlo tendríamos que recurrir a inspeccionar el archivo accesorio que se crea adicionalmente cuando se ejecutan las estadísticas de conectividad. En tal archivo (.csv compatible con Excel) se detalla cada una de las cajas que contienen información de conectividad, indicándose cuál es su posición en el eje de coordenadas y respecto del total de cajas. Sabiendo cual es el número de caja que estamos visualizando (referido como *timestep*), nos tendríamos que ir a dicho archivo, ver su posición en el eje X,Y e ir a dicha posición en el mapa. Todo este complejo proceso debe realizarse “manualmente”, con los consabidos riesgos de error que entraña. En el geoportal IFOP cada vez que un usuario selecciona una caja lo hace navegando con el puntero del *mouse*, y no seleccionando un *timestep* que no se sabe automáticamente a qué caja hace referencia, esta razón hace preferible para cualquier usuario la utilización directa del geoportal en oposición a las bases de datos.

A través del geoportal IFOP elegimos la caja de la que queremos extraer información siguiendo los siguientes pasos:

- a) Accedemos a través de nuestro navegador a la página ifop.teramaps.cl o siguiendo el enlace en la página web del grupo de oceanografía del IFOP Castro <http://www.iproach.cl> (**Figura 60**).
- b) Situamos el puntero de nuestro *mouse* sobre el área de nuestro interés, la cual subyace por debajo de dicha caja y es visible en todo momento, permitiendo una rápida orientación. Se navega como en cualquier otro mapa de *Google Maps* (**Figura 61**).



- c) Click izquierdo para activar la caja que queremos inspeccionar. Dicha caja se destaca sobre las demás (bordes de color rojo) y se despliega una ventana emergente (**Figura 62**). En la parte superior de esta ventana hay un indicador o ID del número de la caja seleccionada respecto del total.
- d) En la parte inferior de la ventana emergente seleccionamos el horizonte temporal deseado (en caso de que haya más de uno) y el tipo de conectividad que queremos inspeccionar (*upstream/downstream*).
- e) Click sobre la pestaña “filtrar” (**Figura 63**).
- f) Automáticamente se muestra el mapa de probabilidades asociado a la caja seleccionada y el horizonte y conectividad definidos. La caja que seleccionamos se mantiene activada con sus bordes en color rojo (**Figura 64**). De esta manera podemos saber en todo momento cual es la caja de la que estamos viendo su información.
- g) En la misma ventana emergente se indica el ID de la caja, tipo de conectividad y horizonte seleccionados. Se adjunta una leyenda con escala cromática donde se dan los intervalos en que se registran las probabilidades de las cajas que contienen información. Las probabilidades se expresan en el rango absoluto 0-1 (1 = 100%).
- h) Si se quiere conocer con más detalle la probabilidad de un cierta caja tan sólo se debe hacer click con el botón izquierdo y una nueva ventana emergente mostrará la probabilidad junto a la información adicional de ID de la caja, tipo de dispersión y horizonte (**Figura 65**).
- i) Para volver a realizar una nueva consulta click en la pestaña “Quitar” de la ventana emergente.

Estos mapas interactivos se localizan en un geoportal soportado por una base de datos georreferenciada en donde se almacena la información, en este caso los archivos *shape* que contienen las matrices de conectividad. Este geoportal (ifop.teramaps.cl), desarrollado por Teramaps Limitada, estará ligado a la página web del grupo de Oceanografía del IFOP en Castro, <http://www.iproach.cl>, y ésta a su vez a la página web del IFOP (<http://www.ifop.cl>).



6. DISCUSIÓN

Los resultados de conectividad, es decir, las probabilidades de arribo (en el caso de la conectividad upstream) o dispersión (conectividad downstream) de partículas son resultados cuya validez dependen directamente a su vez de la validez del modelo hidrodinámico a partir del cual fueron determinados. No es posible dar validez a los resultados de conectividad per se, pues si no es imposible, al menos logísticamente, es muy complicado y costoso a esta escala realizar mediciones de deriva de partículas, para todas y cada una de las unidades de trabajo o cajas, que puedan ser empleadas para evaluar las dispersiones desde dichas cajas. Por esto, el grado de confianza y validación de los resultados de conectividad deben ser tasados en función del grado de validación de su modelo hidrodinámico. En la misma manera que validar las conectividades resulta una tarea cuasi imposible de realizar debido al elevadísimo número de conectividades que se pueden establecer, también lo es la interpretación y discusión de los resultados de conectividad. El número de posibilidades (o conectividades) para un supuesto de 2500 cajas activas y un promedio conservacionista de 3 conectividades por cada caja es de 7500 conectividades upstream y 7500 conectividades downstream para cada uno de los 4 escenarios de variabilidad estacional. Una discusión factible de los resultados debe realizarse en base a la propuesta de objetivos específicos que busquen respuesta a las posibles conectividades que puedan establecerse entre determinadas y concretas áreas (centros de cultivo por ejemplo) en determinados contextos (verano/invierno, sicigia/cuadratura) a partir de los mapas de probabilidades de conectividad previamente generados. Dadas las enormes posibilidades (60000 aproximadamente) resulta más eficaz por parte del usuario la utilización del geoportal en la búsqueda y análisis de la información específica requerida, como pudiera ser la probabilidad de contaminación de un centro a otro en un contexto ambiental específico, más que la discusión una a una de todas las posibles conectividades que pudieran establecerse.

Las conectividades han sido establecidas a partir de 4 modelos hidrodinámicos que incluyen en sus componentes-forzantes la variabilidad estacional más representativa de cada periodo. La variabilidad estacional es dada entonces por las características del forzante del viento en su dirección e intensidad y por las fluctuaciones en caudal por parte de ríos y glaciares; también se ha dado inclusión a la variabilidad intra-mensual de los ciclos mareales en sus periodos de cuadratura y sicigia. Para garantizar que durante la dispersión de las partículas los forzantes sean netamente característicos del periodo y escenario estacional que representan, además de simular el máximo escenario posible, los forzantes empleados han sido seleccionados arbitrariamente en vez de utilizar datos que representarían las condiciones ambientales que realmente sucedieron en el terreno, y que bien no podrían ser característicos de dicho periodo. Los 2 tipos de viento empleados son representativos de los escenarios de invierno y verano, tanto en dirección como en intensidad. Con los aportes de agua dulce el criterio ha sido el mismo, con caudales medios de cada río incrementados arbitrariamente (+50%) para representar los caudales característicos de invierno y reducidos (-50%) para hacer lo propio en el escenario de verano. Esta concepción de los modelos hidrodinámicos a pesar de representar las características ambientales propias de cada estación Invierno/Verano, no sucedieron realmente, son caracterizaciones típicas y por ello no pueden ser



evaluadas individualmente. La evaluación debe realizarse con los resultados del modelo hidrodinámico común del que derivan y del cual, una vez evaluado y validado, se modificaron los forzantes (viento, agua dulce) para dar representación a la variabilidad ambiental estacional.

En 5.1 se muestran los resultados de evaluación de la anomalía del nivel mar, correntometría euleriana (series de tiempo, bottom track) y correntometría lagrangiana junto a los estadísticos de cada tipo de análisis. Como se ve en la Figura 12 se ha intentado dar la mayor cobertura espacial posible a la evaluación del modelo, eligiendo el periodo de simulación del modelo en función de la distribución espacial de las mediciones.

El nivel del mar, representado como la anomalía respecto de su nivel medio, es simulado en buen grado por el modelo, y los resultados son muy consistentes entre estaciones, con errores NRMSE por debajo del 8% y correlaciones por encima del 95%. Las series de tiempo registradas por los mareógrafos han sido extendidas mediante la reconstrucción de dichas series a través de análisis armónicos de sus constituyentes astronómicas principales (S2/M2, O1/K1) allí donde no se solapaban con el periodo de simulación del modelo. En la práctica esto sólo ha sido necesario para las series temporales de los mareógrafos de Melinka, fiordo Comau y estrecho de Chacao. Las otras estaciones de evaluación (isla Colorada, islote Quetros y canal Chacabuco) que corresponden a los mareógrafos que estuvieron instalados y registrando en el mismo periodo que el modelo, incluyen en la oscilación de la superficie libre del mar los efectos de apilamiento/desalojo por viento y la presión atmosférica. La forzante atmosférica del modelo WRF (Weather Research Forecast) incluye el viento pero no la presión atmosférica, razón por la cual en estas 3 estaciones desde el 23 de Octubre hasta el 26 de Octubre la oscilación de la superficie libre está desplazada en promedio 20-30 centímetros por debajo del nivel medio del mar, lo cual presumiblemente es atribuible a un aumento de la presión atmosférica en tal fecha (hasta los 1028 hPa) como se ve en la Figura 66.

En la correntometría euleriana de series de tiempo medidas con ADCP fondeado se obtuvieron los mejores resultados en el canal Chacabuco (Figuras 32 y 33), sobre todo en su componente U de la velocidad con errores menores al 20% en amplitud y correlaciones de hasta el 90%. La calidad de los resultados es mayor en las capas superficiales que en las más profundas, lo cual indica que la acción de los forzantes es bien reflejada por el modelo. Los flujos residuales tienen correlaciones positivas lo que indica que ambas series (terreno vs modelo) siguen las mismas tendencias aunque no tienen por qué ser del mismo sentido. A todas las profundidades se ve que el flujo residual del modelo está menos desplazado del nivel cero que el del terreno, el cual a 5 y 10 metros es mayor y a 40 metros inferior. El flujo del modelo está más influenciado por la marea que el observado en terreno, donde la acción de los forzantes desplaza el flujo residual en un sentido u otro en grado mayor que el modelo. La componente V en el canal Chacabuco en los primeros 20 metros es de signo positivo (hacia el Norte), y así se observa en el residual, mientras la amplitud del modelo es menor (NRMSE 20-25%) y su flujo residual asociado es cercano a cero la mayor parte del tiempo. La capa más profunda del modelo a 40 metros de profundidad tiene un comportamiento más parejo (correlaciones < 80%); esto parece indicar que, al contrario que en la componente U, en V los forzantes no son tan bien asimilados por el modelo pues las mejores evaluaciones son en las capas



más profundas, donde la señal del flujo es de comportamiento más mareal y bien reproducida por el modelo.

El flujo del modelo en la estación situada en las inmediaciones del canal Darwin con el canal Errázuriz (Figuras 34 y 35) está claramente desplazado por debajo del nivel cero, tanto en U como en V, lo que indica un flujo promedio hacia el SurOeste. Por su parte el flujo promedio registrado con ADCP es en general cercano a cero, arrojando correlaciones bajas o incluso negativas en U y superiores al 50% en V. Las amplitudes son similares entre modelo y terreno y un poco mayores en V que en U (hasta 50 cm). Los errores entre 15-30% en U y cercanos a 25% en V. La sobreestimación del flujo modelado hacia el SurOeste se refleja en el error de las series residuales (hasta el 200% de NRMSE).

En el paso Casma (Figuras 36 y 37) la componente U del modelo es de signo negativo la mayor parte del tiempo y a todas las profundidades, y así lo es también el flujo residual, marcadamente hacia el Oeste, mientras en el terreno el flujo residual oscila ligeramente en ambos sentidos. Esto se ve en que si bien los errores del flujo total U no son muy grandes (20-40%), sí lo sean en los flujos residuales (hasta 200%). La componente V del modelo es de amplitud menor y fluctúa entre Norte-Sur en las capas superficiales, como se ve en el flujo residual. Por su parte el ADCP registró un flujo marcadamente hacia el Norte a 5 y 10 metros de profundidad. A 20 y 40 metros ambas series son más similares y de amplitud decreciente con la profundidad.

El ADCP remolcado del fiordo Aysén registró una estructura de 2 capas del flujo residual de la componente U de la velocidad (Figuras 38 y 39): una de salida hacia el Oeste en superficie hasta 75 metros de profundidad aproximadamente y otra capa por debajo de la primera y hasta el límite de alcance del equipo (200 m) y de sentido opuesto y de entrada a la cabeza del fiordo. El modelo es capaz de replicar esta estructura de 2 capas que ya definiera Valle-Levinson *et al.* (2002) y Cáceres *et al.* (2010) con leves diferencias como que es más delgada en el extremo SW (20 metros) y en la intensidad de dicho flujo.

En el estero Quitralco (Figuras 40 y 41) se consigue replicar a grandes rasgos la estructura de 2 capas que se observa en terreno, si bien las estructuras registradas en terreno suelen tender a ser más complejas y no tan bien definidas como las del modelo. En superficie y especialmente en el extremo SE del transecto el flujo residual de la componente V de la velocidad se dirige hacia el Norte en una capa de espesor variable, mientras por debajo se genera una capa de sentido Sur. Las intensidades son similares y cercanas a 0.1 m/s en ambos sentidos.

El transecto S-N a la salida del canal Darwin (Figuras 42 y 43) se registró una estructura que muestra agua saliendo desde la zona del canal Errázuriz hacia el Oeste por superficie y en el margen Sur y un flujo de sentido opuesto por debajo y que alcanza la superficie en el extremo Norte del transecto; esta estructura espacial parece indicar una situación de geostrofia. Las intensidades son similares en ambos sentidos (0.1 m/s). El modelo reproduce esta misma estructura bastante bien, aunque como ya se comentó simplificando y homogeneizando la estructura que se percibe en el registro del terreno.



El transecto o bottom track de ADCP remolcado en el canal Costa es de sentido W-E (Figuras 44 y 45) y nuevamente mostró en el terreno una estructura de 2 capas. La capa superior es de salida de agua procedente de la zona Sur del estero Elefantes (importante fuente de agua dulce) hacia el Norte. Por debajo de esta capa de fuerte intensidad (hasta 0.3 m/s) se forma otra, como es habitual, de sentido opuesto. La capa superior sugiere una situación de posible balance geostrófico, al estar inclinada hacia el margen Oeste. El modelo vuelve a comportarse adecuadamente en la representación de estas 2 capas y la inclinación de la superior sobre la inferior por el lado Oeste, si bien las intensidades mayores ocurren en el margen Este y no alcanzan semejante intensidad (0.15 m/s aproximadamente).

Las figuras de los derivadores lagrangianos nos muestran las trayectorias de éstos a 4 metros de profundidad. Tal vez sean estas mediciones y evaluaciones las que más y mejor nos pueden decir del grado de confianza de los resultados de las conectividades, aunque como dijimos sea muy difícil (si no imposible) dar la cobertura necesaria a las miles de conectividades que se establecen a estos niveles de escala y resolución. Además de comparar valores absolutos relativos a las trayectorias, se ponderará el sentido de la derivas y/o que éstas describan trayectorias similares.

En el canal Chacabuco (Figura 46) ambos derivadores (terreno y modelo) consiguen al cabo del periodo de deriva cruzar el canal de Este a Oeste. El derivador de terreno describe elipses y parece más sujeto a vaivenes (supuestamente de acción mareal) mientras el derivador del modelo describe una trayectoria más lineal, aunque las distancias totales (23 km) y netas (18-20 km) recorridas son prácticamente iguales.

En el canal Costa (Figura 47) ambos derivadores describen trayectorias de ida y vuelta con la excursión mareal, pero al fin ambos terminan en posiciones más al Norte de su punto de partida (algo más en el caso del derivador del modelo) y recorriendo la misma distancia total (13 km).

A la salida del fiordo Aysén (Figura 48) el derivador del terreno se movió a lo largo del centro del fiordo hacia el SurOeste en dirección de salida desde el interior del fiordo, al igual que el derivador del modelo.

Ya en el sector Norte del dominio del modelo regional Chiloé-Aysén el derivador que se liberó en la boca del fiordo Reñihue (Figura 49) se desplazó al interior del fiordo, en contra de lo esperado en este tipo de sistemas en los que el agua dulce que ingresa al medio marino en la cabeza del fiordo sale a través de la boca del mismo por superficie. El modelo, aunque con una trayectoria más lineal, también se desplaza hacia el interior del fiordo, consiguiendo replicar esta circulación tan particular.

En el extremo Este del canal de Dalcahue se realizó una medición de correntometría lagrangiana (Figura 50) en la cual el derivador se dirigió hacia el Oeste, terminando a la altura de Dalcahue. Si bien el derivador del modelo no alcanza tal punto en su deriva sí que termina su periplo más al Oeste del punto inicial de partida.



Al interior del seno de Reloncaví el derivador lagrangiano de terreno (Figura 51) describió una trayectoria elíptica para terminar saliendo del seno al golfo de Ancud a través del paso entre las islas Puluqui y Queullín. El modelo, en una trayectoria más lineal (recorre 17 km por 31 km del derivador de terreno), también egresa del seno a través del mismo paso hacia el golfo de Ancud.



8. CONCLUSIONES

En general los resultados de evaluación del modelo hidrodinámico son aceptables. El nivel del mar, en la propagación de la onda de marea desde el océano hacia los mares interiores a través de los canales, está bien representado a lo largo y ancho del dominio del modelo de Norte a Sur. La correntometría euleriana con ADCP fondeado es la evaluación que presenta resultados menos consistentes, en al menos 2 de las 3 estaciones. Las estaciones donde las evaluaciones han sido más deficientes, canal Darwin y paso Casma, se encuentran relativamente cercanas entre sí y encuadradas en el mismo área que es el entorno de la isla Traiguen, al Oeste y Este respectivamente, lo que evidencia que en este área el modelo no simula correctamente la hidrodinámica, no logrando replicar el sentido de las corrientes residuales ni la amplitud de la corriente en sus componentes U y V en la medida suficiente. Esta área está situada geográficamente en la unión de los canales Errázuriz y Costa por el Sur, Darwin por el Oeste, Moraleda y la constricción de Meninea por el Norte y la salida del fiordo Aysén por el Este; la más que posible interacción de flujos procedentes o dirigidos hacia estos canales es compleja y debe ser sometida a reanálisis en próximas etapas en la búsqueda de mejorar estos resultados. Las evaluaciones de flujos residuales por medio de mediciones con ADCP remolcado son correctas; si bien hay detalles en la escala pequeña que son omitidos, la formación de grandes estructuras como son las disposiciones de las capas en la vertical y escenarios de geostrofia sí son bien representados. Por último, la evaluación de la correntometría lagrangiana con derivadores está bien definida, si no cuantitativamente en cuanto a diferencias entre derivador de terreno y modelo en distancias y velocidades promedio, sí cualitativamente en cuanto al sentido general de la deriva y las posiciones relativas entre los puntos de inicio y final de las derivas. Éste último tipo de evaluación es el que mejor va a darnos una medida de la calidad de los resultados de las estadísticas de conectividad por dar ambas una medida de la dispersión de partículas. En cualquier caso, en próximas etapas de continuación de este proyecto, así como proyectos paralelos que tienen como objetivo la modelación hidrodinámica en Chiloé-Aysén, los resultados que mejoren los actuales serán incluidos dentro de las estadísticas de conectividad.

Los resultados intrínsecos de conectividad están disponibles en la base de datos adjunta en forma de archivos ASCII que contienen todas las matrices de conectividad y en el geoportal ifop.teramaps.cl o a través de la web <http://www.iproach.cl>. El gran número de interacciones y conectividades establecidas entre las distintas unidades de trabajo o cajas, en el orden de miles, hace que una la discusión de éstas fuera una tarea demasiado extensa, y en muchos casos fútil por tratarse de conectividades entre áreas que poca significancia tienen en la salmonicultura. Se demandaría entonces de un objetivo más específico en la discusión de resultados de conectividad, que fuera factible de llevar a cabo en su dimensión y que implicara unidades de trabajo (centros de cultivo) diana o de interés en el análisis. Los resultados de conectividad servirán de herramienta para la prevención y gestión de agentes sujetos a dispersión, como pueden ser los efluentes de poblaciones, vertidos tóxicos y sobre todo enfermedades contagiosas de relevancia en la salmonicultura o para un mejor posicionamiento de nuevos centros de cultivo de salmones tomando en cuenta la conectividad del sitio. Es con este último propósito con el que fueron ideadas las



unidades de trabajo en sus dimensiones, para dar inclusión y representatividad al menos a la conectividad entre las más pequeñas agrupaciones de concesiones o barrios y en los casos de los barrios más grandes también da estimación de la conectividad entre distintas concesiones dentro del mismo barrio. En esta primera etapa de implementación a las técnicas y metodología de las estadísticas de conectividad además de la definición de la metodología se ha dado una cobertura global al área de la X-XI regiones desde el límite de la X-XIV regiones por el Norte hasta la península de Taitao por el Sur. La gran extensión de esta área supone la generación de un alto número de unidades de trabajo (< 2000). Sin embargo, en vistas de la finalidad principal de este proyecto en próximas etapas se priorizará el aumentar la resolución de las unidades de trabajo en detrimento del área total a la que se dé cobertura de conectividad para no incrementar “innecesariamente” el número de áreas de trabajo en zonas donde no se espera la ubicación de centros de cultivo y, por tanto la dispersión de patógenos donde no supone un problema para la salmonicultura. Además del aumento de resolución se establecerán diversos horizontes suplementarios al máximo horizonte de dispersión actual de 72 horas y más cercanos al origen de la dispersión, por ejemplo a 48, 24 y 12 horas para de esta manera poder disponer de medidas de gestión y actuación en función del tiempo discurrido desde un evento de contaminación.



9. 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.
- 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.
- Amundrud TL, Murray AG (2009) Modelling sea lice dispersion under varying environmental forcing in a Scottish sea loch. *J Fish Dis* 32:27-44.
- 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.
- Batten M., Chih-Ping Hu, Bacon J. y Melson C., 1995. Numerical study of the effects of wind forcing on the Chile current system. *Journal of Oceanography*. Vol. 51, pp 585 to 614, 1995.
- Cáceres M., Valle-Levinson A., Fierro J., Valenzuela C. y Castillo M., 2010. Variabilidad transversal del flujo y la densidad en la boca del fiordo Aysén. *Cienc. Tecnol. Mar*, 33 (1): 5-15, 2010.
- Carvajal J, González L, George-Nascimento M. Native sea lice (Copepoda: Caligidae) infestation of salmonids reared in netpen systems in southern Chile. *Aquaculture*. 1998;166:241-246.
- Costello MJ. Ecology of sea lice parasitic on farmed and wild fish. *Trends Parasitol*. 2006;22:475-483. doi: 10.1016/j.pt.2006.08.006.
- 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/>
- Dussaillant A., Buytaert W., Meier C. y Espinoza F., 2012. Hydrological regime of river catchments with extreme gradients under accelerated change: the Baker basin in Patagonia. *Hydrological Science Journal*, 57(8), 2012.
- Fox Cj, McCloghrie P, Nash RDM (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.
- Johnson SC, Treasurer JW, Bravo S, Nagasawa K, Kabata Z. A review of the impact of parasitic copepods on marine aquaculture. *Zool Stud*. 2004;432:229-243.



