



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SECRETARIA DE INFRAESTRUCTURA
Y POLÍTICA HÍDRICA
REPÚBLICA ARGENTINA



Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica

Proyecto PIO CONICET – Fundación YPF

INFORME Nº 1 – Estado del arte y análisis batimétrico



*Proyecto INA 372
Informe LHA 01-372-18
Ezeiza, febrero de 2018*

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Ing. Pablo Spalletti

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Julio C. DE LÍO (A/C)

DIRECTOR DEL LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Julio C. DE LÍO

JEFE DEL PROGRAMA DE HIDRÁULICA COMPUTACIONAL

Dr. Ángel N. MENÉNDEZ

DIRECTOR DEL PROYECTO

Ing. Mag. Mariano RE

EQUIPO DE TRABAJO

Ing. Nicolás D. BADANO

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

Ing. Mag. Mariano RE

Mayra MORALE

Ing. Mag. Nicolás TOMAZIN

Arq. Sebastián PERALTA

Lic. Federico HASPERT

Ing. Martín SABAROTS GERBEC

Ing. Lucas BINDELLI

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Mag. Mariano RE

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

Arq. Sebastián PERALTA

Lic. Federico HASPERT

Ing. Lucas Bindelli

Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica

RESUMEN

En este informe se presenta el estado del arte en cuanto al aprovechamiento energético vinculado a las mareas: energías mareomotriz e hidrocínética. Se exponen sus particularidades e implantaciones, y se describe el estado actual de desarrollo de cada una. Además, se presenta la metodología de modelación que se implementará para determinar el potencial hidrocínético disponible en cinco estuarios patagónicos. En este contexto, se detallan las condiciones de borde y topobatómetricas a utilizar, junto con el procesamiento llevado a cabo para su incorporación a los modelos numéricos.

Descriptores temáticos: corrientes de marea, potencial energético, modelación numérica.

Descriptores geográficos: Estuarios Patagónicos, Santa Cruz, Tierra del Fuego, Mar Argentino.

Índice

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUCCIÓN | 3 |
| 1.1. Problema | 3 |
| 1.2. Proyecto PIO CONICET-FYPF 2016-2017 | 4 |
| 1.3. Estuarios patagónicos | 5 |
| 1.4. Primer informe | 7 |
| 2. ENERGÍA DE LAS MAREAS | 8 |
| 2.1. Energía de las mareas en el mundo | 8 |
| 2.2. Instalaciones mareomotrices | 10 |
| 2.3. Instalaciones hidrocinéticas | 15 |
| 2.4. Resumen | 24 |
| 3. MODELO NUMÉRICO | 28 |
| 3.1. Introducción | 28 |
| 3.2. Software | 28 |
| 3.3. Esquema de modelación | 29 |
| 3.4. Forzantes y condicionantes | 37 |
| 4. ANÁLISIS BATIMÉTRICO | 39 |
| 4.1. Análisis de batimetrías globales | 39 |
| 4.2. Digitalización de cartas náuticas | 45 |
| 4.3. Complementación satelital | 50 |
| 4.4. Producción de batimetrías | 64 |
| 4.5. Zonas aptas para generación hidrocinética | 69 |
| 5. CONCLUSIONES | 71 |
| REFERENCIAS | 72 |

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Problema

El aprovechamiento de la energía proveniente de las mareas puede ser de dos tipos: utilización de la energía potencial provocada por la diferencia de nivel de agua en centrales ubicadas en presas que cierran sitios con buena amplitud de marea, o captación de la energía cinética de las corrientes de marea con turbinas localizadas en zonas de alta velocidad.

La generación de energía mareomotriz en presas se realiza mediante los mismos principios de la generación hidroeléctrica con la diferencia de que puede construirse una central de ciclo doble (dos direcciones del flujo). Esta tecnología está suficientemente probada, pero las instalaciones que la contienen implican un alto costo ambiental e inversiones iniciales significativas.

La energía cinética de las corrientes de marea está relacionada con el constante movimiento de los flujos de marea. El aprovechamiento de esta energía es reciente, encontrándose en una etapa de desarrollo y existiendo una gama variada de soluciones. La producción de energía se efectúa a través de un sistema de turbinas que se instalan subacuáticamente. El concepto de generación es similar al de la explotación de la energía eólica; sin embargo, debido a la alta densidad del agua respecto de la del aire, un sistema de turbinas hidrocinéticas puede producir la misma cantidad de energía a una menor velocidad de rotación y en un área más pequeña. Esta ventaja relativa resulta importante, además de la previsibilidad de las mareas respecto de la del viento.

Estos sistemas presentan algunas ventajas sobre el uso de la energía mareomotriz: no se requieren obras de retención, se reducen impactos visuales, existe la posibilidad de no interferencia con la navegación y se reduce el impacto sobre los ecosistemas. Sin embargo, el sistema de producción de energía a través de las corrientes de marea cuenta con algunas desventajas como el sometimiento a grandes fuerzas de arrastre de las estructuras, el desarrollo de procesos de corrosión y *fouling* sobre turbinas, la reducción de las posibilidades de prácticas recreativas en el cuerpo de agua, la necesidad de velocidades superiores a 1 m/s y la necesidad de grandes profundidades.

Las desembocaduras de los ríos son zonas ideales para aprovechamiento de las mareas, debido a la confluencia de las mareas con el río y a la morfología propia de la desembocadura. Esta situación, más una buena amplitud de mareas, abre la oportunidad a que esta energía sea aprovechada en zonas próximas al territorio y cercanas a puntos de consumo como ciudades o puertos. En la Argentina, estas posibilidades se combinan en los estuarios de la Patagonia Austral.

En este contexto, el desafío de aprovechar el potencial energético de la costa argentina se

encuentra inserto en distintas estrategias gubernamentales. Entre ellas, el Plan Argentina Innovadora 2020¹ (Plan Nacional de Ciencia Innovación y Tecnología Productiva). En este plan, 'Energía' es uno de los seis sectores estratégicos en donde uno de los núcleos socio-productivos es 'Energías del mar'. También en línea con este plan se presenta el ambicioso proyecto 'Pampa Azul'², que es una iniciativa interministerial que facilita investigaciones científicas en el Mar Argentino incluyendo actividades de exploración y conservación, de innovación tecnológica para los sectores productivos vinculados al mar, y de divulgación científica dirigida al público en general. Por todo esto, en la Argentina existen condiciones favorables para avanzar con el estudio de las energías marinas.

1.2. Proyecto PIO CONICET-FYPF 2016-2017

El proyecto "Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica" (PIO CONICET-FYPF 2016-2017) fue seleccionado en el marco de la convocatoria 2016-2017 de los Proyectos de Investigación Orientados sobre investigación en energía que impulsan la Fundación YPF y el CONICET (Argentina). Esta convocatoria se orienta a la promoción de un nuevo modelo de investigación científica que aborde las necesidades y oportunidades de mejora en la industria energética y contribuya con el desarrollo de la Argentina.

Esta propuesta involucra a tres grupos de trabajo del Laboratorio de Hidráulica del Instituto Nacional del Agua (INA): Programa de Hidráulica Computacional (PHC), Programa de Hidráulica Fluvial (PHC) y Programa de Hidráulica Marítima (PHM).

El objetivo general de esta propuesta consiste en evaluar el potencial hidrocínético en el entorno de cinco estuarios patagónicos mediante la implementación de herramientas de simulación numérica avanzadas para el desarrollo de estudios de ingeniería costera. Esta idea apunta a establecer un avance concreto sobre la caracterización de un recurso estratégico que, a la luz del desarrollo prominente de nuevas tecnologías de explotación, pronto puede convertirse en una fuente energética competitiva.

Para este estudio los objetivos específicos que se plantean son los siguientes:

Describir espacial y temporalmente la hidrodinámica en el entorno de cinco estuarios patagónicos: Analizar el potencial energético de las corrientes de marea a través del comportamiento de las siguientes variables, teniendo en cuenta su variación temporal y espacial: velocidades medias y máximas, potencia y energía aprovechable.

Implementar, calibrar y validar modelos hidrodinámicos en cinco estuarios patagónicos: Desarrollar herramientas de análisis que permitan el mejor diagnóstico y estudio de capacidades de los estuarios para la generación de energía hidrocínética. Esto permitirá obtener la información de base necesaria para evaluar localmente el potencial energético.

Representar resultados en un Sistema de Información Geográfica (SIG): Un SIG permitirá visualizar, analizar e interpretar los resultados de las modelaciones con el

¹ www.argentinainnovadora2020.mincyt.gob.ar/

² <http://www.pampazul.gob.ar/>

objetivo de entender las relaciones, procesos, patrones y tendencias que intervienen en la dinámica de las corrientes de marea y su impacto sobre el potencial energético.

Estimar en forma preliminar el potencial energético hidrocínético en cada emplazamiento: Se prevé identificar tipos de dispositivos convenientes para cada aprovechamiento teniendo en cuenta la tecnología instalada en la actualidad, analizando las singularidades físicas del lugar y las características de la dinámica de las corrientes de marea simuladas.

1.3. Estuarios patagónicos

Los estuarios patagónicos a estudiar en este proyecto son: estuario del río Deseado, estuario del río Santa Cruz, estuario del río Coyle, estuario del Río Gallegos y estuario del Río Grande (Figura 1.1). En la provincia de Santa Cruz se tienen cuatro estuarios (Río Deseado, Río Santa Cruz, Río Coyle y Río Gallegos) mientras que en Tierra del Fuego se destaca el del Río Grande entre numerosos estuarios pequeños. En estos estuarios se tienen amplitudes máximas de marea que van de los 6,18 m a los 13,07 m y amplitudes medias en el rango 4,34–8,37 m. Tres de estas locaciones son destacadas por la NOAA³ entre las 50 estaciones con mayor registro de amplitud de marea en todo el mundo (Río Gallegos, Puerto Santa Cruz y Río Coyle).

En general los estudios antecedentes que involucran a cada uno de estos estuarios tienen perspectivas varias. Entre ellas se destacan abordajes que tienen que ver con la calidad del agua (Esteves et al., 1997, Tarela y van Avermaete., 2009; Tarela et al., 2005), la geomorfología y la geología (Isla y Bujalesky, 2004; Isla et al., 2004), cuestiones ambientales (Ferrari et al., 2002; Lofiego et al., 2009; Lloreda y Pellanda, 2008), y obras (Francisca et al., 2005). Específicamente vinculado con el estudio de la hidrodinámica de uno de los estuarios, se reconoce el trabajo de Speroni et al. (2005), en donde se estudiaron las corrientes de marea a partir de información obtenida en campo.

En la Argentina, la historia de la energía mareomotriz se concentra en torno a los estudios realizados para los golfos Nuevo y San José en la Península de Valdés, con propuestas que ya cuentan con casi un siglo de antigüedad. Ideas más recientes tienen que ver con las posibilidades de los estuarios del Río Deseado, Río Gallegos y Río Grande. Los pocos estudios actuales sobre esta temática ponen un mayor énfasis en la tecnología de los dispositivos que en la caracterización del recurso. En cuanto al análisis del potencial energético de alguno de los estuarios aquí analizados, se destaca el trabajo de Buono et al. (2016) en donde se caracteriza el recurso de las corrientes de marea en el estuario del río Gallegos y su potencial energético.

En la Tabla 1.1 se presentan las características geométricas de cada estuario y las predicciones de amplitud de marea media y máxima (SHN, 2016, 2017). En la Tabla 1.2, respecto de cada estuario, se destacan los datos y antecedentes necesarios para la implementación de modelos numéricos en cada uno de ellos.

³ <https://tidesandcurrents.noaa.gov/>

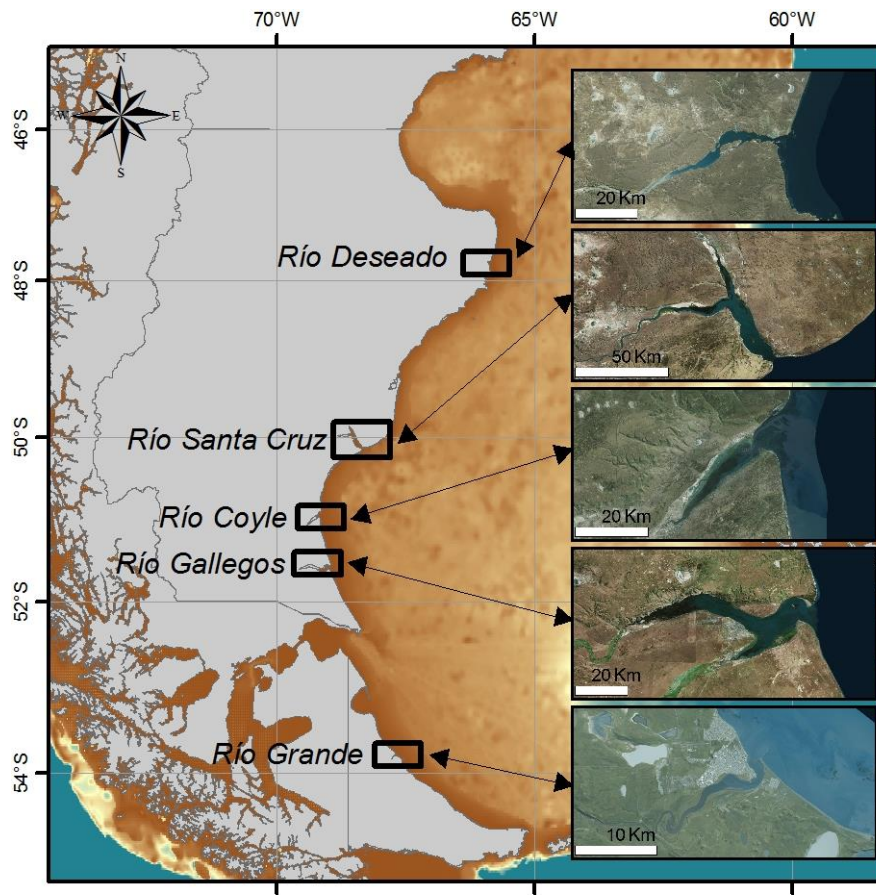


Figura 1.1. Localización de las zonas de estudio

Tabla 1.1 Características generales de los estuarios

| Estuario | Río Grande | Río Gallegos | Río Coyle | Río Santa Cruz | Río Deseado |
|--------------------------------|------------|--------------|-----------|----------------|-------------|
| Dimensiones aproximadas | 4 x 0.3 km | 35 x 3 km | 20 x 1 km | 40 x 5 km | 25 x 2 km |
| Ancho de boca | 400 m | 4000 m | 4600 m | 2100 m | 1200 m |
| Descarga fluvial significativa | NO | NO | NO | SI | NO |
| Infraestructura cercana | SI | SI | NO | SI | SI |
| Amplitud media (SHN, 2016) | 5.60 m | 8.37 m | 7.70 m | 8.11 m | 3.68 m |
| Amplitud máxima (SHN, 2016) | 8.53 m | 13.03 m | - | 12.63 m | 5.77 m |
| Amplitud media (SHN, 2017) | 5.60 m | 8.35 m | 7.70 m | 8.10 m | 3.86 m |
| Amplitud máxima (SHN, 2017) | 8.42 m | 12.66 m | - | 12.34 m | 5.72 m |

Tabla 1.2 Características generales de los estuarios

| Estuario | Río Grande | Río Gallegos | Río Coyle | Río Santa Cruz | Río Deseado |
|-----------------------------------|---------------|---------------|-------------------|----------------|---------------|
| <i>Datos batimétricos</i> | SI | SI | NO | SI | SI |
| <i>Predicción de marea</i> | Puerto patrón | Puerto patrón | Puerto secundario | Puerto patrón | Puerto patrón |
| <i>Niveles observados</i> | SI | SI | NO | SI | SI |
| <i>Velocidades observadas</i> | SI | SI | NO | SI | SI |
| <i>Antecedentes de modelación</i> | SI | SI | NO | NO | SI |

1.4. Primer informe

El Proyecto “Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica” (PIO CONICET-FYPF 2016-2017), se está desarrollando en tres ejes: i) Búsqueda de información de base: recolección, puesta en valor y generación de nueva información de base en cada uno de los estuarios y evaluación del estado del arte de los aprovechamientos energéticos basados en corrientes de marea; ii) Modelación numérica, implementación de modelos 3D de detalle de cada estuario; y iii) Generación de productos: análisis espacial y temporal (estadísticas) de velocidades de corriente y potencial energético, y caracterización hidrológica de los ríos tributarios a los estuarios.

En este primer informe se abordan algunos aspectos de estos tres ejes de producción, destacándose un análisis del estado del arte de los aprovechamientos basados en las mareas en el mundo, la presentación de la metodología de modelación hidrodinámica de los estuarios y un detallado estudio de las batimetrías de cada zona de interés en modelar.