- 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.
- Godin, G., 1972. The analysis of tides. University of Toronto Press, p. 65.
- 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.
- Kibenge, F.S.B., Godoy, M.G., Wang, Y., Kibenge, M.J.T., Gherardelli, V., Mansilla, S., Lisperger, A., Jarpa, M., Larroquete, G., Avendaño, F., Lara, M. and Gallardo, A. (2009) Infectious salmon anaemia virus (ISAV) isolated from the ISA disease outbreaks in Chile diverged from ISAV isolates from Norway around 1996 and was 44 disseminated around 2005, based on surface glycoprotein gene sequences. Virology Journal 6, doi:10.1186/1743-422X-6-88.
- 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.
- Letelier J., Soto-Mardones L., Salinas S., Osuna P., López D., Sepúlveda H., Pinilla E. y Rodrigo C., 2011. Variabilidad del viento, oleaje y corrientes en la región de los fiordos Patagónicos de Chile. Revista de Biología Marina y Oceanografía, Vol. 46, N°3: 363-377, diciembre 2011.
- 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.
- 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.
- 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.
- Pinilla, E., G. Soto, M. Arriagada. 2012. Informe final. "Diseño y estudio técnico de macrozonas de agrupaciones de concesiones en la zona sur-austral X a XII regiones" Proyecto ASIPA – SUBPESCA.



- Pinilla, E., G. Soto, M. Arriagada, C. Ruiz., 2013. Informe final. “Caracterización y modelación de patrones de circulación marina en la XII Región de Magallanes” Proyecto ASIPA – SUBPESCA.
- Pinilla, E., G. Soto, M. Arriagada, C. Ruiz, P. Reche. 2015. Informe final. “Determinación de los patrones de circulación en los mares interiores de la región de Magallanes” Proyecto ASIPA – SUBPESCA.
- 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).
- Rodi, W., 1984. Experimental investigations of jets in across flow. *Journal of Fluid Mechanics* 138, 93–127.
- North EW, Schlag Z, Hood RR, Li M, Zhong L, Gross T, Kennedy VS (2008) Vertical swimming behavior influences the dispersal of simulated oyster larvae in a coupled particle-tracking and hydrodynamic model of Chesapeake Bay. *Mar Ecol Prog Ser* 359:99-115.
- Salama NKG, 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.
- 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.
- 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.
- Tremblay EA, Halpin PN, Urban DL, Pratson LF (2008) Modelling population connectivity by ocean currents, a graph-theoretic approach for marine conservation. *Landscape Ecol* 23:19-36.
- Valle Levinson A., Cáceres M., Sepúlveda H. y Holderied K, 2002. Patrones de flujo en los canales asociados a la boca del seno Aysén. *Cienc. Tecnol. Mar*, 25 (2): 5-16, 2002.

FIGURAS

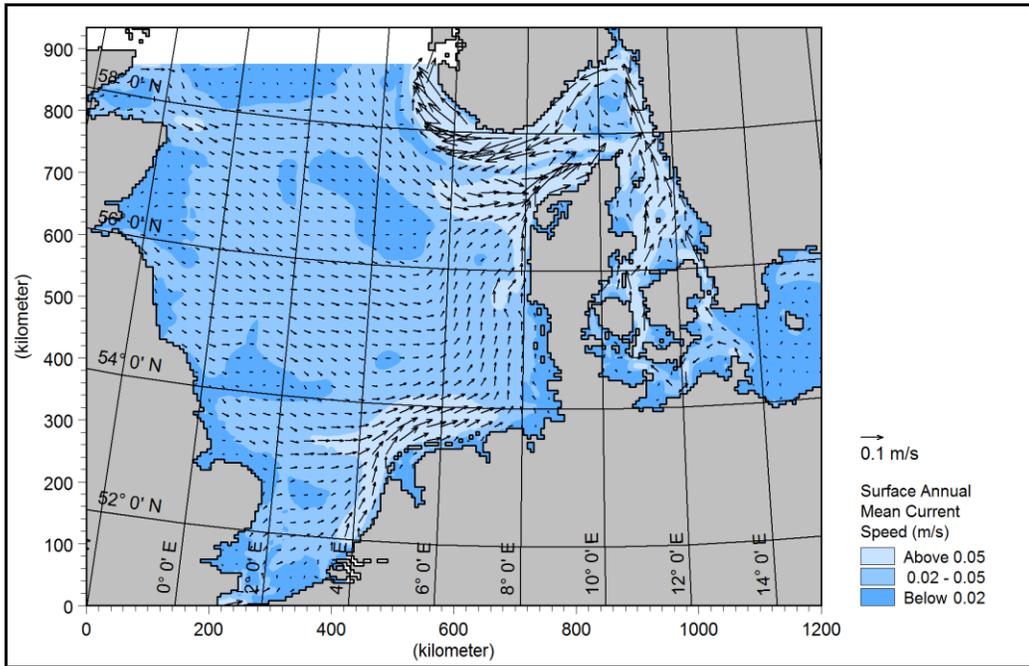


Figura 1. Campo de corriente superficial en el mar del Norte visto a trav3s de los vectores promedio anuales.

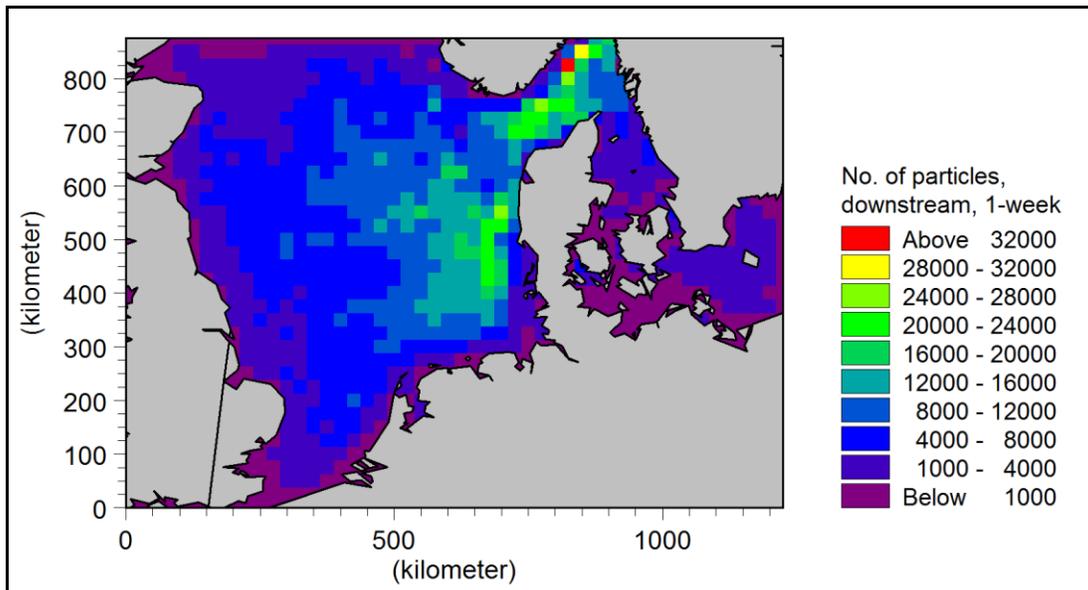


Figura 2. N3mero de part3culas incluidas en las estad3sticas de conectividad en el ejemplo del mar del Norte.

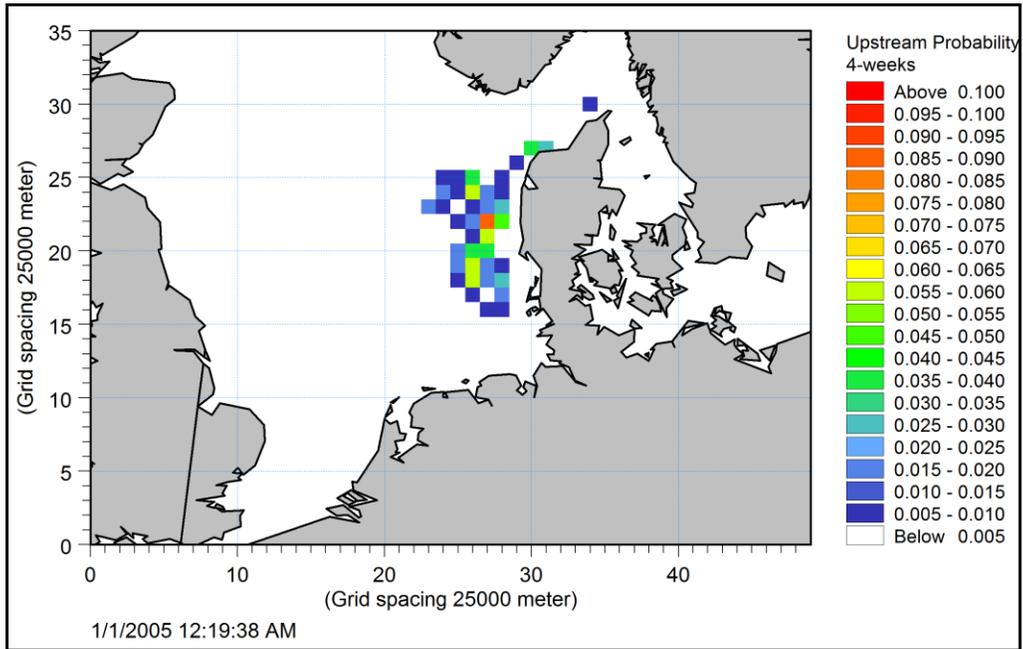


Figura 3. Mapa mostrando las probabilidades de la conectividad *upstream* a 4 semanas de una 3nica caja en el ejemplo del mar del Norte.

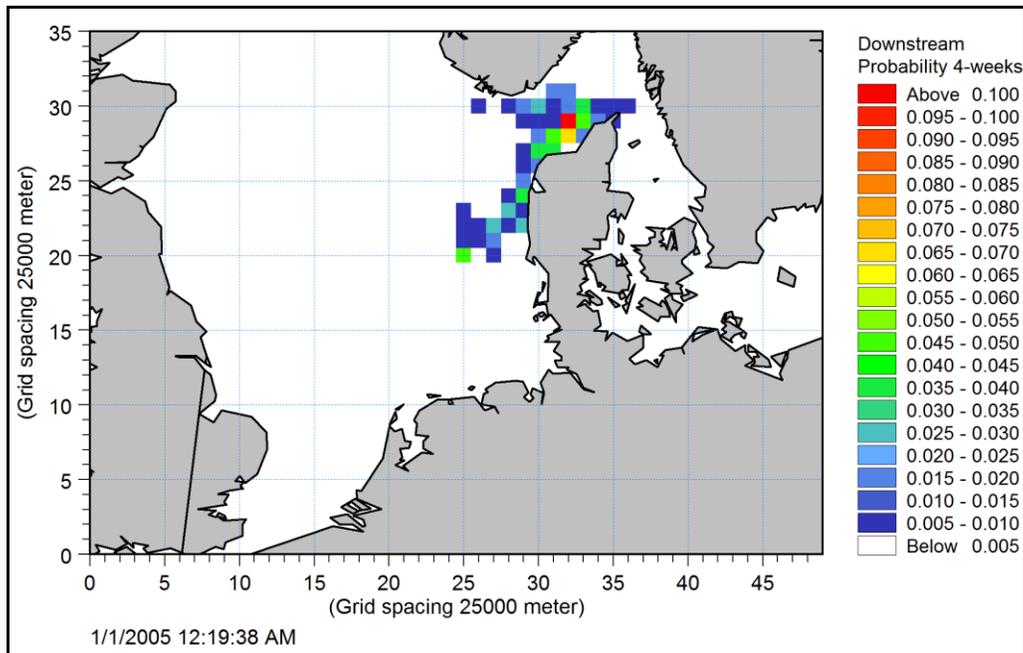


Figura 4. Mapa mostrando las probabilidades de la conectividad *downstream* a 4 semanas de una 3nica caja en el ejemplo del mar del Norte.

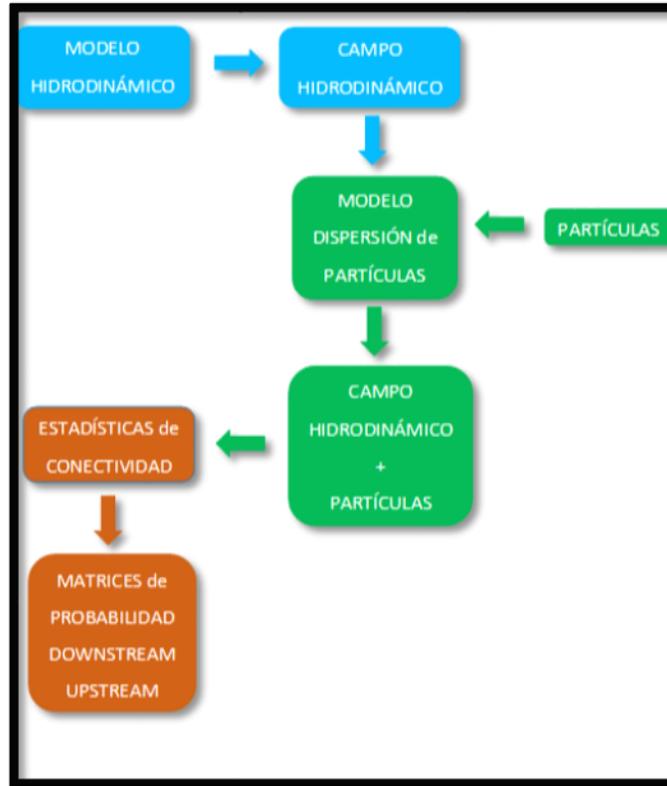


Figura 5. Diagrama de flujo mostrando las etapas de desarrollo en las estadísticas de conectividad.

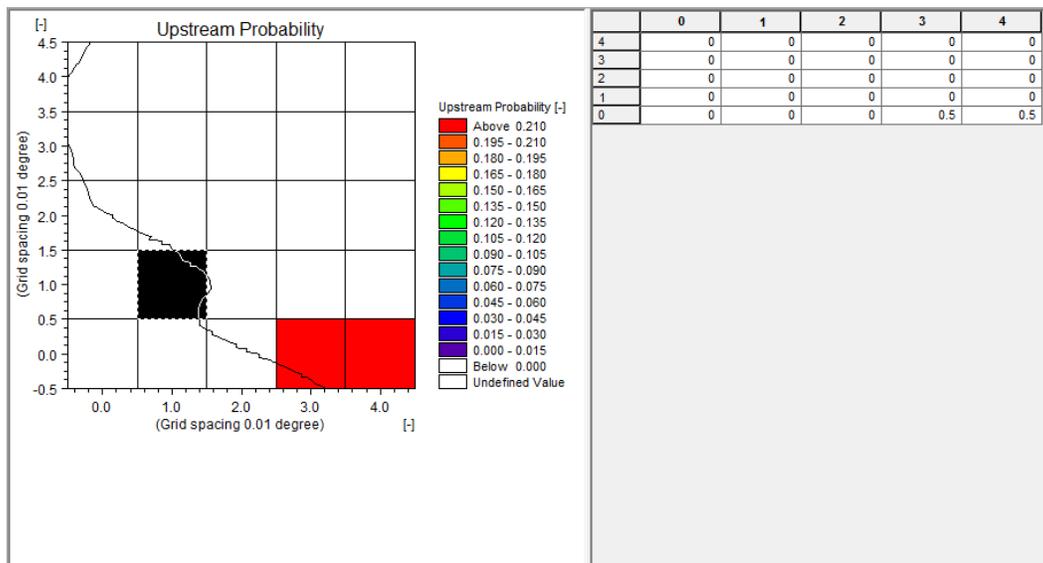


Figura 6. Archivo nativo de MIKE3 mostrando las probabilidades de la conectividad *upstream* de una caja (en negro) en mapa y su matriz correspondiente.

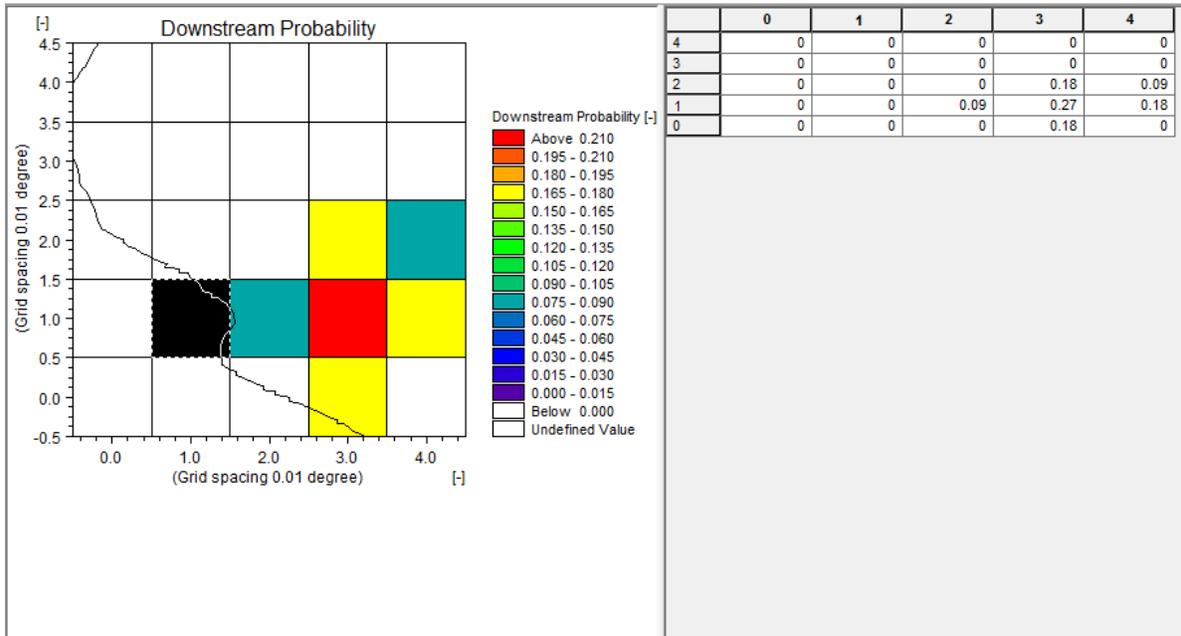


Figura 7. Archivo nativo de MIKE3 mostrando las probabilidades de la conectividad *downstream* de una caja (en negro) en mapa y su matriz correspondiente.

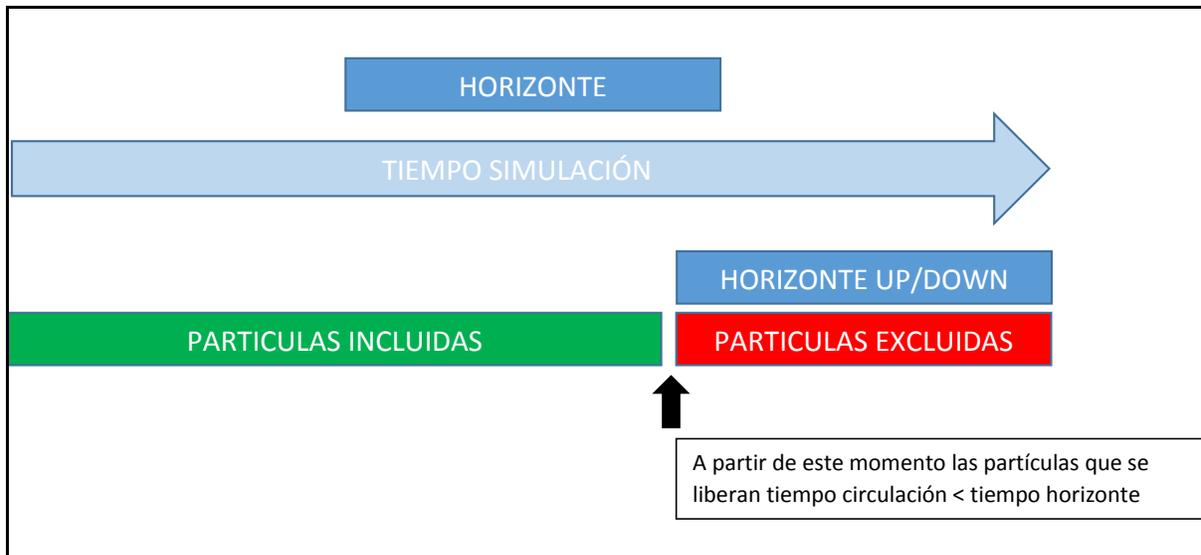


Figura 8. Diagrama mostrando cómo el horizonte dictamina qué partículas son incluidas y cuáles excluidas de los cálculos de conectividad.

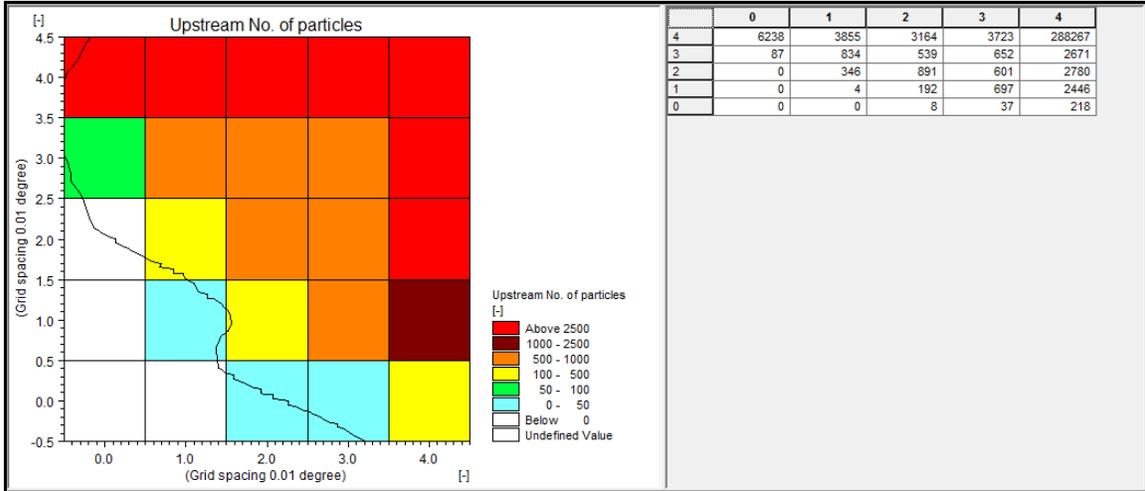


Figura 9. Archivo nativo de MIKE3 mostrando el número de partículas que son incluidas dentro de los cálculos de conectividad *upstream*.

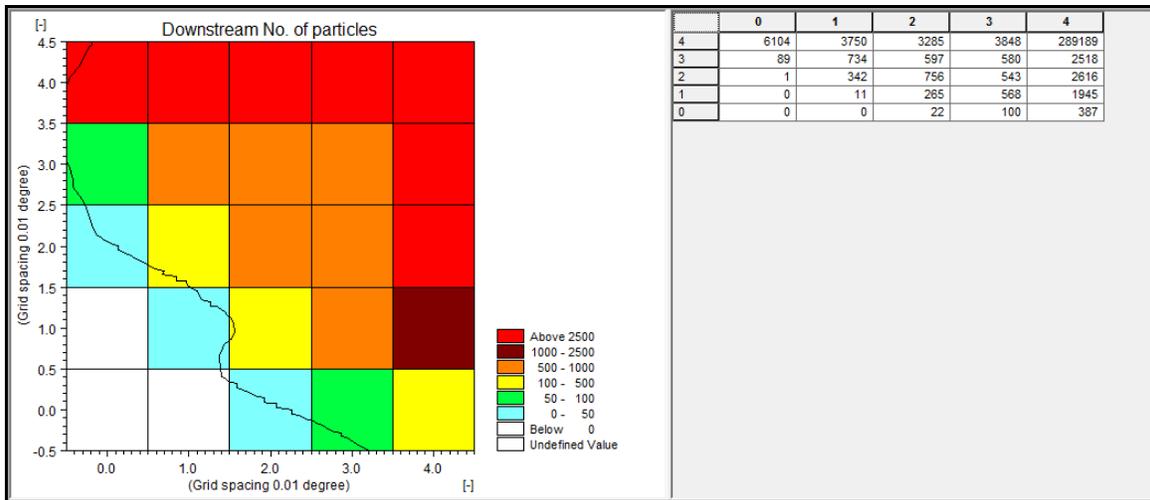


Figura 10. Archivo nativo de MIKE3 mostrando el número de partículas que son incluidas dentro de los cálculos de conectividad *downstream*.