2. ENERGÍA DE LAS MAREAS

2.1. Energía de las mareas en el mundo

En los últimos años las energías oceánicas se han convertido en objeto de estudio y experimentación en muchas partes del mundo, siendo consideradas como una fuente alternativa de provisión de recursos energéticos ambientalmente sostenibles. En el mundo, se cuenta con desarrollos históricos, mayormente basados en el aprovechamiento del salto hidráulico debido a amplitud de marea favorable, y con una variada experimentación en base a desarrollos más orientados al aprovechamiento de las corrientes de marea. En la Argentina, según el Catálogo Energías del Mar (Grupo GEMA, 2014), más de cien proyectos vinculados al desarrollo de diferentes dispositivos para el aprovechamiento de estas energías señalan el interés de muchos investigadores orientado en esta dirección.

No son muchos los lugares en el mundo en donde se dan condiciones de buena amplitud de marea como para considerar la evaluación de su potencial energético. Archer (2013), en la Figura 2.1, analiza los regímenes de marea de casi 7000 estaciones de observación encontrando muy pocas con características macromareales o hipermareales. En la Figura 2.2 se localizan distintas regiones con buenas condiciones de marea para su aprovechamiento energético. En este marco, los estuarios patagónicos en la costa argentina generan un interés particular, en algunos de los cuales se presentan amplitudes de onda de marea significativas, donde se observan corrientes de gran intensidad que constituyen a priori un recurso energético significativamente valioso.

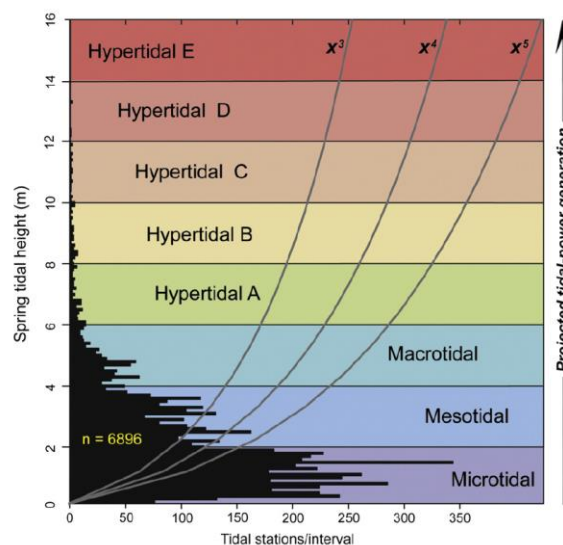


Figura 2.1. Estadística de características mareales en estaciones de observación de Sudamérica, Norteamérica y Europa (Archer, 2013).



Figura 2.2. Localización de las regiones con buenas condiciones de marea para su aprovechamiento energético.

La instalación de energía mareomotriz más grande del mundo es la Sihwa Lake Tidal Power Station (2011) de Corea del Sur con 254 MW de capacidad de generación (amplitud media de marea de 5,6 m y diez turbinas de una dirección), sobrepasando los 240 MW de la francesa Usina Mareomotrice de la Rance (1966) que fue la más grande por 45 años (amplitud media de marea de 8,2 m y 24 turbinas reversibles). También en Corea del Sur, se encuentra la inminente Incheon Tidal Power Station que sería la más grande del mundo una vez operativa y que tendría una capacidad de generación de 1.320 MW. El resto de las centrales de este tipo tiene una capacidad de generación dos órdenes de magnitud menor. Teniendo en cuenta las capacidades de generación de las centrales más grandes según tipo en la Argentina, las posibilidades de un emprendimiento de este tipo están en el orden de las centrales nucleares, ya que la Central Hidroeléctrica Yacyretá tiene una capacidad de 3.100 MW, la Central Térmica Costanera, 2.320 MW y la Central Nuclear Atucha II, 740 MW.

En el mundo existe una buena cantidad de proyectos para la producción de energía a través de las corrientes de marea (Figura 2.3) que se encuentran en distintas etapas de desarrollo. Algunos destacables son Cape Sharp Tidal⁴, O2 de Orbital Marine Power⁵, Proyecto Magallanes⁶ y THC de INVAP INGENIERÍA S.A. (Argentina)⁷. Cape Sharp Tidal es un ambicioso proyecto, actualmente en primera fase, que aspira a desarrollar el primer conjunto de turbinas conectadas a la red en la Bahía de Fundy en Canadá (el lugar del mundo con mayor amplitud de marea). Las turbinas flotantes de Orbital Marine Power, diseñadas para minimizar los costos de instalación y funcionamiento, han sido probadas ampliamente con modelos a escala y un prototipo de 250 KW (SR250), lo que ha permitido el proceso de

⁴ <http://capesharptidal.com/>

⁵ <https://orbitalmarine.com/>

⁶ <http://www.magallanesrenovables.com/es/proyecto>

⁷ <http://www.invap.com.ar/es/2014-05-12-14-44-54/proyectos/turbina-hidrocinetica.html>

desarrollo de la SR2000 y posteriormente la O2, una turbina de escala comercial de 2 MW pensada para su colocación en granjas. En Vigo (España), el Proyecto Magallanes se encuentra en la última fase de prueba de un trimarán de 45 m de eslora, que con dos rotores orientables de 19 metros de diámetro obtendría una potencia de 2 MW. En Argentina, a una escala menor, INVAP INGENIERÍA S.A. instaló turbinas de 4,5 KW de potencia.



Figura 2.3. Localización de proyectos de energía de las mareas.

2.2. Instalaciones mareomotrices

En general, este tipo de aprovechamiento utiliza siempre el mismo método (cierre de un sector costero) para generar energía a partir de dos tipos de turbinas: Kaplan y Bulbo (Figura 2.4). La diferencia entre estas es que la primera permite la generación en un solo sentido del flujo, mientras que la segunda lo hace en ambos. De esta forma, las turbinas Bulbo son las que mejor aprovechan la energía mareomotriz.

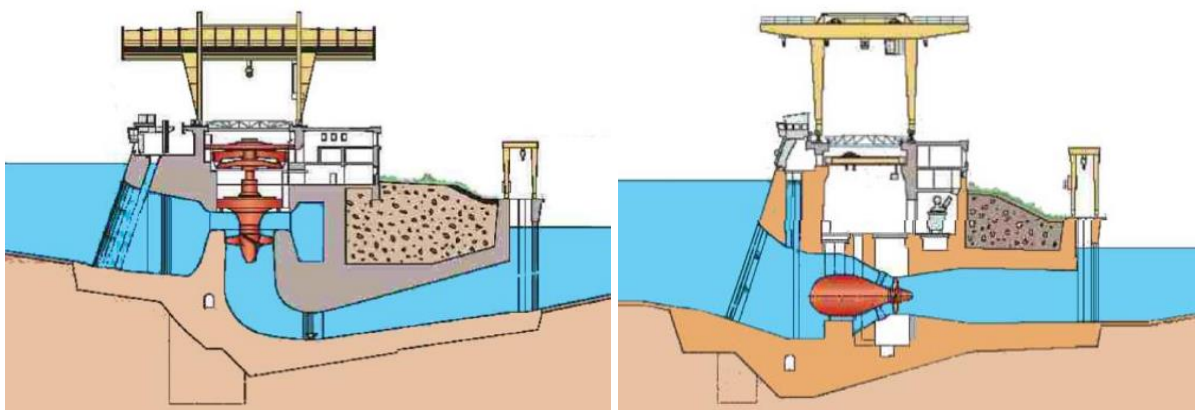


Figura 2.4. Esquemas de turbinas Kaplan (izquierda) y Bulbo (derecha).

2.2.1. Usine marémotrice de la Rance

La usina mareomotriz de la Rance⁸ (Figura 2.5), puesta en marcha en 1966 sobre la costa francesa del Canal de la Mancha, en la región de Bretaña, es uno de los desarrollos más emblemáticos en torno a las energías marinas. Consiste en una presa que cierra el estuario del río Rance, en el municipio de La Richardais y en donde se produce hidroelectricidad utilizando la diferencia de nivel provocada por la marea. El cierre es de aproximadamente 700 m, contiene una esclusa de navegación y una usina con 24 turbinas de tipo bulbo reversibles de 10 MW, alcanzando una potencia de 240 MW y una generación anual de 540 GWh. La amplitud de marea en esta zona es de aproximadamente 8,2 m.



Figura 2.5. Usina mareomotriz de la Rance, Francia.

2.2.2. Annapolis Tidal Station

La estación de energía de mareas Annapolis⁹ (Figura 2.6) fue puesta en funcionamiento en 1984. Localizada en la Bahía de Fundy y el río Annapolis, próxima a Annapolis Royal, en la provincia canadiense de Nova Scotia, esta central está considerada como la única planta de generación de energía por mareas en Norteamérica. La turbina de tipo Straflo (unidireccional, de eje horizontal) tiene un diámetro de 7.6 m y está diseñada para generar energía durante la descarga del reservorio hacia el mar. Annapolis cuenta con una potencia de 20 MW y una capacidad de generación anual de hasta 36 GWh. La amplitud de marea en esta zona es de aproximadamente 8,7 m.



Figura 2.6. Estación mareomotriz de Annapolis, Canadá.

⁸ <https://www.edf.fr/usine-maremotrice-rance/presentation>

⁹ <http://www.nspower.ca>

2.2.3. Jiangxia Tidal Power station

La planta de Jiangxia¹⁰ (Figura 2.7) es la instalación de energía mareomotriz china más grande en operación, con una capacidad instalada de 3.9 MW y se localiza en el extremo del norte de la bahía de Yueqing, Mar de China Oriental. La construcción de este proyecto comenzó en 1974, pero la instalación de la primera turbina finalizó en 1980, y su capacidad era de 500 KW. El proyecto se completó en 1985 con la instalación de una turbina de 500 KW, una turbina de 600 KW y tres series de turbinas de 700 KW, con un total de 3.2 MW de capacidad instalada. En junio de 2006, la sexta turbina fue conectada a la red, aumentando la capacidad total de la planta a 3.9 MW. La obra es de tipo barrera, y las turbinas de flujo axial alcanzan una generación anual de 7 GWh. La amplitud máxima de marea es de aproximadamente 8.4 m.



Figura 2.7. Estación de energía mareomotriz Jiangxia, China.

2.2.4. Estación experimental Kislaya Guba

La pequeña estación experimental Kislaya Guba (Figura 2.8) fue puesta en marcha hacia fines de 1968 en la Unión Soviética. El propósito de esta instalación fue el de contar con una estación experimental que permitiera avanzar en el conocimiento de la generación de energía mareomotriz (Bernshtein, 1972). Localizada en la Península Kola, en el Mar de Barents y próxima a Murmansk al noreste de Rusia, se ubica en un fiordo de unos 40 m de ancho y 3–5 m de profundidad en donde las velocidades de corriente llegan a alcanzar los 4 m/s (Chaineux y Charlier, 2008). La potencia alcanzada es de 0.4 MW con una turbina de bulbo. La amplitud de marea media es de 2.5 m.



Figura 2.8. Estación experimental Kislaya Guba, Rusia.

¹⁰ <http://www.cgdc.com.cn>

2.2.5. Sihwa Lake Tidal Power Station

La planta mareomotriz de Sihwa Lake¹¹ (Figura 2.9 y Figura 2.10) en Corea del Sur, a pocos kilómetros de la frontera con Corea del Norte está en funcionamiento desde 2011. La descarga del río Sihwa en el Mar Amarillo se aprovecha con una barrera que tiene una potencia instalada de 254 MW con una generación anual de 552.7 GWh mediante 10 turbinas bulbo unidireccionales de 25 MW. El área embalsada es de 30 km² y cuenta con una amplitud de marea de 5.6 m.



Figura 2.9. Central energética Sihwa Lake, Corea del Sur.

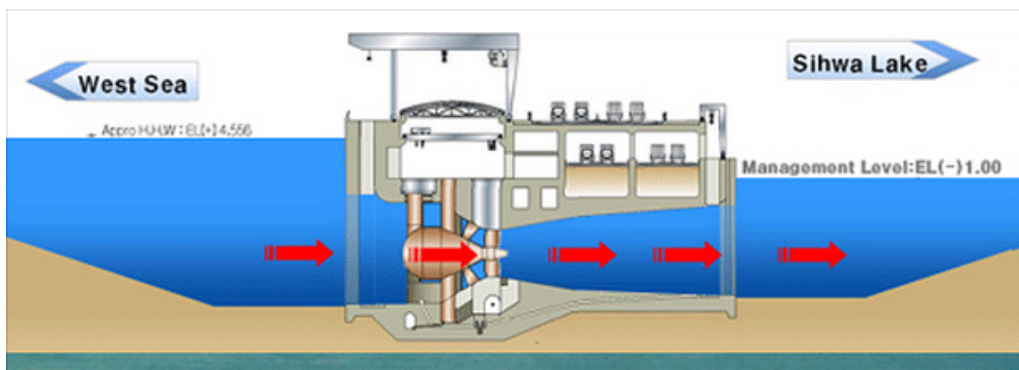


Figura 2.10. Funcionamiento de la Central energética Sihwa Lake, Corea del Sur.

2.2.6. Proyectos en desarrollo e investigación

Proyectos de Corea del Sur

Corea del Sur se encuentra bajo un plan de sustitución de importación de los combustibles fósiles que utilizan para satisfacer sus demandas de consumo de energía (Kim et al., 2012). Para esto el país se encuentra desarrollando un ambicioso plan vinculado a las energías renovables. Las posibilidades de las energías marinas básicamente se centran en la energía de las corrientes de marea. Particularmente, las costas del sur y el oeste de Corea del Sur presentan condiciones de velocidad de corriente de marea muy buena para emprendimientos energéticos (Byun et al., 2013) (Figura 2.11).

¹¹ https://www.kwater.or.kr/eng/busi/project03Page.do?s_mid=1192

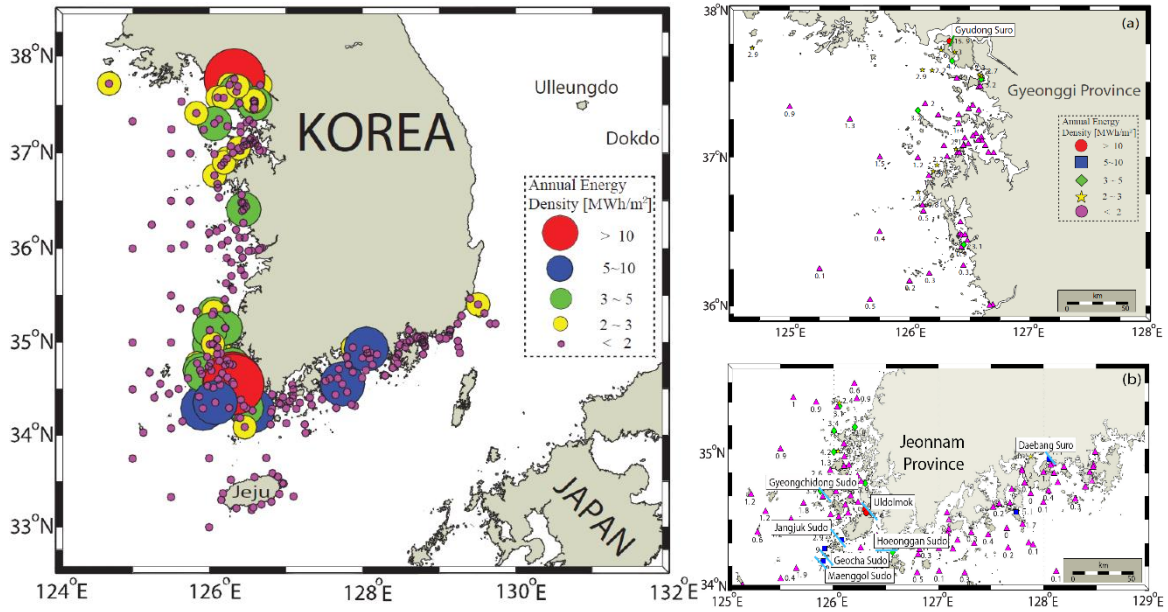


Figura 2.11. Distribución espacial de densidad de energía y detalles en las provincias de Gyeonggi y Jeonnam (Byun et al., 2013).

Corea del Sur tiene varios emprendimientos en agenda, siendo la mayoría de barrera, cerrando distintas bahías. Entre los proyectos se destaca la Incheon Tidal Power Station, que tras su construcción sería la más grande del mundo (1.320 MW). Otros proyectos, no menores, son Ganghwa (420 MW), Garorim (520 MW), Cheonsu Bay (720 MW), entre otros (Figura 2.12). Sin embargo, cabe mencionar que estos proyectos han abierto una gran discusión por el impacto ambiental que pudieran ocasionar¹².