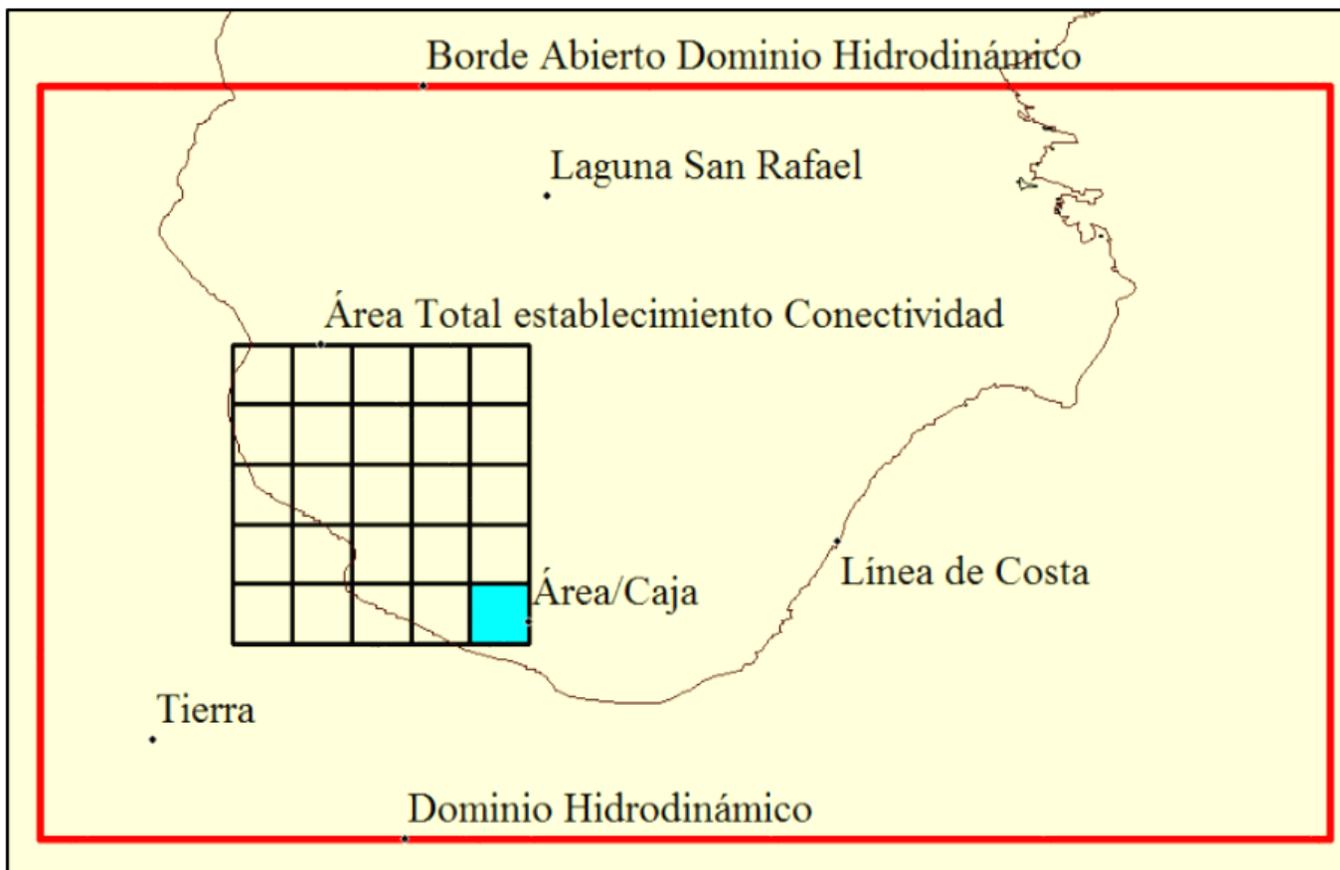


Figura 11. Definición de caja dentro de un área de conectividad englobada a su vez dentro del dominio de un modelo hidrodinámico.

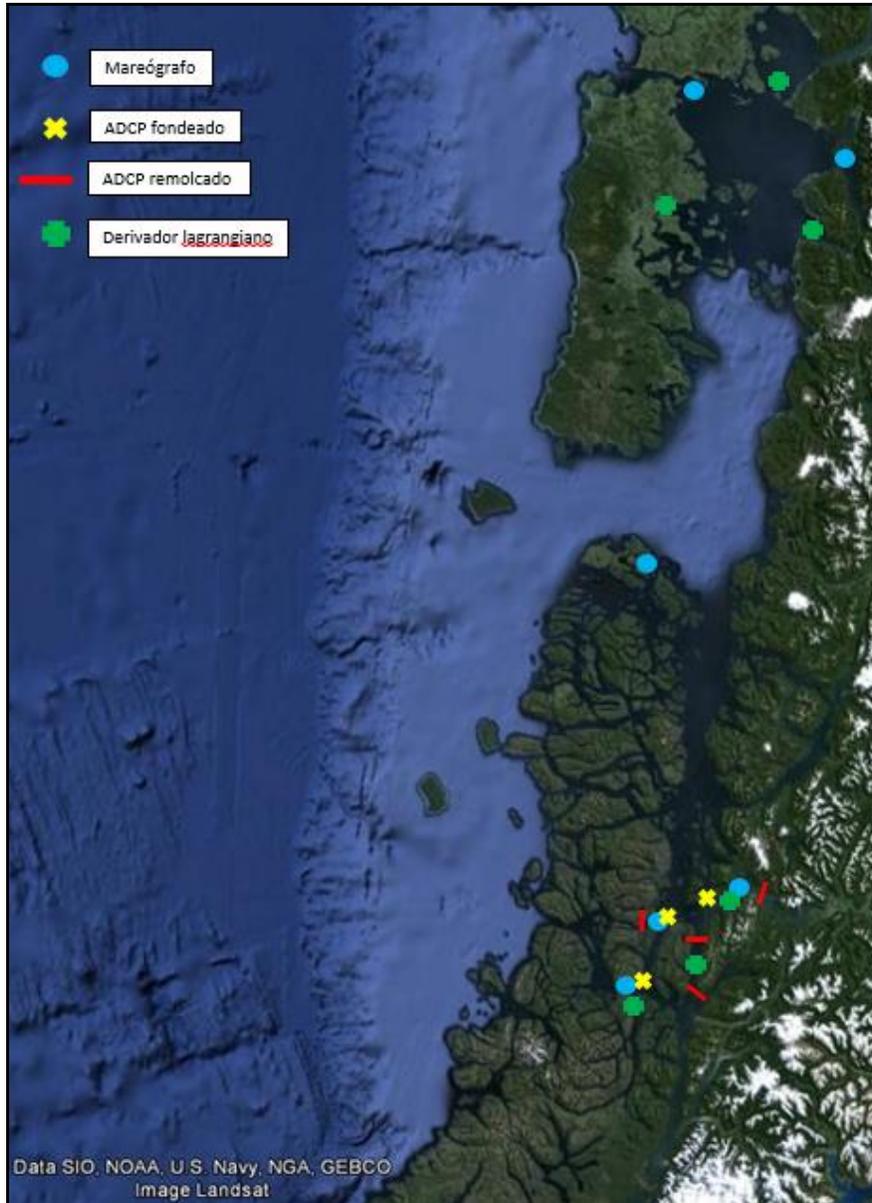


Figura 12. Posición de los equipos cuyos registros han sido utilizados en la evaluación del modelo regional Chiloé-Aysén.

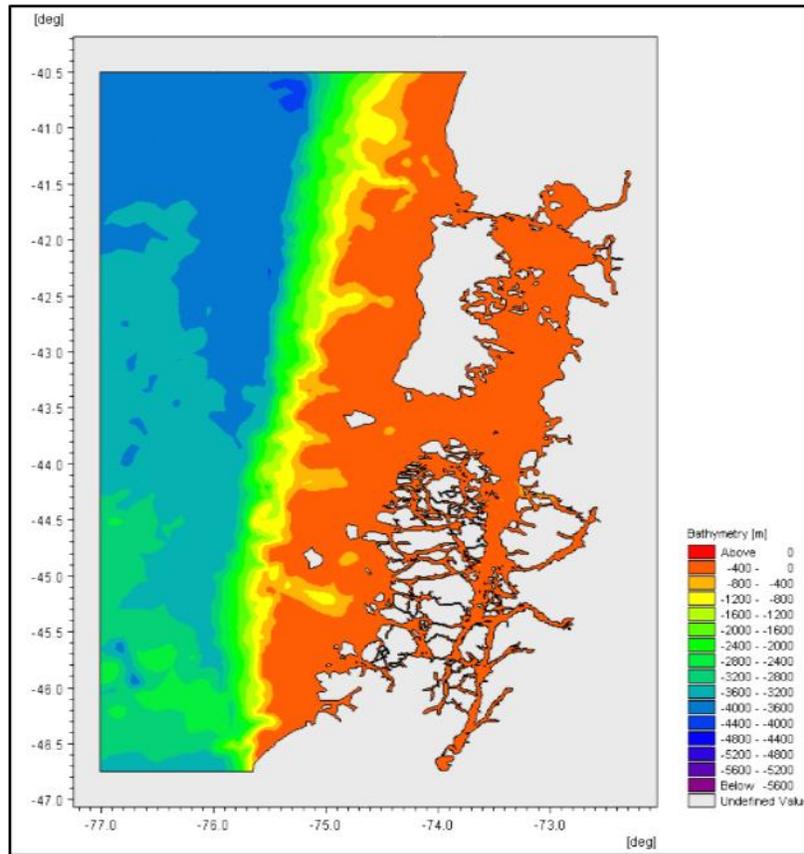


Figura 13. Dominio y batimetría interpolada del modelo regional Chiloé-Aysén.

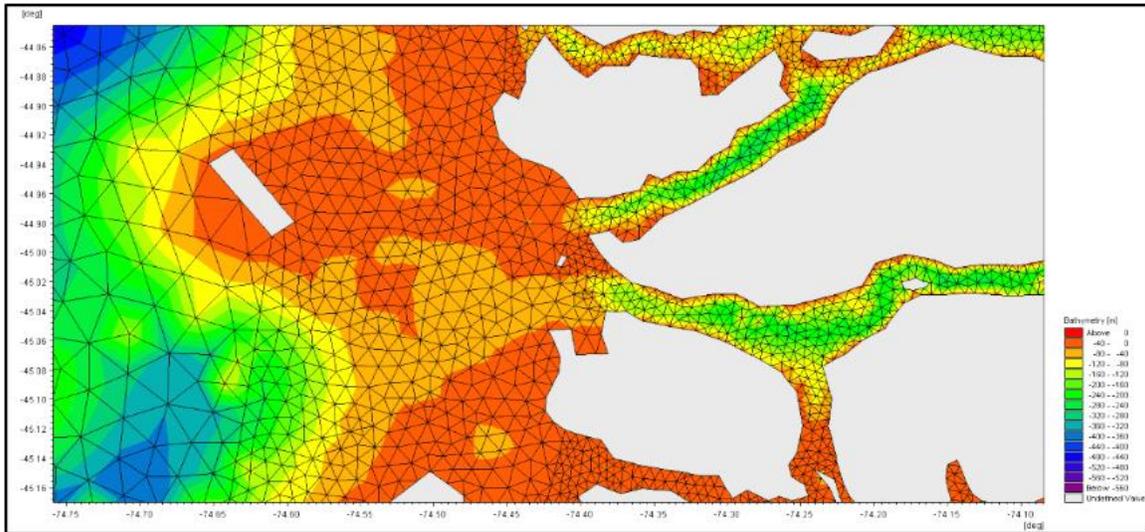


Figura 14. Zoom del modelo regional Chiloé-Aysén mostrando anidamientos de resolución horizontal de malla la malla flexible de elementos triangulares.

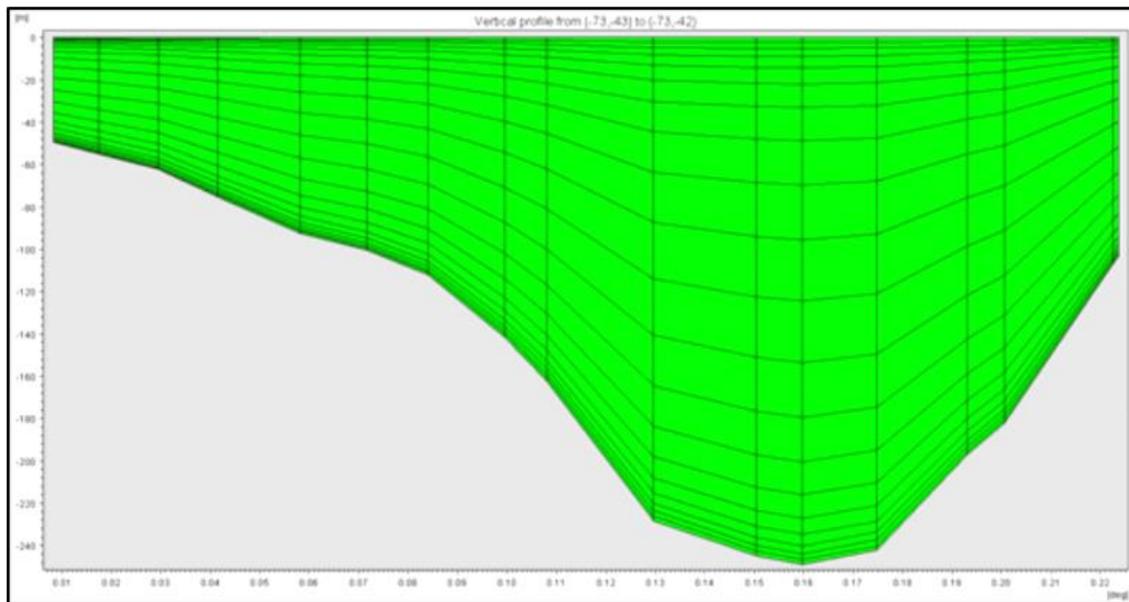


Figura 15. Perfil vertical de un transecto mostrando la resolución vertical de 20 capas sigma.

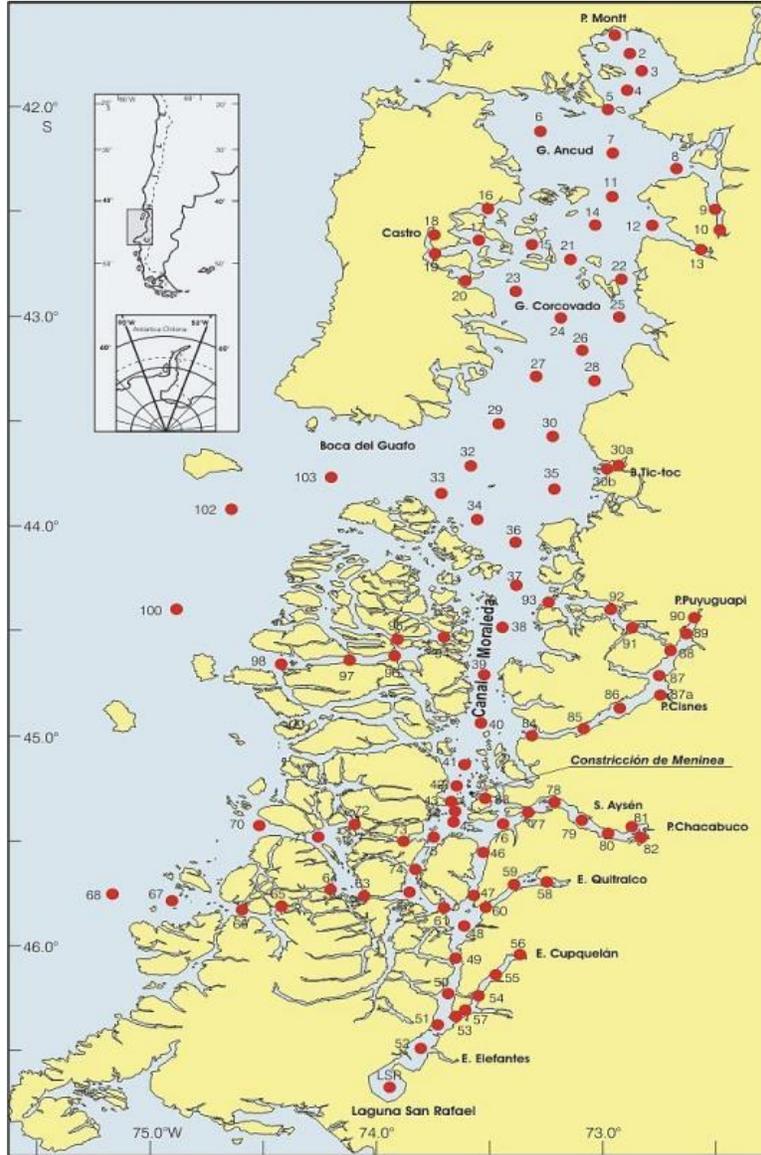


Figura 16. Estaciones de muestreo CTD del crucero CIMAR1 en Octubre-Noviembre 1995.

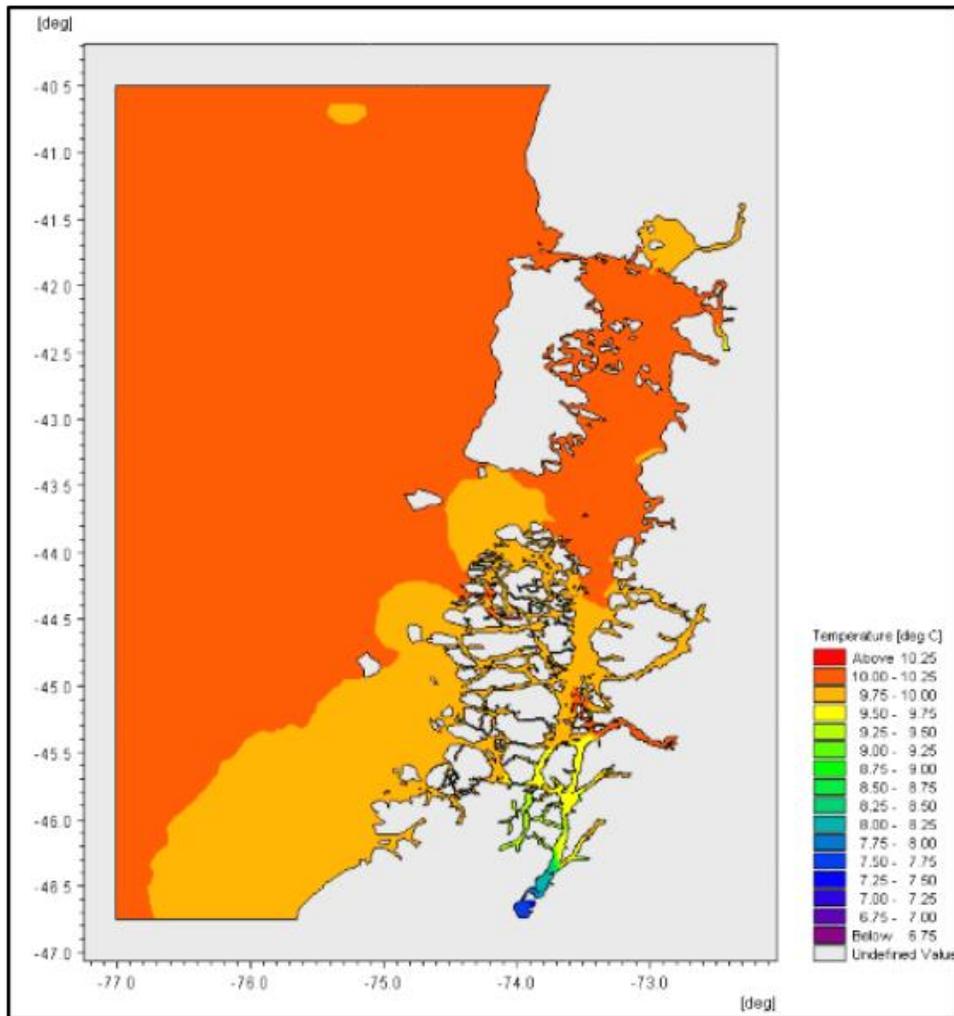


Figura 17. Condición inicial de temperatura del modelo regional Chiloé-Aysén.

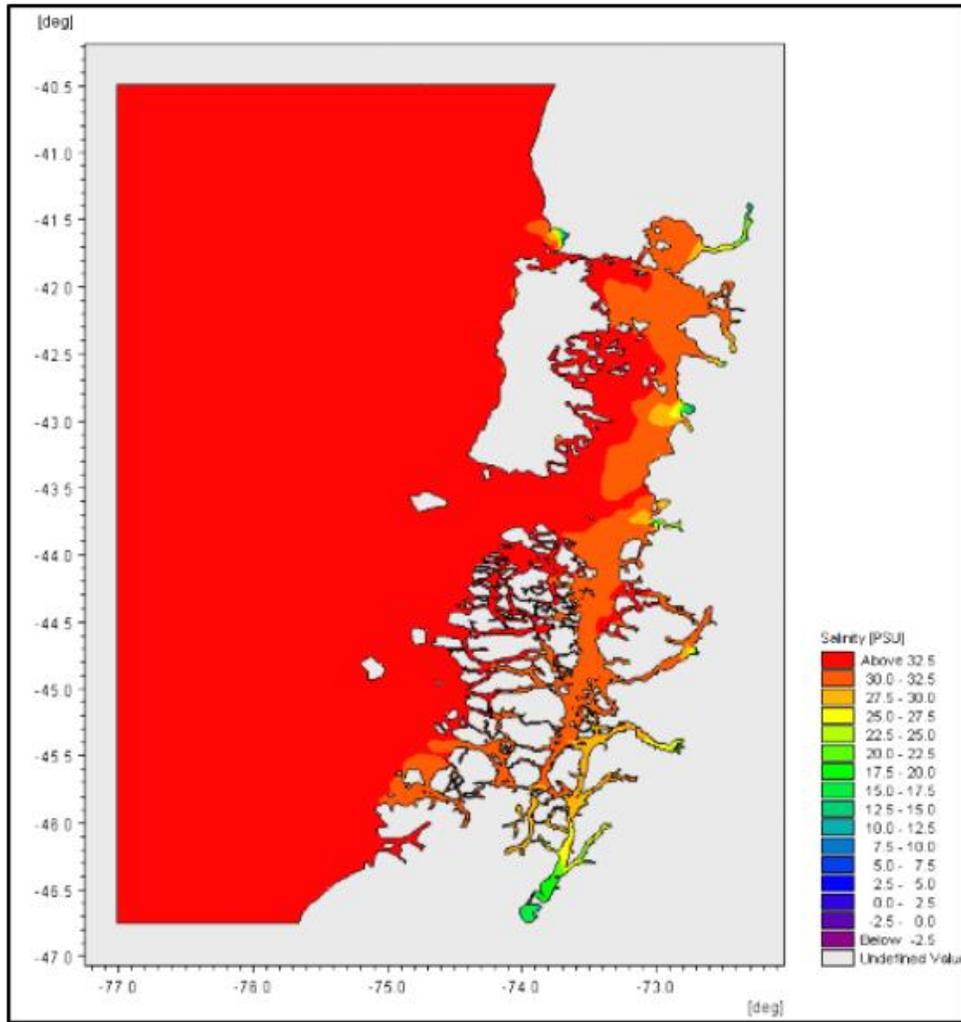


Figura 18. Condici3n inicial de temperatura del modelo regional Chilo3-Ays3n.

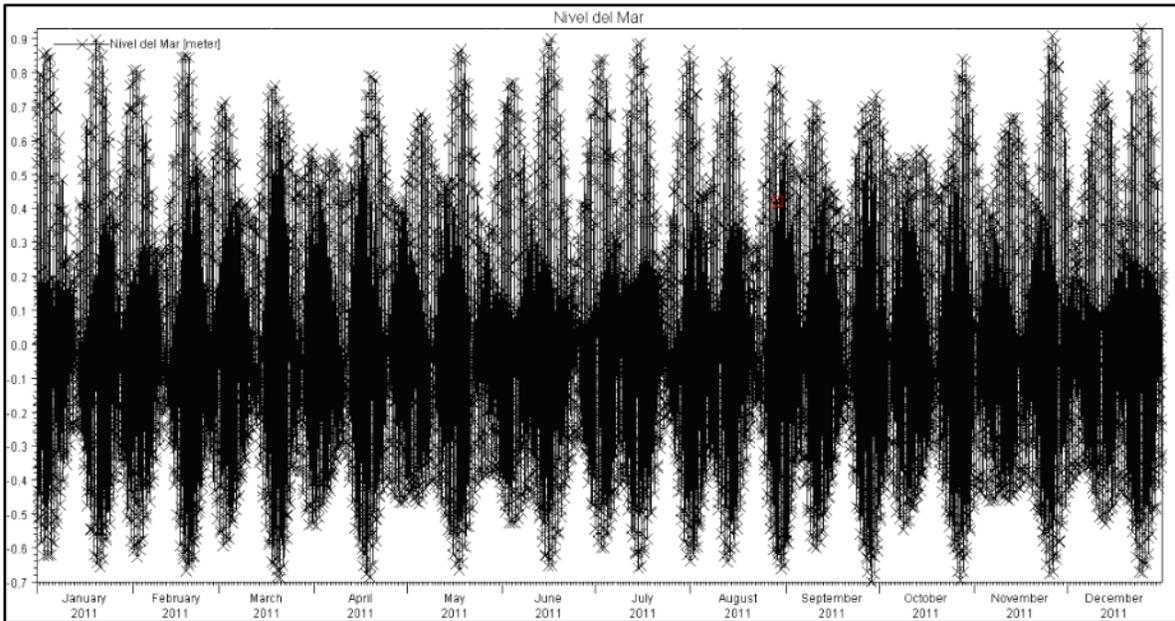


Figura 19. Condici3n de borde del nivel del mar a partir del modelo global TOPEX-POSEIDON.

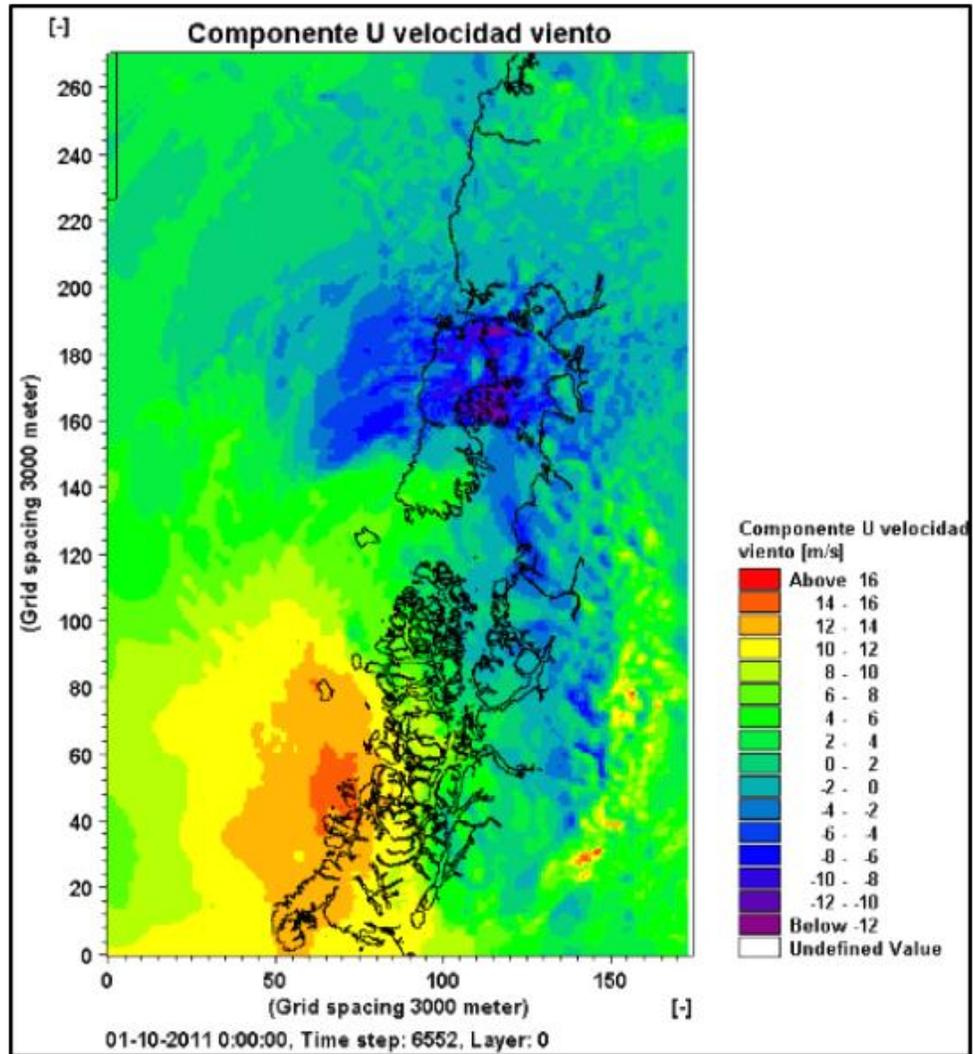


Figura 20. Componente U de la velocidad del viento WRF a 10 metros sobre la superficie sobre el dominio del modelo regional Chiloé-Aysén.

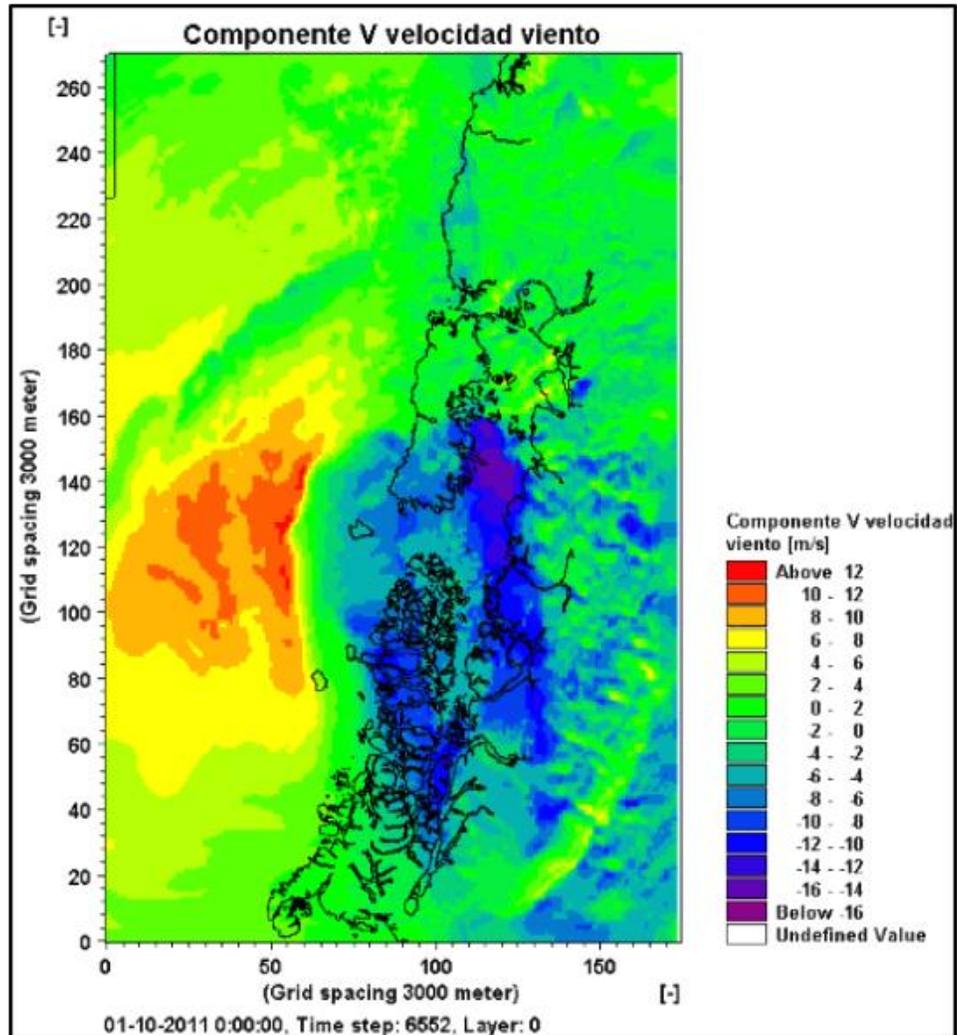


Figura 21. Componente V de la velocidad del viento WRF a 10 metros sobre la superficie sobre el dominio del modelo regional Chiloé-Aysén.

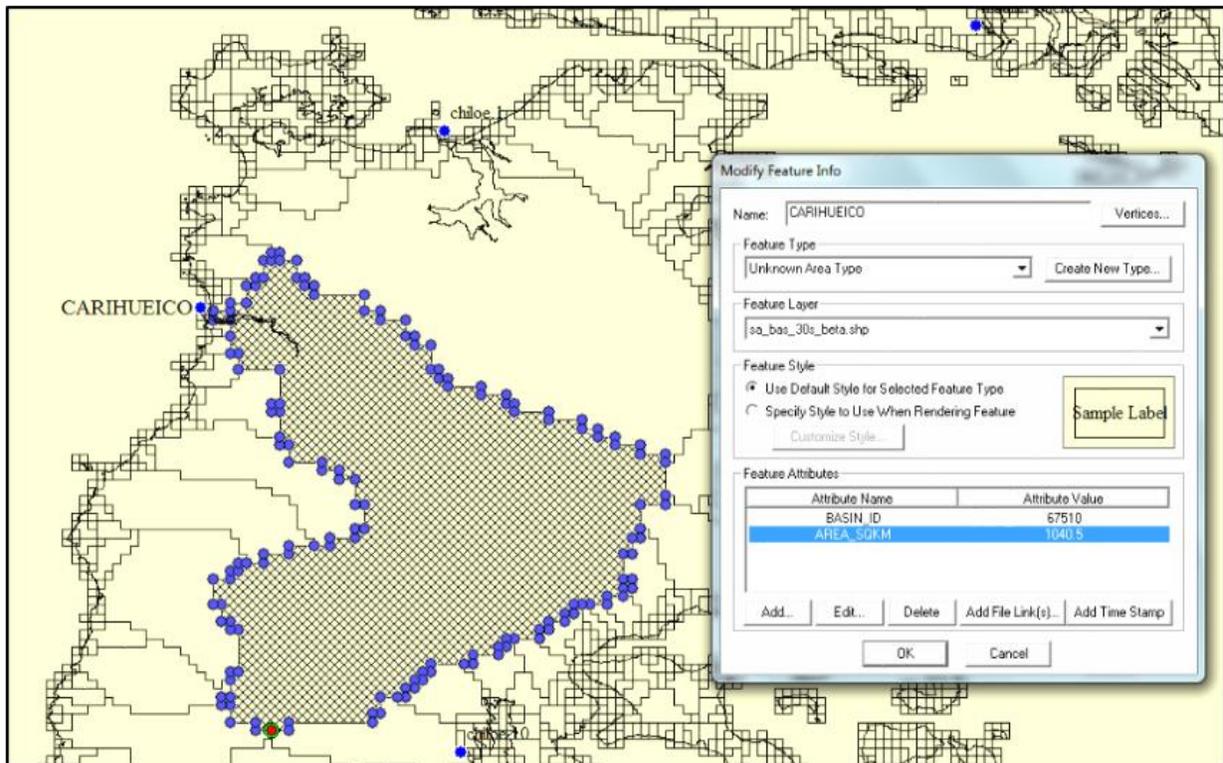


Figura 22. Archivo de capas y metadata de cuencas hídricas que desembocan a cota cero. En imagen cuenca del río Carihueico en Chiloé.



Figura 23. Ordenamiento territorial por Sernapesca de las agrupaciones de concesiones (barrios) al norte del golfo del Corcovado.



Figura 24. Ordenamiento territorial por Sernapesca de las agrupaciones de concesiones (barrios) al sur del golfo del Corcovado.

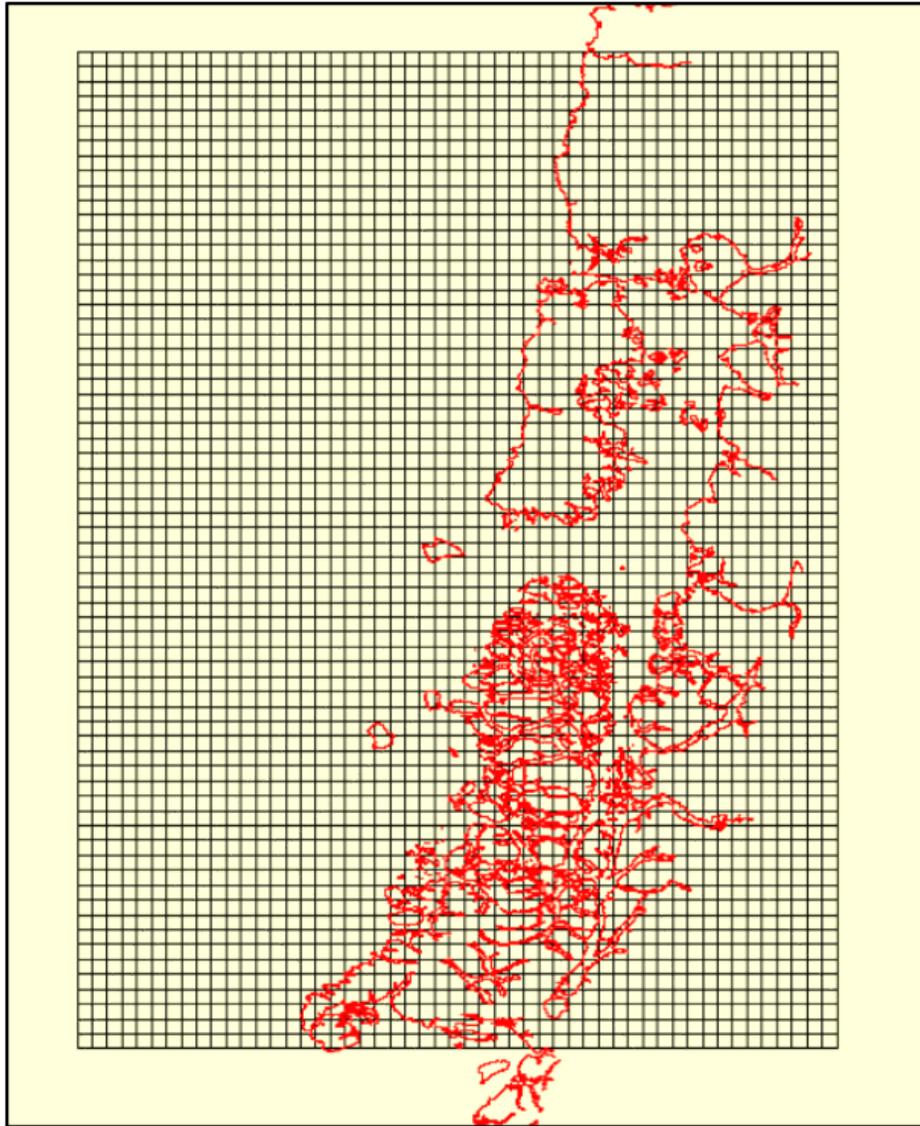


Figura 25. Disposición de las cajas que conforman el área donde se determinará la conectividad sobre el dominio del modelo regional Chiloé-Aysén.

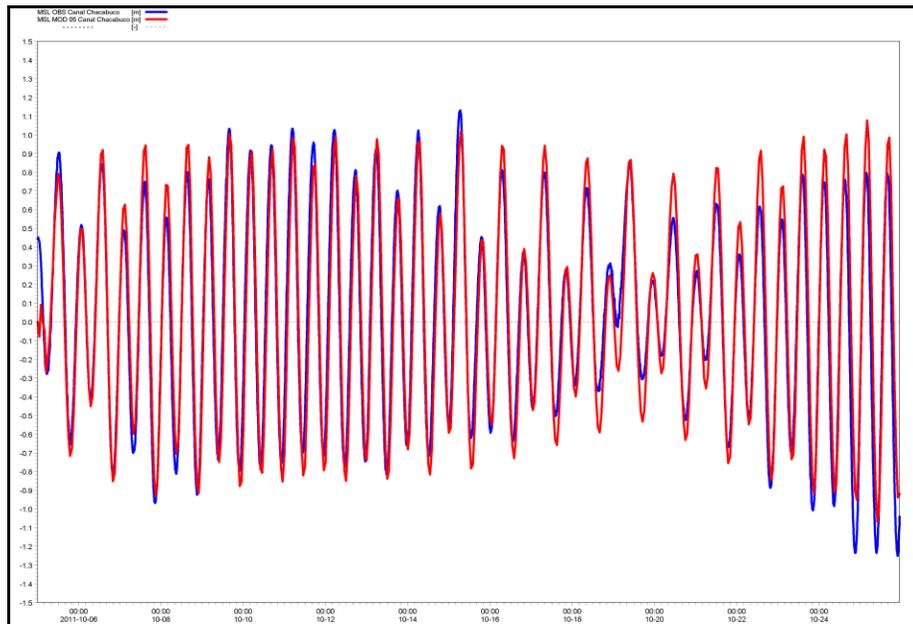


Figura 26. Evaluaci3n de la anomalía del nivel del mar en el canal Chacabuco entre el registro del mare3grafo (azul) y el modelo regional Chilo3-Ays3n (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.

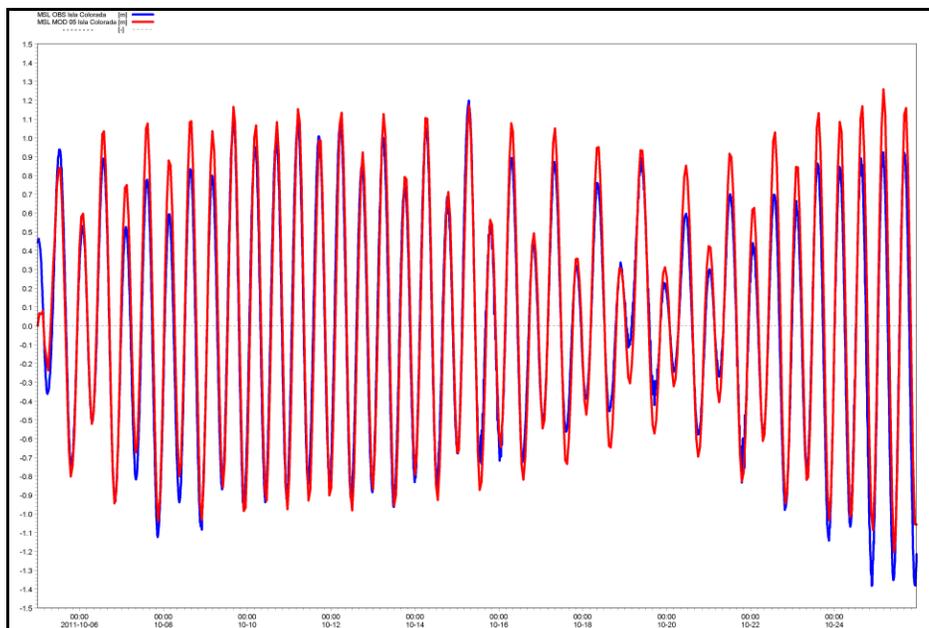


Figura 27. Evaluaci3n de la anomalía del nivel del mar en la isla Colorada entre el registro del mare3grafo (azul) y el modelo regional Chilo3-Ays3n (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.

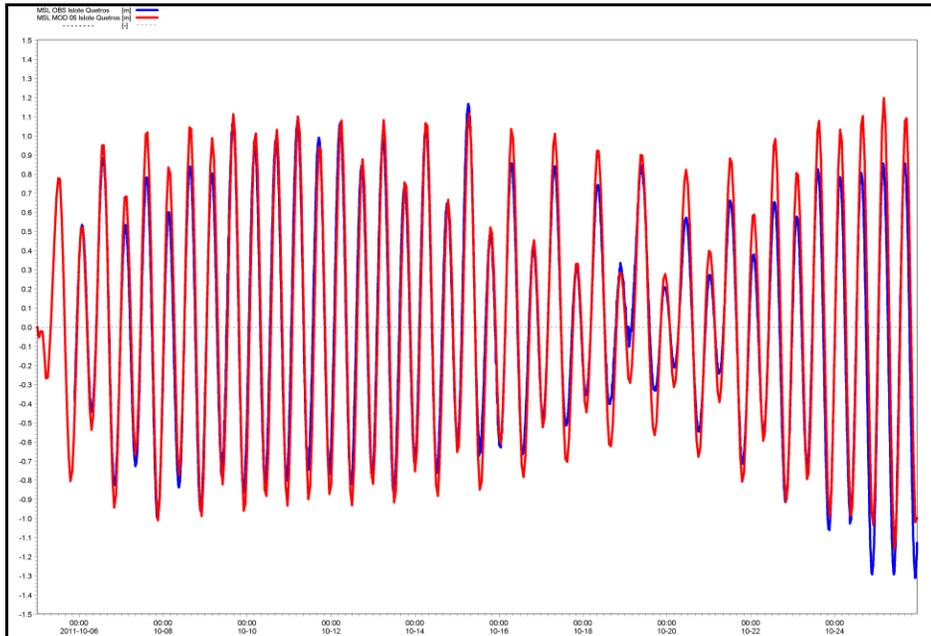


Figura 28. Evaluación de la anomalía del nivel del mar en la isla Colorada entre el registro del mareógrafo (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.