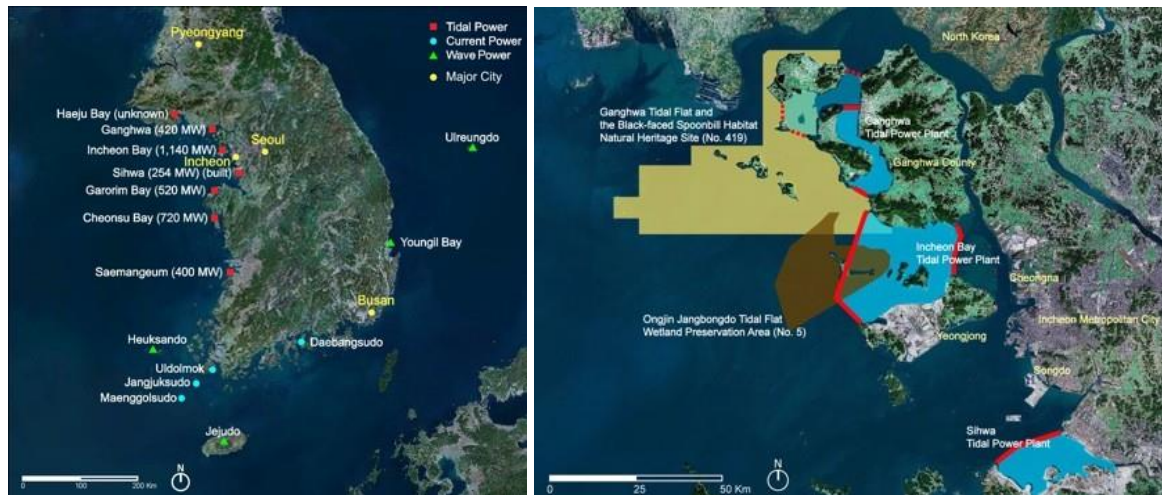


Figura 2.12. Principales proyectos energéticos marinos de Corea del Sur.

¹² [Yekang Ko and Derek K. Schubert, "South Korea's Plans for Tidal Power: When a "Green" Solution Creates More Problems", NAPSNet Special Reports, November 29, 2011.](#)

Swansea Bay Tidal Lagoon

La empresa británica Tidal Lagoon Power¹³ se encuentra desarrollando un proyecto que contempla la creación de seis lagunas artificiales y diques con turbinas en Gales (Swansea Bay, Cardiff, Newport y Colwyn Bay) e Inglaterra (West Cumbria y Bridgwater Bay).

Swansea Bay Tidal Lagoon sería el desarrollo inicial y se convertiría en la primera central eléctrica de laguna de mareas del mundo (Figura 2.13). Esta laguna estaría determinada por una escollera en forma de U (muelle multiuso) contenedora de un banco de turbinas. Las mareas llenarían y vaciarían la laguna permitiendo la generación de energía tanto en las mareas entrantes como salientes, funcionando cuatro veces al día, todos los días. Para esto se mantendrían por un corto tiempo las compuertas de la laguna cerradas con el objetivo de alcanzar una diferencia de 4 m de altura a un lado y otro de la escollera, para luego generar energía utilizando 16 turbinas bidireccionales del orden de los 7 m de diámetro. Se estima que generará electricidad para 155,000 hogares (aproximadamente una potencia estimada de 240 MW y una generación anual estimada de 400 GWh).

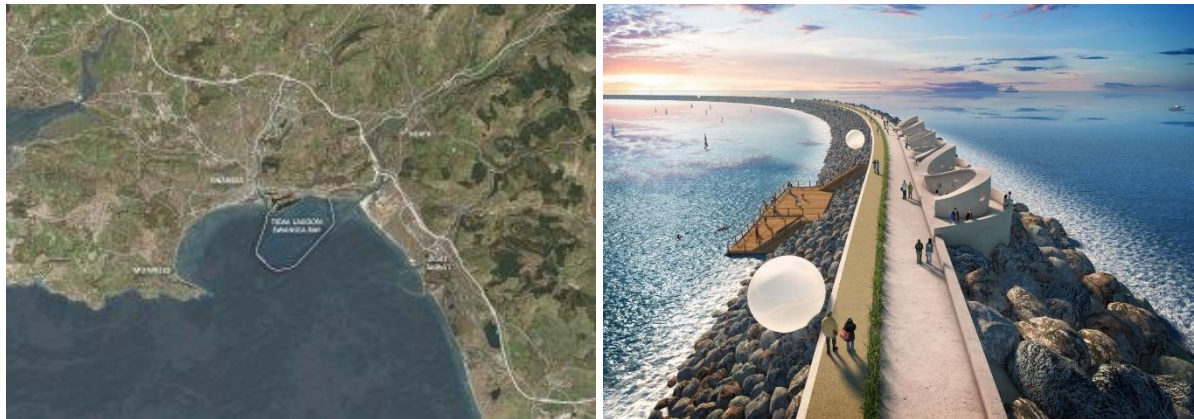


Figura 2.13. Swansea Bay Tidal Lagoon

Este proyecto, a pesar de haber recibido algún consentimiento oficial para su desarrollo en 2015, continúa siendo muy discutido en los ámbitos gubernamentales. El resto de los proyectos se encuentran en etapas anteriores de análisis.

2.3. Instalaciones hidrocinéticas

Para el aprovechamiento energético mediante instalaciones hidrocinéticas resulta necesario fondear dispositivos conversores en puntos de elevadas velocidades del flujo que cumplan con características particulares, por ejemplo, profundidades mínimas y máximas. Las instalaciones utilizadas con este objetivo son muy variadas en su forma y en sus requerimientos debido al incipiente desarrollo tecnológico en esta área.

A modo de clasificar los distintos tipos de generadores, se los puede distinguir según:

¹³ <http://www.tidallagoonpower.com/>

- El mecanismo de acción: hélices, hidroplanos, brazos pivotantes, etc.
- La potencia eléctrica de generación: actualmente hay un amplio rango de dispositivos, que va desde los 4,5 kW hasta los 2 MW.
- La orientación del eje de rotación: horizontal o vertical. Las de eje vertical no requieren una orientación definida respecto de la dirección del flujo, como así lo exigen las de eje horizontal. Sin embargo, estas últimas presentan mayores rendimientos.
- El tipo de centro: cerrado o abierto.
- El tipo de sujeción/fundación: empotrado al lecho marino o con tensores anclados al lecho o a tierra firme. Este dependerá de las condiciones del suelo en el que se ubica el proyecto, tendiendo hacia un empotramiento en caso de contar con roca o más bien implementando pilotes si se trata de suelos arcillosos.
- Fijos o móviles: si la turbina acciona a una distancia fija respecto del fondo o si esta se desplaza dentro de la columna de agua.
- Direccionables o no direccionables: si pueden modificar su orientación respecto de la dirección del flujo.

Estas características serán ejemplificadas en los casos que se presentan a continuación.

2.3.1. Principales tipos de turbinas disponibles en el mercado

Generador OpenHydro

Se trata de una turbina de centro abierto y eje horizontal. Tiene 10 aspas de plástico reforzado con fibra de vidrio que giran a una velocidad de 6-8 RPM. El diámetro del rotor es de unos 16 metros, pesa 1000 toneladas (incluyendo su base) y puede generar una potencia de hasta 2 MW. Su funcionamiento cubre rangos de velocidades de 1 a 5,5 m/s y no requiere empotramiento en el lecho marino ya que su sustentación es por gravedad. Como contrapartida, no es posible modificar su orientación respecto de la corriente en función del tiempo, ni su ubicación dentro de la columna de agua, por lo que se trata de un dispositivo fijo no direccionable (Figura 2.14).

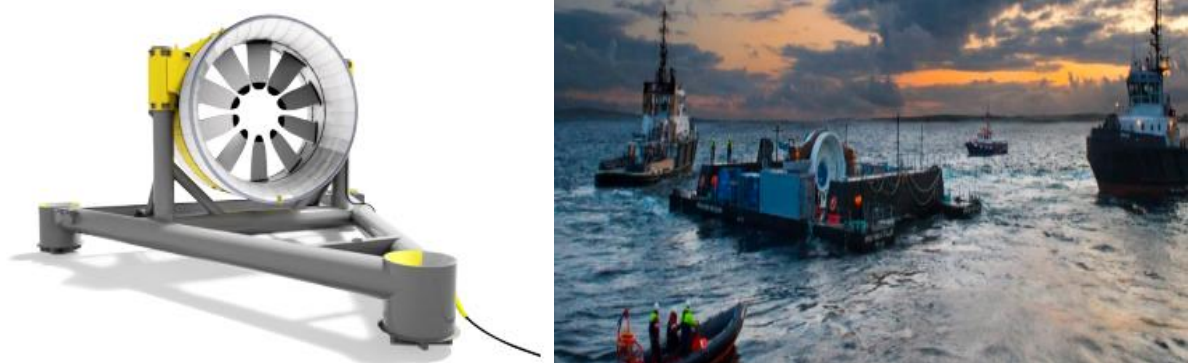


Figura 2.14. Generador OpenHydro.

Generador AR1500

Es un generador de eje horizontal, con tres aspas de fibra de carbono y estructura de acero, con una altura total de 24 metros. El diámetro de su rotor es de unos 18 metros, operando en un rango de velocidades de 3 a 5 m/s, con velocidades de rotación de 7 a 15 rpm. La potencia máxima extraíble es de 1,5 MW. Su peso es de unas 1.150 toneladas (incluyendo su fundación) y tampoco requiere fijaciones adicionales puesto que su apoyo sobre el lecho marino es por gravedad, aunque estas pueden adaptarse a los distintos requerimientos de la zona e incorporar pilotes o anclajes. Si bien este dispositivo es fijo en relación a su ubicación dentro de la columna de agua, resulta direccionable ya que cuenta con un cabezal móvil que permite obtener una óptima orientación respecto de la dirección de la corriente. Su vida útil es de unos 25 años (Figura 2.15).



Figura 2.15. Generador AR1500.

Generador Stingray Tidal Stream

A diferencia de los equipos anteriores, este generador produce energía a partir del movimiento de brazos pivotantes. Al pasar la corriente de agua a través de tres hidroplanos contenidos entre los brazos, estos son impulsados hacia arriba mediante el principio de la sustentación por forma, similar al que utilizan los aviones para volar. Una vez que este alcanza el tope superior, el hidroplano modifica su orientación mediante gatos hidráulicos para que el movimiento se produzca en sentido contrario. Al llevar al tope inferior, se vuelve a activar el mecanismo y el ciclo se repite, permitiendo una oscilación continua que genera electricidad mediante un rotor.

En cuanto a las características funcionales, el generador Stingray puede alcanzar una potencia máxima de 0,5 MW, funcionando en un rango de velocidades de entre 1 y 3 m/s y un rango de profundidades de entre 12 y 26 m. Su peso es de 500 toneladas incluyendo su fundación, es de acero inoxidable en su totalidad y se sostiene sobre vigas de fundación simplemente apoyadas sobre el lecho marino, por lo que se trata de un dispositivo fijo no direccionable (Figura 2.16).

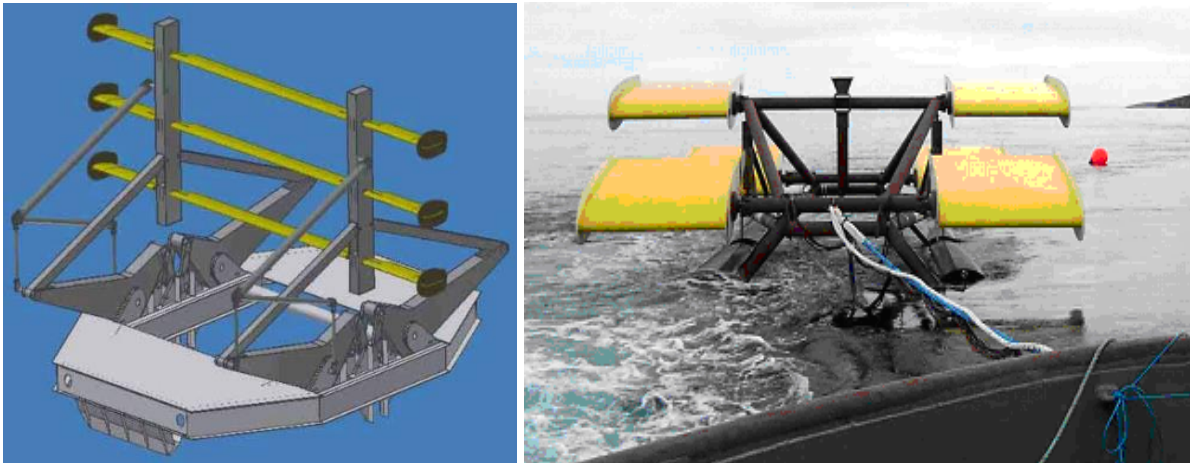


Figura 2.16. *Generador Stingray Tidal Stream.*

Generadores SeaGen

Son turbinas bi-axiales compuestas por un mono-pilote de acero de 2,1 m de diámetro con una ménsula desplazable que soporta en sus extremos dos hélices de eje horizontal. Estas pueden ser de dos capacidades: 1 MW o 0,6 MW de potencia cada una, obteniendo una potencia máxima total de 2 MW o 1,2 MW respectivamente. Dicha ménsula permite direccionar los rotores y desplazarlos dentro de la columna de agua para maximizar el aprovechamiento energético.

Para el caso del generador de mayor envergadura, denominado SeaGen S, su rango de velocidades es de 1 a 4 m/s alcanzando la máxima potencia de generación a los 2,5 m/s, y sus hélices alcanzan los 20 metros de diámetro, rotando a velocidades de entre 4 y 11.5 RPM. El peso de la estructura es de 60 toneladas sin contar el mono-pilote. Este último se diseña acorde a los requerimientos del emplazamiento, pero puede adaptar su fundación a bases superficiales o a un cabezal con grupo de pilotes (Figura 2.17).

El dispositivo de 1,2 MW consiste en el mismo que el caso anterior, con la salvedad de que sus hélices son de 16 metros de diámetro. Posee las mismas ventajas y desventajas que el SeaGen S, pero al ser de un diámetro menor, es apto para zonas menos profundas.



Figura 2.17. *Generador SeaGen S.*

Generador Deep Green Minesto

Consiste en un generador con forma de aeroplano vinculado por un tensor a un empotramiento en el lecho marino. Similar al movimiento de un barrilete, el dispositivo produce un movimiento en forma de ocho al desplazarse por la corriente que lo atraviesa. De esta forma permite aumentar la velocidad relativa entre el agua y el generador, disminuyendo el rango requerido para extraer energía (desde 1,2 hasta 2,4 m/s). Si bien el diámetro de la hélice es de 1,5 metros, el ancho de las alas es de 12 metros y su potencia máxima de 0,5 MW (Figura 2.18).



Figura 2.18. Generador Deep Green Minesto.

Generador Kobold

Esta turbina es de eje vertical (tipo Darrieus) presenta un mecanismo de acción distinto a los anteriores. Consiste en una plataforma flotante a la que se le vincula una hélice de tres aspas verticales unidas entre sí por un eje central. El diámetro del rotor es de 6 m y presenta una altura de 5 m. Sumando la altura de la plataforma, el dispositivo mide 7,5 m en vertical. El material de la hélice es de fibra de carbono y resina epoxi y el dispositivo pesa unas 175 toneladas incluyendo sus fundaciones, que consisten en tensores vinculados a bloques de hormigón apoyados en el lecho del cuerpo de agua. Este dispositivo es apto para velocidades de al menos 1 m/s y alcanza su óptima generación a velocidades de 3 m/s, con una velocidad de rotación de la hélice de 18 RPM.

Este tipo de dispositivos cuenta con dos ventajas: i) al ser flotante se mantiene siempre en la zona de la columna de agua que presenta mayores velocidades, y ii) al ser de eje vertical su orientación respecto de la dirección de la corriente es siempre óptima. La principal desventaja de este tipo de dispositivos es su rendimiento, que se ubica alrededor del 25% (cuando otros dispositivos rondan el 45%), resultando en una turbina con solamente 80 KW de potencia a pesar de su tamaño (Figura 2.19).



Figura 2.19. *Generador Kobold.*

2.3.2. Proyectos destacados de aprovechamientos hidrocinéticos

Parc de Paimpol-Bréhat

El Parque Hidrocinético Paimpol-Bréhat se encuentra actualmente en construcción al norte de la región de Bretaña, en Francia y comprende la instalación de cuatro turbinas. La idea de construir este parque fue presentada por primera vez en 2004 por EDF, Electricité de France, y los trabajos de construcción comenzaron en 2008.

Las turbinas, desarrolladas por OpenHydro, son de centro abierto, de 16 m de diámetro y de una potencia de 0.5 MW cada una (Figura 2.20). En 2014 se puso en marcha la primera de ellas, mientras que la segunda se encuentra dispuesta desde 2016. Las dos turbinas están conectadas a la red desde septiembre de ese año.