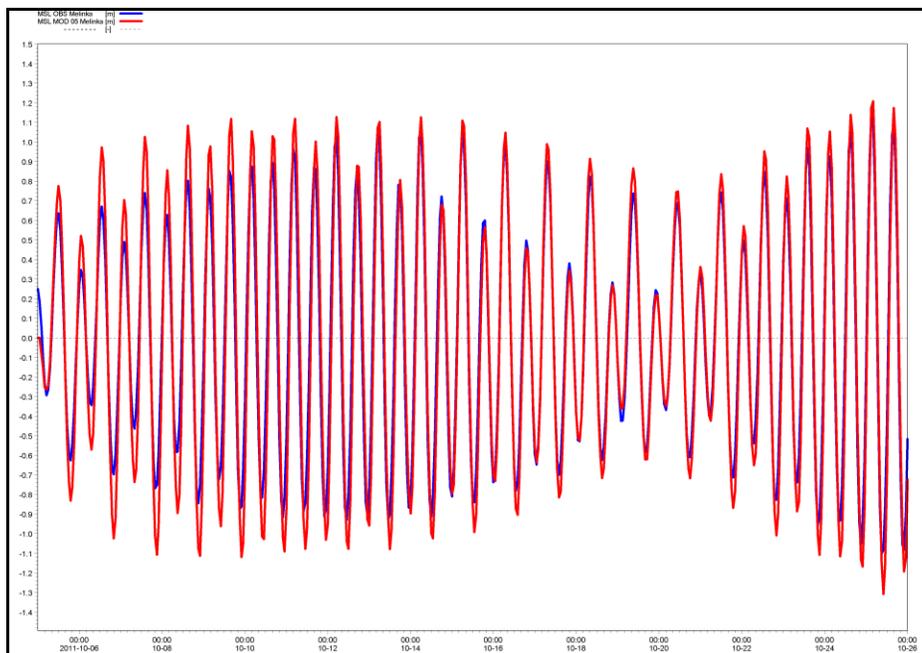


Figura 29. Evaluación de la anomalía del nivel del mar en el islote Quetros entre el registro del mareógrafo (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.

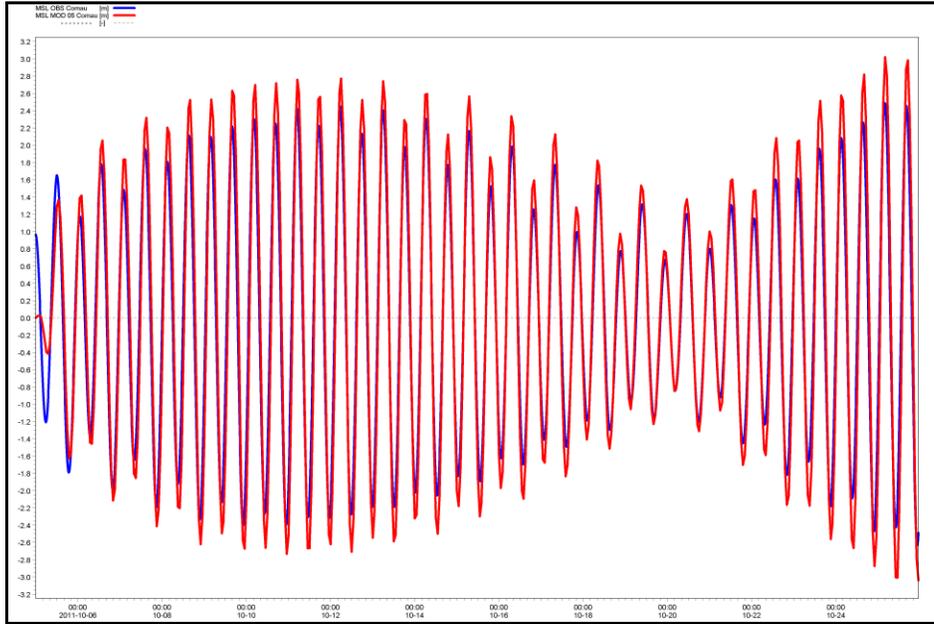


Figura 30. Evaluación de la anomalía del nivel del mar en el fiordo Comau entre el registro del mareógrafo (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.

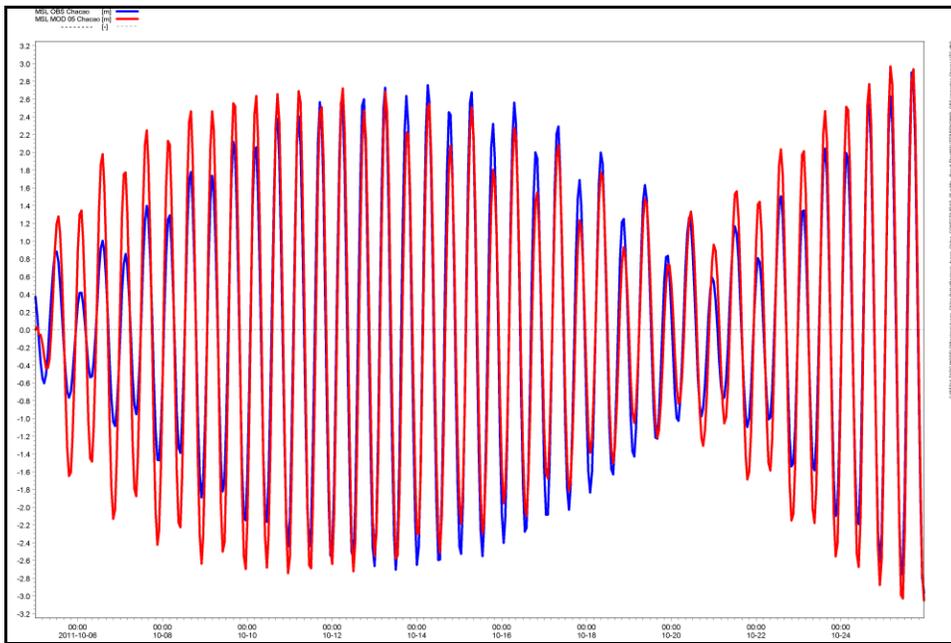


Figura 31. Evaluación de la anomalía del nivel del mar en el canal de Chacao entre el registro del mareógrafo (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.

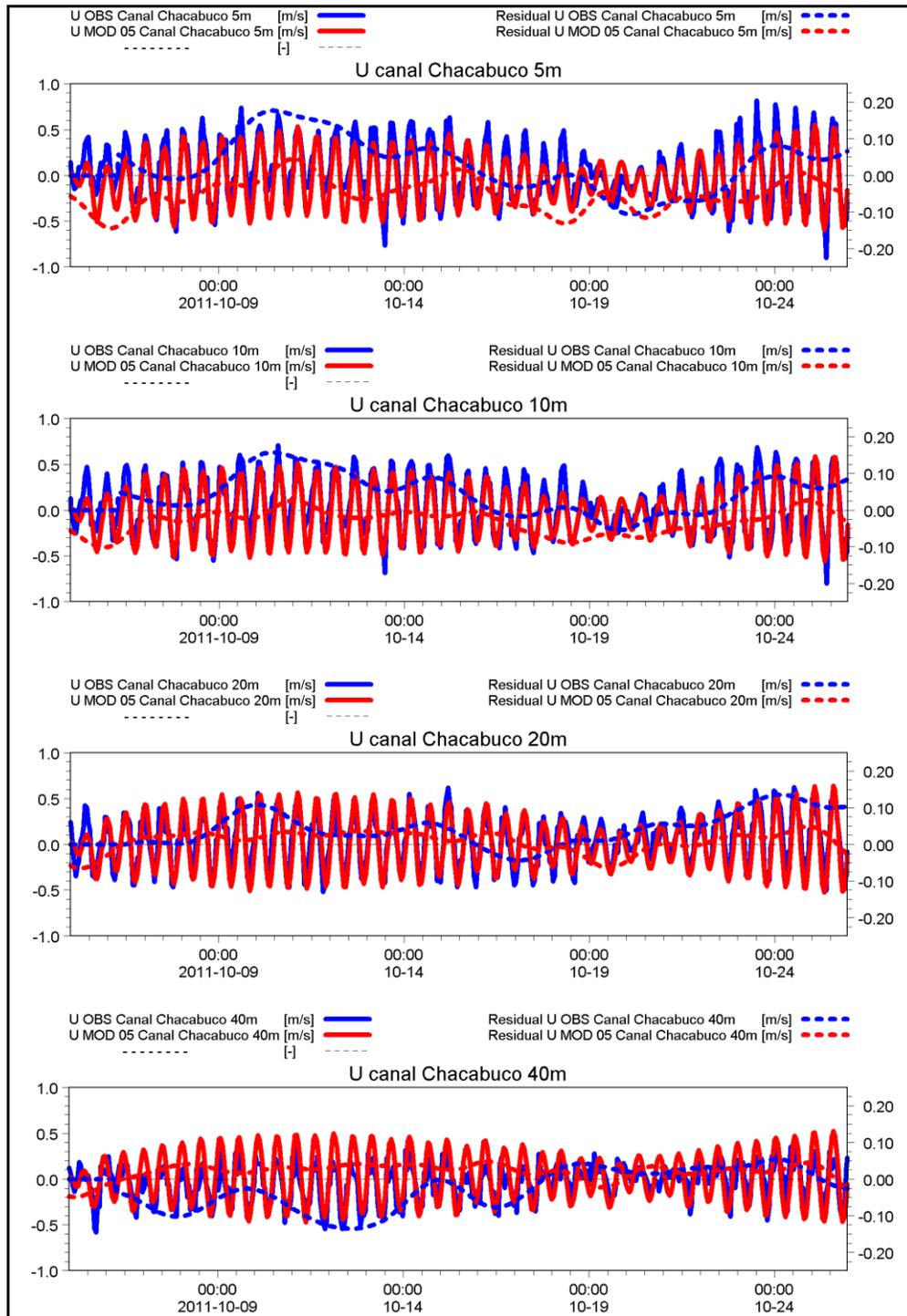


Figura 32. Evaluaci3n de la componente U de la velocidad en el canal Chacabuco entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chilo3-Ays3n (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.

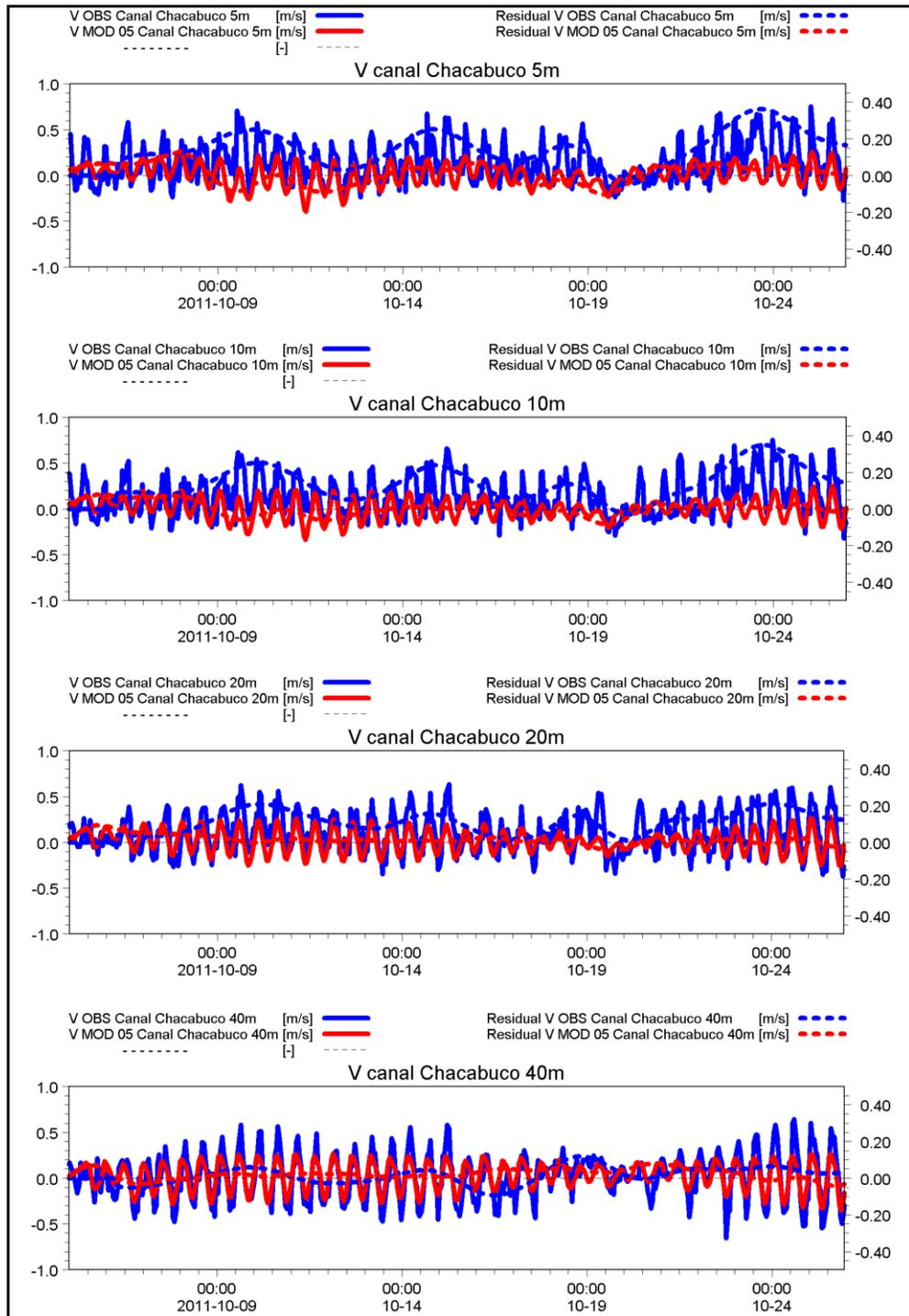


Figura 33. Evaluación de la componente V de la velocidad en el canal Chacabuco entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.

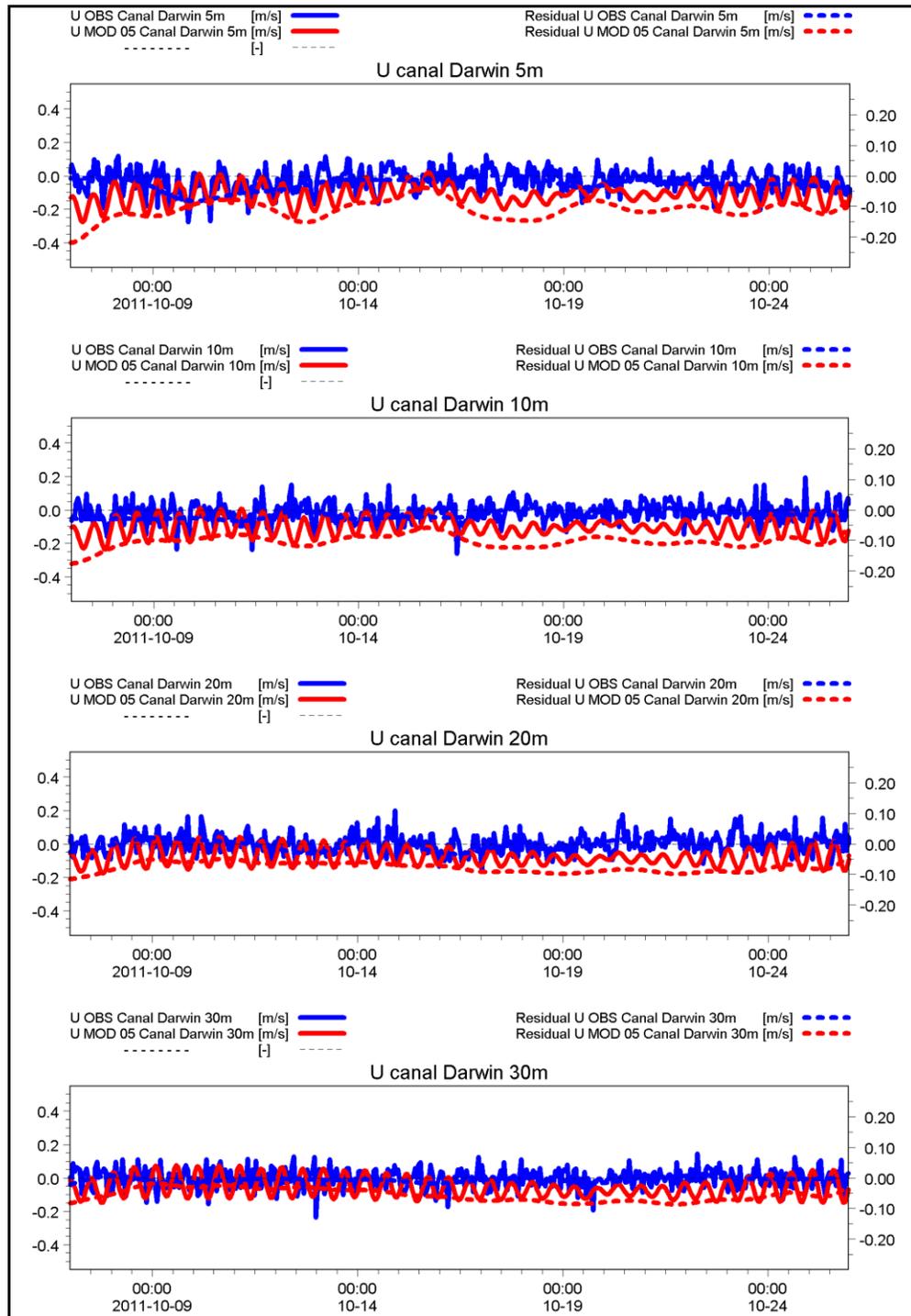


Figura 34. Evaluaci3n de la componente U de la velocidad en el canal Darwin entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chilo3-Ays3n (rojo) entre el 7 y el 26 de Octubre 2011.

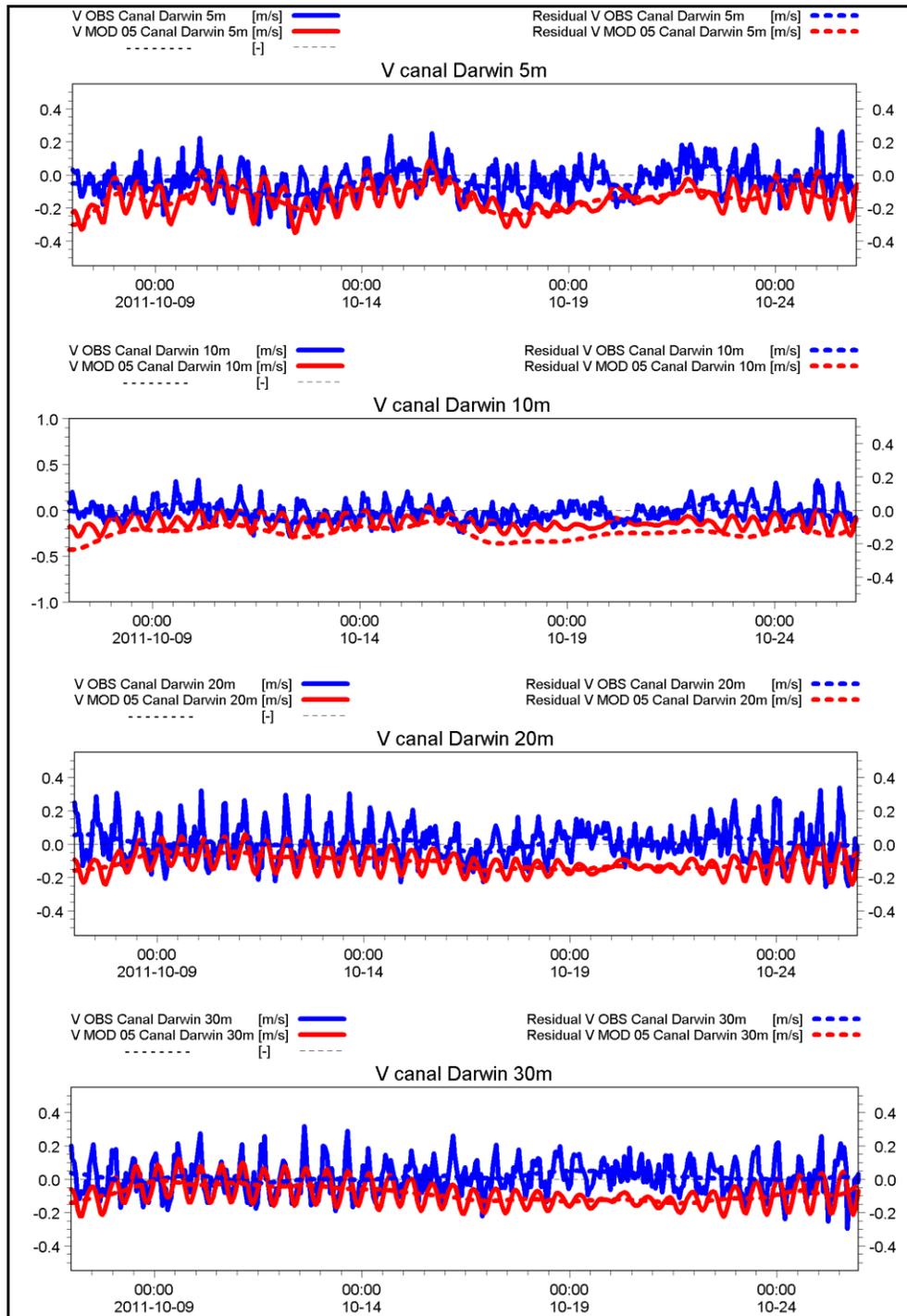


Figura 35. Evaluaci3n de la componente V de la velocidad en el canal Darwin entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chilo3-Ays3n (rojo) entre el 7 y el 26 de Octubre 2011.

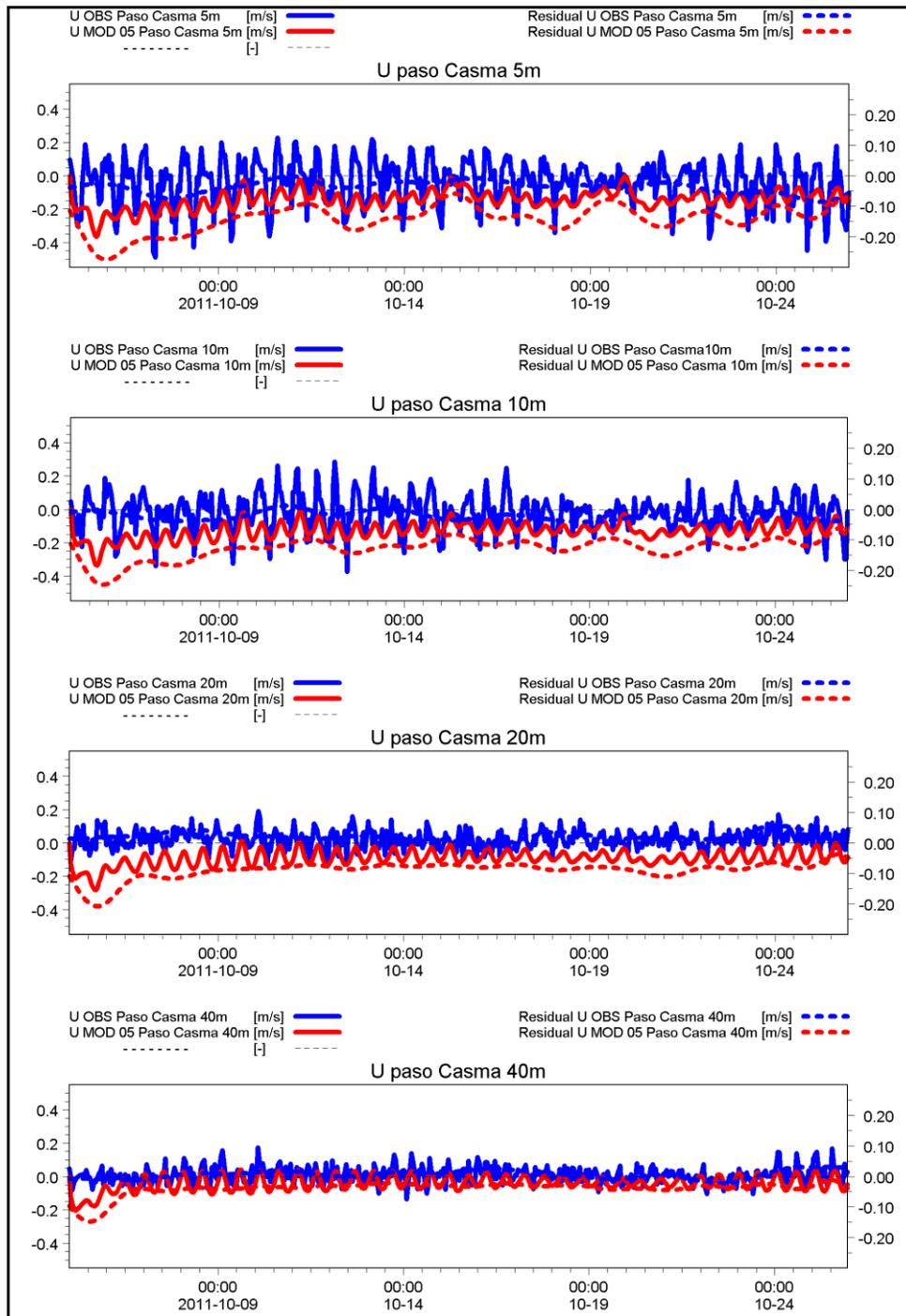


Figura 36. Evaluaci3n de la componente U de la velocidad en el paso Casma entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chilo3-Ays3n (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.

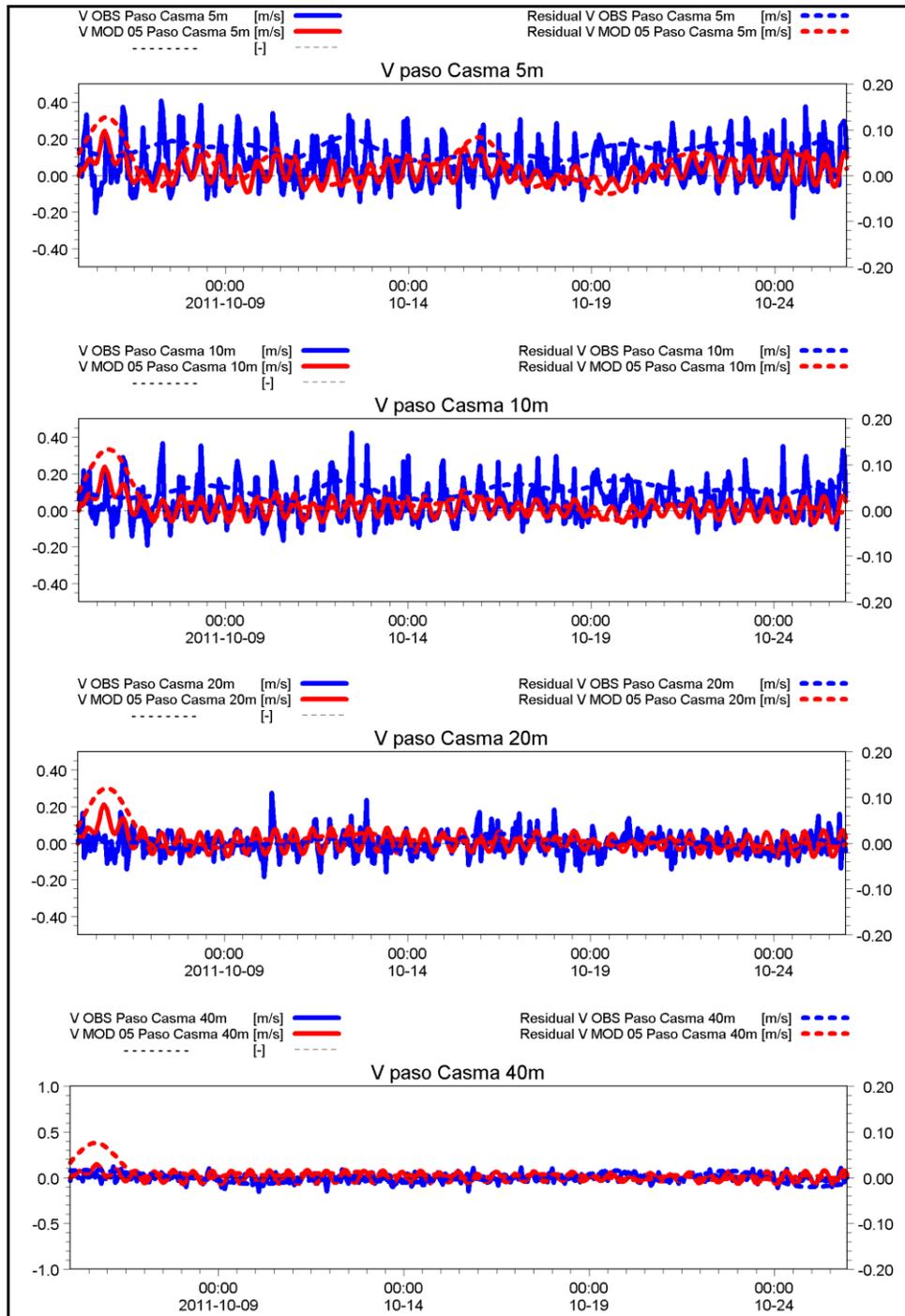


Figura 37. Evaluación de la componente V de la velocidad en el paso Casma entre el registro del ADCP (azul) y el modelo regional Chiloé-Aysén (rojo) entre el 5 y el 26 de Octubre 2011.

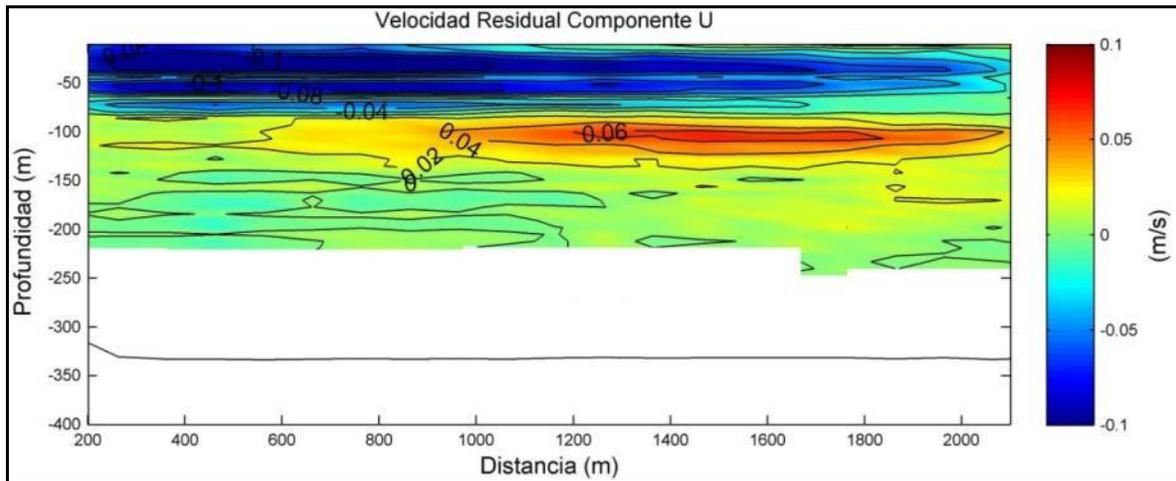


Figura 38. Componente U del flujo residual de la corriente en una sección transversal del fiordo Aysén registrada con ADCP remolcado.

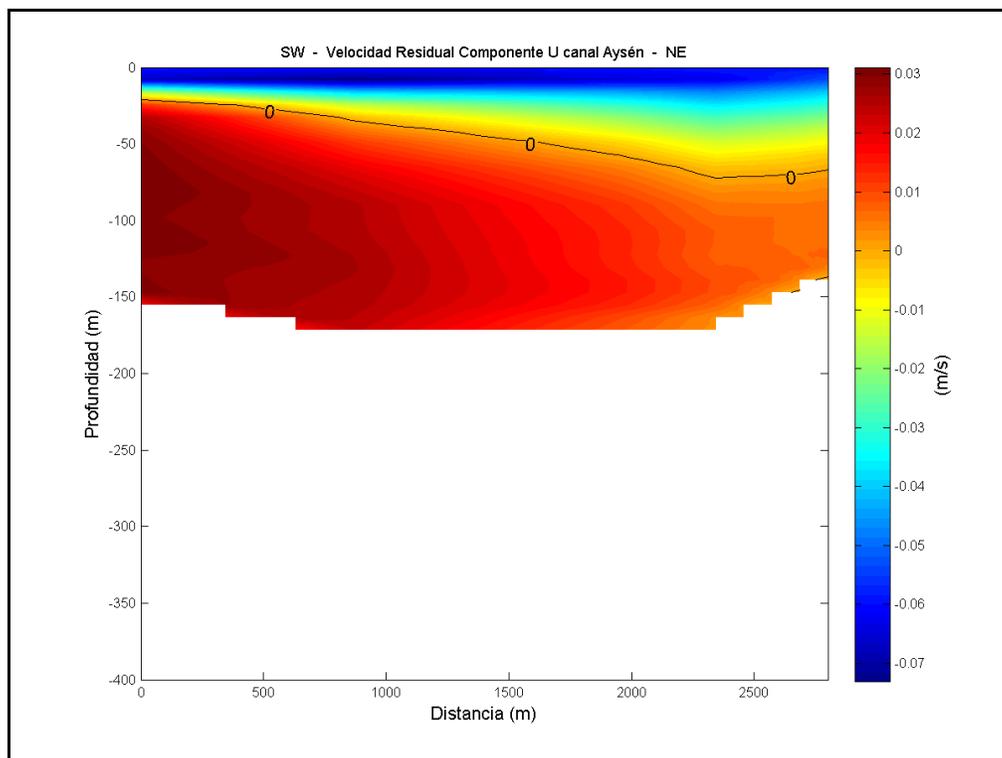


Figura 39. Componente U del flujo residual de la corriente en una sección transversal del fiordo Aysén del modelo regional Chiloé-Aysén.

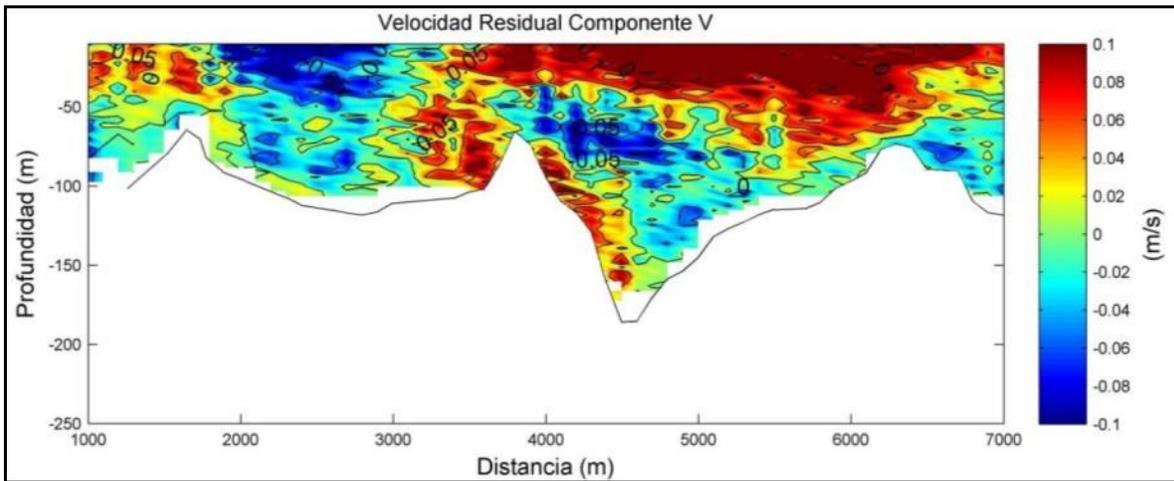


Figura 40. Componente V del flujo residual de la corriente en una sección transversal del estero Quitralco registrada con ADCP remolcado.

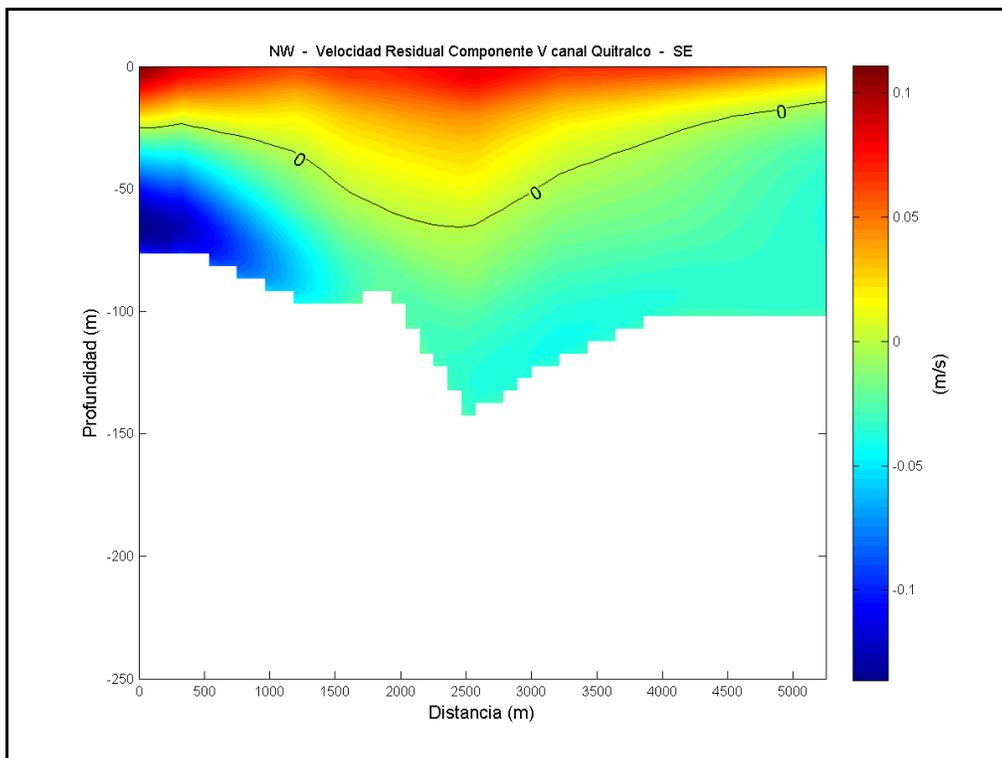


Figura 41. Componente V del flujo residual de la corriente en una sección transversal del estero Quitralco del modelo regional Chiloé-Aysén.

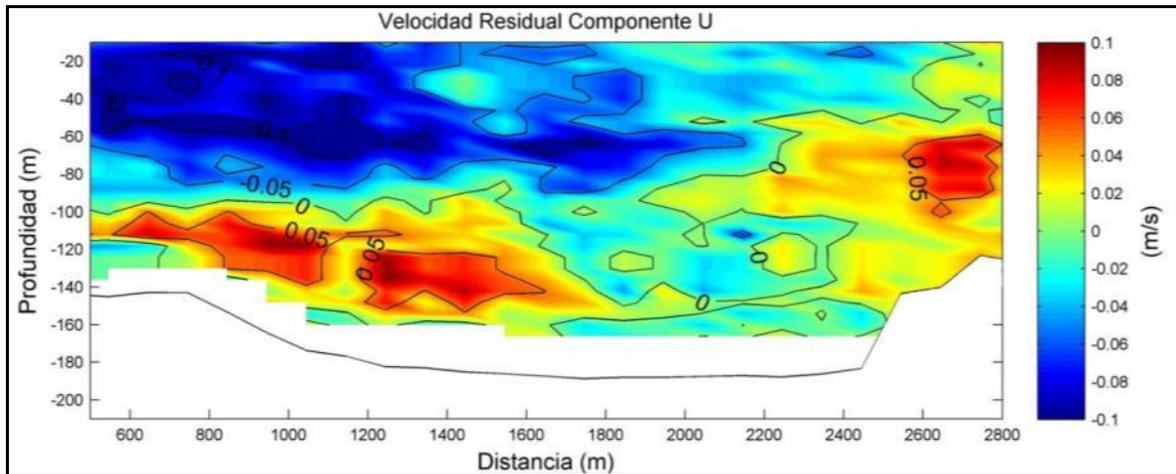


Figura 42. Componente U del flujo residual de la corriente en una secci3n transversal del canal Darwin registrada con ADCP remolcado.

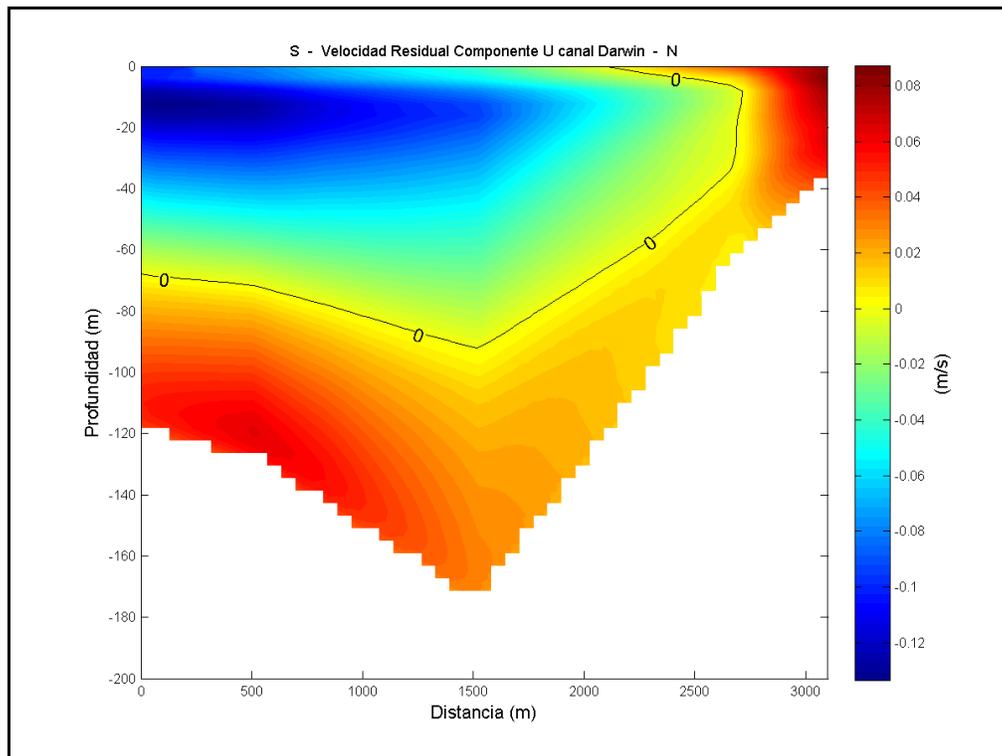


Figura 43. Componente U del flujo residual de la corriente en una secci3n transversal del canal Darwin del modelo regional Chilo3-Ays3n.

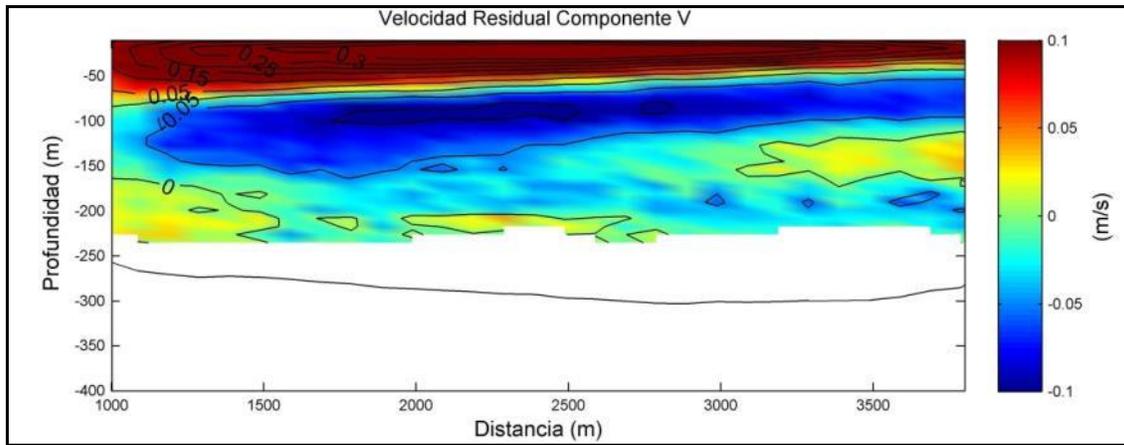


Figura 44. Componente V del flujo residual de la corriente en una secci3n transversal del canal Costa registrada con ADCP remolcado.

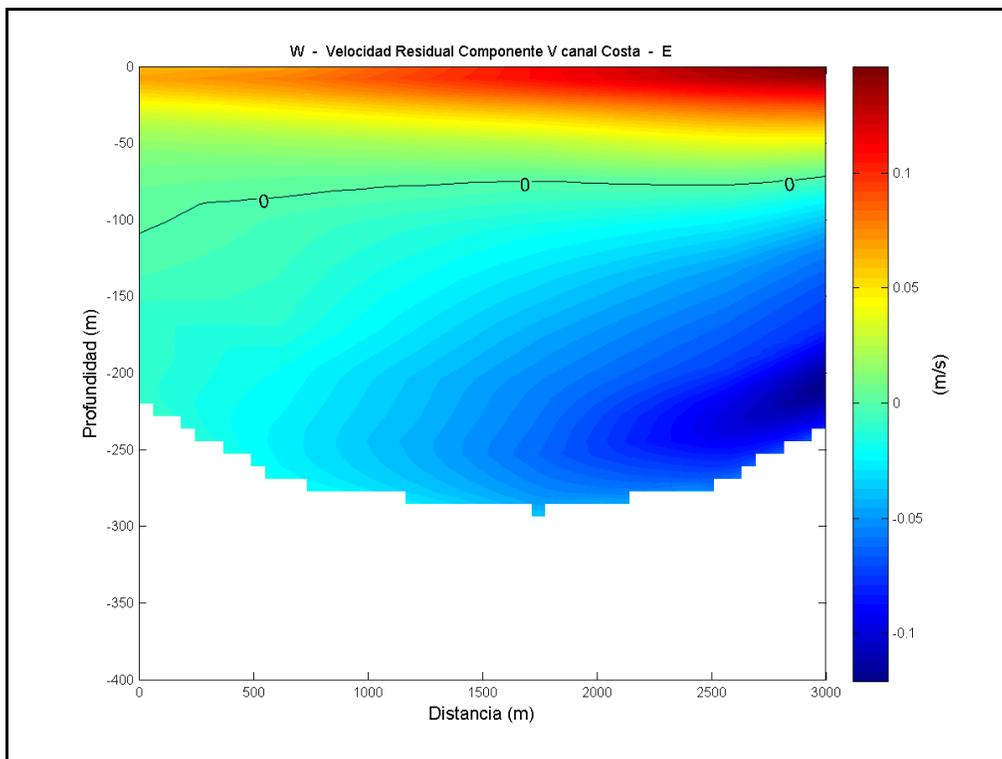


Figura 45. Componente V del flujo residual de la corriente en una secci3n transversal del canal Costa del modelo regional Chilo3-Ays3n.