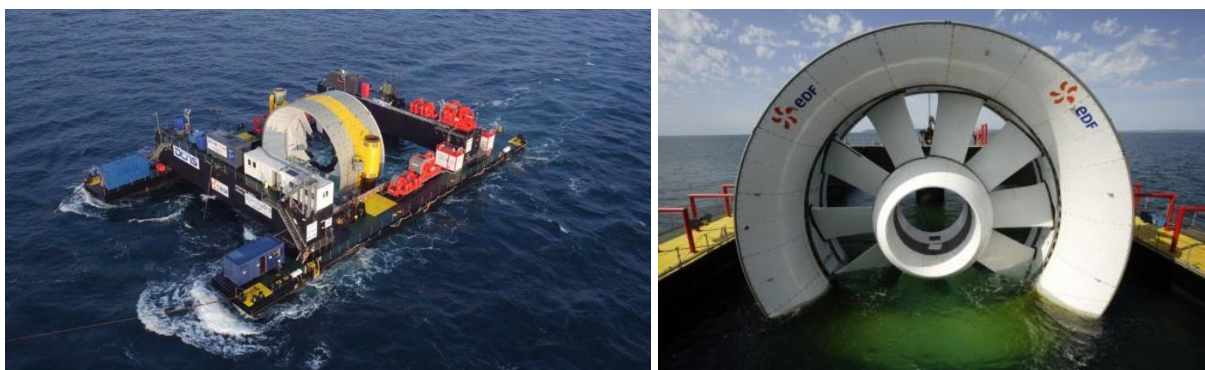


Figura 2.20. *Parc de Paimpol-Bréhat.*

Carpe Sharp Tidal

El proyecto Carpe Sharp Tidal representa la intención de generación energética en la Bahía de Fundy, en Canadá. Para esto se han propuesto diferentes etapas de pruebas. La primera turbina de demostración de Cape Sharp Tidal se desplegó y conectó a la red en noviembre de 2016 y se recuperó en junio de 2017.

Actualmente, esta instalación corresponde a dos turbinas OpenHydro de 2 MW cada una, localizadas en el centro de pruebas del Centro de Investigación Oceánica de Fundy (FORCE¹⁴), en Canadá. Las turbinas instaladas aprovechan solo una fracción del potencial energético en un lugar donde la amplitud de marea media es de 14,5 m. Ambas turbinas están conectadas a la red desde el 2018 (Figura 2.21).

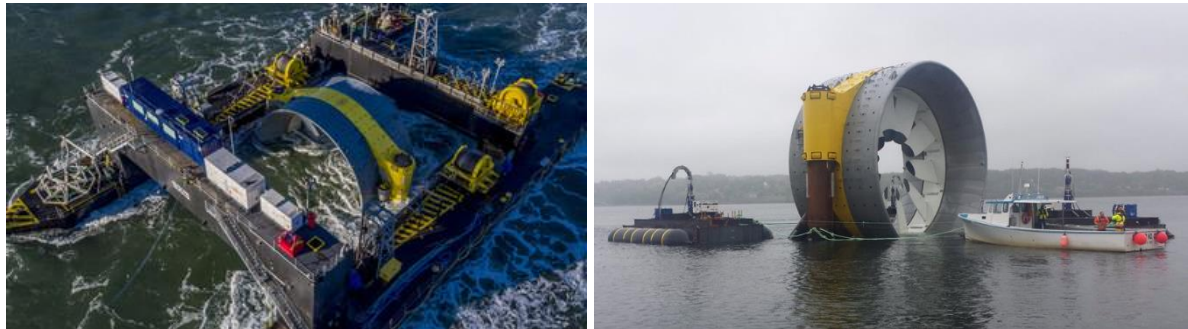


Figura 2.21. Carpe Sharp Tidal

Uldolmok Tidal Power Station

La planta piloto del estrecho de Uldolmok se ubica en la isla de Jindo, provincia de Jeolla, Corea del Sur. Se encuentra en funcionamiento desde el 2009 y cuenta con una turbina de 1 MW. Al tratarse de un estrecho de apenas 300 m de ancho con profundidades de entre 20 y 32 m, las velocidades alcanzadas son muy elevadas, superando los 6,5 m/s. De esta forma, la generación anual es de unos 2,4 GWh, proveyendo electricidad para unas 430 viviendas. Si bien se planeaba expandir su capacidad hasta alcanzar los 50 MW de potencia instalada en 2018, hasta el momento no ha habido nuevas instalaciones (Figura 2.22).



Figura 2.22. Uldolmok Tidal Power Station

MeyGen

Se trata de un parque de turbinas montado por la empresa SIMEC ATLANTIS ENERGY¹⁵ al Norte de Escocia, que actualmente tiene 4 turbinas de eje horizontal de 1,5 MW en funcionamiento y conectadas a la red, y que en dos años de funcionamiento ya generaron

¹⁴ <https://fundyforce.ca/>

¹⁵ <https://simecatlantis.com/projects/meygen/>

unos 17 GWh (Figura 2.23). Además, prevé una ampliación por etapas, primero con la instalación de 49 nuevas turbinas (73.5 MW), para luego continuar aumentando la cantidad hasta alcanzar una capacidad instalada de 398 MW. Las turbinas instaladas son de dos diseños: Atlantis Resources AR1500 y Andritz Hydro Hammerfest AH1000 MK1.



Figura 2.23. Instalación de turbina AR1500 en el parque MeyGen.

2.3.3. Otros proyectos destacados

EMEC

El Centro Europeo de Energía Marina (EMEC¹⁶) Ltd. fue establecido en 2003 en las Islas Orkney, Escocia con el objetivo de ensayar en mar abierto dispositivos de conversión energética, tanto de oleaje como de corrientes de marea (Figura 2.24).

Cuenta con dos sitios de testeo para prototipos a escala real (uno para generación undimotriz en Billia Croo y otro para generación hidrocínética en Fall of Warness) y dos sitios con condiciones climáticas menos exigentes para prototipos a escalas menores que se encuentren en etapas previas de desarrollo. Las velocidades de corrientes van desde 1,5 hasta 3,7 m/s, con profundidades mayores a los 30 m.

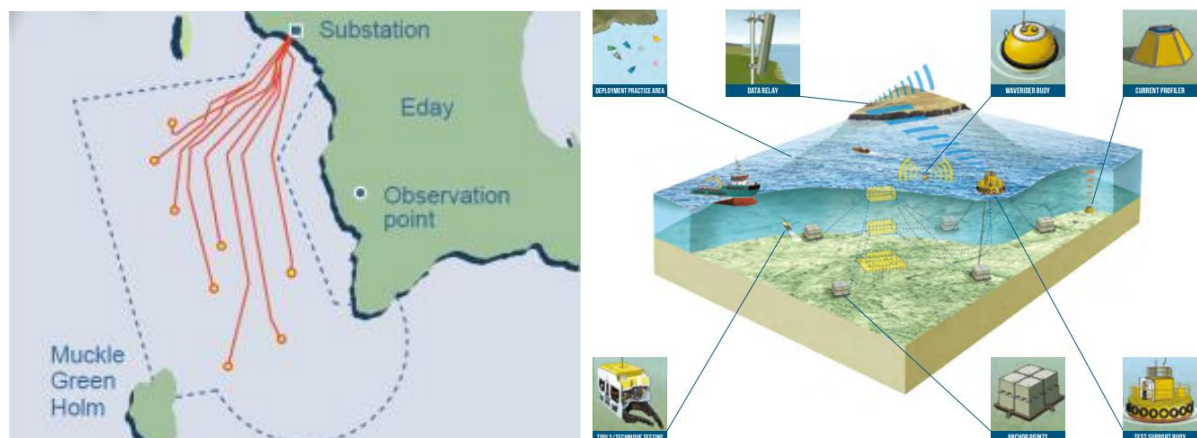


Figura 2.24. Sitio de pruebas EMEC.

¹⁶ <http://www.emec.org.uk/>

ATIR - Magallanes Renovables

Esta empresa viene trabajando desde el 2009 en la construcción de un dispositivo de 2 MW, compuesto por una plataforma flotante de 45 metros de eslora, 6 metros de manga y 23,4 metros de calado total, que incluye dos turbinas de 19 metros de diámetro vinculadas a esta mediante un mástil (**Figura 2.25**). El peso del total de la estructura es de unas 350 toneladas.



Figura 2.25. Turbina ATIR: Esquema (izquierda), Prototipo a escala 1:10 (centro) y Prototipo a escala real (derecha).

O2 - Orbital Marine

Similar al caso anterior, la turbina bi-axial de eje horizontal O2 presenta una estructura flotante de 74 m de eslora a la cual se vinculan dos brazos retractables que en sus extremos cuentan con turbinas de 20 m de diámetro y 1 MW de capacidad cada una, resultando en una capacidad total de 2 MW (Figura 2.26).

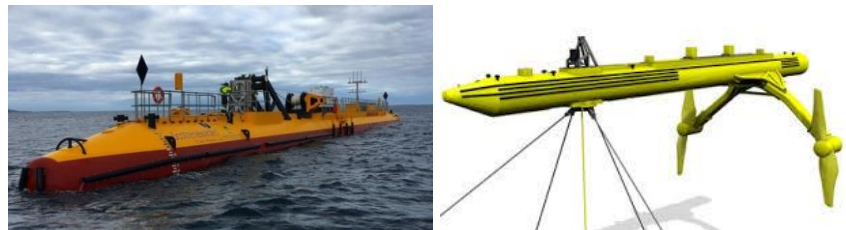


Figura 2.26. Turbina O2: Prototipo a escala real (izquierda) y Esquema (derecha).

THC - INVAP

Desde el 2009 la empresa INVAP INGENIERÍA S.A. viene trabajando en la confección de prototipos de turbinas hidrocinéticas de 4.5 KW (Figura 2.27), habiendo instalado dos de ellas en territorio argentino: Planta de ARSA (provincia de Río Negro) y canal San Martín (provincia de Mendoza).



Figura 2.27. Prototipos de turbinas de 4.5 KW a escala real de INVAP INGENIERÍA S.A.

Puente de marea de Larantuka, Indonesia

Este proyecto, situado en el estrecho Larantuka, que vincula a las islas de Flores y Adonara, se encuentra en etapa de desarrollo con comienzos de los trabajos hacia fines del 2021. Consiste en un puente flotante de 900 metros de largo y 34 de ancho, que alberga entre sus pilas turbinas hidrocínéticas con una capacidad instalada prevista de 30MW (**Figura 2.28**).

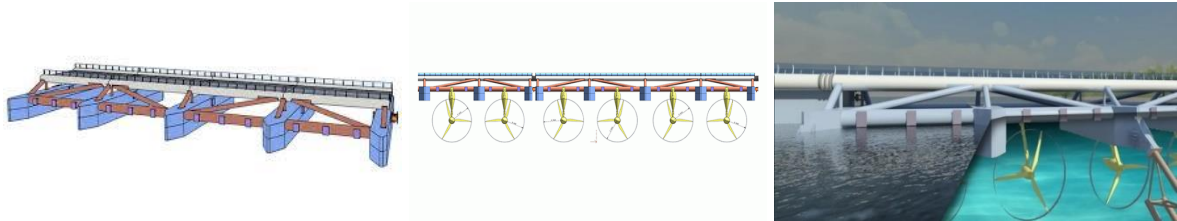


Figura 2.28. Esquemas del puente de marea.

Morlais Tidal Demonstration Array, Gales.

Tal como en el caso de EMEC, este proyecto consiste en proveer la infraestructura necesaria para ensayar prototipos de turbinas hidrocínéticas. Actualmente se encuentra en etapa de desarrollo, pero se espera contar con una superficie disponible de 35 km² en las cercanías de la isla Holy, en Gales, que admita una capacidad instalada de hasta 240 MW.

2.4. Resumen

A continuación, se resumen las principales características de las instalaciones mareomotrices detalladas (Tabla 2.1), de las turbinas hidrocínéticas comerciales (Tabla 2.2) y de las instalaciones hidrocínéticas detalladas (Tabla 2.3).

Tabla 2.1 Características de las instalaciones mareomotrices.

| Instalación | Localización | País | Tipo | Tecnología | Generación anual [GWh] | Potencia [MW] | Año |
|--------------------|--|---------------|---------|-----------------|------------------------|---------------|------|
| Rance | Estuario río Rance, Canal de la Mancha | Francia | Barrera | Turbinas bulbo | 540 | 240 | 1966 |
| Annapolis | Río Annapolis / Bahía Fundy | Canadá | Barrera | Turbina STRAFLO | 36 | 20 | 1984 |
| Jangxia Creek | Bahía de Yueqing / Mar de China Oriental | China | Barrera | Turbinas bulbo | 7 | 3.9 | 1980 |
| Kislaya Guba | Península Kola / Mar de Barents | Rusia | Barrera | Turbina bulbo | - | 0.4 | 1968 |
| Sihwa Lake | Estuario del río Sihwa / mar amarillo | Corea del Sur | Barrera | Turbinas bulbo | 553 | 254 | 2011 |
| Incheon | Bahía Incheon | Corea del Sur | Barrera | - | 2410 | 1320 | - |
| Ganghwa | Incheon | Corea del Sur | Barrera | - | - | 420 | - |
| Garorim | Bahía Garorim | Corea del Sur | Barrera | - | - | 520 | - |
| Cheonsu | Bahía Cheonsu | Corea del Sur | Barrera | - | - | 720 | - |
| Lagoon Swansea Bay | Bahía Swansea | Gales | Barrera | Turbinas bulbo | 400 | 240 | - |

Tabla 2.2 Características de las principales turbinas hidrocínicas comerciales.

| Turbina | Potencia [MW] | Tecnología | Tipo | Desplazable | Fundación | Rango de velocidad [m/s] |
|-----------------------|---------------|-----------------|-------|-------------|--------------|--------------------------|
| OpenHydro | 2 | Centro abierto | Fija | NO | Por gravedad | 1 a 5,5 |
| AR 1500 | 1,5 | Eje horizontal | Móvil | NO | Por gravedad | 3 a 5 |
| Stingray Tidal Stream | 0,5 | Brazo pivotante | Fija | NO | Por gravedad | 1 a 3 |
| SeaGen | 1,2 | Eje horizontal | Móvil | SI | Pilotes | 1 a 4 |
| SeaGen S | 2 | Eje horizontal | Móvil | SI | Pilotes | 1 a 4 |
| Deep Green Minesto | 0,5 | Hidroplano | Móvil | SI | Tensores | 1,2 a 2,4 |
| Kobold | 0,08 | Eje vertical | - | SI | Tensores | 1 a 3 |

Tabla 2.3 Características de las instalaciones hidrocinéticas.

| Instalación | Localización | País | Tipo | Generación anual [GWh] | Potencia [MW] | Año |
|------------------------|--|---------------|---------------------------------------|-------------------------------|----------------------|------------|
| Parc de Paimpol-Bréhat | Isla de Bréhat | Francia | Turbinas de centro abierto | - | 1 | 2016 |
| Cape Sharp Tidal | Bahía Fundy | Canadá | Turbinas de centro abierto | - | 4 | 2018 |
| Udolmok | Isla de Jindo (Jeolla) | Corea del Sur | Turbinas Gorlov de triple hélice | 2,4 | 1 | 2009 |
| MeyGen | Pentland Firth y Orkney Waters | Escocia | Turbinas de eje horizontal | 8.5 | 6 | 2017 |
| ATIR | - | España | Turbinas bi-axiales de eje horizontal | - | 2 | 2017 |
| O2 | - | Escocia | Turbinas bi-axiales de eje horizontal | - | 2 | - |
| THC | Allen (Río Negro) y Canal San Martín (Mendoza) | Argentina | Turbinas de eje horizontal | - | 0,45 | 2011 |
| Puente de mareas | Estrecho de Larantuka | Indonesia | Turbinas de eje horizontal | - | 30 | - |

3. MODELO NUMÉRICO

3.1. Introducción

La simulación numérica resulta la herramienta adecuada para establecer una primera etapa de análisis sobre este problema ya que la visualización de resultados en la escala regional permitiría identificar el potencial energético en diferentes zonas puntualmente. Esto puede ser validado con mediciones existentes y con las que se obtengan en nuevas campañas. Solo existen unos pocos modelos hidrodinámicos de los estuarios que se estudian en este proyecto: Río Deseado (Tarela y van Avermaete., 2009), Río Gallegos (Tarela et al., 2005) y Río Grande (Francisca et al., 2005). En comparación con los costos y dificultades de campañas, la simulación se torna una necesidad para una primera aproximación al problema. Además de aportar conocimiento general, esta primera evaluación del recurso puede brindar información útil para la toma de decisiones y la planificación de campañas de medición.

3.2. Software

Para la simulación de la hidrodinámica de los estuarios se utilizará el Sistema de Modelación Delft3D, desarrollado por la *Delft University of Technology* en los Países Bajos. El módulo hidrodinámico del Delft3D (módulo FLOW) resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes sobre una malla curvilínea, asumiendo las hipótesis de Boussinesq. El conjunto de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en combinación con un apropiado conjunto de condiciones iniciales y de contorno es resuelto en una malla de diferencias finitas utilizando el método RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*). Las fluctuaciones turbulentas se incluyen en el modelo por medio de los esfuerzos de Reynolds, definidos a través del modelo de cierre de turbulencia, entre los cuales cabe mencionar el k-l o el k-ε (Uittenbogaard, van Kester y Stelling, 1992).

La solución numérica de las ecuaciones hidrodinámicas requiere la discretización espacial del área de estudio (horizontal y vertical, si se requiere). Con este fin se superpone sobre el dominio de cálculo una malla con un número apropiado de celdas, dependiendo del detalle requerido por la tipología del problema a estudiar (oleaje, corrientes, entrada de ríos) y por la cercanía a las zonas de mayor interés (desembocadura de los ríos, punto de toma de agua). En caso de requerirse simulaciones 3D, la dirección vertical se discretiza a través de una malla con sistema coordenado tipo sigma, donde las capas se dividen proporcionalmente y están limitadas por dos planos, de los cuales uno se aproxima a la superficie libre del agua y el otro a la topografía del fondo. El número de capas en la vertical es constante para la totalidad del área de estudio.