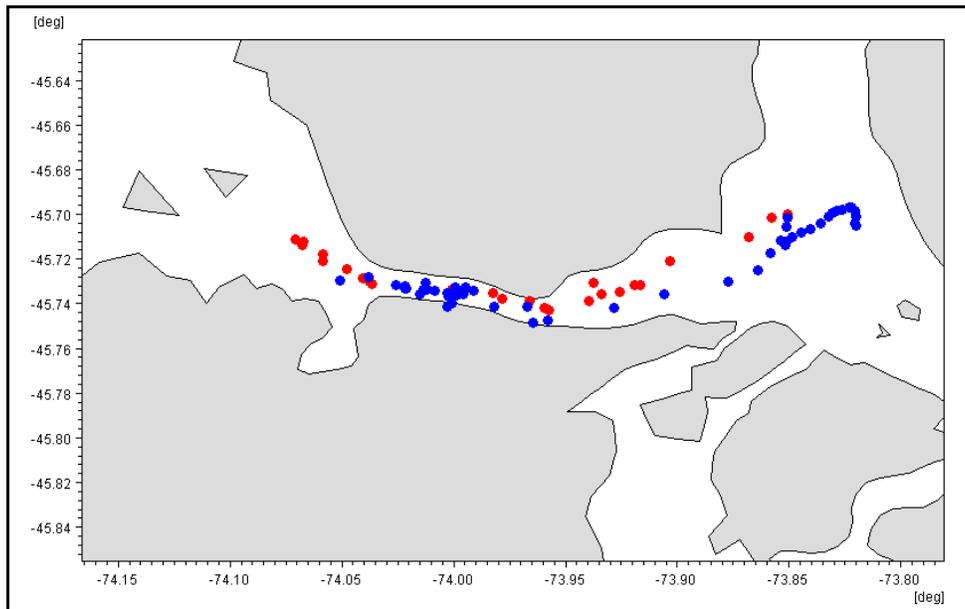


Figura 46. Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en el canal Chacabuco. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.

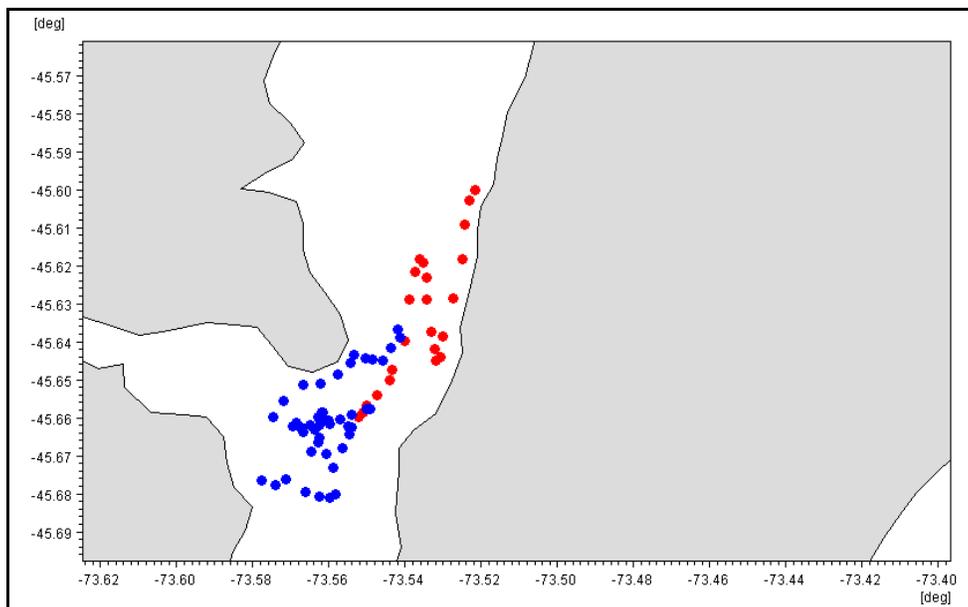


Figura 47. Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en el canal Costa. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.

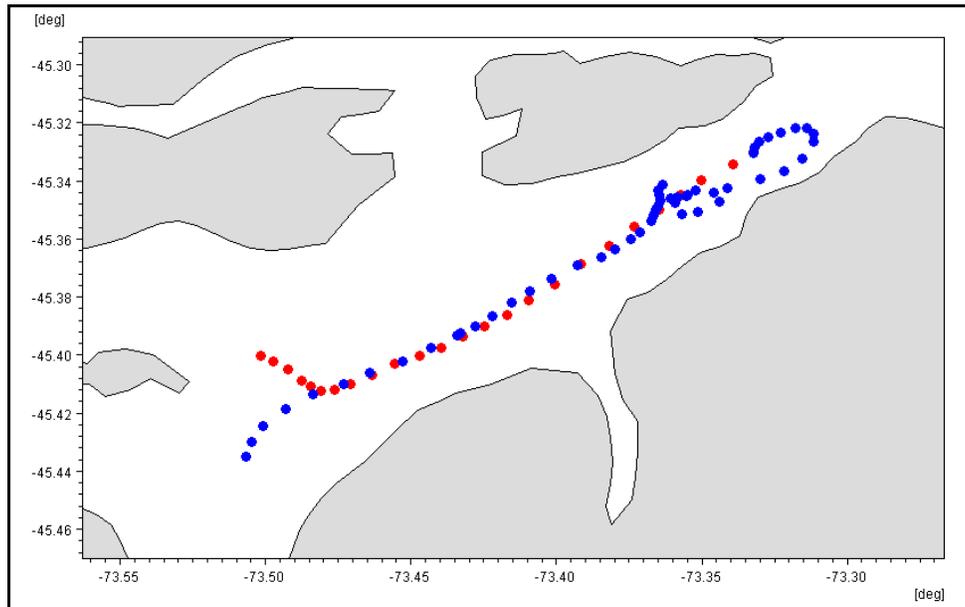


Figura 48. Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en el fiordo Aysén. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.

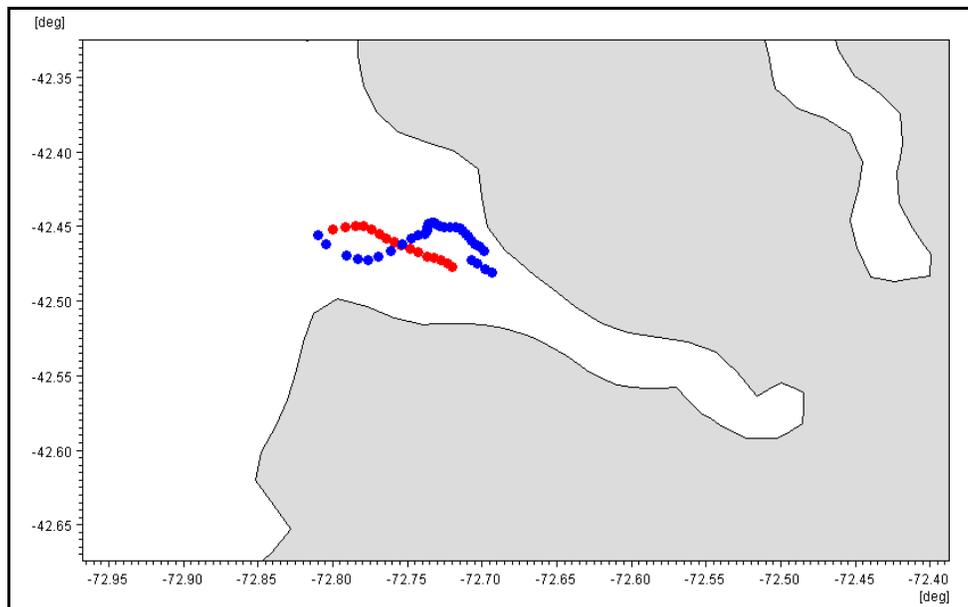


Figura 49. Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en el fiordo Reñihue. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.

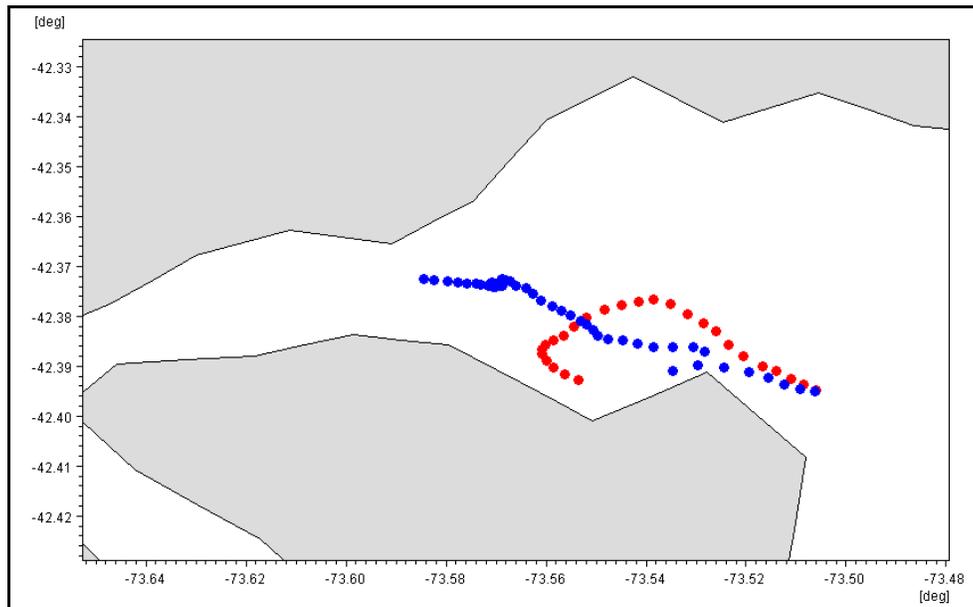


Figura 50. Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en las cercanías de Dalcahue. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.

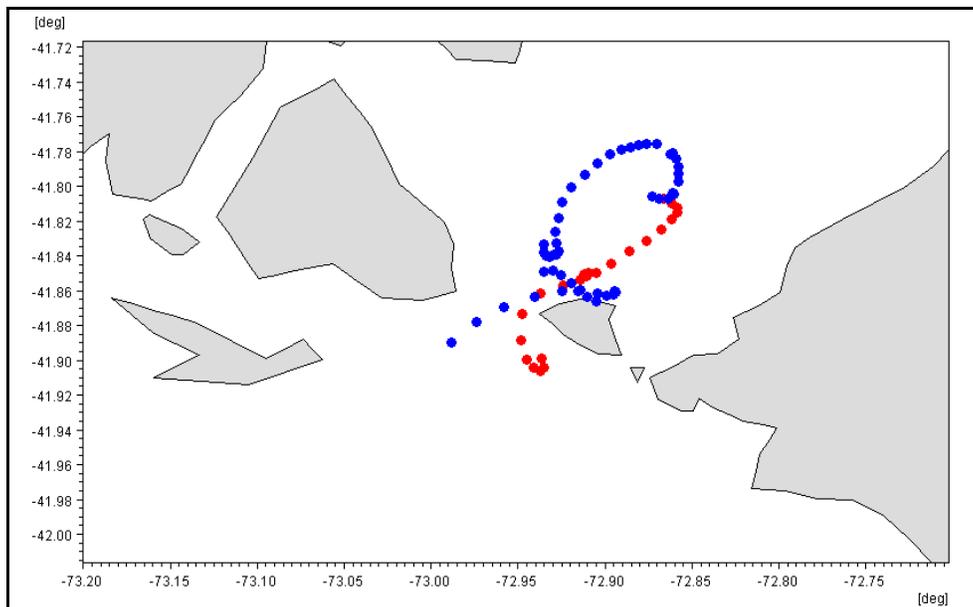


Figura 51. Comparativa trayectorias seguidas por los derivadores lagrangianos a 4 metros de profundidad en el seno de Reloncaví. Trayectoria del derivador de terreno en azul y del derivador del modelo regional Chiloé-Aysén en rojo.

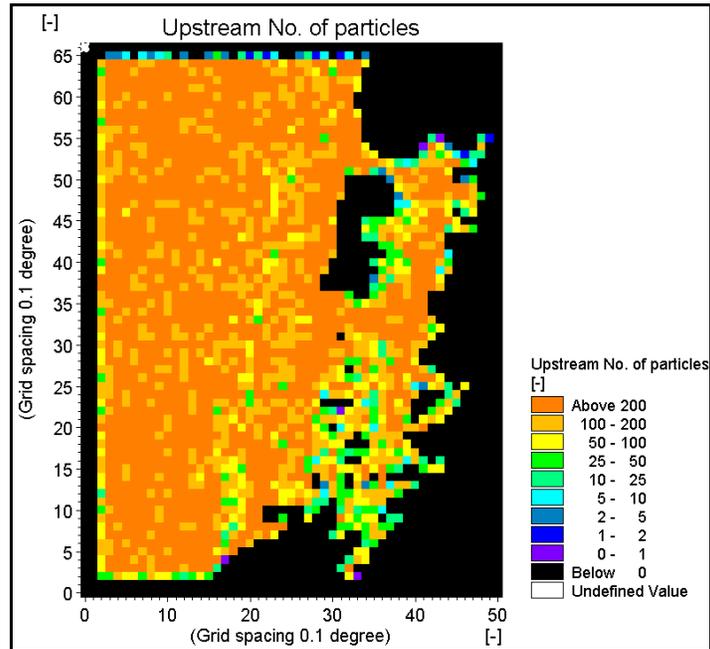


Figura 52. Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *upstream* del modelo estacional Invierno-Cuadratura.

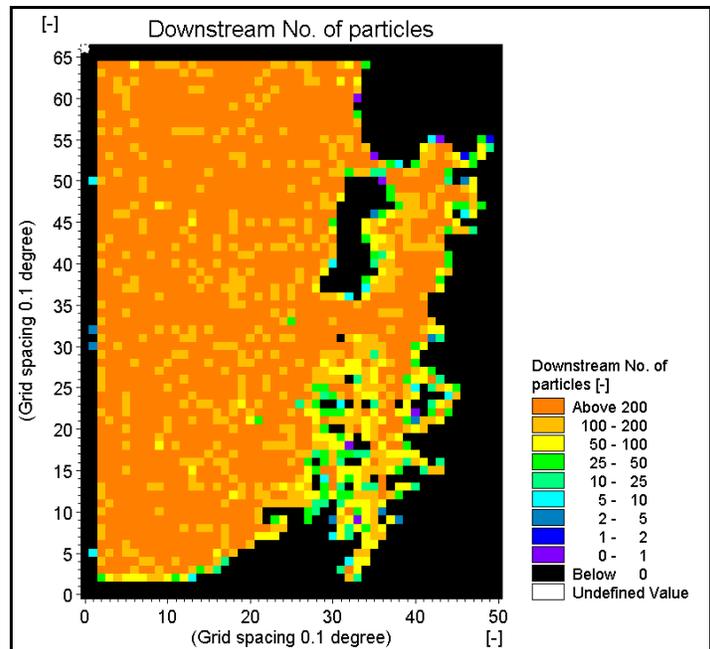


Figura 53. Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *downstream* del modelo estacional Invierno-Cuadratura.

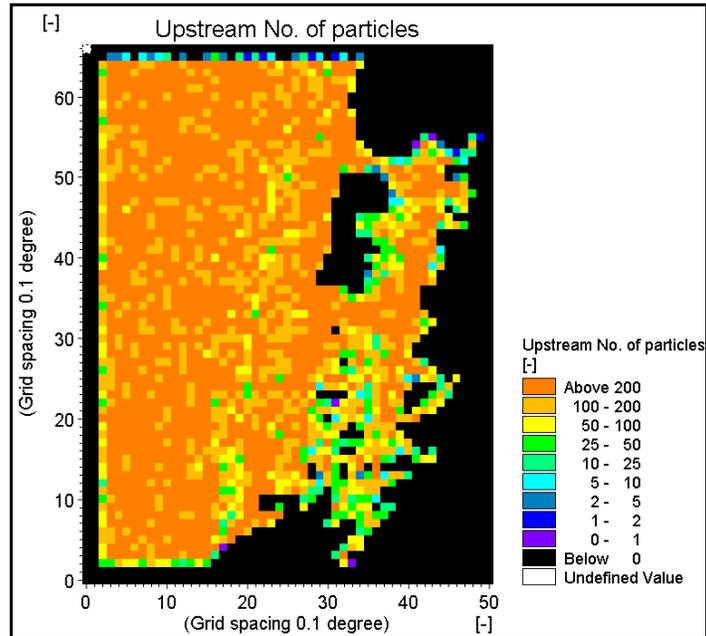


Figura 54. Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *upstream* del modelo estacional Invierno-Sicigia.

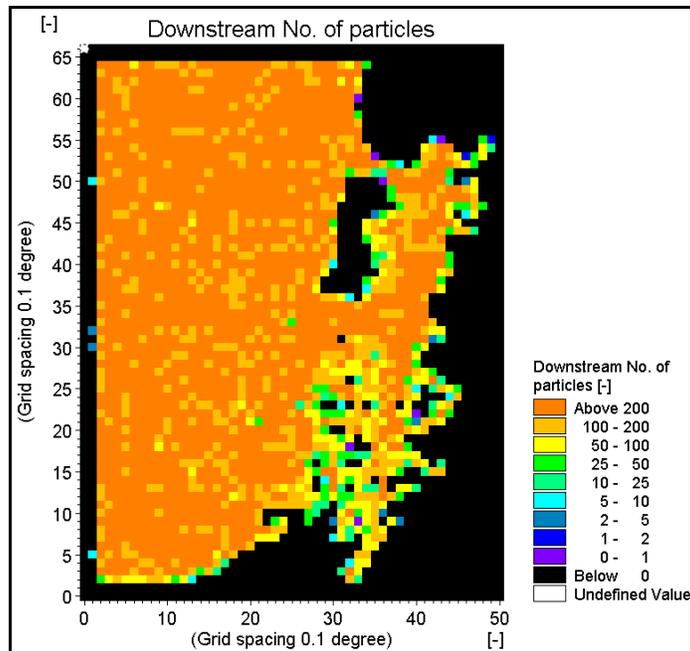


Figura 55. Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *downstream* del modelo estacional Invierno-Sicigia.

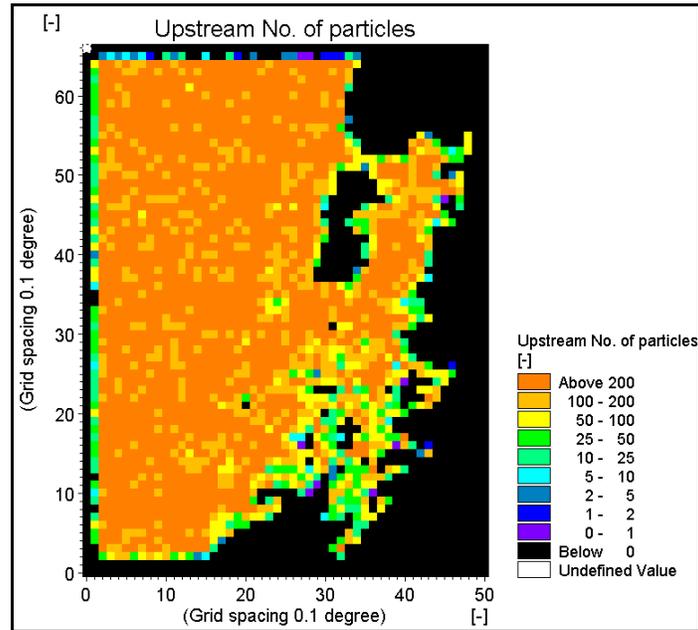


Figura 56. Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *upstream* del modelo estacional Verano-Cuadratura.

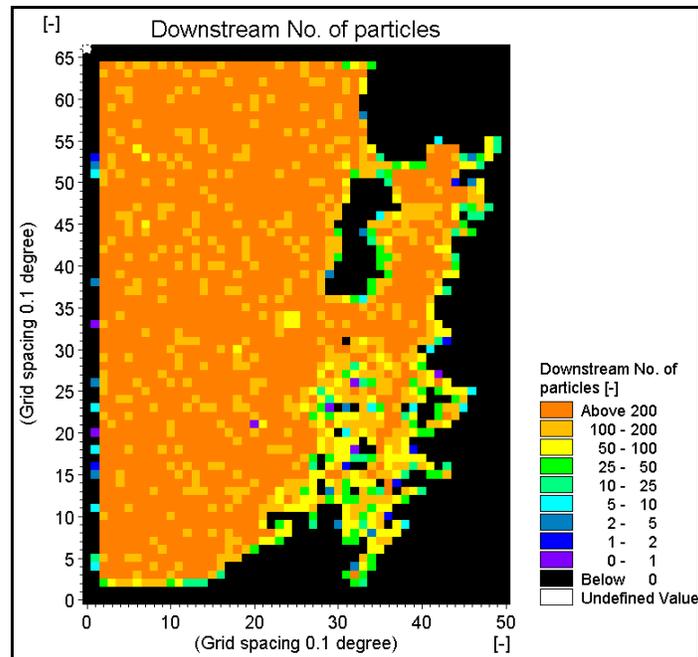


Figura 57. Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *downstream* del modelo estacional Verano-Cuadratura.

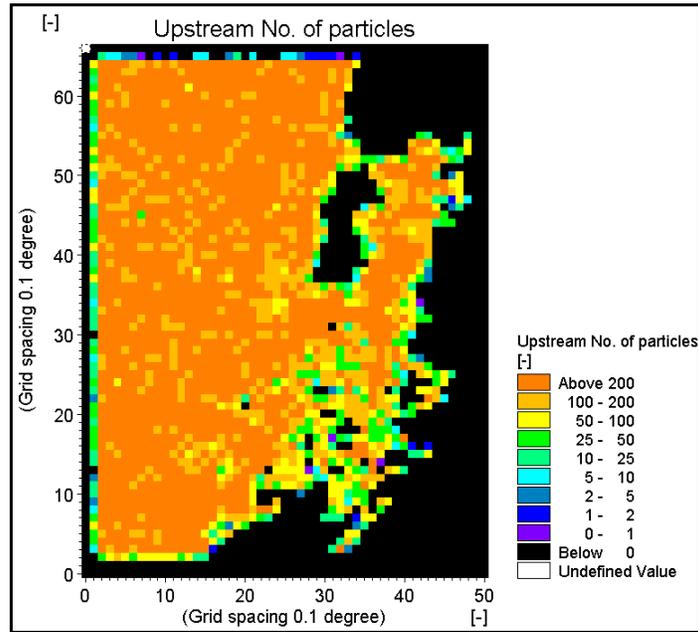


Figura 58. Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *upstream* del modelo estacional Verano-Sicigia.