La integración temporal usada por el esquema de solución numérica del sistema (método *Cyclic*) se basa en el método ADI (*Alternating Direction Implicit*). Este esquema no impone

restricciones al intervalo temporal de cálculo. Cada problema requiere cumplir con una condición de estabilidad, adoptando un intervalo temporal apropiado determinado por el tipo de problema involucrado y estimado con el cálculo del número de Courant-Friedrichs-Lewy (*CFL number*).

3.3. Esquema de modelación

El esquema de simulación a desarrollar implica la implementación de un modelo regional del Mar Argentino, denominado *Rank 0*, con un dominio que permita simular adecuadamente la circulación en la Plataforma Continental forzado a partir de modelos globales de marea. Luego se propone un segundo modelo anidado, *Rank 1*, que incluye a todos los estuarios, pero con una relación de longitudes de celdas aproximadamente 1 en 5 con respecto al *Rank 0*.

Posteriormente, para cada estuario se proponen 2 modelos anidados al *Rank 1* que se denominarán *Rank 2* y *Rank 3*. Cada *Rank 2* tomará las condiciones de borde del *Rank 1* y serán independientes entre ellos. Por último, los *Rank 3* de cada estuario que toman las condiciones de borde de los *Rank 2* serán los utilizados para el análisis de velocidades locales.

3.3.1. Rank 0

El *Rank 0* cubre desde el sur de Tierra del Fuego hasta el sur de Brasil con borde norte en latitud $25^{\circ}30'S$, borde sur en latitud $56^{\circ}30'S$, borde este en longitud $45^{\circ}30'O$ y el borde oeste dado por la costa continental Argentina y cerrando en longitud $69^{\circ}30'O$ en el pasaje de Drake. Tiene una máxima extensión vertical de 3500 km y horizontal de 1500 km (Figura 3.1).

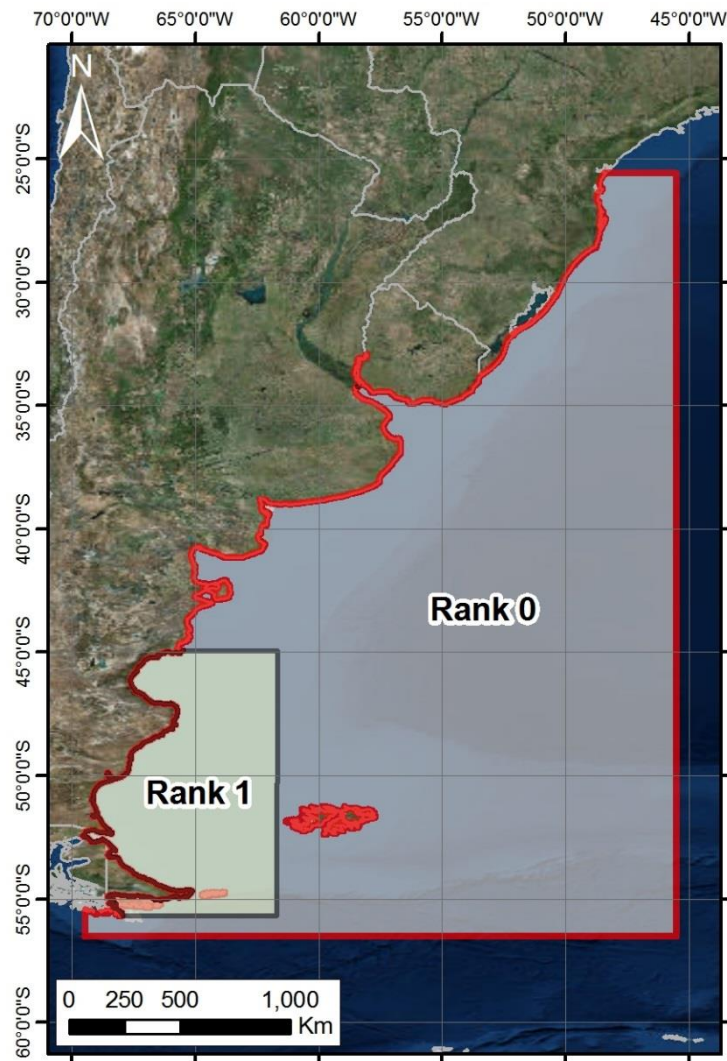


Figura 3.1. Dominios de modelación Rank0 y Rank1.

3.3.2. Rank 1

El Rank 1 cubre desde el sur de Tierra del Fuego hasta el borde norte del Golfo de San Jorge con borde norte en latitud 45°55'S, borde sur en latitud 55°40'S, borde este en longitud 61°41'O y el borde oeste dado por la costa continental Argentina. Tiene una extensión máxima vertical de 1.194 km y horizontal de 536 km (Figura 3.2).



Figura 3.2. Dominios de modelación Rank1 y Rank2.

3.3.3. Rank 2

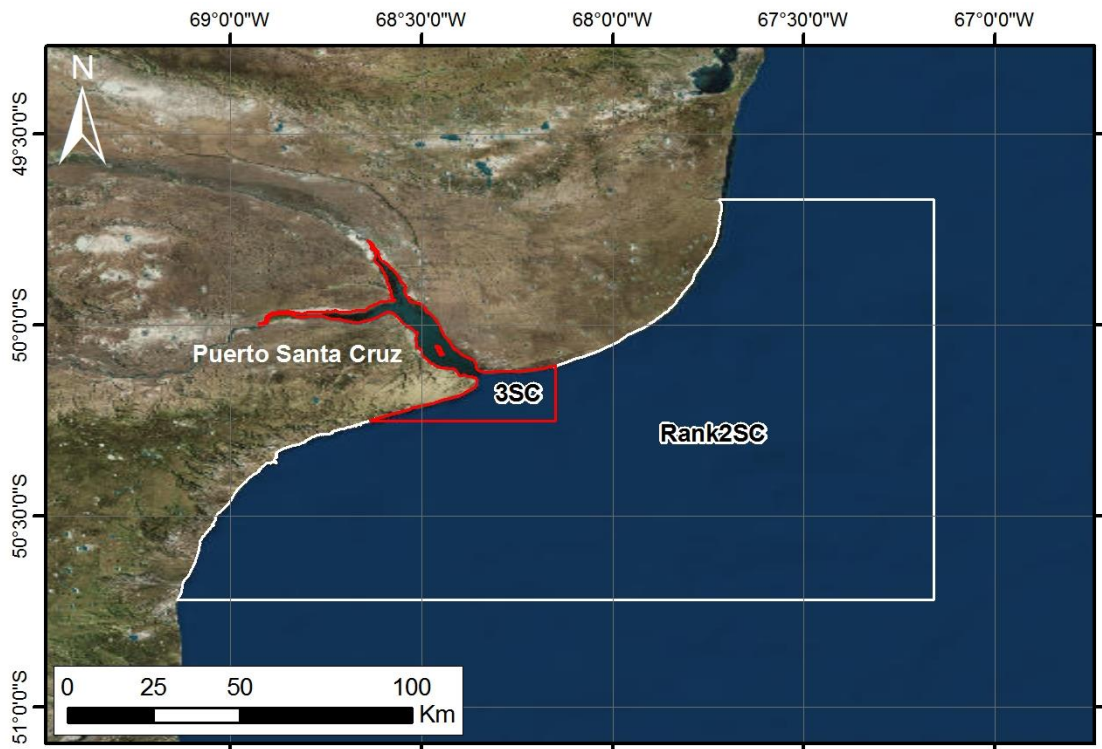
Los dominios de modelación para otorgar condiciones de borde a cada estuario se dividen como se mencionó previamente en 2 dominios anidados. El primero es el Rank 2 y luego el Rank 3. La denominación de los Rank 2 y Rank 3 de cada estuario tiene el siguiente esquema:

- Río Deseado: Rank2DE y Rank3DE
- Río Santa Cruz: Rank2SC y Rank3SC
- Río Coyle: Rank2CO y Rank3CO
- Río Gallegos: Rank2GA y Rank3GA
- Río Grande: Rank2GR y Rank3GR

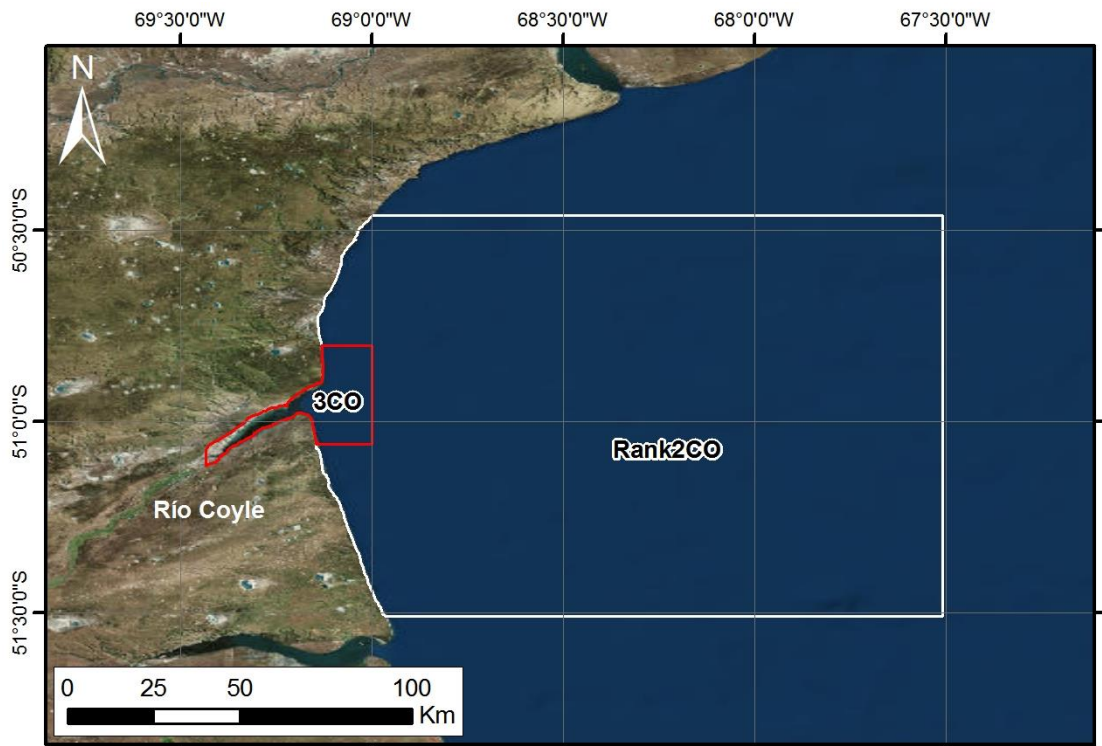
En la Figura 3.3 se presentan en detalle los dominios de modelación de los Rank 2 de los 5 estuarios mientras que en la Tabla 3.1 se encuentran los datos de los dominios.



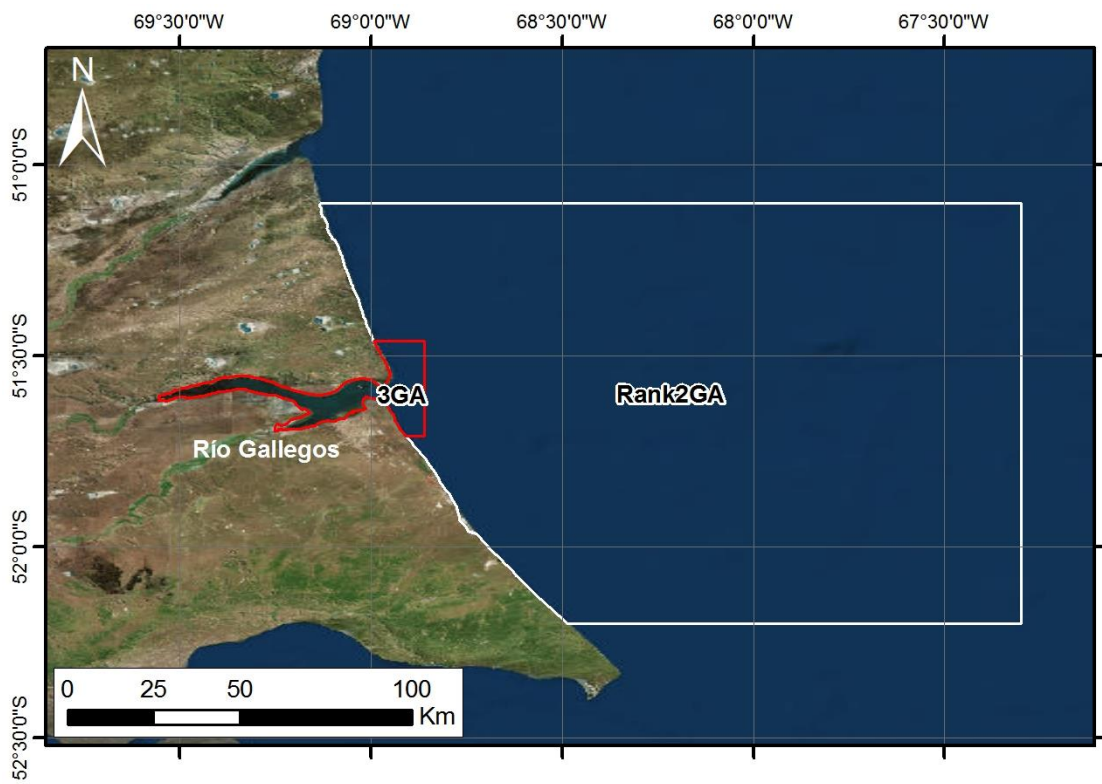
a) Estuario del río Deseado.



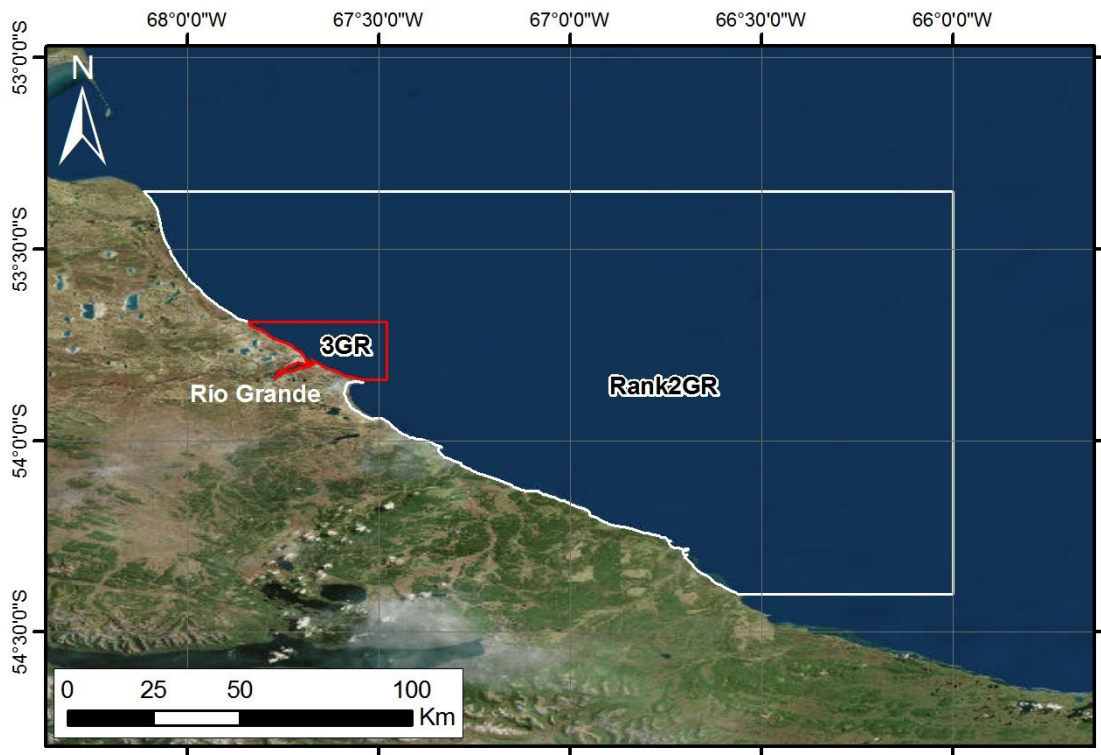
b) Estuario del río Santa Cruz.



c) Estuario del río Coyle.



d) Estuario del río Gallegos.



e) Estuario del río Grande.

Figura 3.3. Dominios de modelación de los Rank 2 y Rank 3 de los 5 estuarios.

Tabla 3.1 Características de los Rank 2.