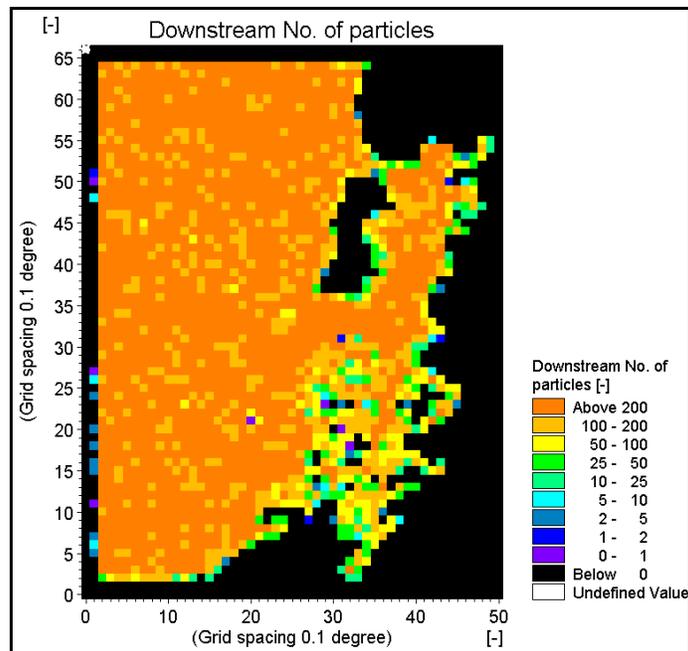


Figura 59. Número de partículas por unidad de trabajo (caja) en el caso de la conectividad *downstream* del modelo estacional Verano-Sicigia.

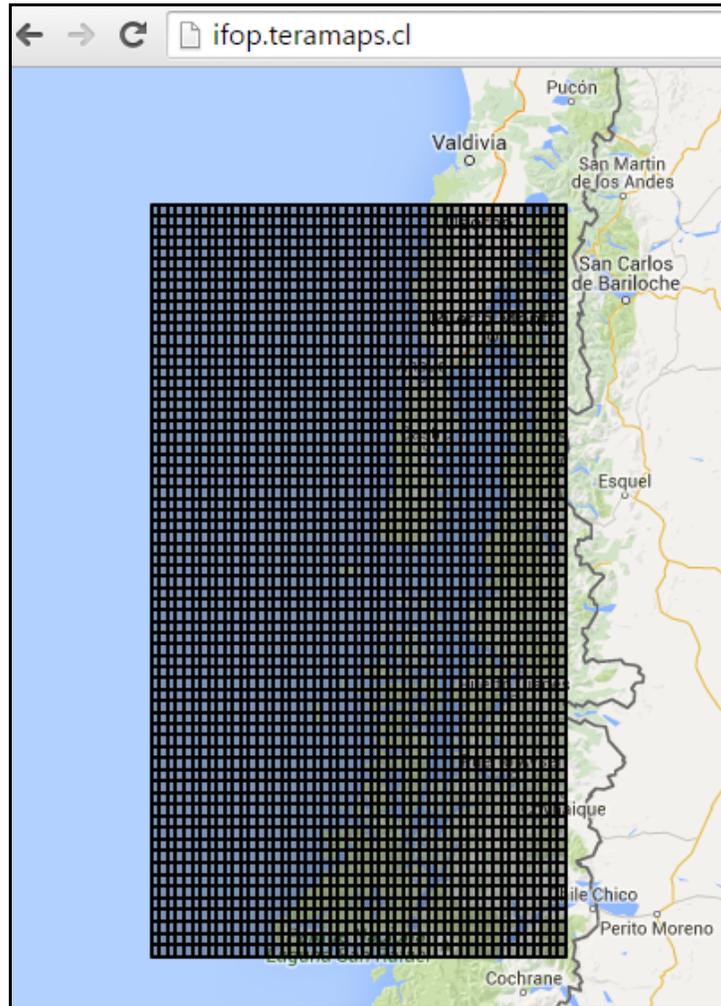


Figura 60. Vista inicial del geoportal IFOP en el dominio ifop.teramaps.cl.

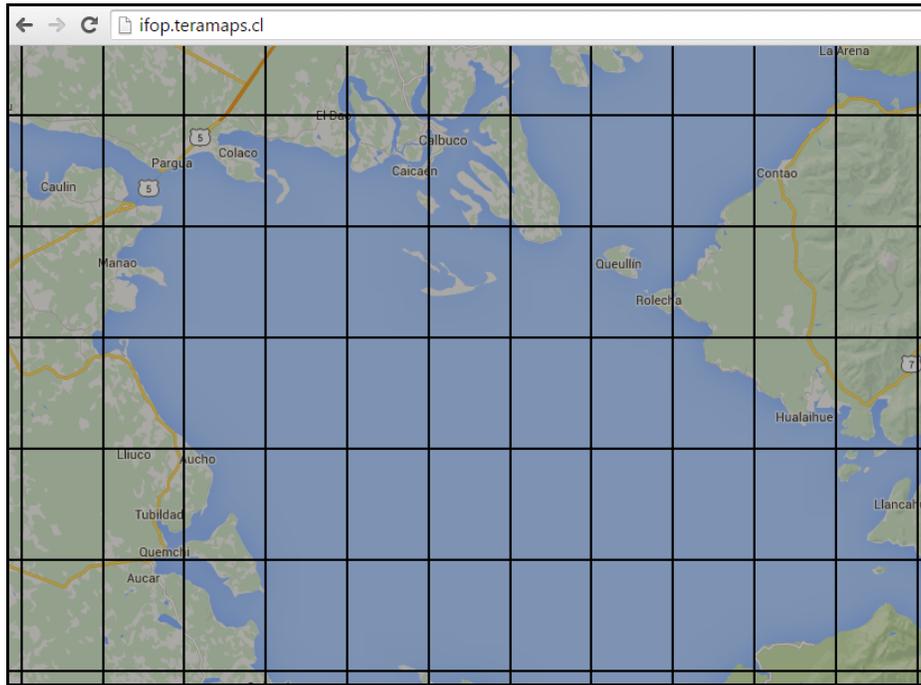


Figura 61. Zoom en el golfo de Ancud.

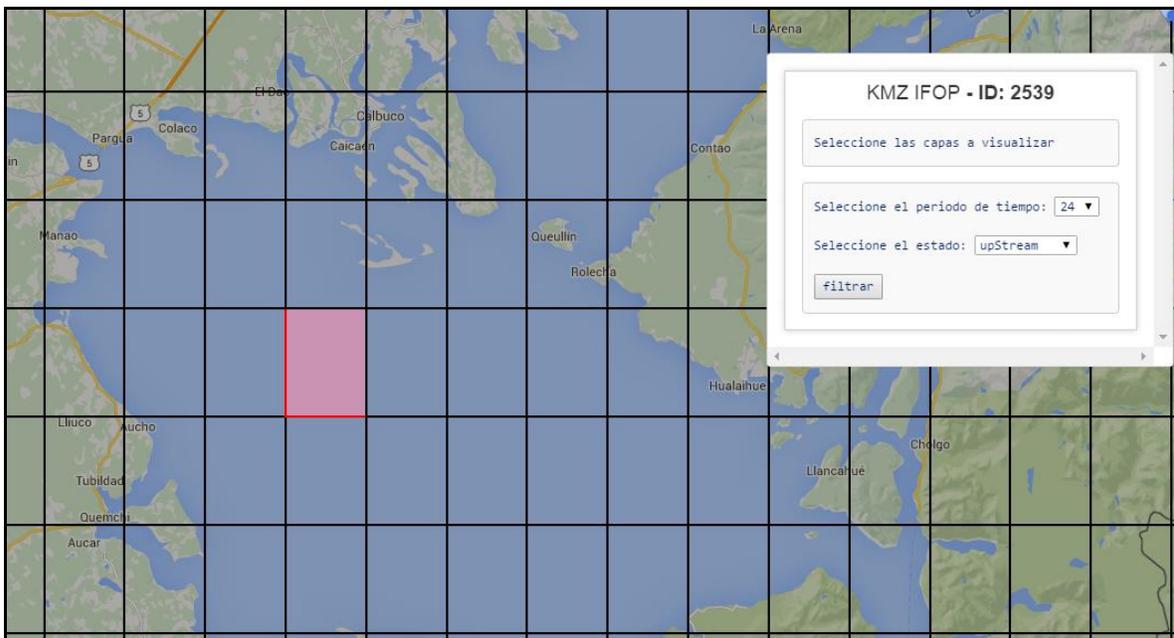


Figura 62. Selecci3n de caja y filtro de ventana emergente.



Figura 63. Selecci3n del filtro deseado en la ventana emergente.

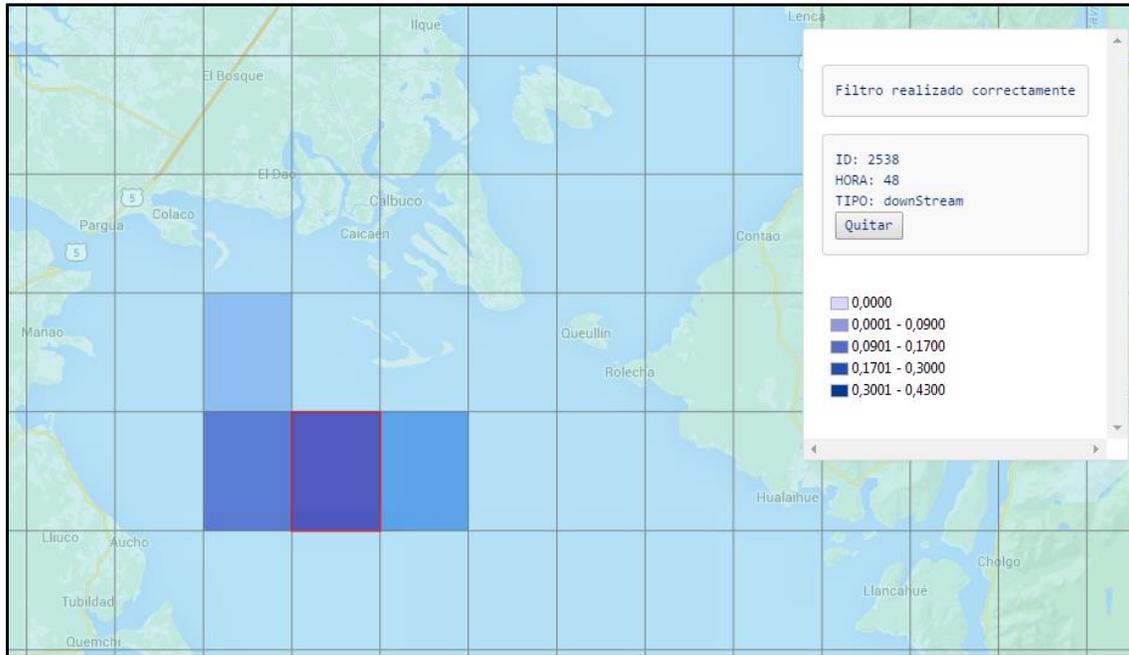


Figura 64. Mapa de probabilidades asociado a la caja seleccionada (bordes rojos) junto con leyenda de escala de rangos.

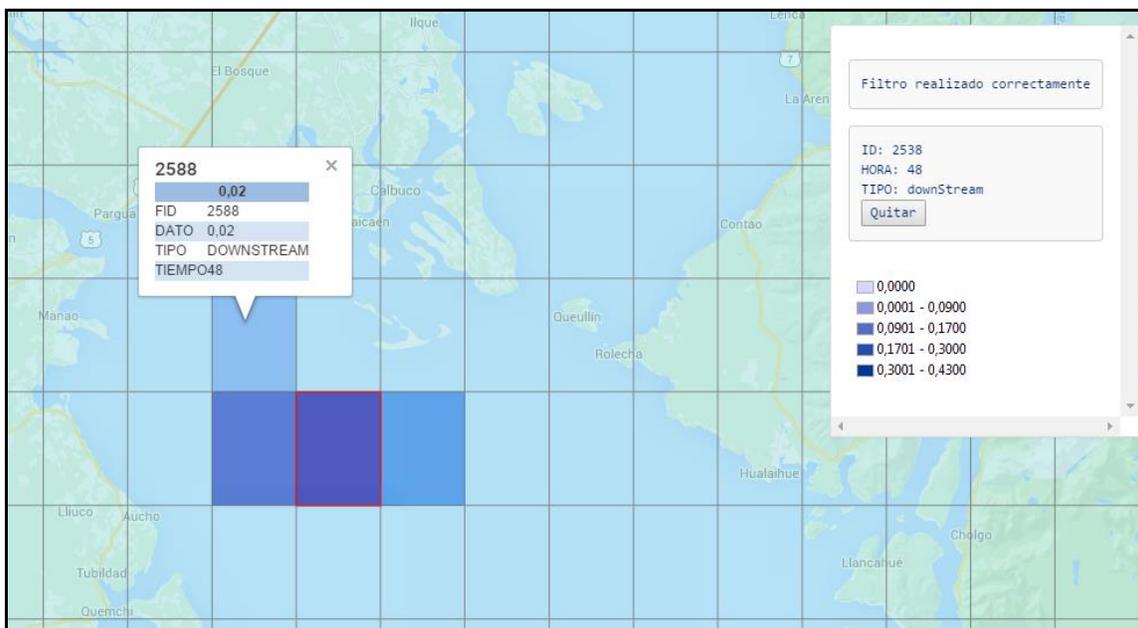


Figura 65. Información de probabilidad dispersión de la caja ID:2588 con un filtro downstream a un horizonte de 48 horas respecto de la caja ID:2538.

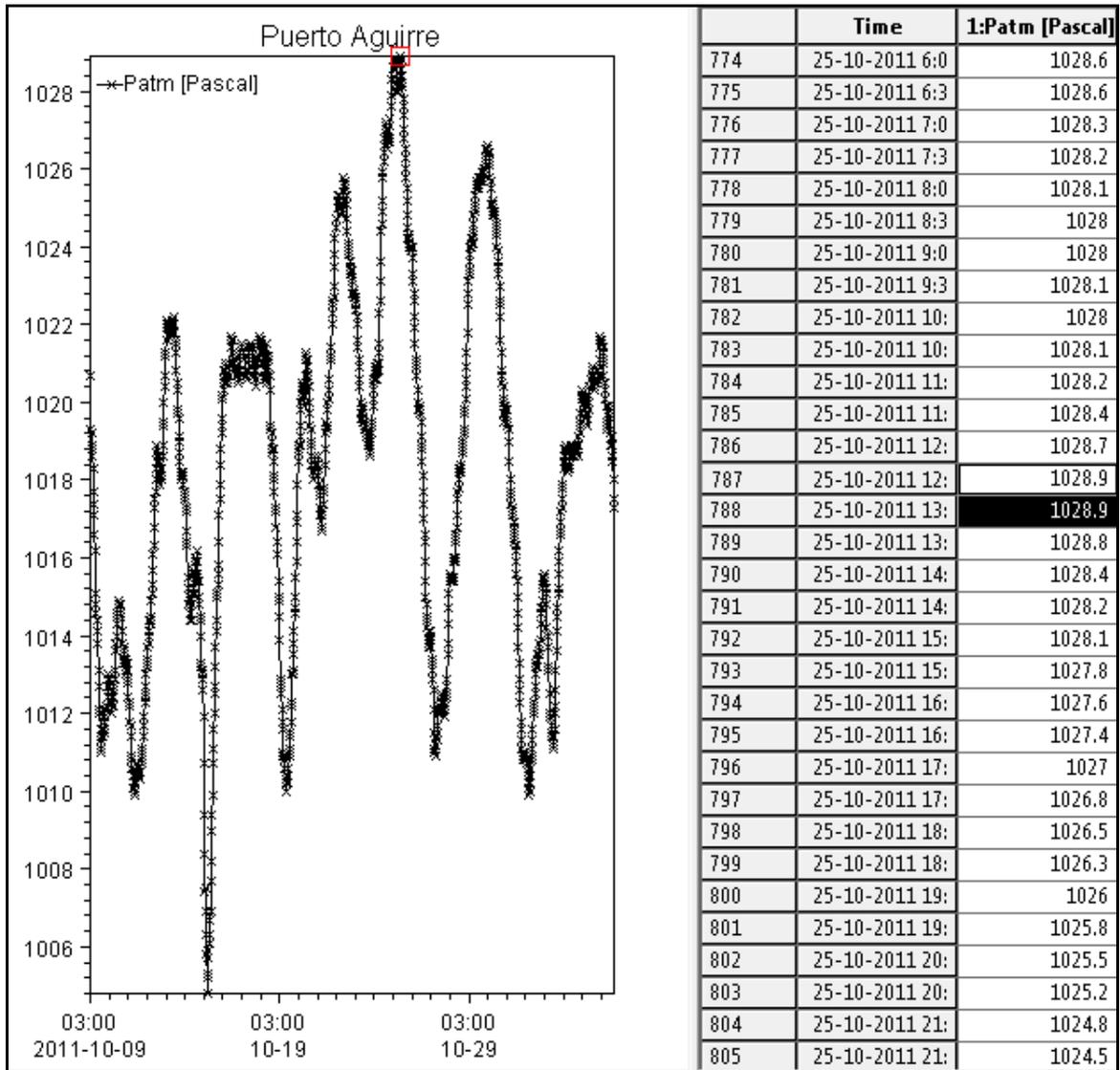


Figura 66. Presión atmosférica registrada en Puerto Aguirre por IFOP en Octubre 2011.

T A B L A S

**Tabla 1.**

Posición y periodo de medición de los mareógrafos cuyos registros del nivel del mar han sido utilizados en la evaluación del modelo regional Chiloé-Aysén.

Mareógrafos	Long	Lat	Fecha Inicio	Fecha Fin
canal Chacabuco	-73.912	-45.711	01/10/2011	06/11/2011
isla Colorada	-73.351	-45.343	26/09/2011	05/11/2011
islote Quetros	-73.765	-45.459	05/10/2011	06/11/2011
Melinka	-73.748	-43.896	19/04/2011	06/06/2011
fiordo Comau	-72.576	-42.138	16/10/2010	11/12/2010
canal Chacao	-73.411	-41.868	09/10/2010	11/11/2010

Tabla 2.

Posición y periodo de medición de los ADCP fondeados cuyos registros del nivel del mar han sido utilizados en la evaluación del modelo regional Chiloé-Aysén

ADCP fondeado	Long	Lat	Fecha Inicio	Fecha Fin
canal Chacabuco	-73.858	-45.713	02/10/2011	06/11/2011
canal Darwin	-73.719	-45.396	06/10/2011	06/11/2011
paso Casma	-73.540	-45.427	26/09/2011	05/11/2011

Tabla 3.

Posición y periodo de medición de los ADCP remolcados cuyos registros del nivel del mar han sido utilizados en la evaluación del modelo regional Chiloé-Aysén.

ADCP remolcado	Punto 1		Punto 2		Fecha inicio	Duración (horas)
	Long	Lat	Long	Lat		
fiordo Aysén	-73.144	-45.315	-73.127	-45.292	24/09/2011	24
estero Quitralco	-73.593	-45.783	-73.541	-45.813	29/09/2011	24
canal Darwin	-73.782	-45.450	-73.782	-45.422	05/10/2011	12
canal Costa	-73.548	-45.530	-73.511	-45.537	27/09/2011	24

Tabla 4.

Posición y periodo de medición de los derivadores lagrangianos cuyos registros del nivel del mar han sido utilizados en la evaluación del modelo regional Chiloé-Aysén.

Derivador 4 m profundidad	Punto inicio		Fecha inicio	Duración (horas)
	Long	Lat		
canal Chacabuco	-73.850	-45.699	02/10/2011	24
canal Costa	-73.541	-45.638	28/09/2011	23
fiordo Aysén	-73.332	-45.330	26/09/2011	24
fiordo Reñihue	-72.809	-42.456	28/09/2011	16
Dalcahue	-73.506	-42.394	21/09/2011	25
seno Reloncaví	-72.872	-41.806	25/09/2011	25



Tabla 5.

Estadísticos de evaluación de la anomalía del nivel del mar del modelo regional Chiloé-Aysén.

Mareógrafo	NRMSE	CC
canal Chacabuco	7.32	95.15
isla Colorada	6.28	97.2
islote Quetros	6.29	97.05
Melinka	7.01	97.62
fiordo Comau	7.63	97.82
canal Chacao	7.17	96.35

Tabla 6.

Estadísticos de evaluación de las componentes U y V de la velocidad de la corriente el modelo regional Chiloé-Aysén en el canal Chacabuco.

U canal Chacabuco	NRMSE	CC	V canal Chacabuco	NRMSE	CC
5 m	10.55 (35.67)	89.23 (62.64)	5 m	25.60 (40.23)	44.96 (27.26)
10 m	10.29 (40.41)	91.89 (71.38)	10 m	24.56 (43.28)	46.47 (6.73)
20 m	11.34 (29.53)	91.21 (37.71)	20 m	19.02 (57.41)	63.91 (-32.45)
40 m	19.84 (42.42)	78.69 (-36.64)	40 m	11.74 (23.95)	82.54 (6.42)

Tabla 7.

Estadísticos de evaluación de las componentes U y V de la velocidad de la corriente del modelo regional Chiloé-Aysén en el canal Darwin.

U canal Darwin	NRMSE	CC	V canal Darwin	NRMSE	CC
5 m	32.02 (114.06)	29.94 (-31.38)	5 m	25.82 (47.66)	64.09 (55.63)
10 m	39.61 (211.03)	13 (-22.93)	10 m	27.66 (97.76)	51.67 (29.72)
20 m	24.49 (143.09)	-6.39 (21.36)	20 m	27.35 (120)	55.29 (-20.88)
30 m	15.38 (145.59)	-6.76 (-10.21)	30 m	24.76 (157.28)	50.64 (-61.62)

Tabla 8.

Estadísticos de evaluación de las componentes U y V de la velocidad de la corriente del modelo regional Chiloé-Aysén en el paso Casma.

U paso Casma	NRMSE	CC	V paso Casma	NRMSE	CC
5 m	22.78 (138.42)	40.26 (36.68)	5 m	17.45 (93.18)	39.77 (-32.76)
10 m	22.45 (220.68)	39.63 (-3.88)	10 m	15.83 (81.38)	42.38 (-42.97)
20 m	41.66 (182.33)	2.36 (-2.59)	20 m	16.28 (53.63)	14.01 (20.21)
40 m	23.65 (95.30)	31.03 (45.48)	40 m	20.17 (43.09)	23.79 (47.16)

**Tabla 9.**

Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén en el canal Chacabuco.

Derivador canal Chacabuco	Distancia total recorrida (km)	Velocidad promedio (cm/s)	Distancia neta (km)
Terreno	23.4	27	18.6
Modelo	23.8	27	20

Tabla 10.

Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén en el canal Costa.

Derivador canal Costa	Distancia total recorrida (km)	Velocidad promedio (cm/s)	Distancia neta (km)
Terreno	13.7	16	3.6
Modelo	13.5	16	7.8

Tabla 11.

Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén en el fiordo Aysén.

Derivador fiordo Aysén	Distancia total recorrida (km)	Velocidad promedio (cm/s)	Distancia neta (km)
Terreno	24.9	28	17.9
Modelo	17.2	20	16

Tabla 12.

Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén en el fiordo Reñihue.

Derivador Fiordo Reñihue	Distancia total recorrida (km)	Velocidad promedio (cm/s)	Distancia neta (km)
Terreno	14.4	25	9.9
Modelo	9.2	16	8.1



Tabla 13.

Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén cerca de Dalcahue.

Derivador Dalcahue	Distancia total recorrida (km)	Velocidad promedio (cm/s)	Distancia neta (km)
Terreno	8.7	9	6.9
Modelo	7.5	8	4

Tabla 14.

Estadísticos descriptivos de las trayectorias de los derivadores lagrangianos de terreno y del modelo regional Chiloé-Aysén en el seno Reloncaví.

Derivador seno Reloncaví	Distancia total recorrida (km)	Velocidad promedio (cm/s)	Distancia neta (km)
Terreno	31.2	34	13.3
Modelo	17.8	19	11.7



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