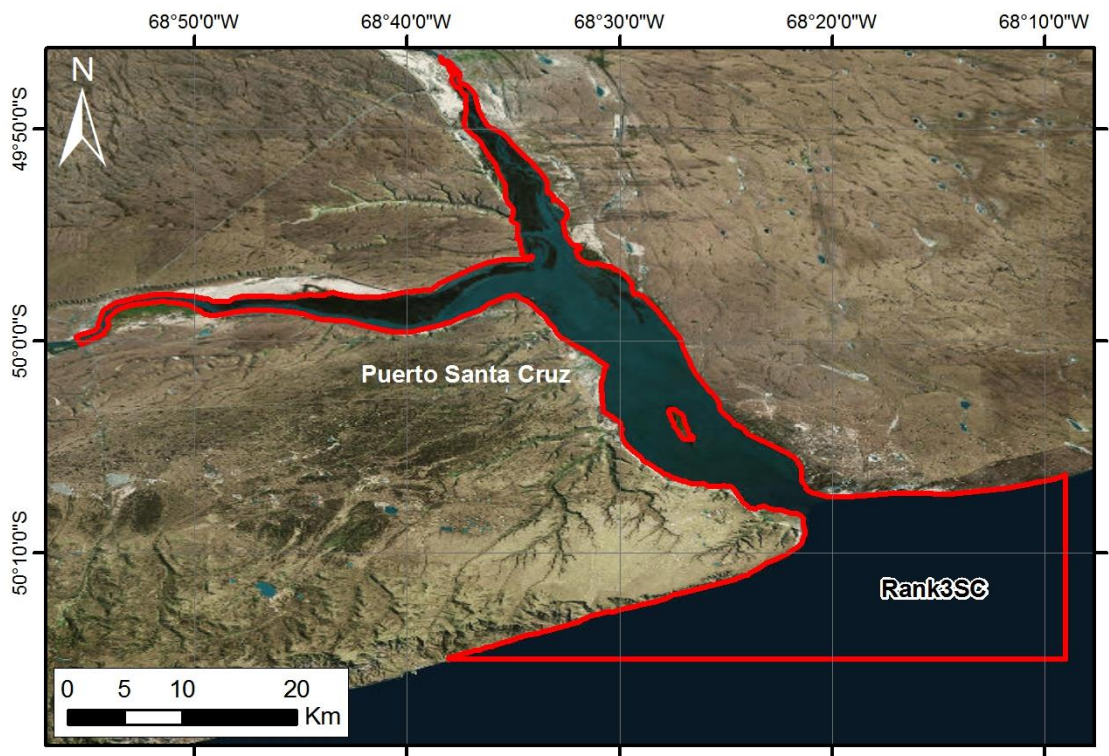
| Rank 2 | Lat Inf (°) | Lat Sup (°) | Altura (km) | Long Der (°) | Ancho (km) | Área (km ²) |
|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------|-------------------------|
| Río Deseado | 48°18'S | 47°15'S | 116,7 | 64°24'O | 144,8 | 1314 |
| Río Santa Cruz | 50°43'S | 49°40'S | 117,0 | 67°09'O | 139,7 | 1082 |
| Río Coyle | 51°30'S | 50°27'S | 116,8 | 67°30'O | 120,3 | 1308 |
| Río Gallegos | 52°12'S | 51°06'S | 122,3 | 67°18'O | 128,5 | 1362 |
| Río Grande | 54°24'S | 53°21'S | 116,8 | 65°00'O | 141,0 | 1146 |

3.3.4. Rank 3

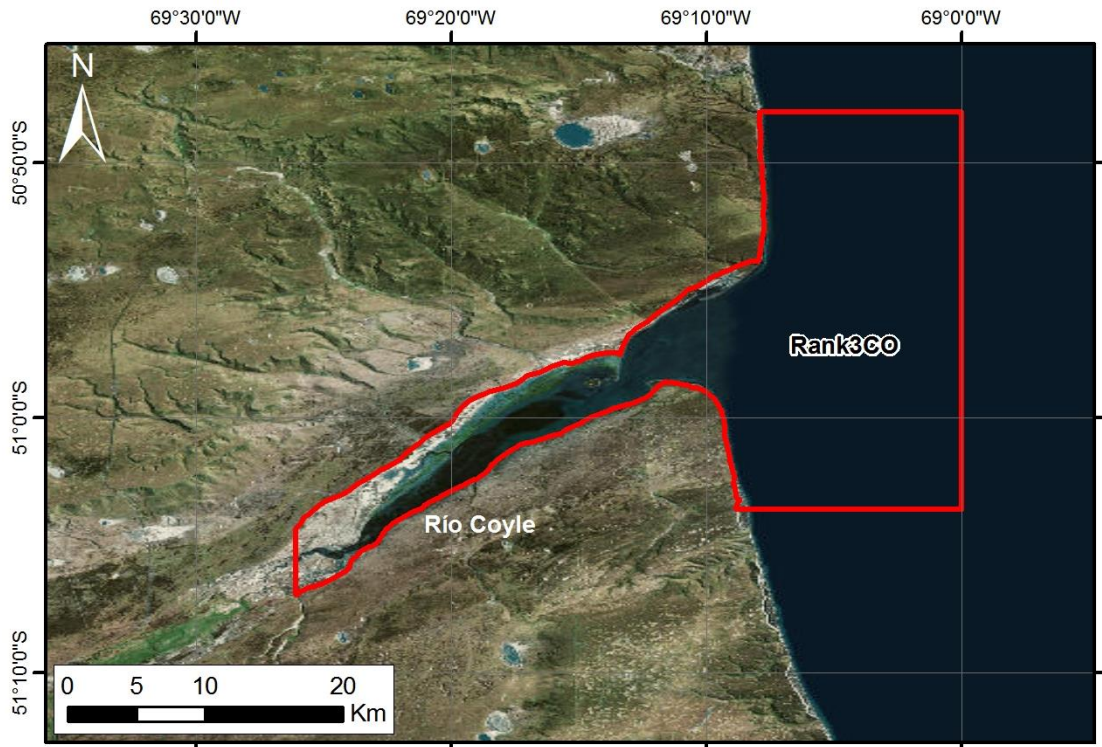
En la Figura 3.4 se presentan en detalle los dominios de modelación de los Rank 3 de los 5 estuarios mientras que en la Tabla 3.2 se encuentran los datos de los dominios.



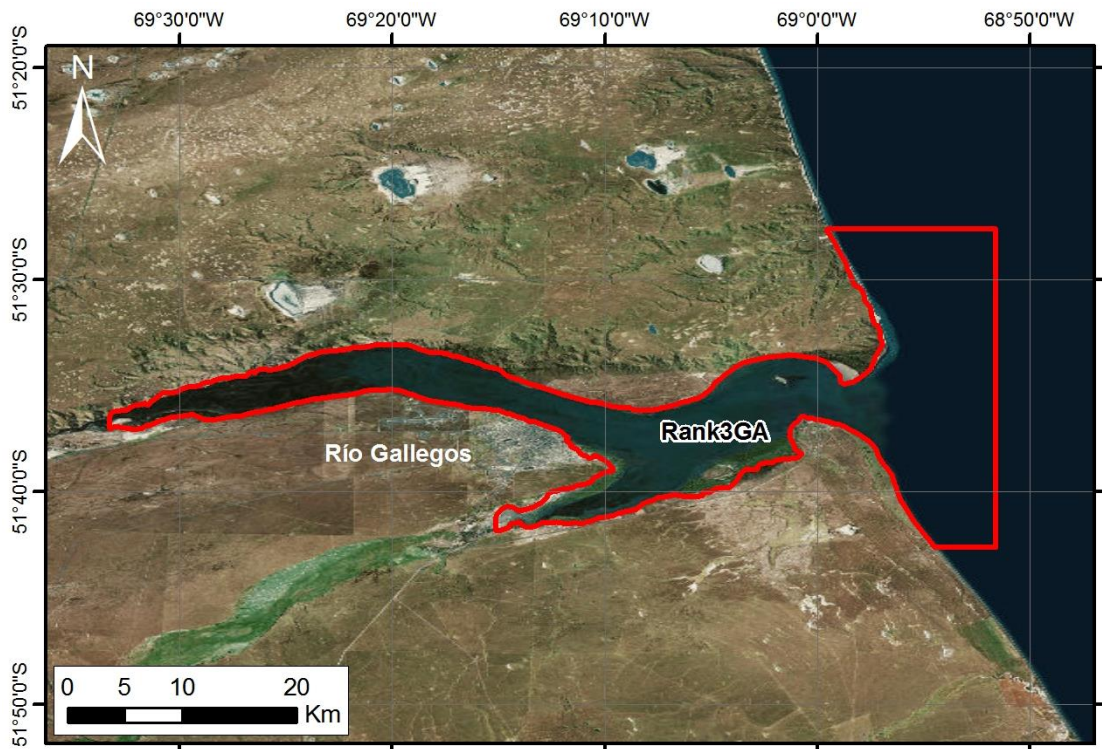
a) Estuario del río Deseado.



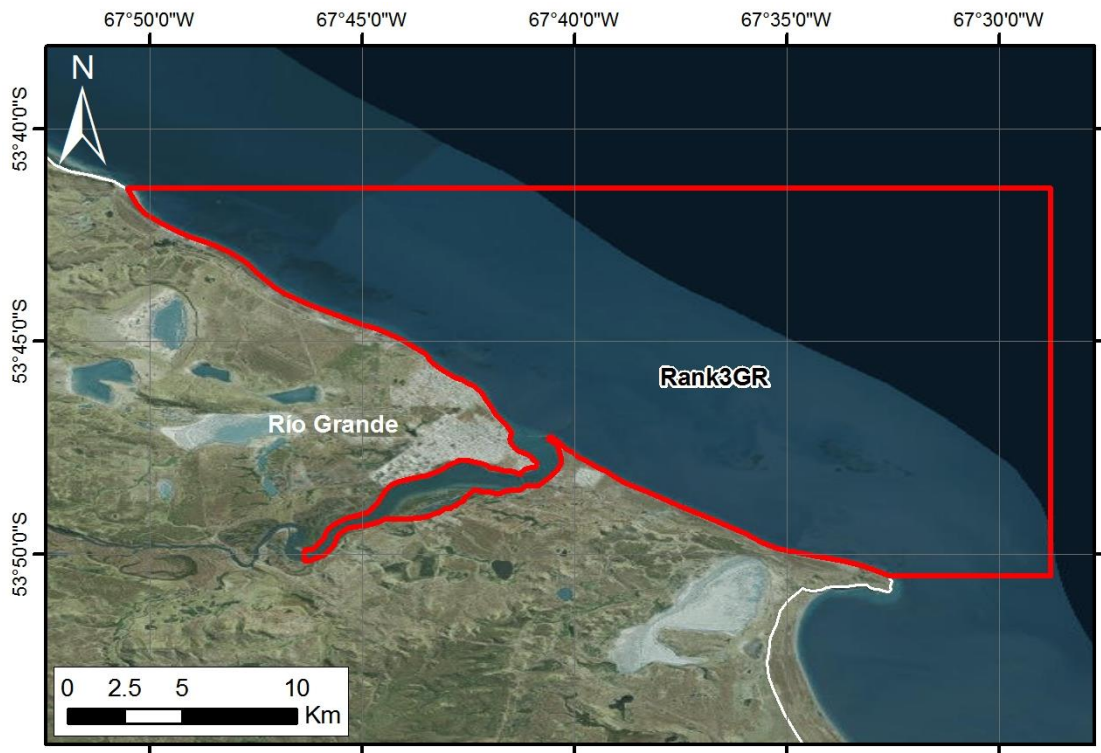
b) Estuario de río Santa Cruz.



c) Estuario del río Coyle.



d) Estuario del río Gallegos.



e) Estuario del río Grande.

Figura 3.4. Dominios de modelación de los Rank3 de los 5 estuarios.

Tabla 3.2 Características de los Rank3.

| Rank 3 | Lat Inf (°) | Lat Sup (°) | Altura (km) | Long Der (°) | Ancho (km) | Área (km ²) |
|----------------|-------------|-------------|-------------|--------------|------------|-------------------------|
| Río Deseado | 47°54'36\"S | 47°42'00\"S | 23,3 | 65°42'00\"O | 14,1 | 340 |
| Río Santa Cruz | 50°15'00\"S | 49°46'23\"S | 16,1 | 68°09'00\"O | 50,8 | 522 |
| Río Coyle | 51°03'36\"S | 50°48'00\"S | 28,9 | 68°00'00\"O | 15,7 | 400 |
| Río Gallegos | 51°42'36\"S | 51°27'36\"S | 27,8 | 68°51'36\"O | 9,2 | 402 |
| Río Grande | 53°50'31\"S | 53°41'24\"S | 16,9 | 67°28'48\"O | 23,9 | 266 |

3.4. Forzantes y condicionantes

3.4.1. Modelo global de mareas

Las condiciones de borde del Rank 0 son generadas a partir de modelos globales de marea que proveen las amplitudes y fases de cada una de las componentes de marea astronómica para todos los puntos de la tierra. Se seleccionó el modelo FES2014b¹⁷ con su última

¹⁷ <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/auxiliary-products/global-tide-fes.html>

actualización de diciembre de 2017 que tiene una resolución de $1/16^\circ$ e incluye 34 componentes. Para este trabajo se seleccionaron las 15 principales que según Fernández (2011) son las que mayor incidencia tienen en la región suroeste del Océano Atlántico. A saber:

Tabla 3.3 Principales componentes de marea.

| Nombre | Símbolo | Período (h) |
|-------------------------|------------|-------------|
| Lunar Principal | <i>M2</i> | 12.42 |
| Solar Principal | <i>S2</i> | 12.00 |
| Elíptico Lunar mayor | <i>N2</i> | 12.66 |
| Semidiurno Luni-Solar | <i>K2</i> | 11.97 |
| Solar elíptico mayor | <i>T2</i> | 12.01 |
| Solar elíptico menor | <i>L2</i> | 12.19 |
| Elíptico lunar 2° orden | <i>2N2</i> | 12.91 |
| Diurno Luni-Solar | <i>K1</i> | 23.93 |
| Diurno Lunar principal | <i>O1</i> | 25.82 |
| Diurno Solar principal | <i>P1</i> | 24.07 |
| Elíptico Lunar mayor | <i>Q1</i> | 26.87 |
| Elíptico Lunar menor | <i>M1</i> | 24.84 |
| Quincenal Lunar | <i>Mf</i> | 327.9 |
| Mensual Lunar | <i>Mn</i> | 661.3 |
| Semi-anual Solar | <i>Ssa</i> | 4383 |

Para la extracción y generación de las condiciones de borde se empleó el software Panoply desarrollado por la NASA¹⁸ (*National Aeronautics and Space Administration*) y luego se interpolaron los datos de marea para hacerlos coincidir con los límites del Rank 0.

3.4.2. Batimetrías

La implementación de los modelos hidrodinámicos requiere la caracterización batimétrica de las áreas simuladas de acuerdo con las discretizaciones elegidas para cada modelo (interpolación de información batimétrica existente o estimada).

La información batimétrica disponible consiste principalmente en los datos de las cartas náuticas publicadas por el Servicio de Hidrografía Naval (SHN) de la República Argentina (interior de los estuarios y Plataforma Continental) e información de bases batimétricas globales (ETOPO y GEBCO, por ejemplo).

Por su parte, la información batimétrica estimada surgió de la detección de curvas de nivel de los estuarios a partir de la clasificación de imágenes satelitales LANDSAT, a diferentes tiempos dada la amplitud de marea y con cobertura de nubosidad baja, con la metodología NDWI - *Modified Normalized Difference Water Index*, que será presentada en el Capítulo 4.

¹⁸ <https://www.giss.nasa.gov/tools/panoply/>

4. ANÁLISIS BATIMÉTRICO

4.1. Análisis de batimetrías globales

Se analizaron 2 conjuntos de topobatimetrías globales de libre disponibilidad: la topobatimetría GEBCO¹⁹ de 30 segundos de resolución y la topobatimetría ETOPO1²⁰ de 1 minuto de resolución desarrollada por la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*, EEUU). Ambos conjuntos de datos se basan en relevamientos batimétricos interpolados en grillas regulares.

Para seleccionar el modelo a utilizar se procedió a compararlas de forma cualitativa. En las Figuras 4.1 a 4.5 se ilustran ambas batimetrías para los dominios de los *Rank 2* y *Rank 3* de los cinco estuarios. Se observa que en todos ellos existe una buena coincidencia entre ambos modelos alejados de la costa, mientras que en cercanías de la línea costera los resultados de la batimetría ETOPO presenta mucho menor detalle. Esto se debe a que no utiliza datos de cartas locales como si lo hace GEBCO, y ante la falta de información realiza una interpolación.

Como modelo batimétrico a utilizar para la batimetría de los *Rank 0* y *Rank 1* se seleccionó GEBCO. La batimetría de los *Rank 2* y *Rank 3* de los distintos estuarios se construyeron en base a datos de la batimetría GEBCO en conjunto con datos locales (cartas SHN). En particular, para el *Rank 2* y *Rank 3* del dominio de Río Gallegos se decidió utilizar el modelo ETOPO ya que como se aprecia en la Figura 4.4 se presentan ciertos valores anómalos que se presumen resultado de la interpolación y podrían llegar a afectar los resultados de la modelación.

¹⁹ <https://www.gebco.net/>

²⁰ <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>

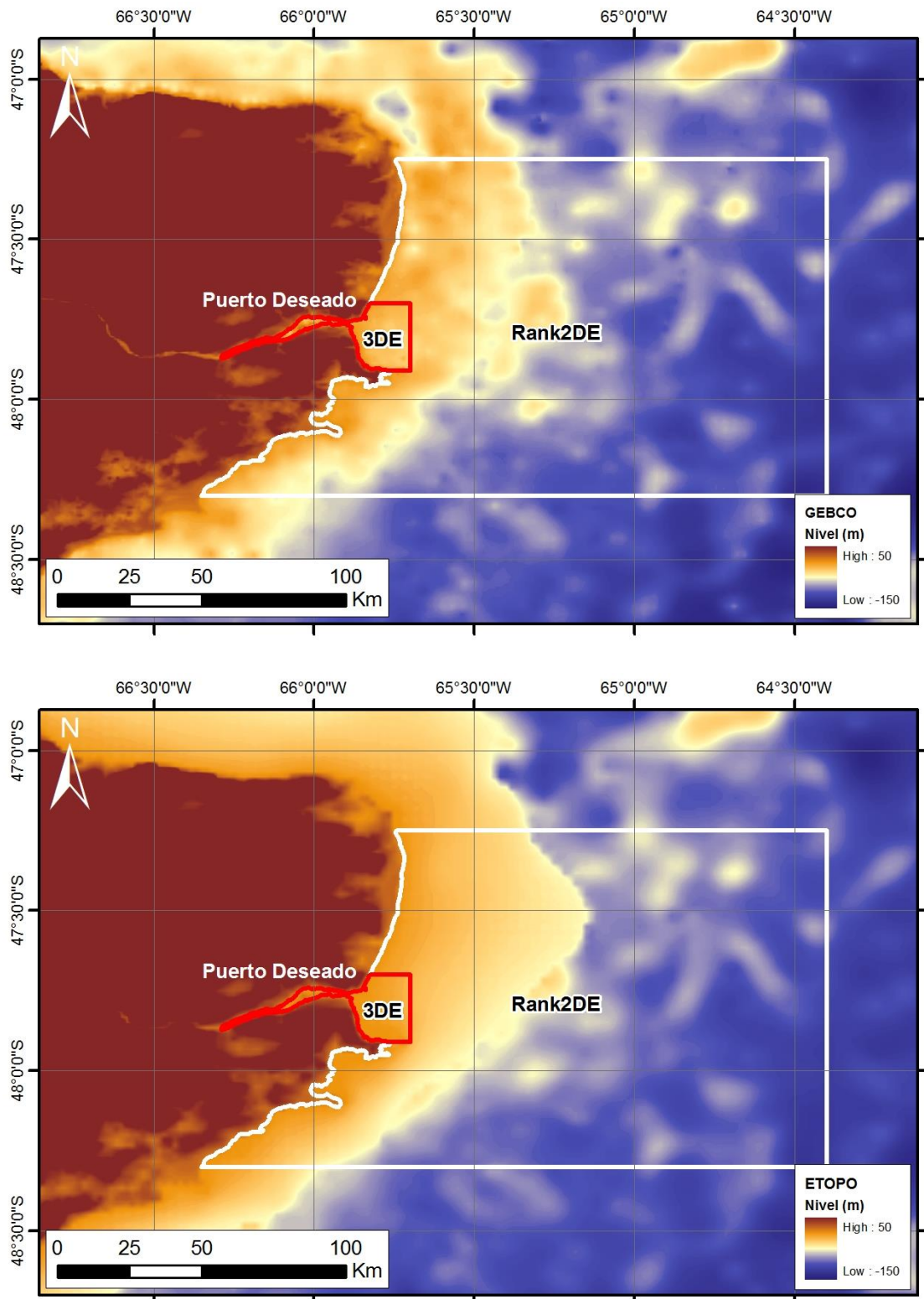


Figura 4.1. Batimetrías globales GEBCO (arriba) y ETOPO (abajo) para el Rank2 y el Rank3 del estuario del río Deseado.

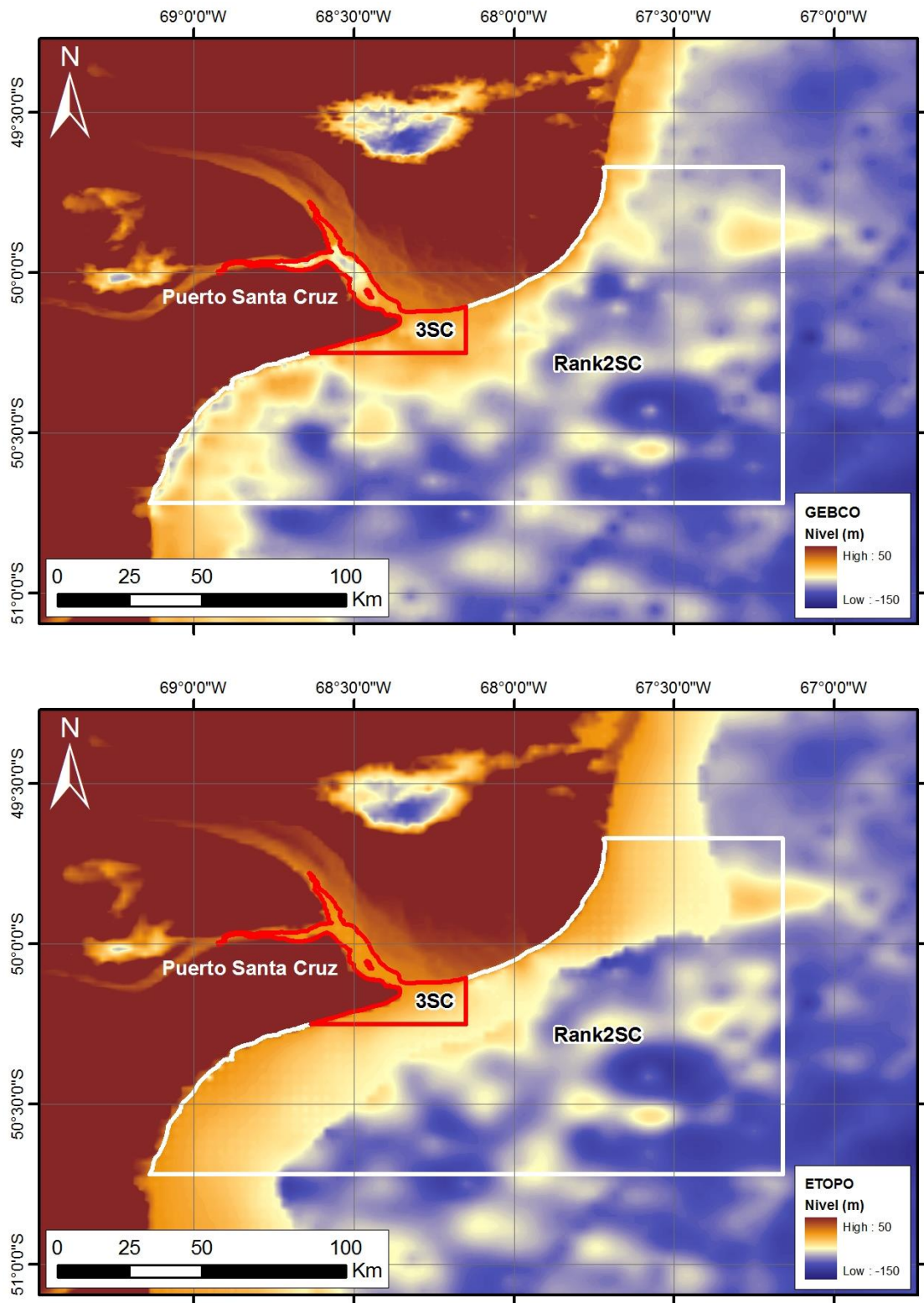


Figura 4.2. Batimetrías globales GEBCO (arriba) y ETOPO (abajo) para el Rank 2 y el Rank3 del estuario del río Santa Cruz.

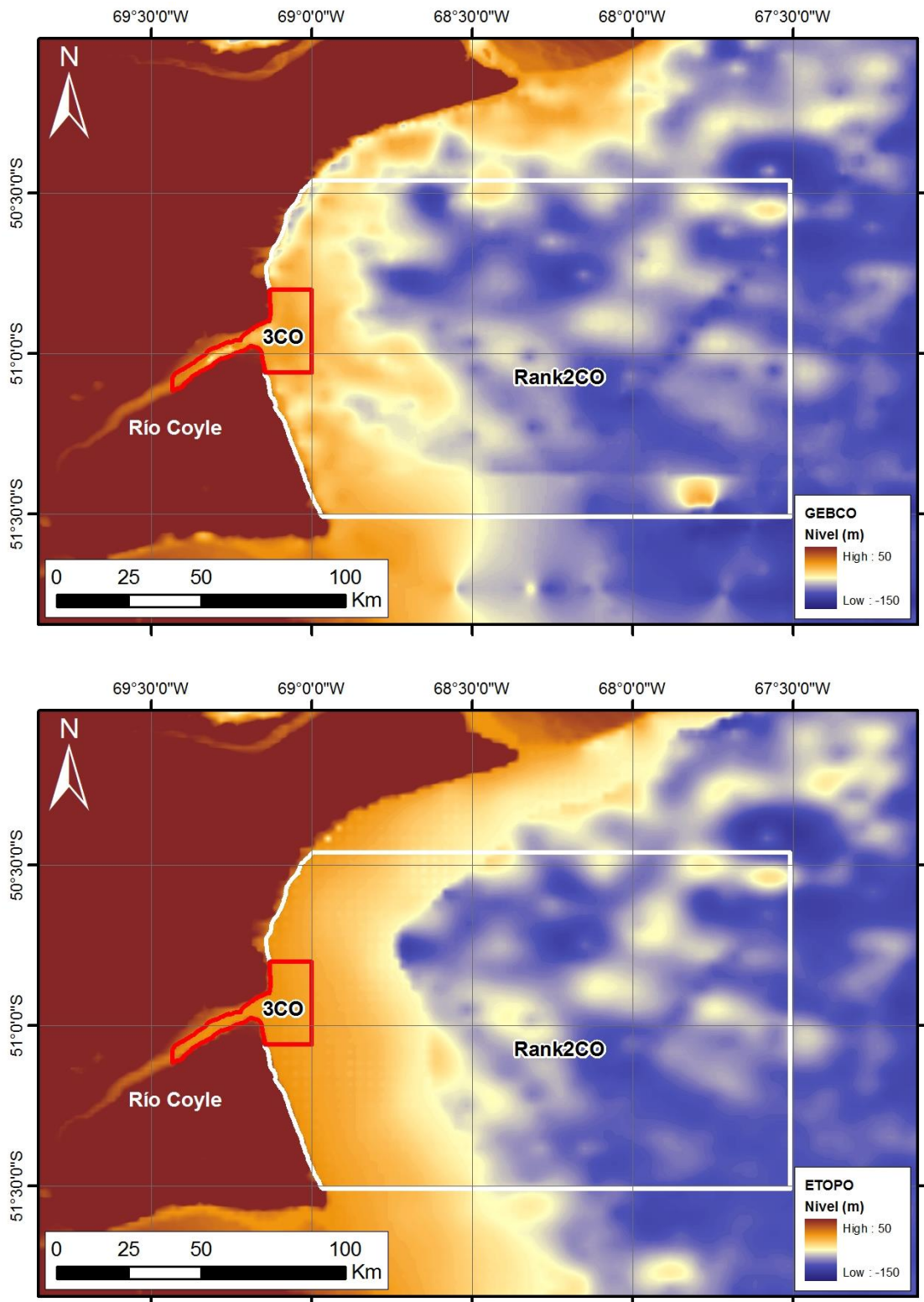


Figura 4.3. Batimetrías globales GEBCO (arriba) y ETOPO (abajo) para el Rank 2 y el Rank3 del estuario del río Coyle.

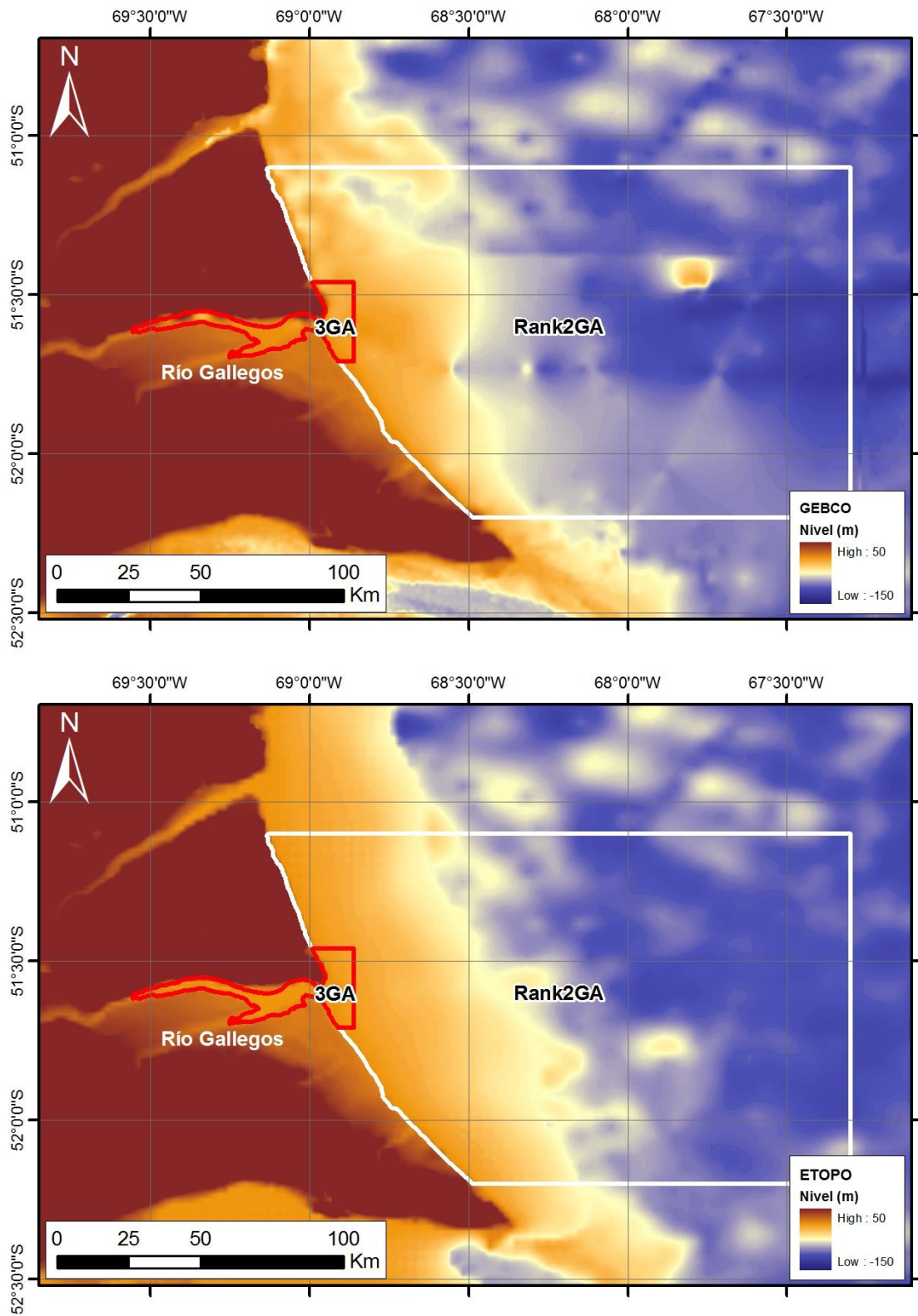


Figura 4.4. Batimetrías globales GEBCO (arriba) y ETOPO (abajo) para el Rank 2 y el Rank3 del estuario del río Gallegos.

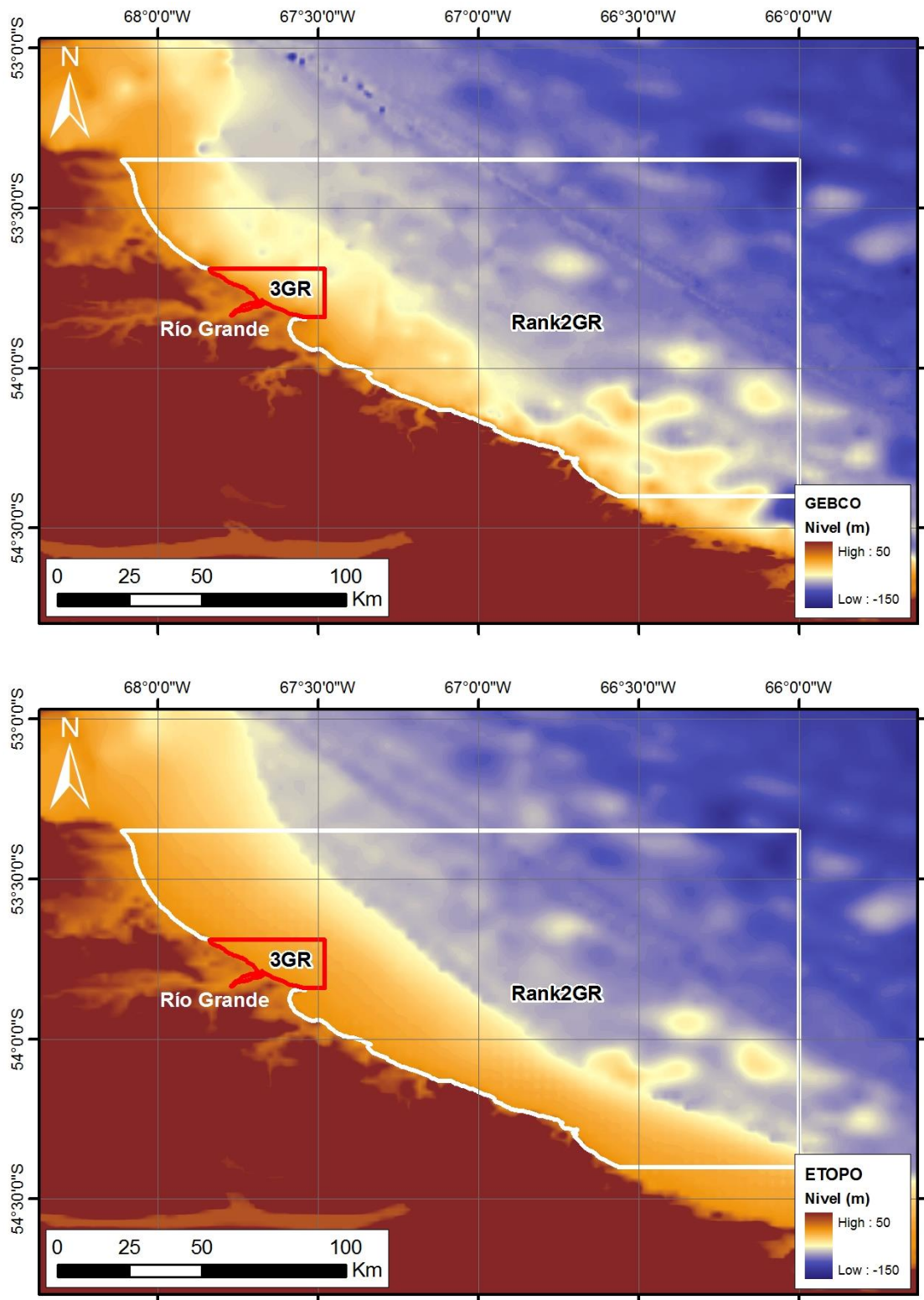


Figura 4.5. Batimetrías globales GEBCO (arriba) y ETOPO (abajo) para el Rank 2 y el Rank3 del estuario del río Grande.

4.2. Digitalización de cartas náuticas

Para representar las batimetrías de mayor detalle se procedió a digitalizar toda la información proporcionada en las cartas náuticas del SHN elegidas para el presente estudio (datos altimétricos puntuales y curvas de nivel). Estas cartas representan distintas escalas de resolución, de modo que incluyen diferentes densidades de puntos. Las cartas empleadas para el proceso de digitalización se citan a continuación:

Tabla 4.1 Cartas náuticas de gran escala disponibles para digitalización.

| Tipo | Escala | Carta | Denominación |
|------------|-------------|-------|---|
| Regional | 1:3.500.000 | H-50 | Mar Argentino: de Río de la Plata al Paralelo 57° Sur |
| Intermedia | 1:1.500.000 | H-1 | Acceso al Río de la Plata |
| Intermedia | 1:1.500.000 | H-2 | El Rincón. Golfos San Matías y Nuevo |
| Intermedia | 1:1.500.000 | H-3 | Golfo San Jorge |
| Intermedia | 1:1.500.000 | H-4 | Archipiélago Fueguino e Islas Malvinas |

Tabla 4.2 Cartas náuticas de detalle disponibles para digitalización.

| Estuario | Escala | Carta | Denominación |
|----------------|----------|---------|---------------------------------------|
| Río Deseado | 1:35.000 | H-360 | Rada Puerto Deseado |
| Río Deseado | 1:20.000 | H-361 | Río Deseado |
| Río Santa Cruz | 1:50.000 | 2 | Puerto Santa Cruz |
| Río Santa Cruz | 1:50.000 | H-367 | Punta Quilla |
| Río Gallegos | 1:40.000 | H-451-A | Puerto Río Gallegos (Barra Exterior) |
| Río Gallegos | 1:5.000 | H-451-B | Punta Loyola. Muelle Presidente Illia |
| Río Gallegos | 1:30.000 | H-452 | Puerto Río Gallegos (Parte Interior) |
| Río Grande | 1:15.000 | H-462 | Río Grande |
| Río Grande | 1:10.000 | H-462 | Río Grande (Interior) |

En la Figura 4.6 se presenta la cobertura batimétrica proporcionada por la cartografía de base empleada a escala regional e intermedia, como así también la ubicación de los cinco estuarios patagónicos.

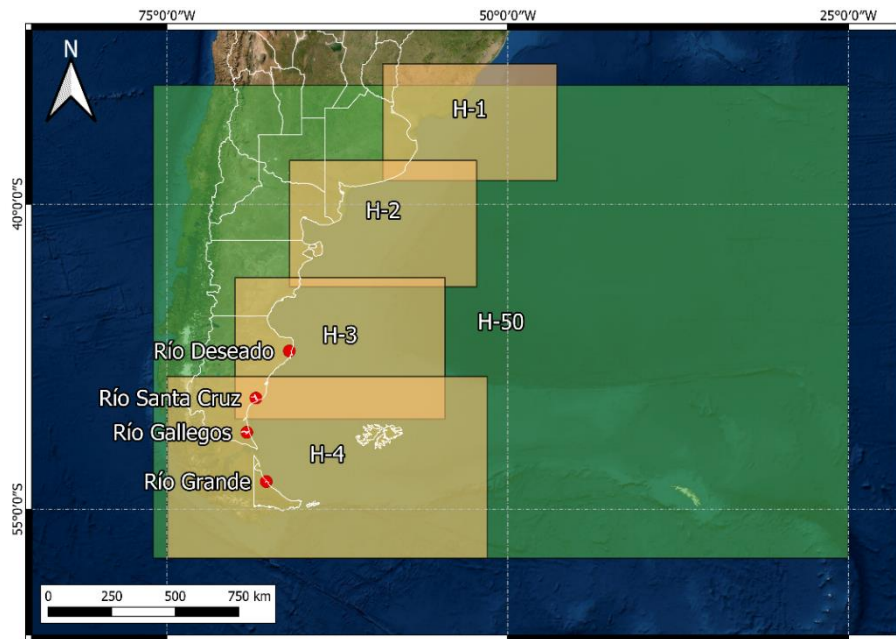


Figura 4.6. Cobertura de la cartografía de base empleada y ubicación de los estuarios.

Por su parte, en la Figura 4.7 se muestra la cobertura de las cartas para los diferentes estuarios con las que se cuenta con información batimétrica detallada. El estuario del río Coyle no cuenta con información batimétrica de cartas del SHN.

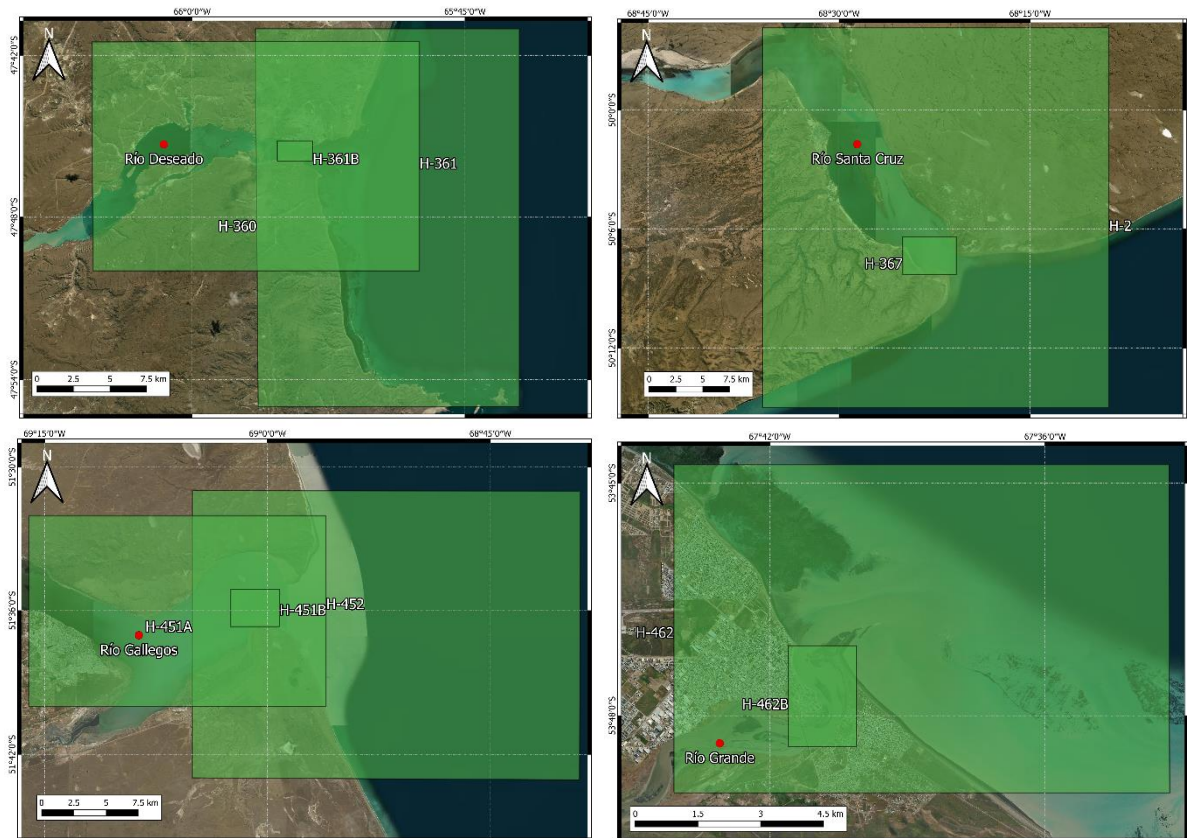


Figura 4.7. Cobertura de la cartografía de detalle para los estuarios patagónicos.

Las cartas indican en su mayoría que las profundidades están referidas al límite inferior de las bajamares de sicigias. Para poder llevar todos los niveles a un mismo plano de referencia, se utiliza el esquema que se presenta en la Figura 4.8, en donde cada carta indica que plano de reducción utiliza. Esto se sintetiza en las Tabla 4.3 a Tabla 4.7 para las cartas de gran escala y en la Tabla 4.8 para las cartas de detalles de cada uno de los estuarios.

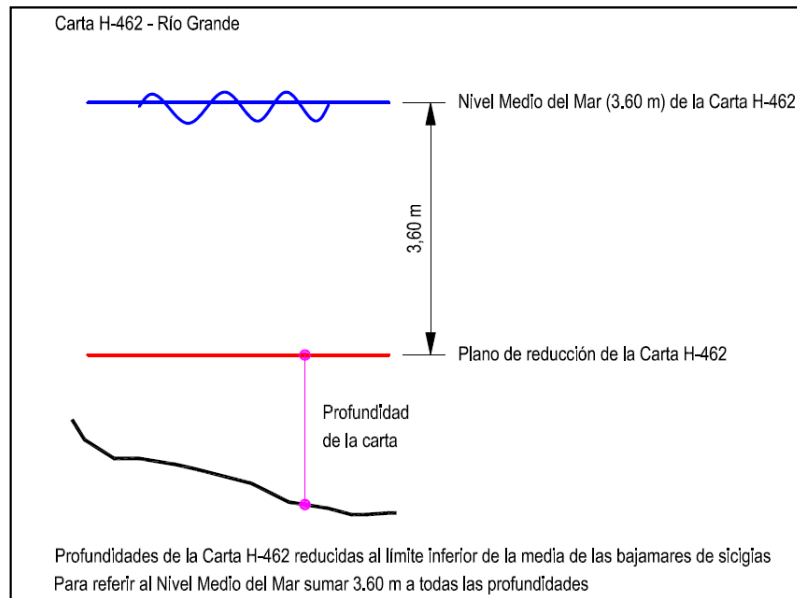


Figura 4.8. Esquema de reducción de niveles al plano del Nivel Medio del Mar.

Tabla 4.3. Planos de reducción de las cartas de gran escala (carta H-50, SHN).

| Plano de reducción | Lugar | Nivel medio (m) |
|--|---|-----------------|
| Límite inferior de la media de todas las bajamares (*) y límite inferior de la media de las bajamares de sicigias (**) | Puerto de Montevideo - Uruguay (*) | 0.91 |
| | Puerto de Buenos Aires (Dársena F) (*) | 0.79 |
| | Puerto Mar del Plata (**) | 0.91 |
| | Puerto Quequén (**) | 0.98 |
| | Puerto Ing. White (**) | 2.59 |
| | Puerto San Antonio (Muelle Este) (**) | 4.45 |
| | Puerto Madryn (**) | 2.99 |
| | Puerto Comodoro Rivadavia (**) | 3.14 |
| | Puerto Deseado (**) | 3.20 |
| | Puerto San Julián (Muelle Frigorífico) (**) | 4.60 |
| | Punta Quilla (Puerto Santa Cruz) (**) | 6.20 |
| | Punta Loyola (Puerto Río Gallegos) (**) | 6.20 |
| | Puerto Río Grande (Exterior) (**) | 4.50 |
| | Puerto Argentino (Islas Malvinas) (**) | 1.01 |
| Puerto Vancouver (Isla de los Estados) (**) | 1.31 | |

Tabla 4.4. Planos de reducción de las cartas de gran escala: (carta H-1, SHN)

| Plano de reducción | Lugar | Nivel medio (m) |
|--|--|-----------------|
| Límite inferior de la media de todas las bajamares (*) y límite inferior de la media de las bajamares de sicigias (**) | Punta del Este - Uruguay (*) | 0.92 |
| | Puerto de Montevideo - Uruguay (*) | 0.91 |
| | Colonia del Sacramento - Uruguay (*) | 0.73 |
| | Isla Martín García (*) | 0.64 |
| | Puerto de Buenos Aires (Dársena F) (*) | 0.79 |
| | Puerto La Plata (*) | 0.79 |
| | Canal Punta Indio (Torre Oyarvide) (*) | 0.85 |
| | San Clemente del Tuyú (Muelle) (**) | 0.91 |
| | Santa Teresita (Muelle) (**) | 0.91 |
| | Mar de Ajó (**) | 0.91 |
| | Pinamar (**) | 0.91 |
| | Puerto Mar del Plata (**) | 0.91 |
| | Puerto Quequén (**) | 0.98 |

Tabla 4.5. Planos de reducción de las cartas de gran escala (carta H-2, SHN)

| Plano de reducción | Lugar | Nivel medio (m) |
|--|---|-----------------|
| Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias | Puerto Mar del Plata | 0.91 |
| | Puerto Quequén | 0.98 |
| | Puerto Ingeniero White | 2.59 |
| | Puerto Belgrano | 2.44 |
| | Puerto Rosales | 2.44 |
| | Monte Hermoso | 1.89 |
| | Puerto San Blas | 1.22 |
| | Puerto San Antonio | 4.45 |
| | Río Negro (Punta Redonda) | 2.13 |
| | Fondeadero. San Román (Golfo San José) | 4.11 |
| | Puerto Pirámide | 2.99 |
| | Puerto Madryn | 2.99 |
| | Puerto Argentino (Islas Malvinas) | 1.01 |
| | Puerto San Juan del Salvamento (Isla. de los Estados) | 1.58 |
| Caleta Brent (Isla de los Estados) | 1.31 | |

Tabla 4.6. Planos de reducción de las cartas de gran escala (carta H-3, SHN).

| Plano de reducción | Lugar | Nivel medio (m) |
|--|--|-----------------|
| Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias | Santa Elena | 2.59 |
| | Bahía Camarones | 2.80 |
| | Bahía Gil (Caleta Horno) | 2.93 |
| | Bahía Bustamante | 3.11 |
| | Comodoro Rivadavia | 3.14 |
| | Cabo Blanco | 2.74 |
| | Puerto Deseado | 3.20 |
| | Bahía Oso Marino | 3.35 |
| | Puerto San Julián (Muelle Frigorífico) | 4.60 |
| | Punta Quilla (Puerto Santa Cruz) | 6.20 |

Tabla 4.7. Planos de reducción de las cartas de gran escala (carta H-4, SHN)

| Plano de reducción | Lugar | Nivel medio (m) |
|--|--|-----------------|
| Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias | Punta Quilla (Puerto Santa Cruz) | 6.20 |
| | Punta Loyola (Puerto Río Gallegos) | 6.20 |
| | Estrecho de Magallanes (Boca Oriental) | 5.90 |
| | Bahía San Sebastián | 5.40 |
| | Puerto Río Grande (Exterior) | 4.50 |
| | Bahía Thetis | 2.19 |
| | Bahía Ushuaia | 1.10 |
| | Puerto Argentino (Islas Malvinas) | 1.01 |
| | Puerto San Juan del Salvamento (Isla de los Estados) | 1.58 |
| | Caleta Brent (Isla de los Estados) | 1.31 |

Tabla 4.8. Planos de reducción de las cartas de detalle.

| Carta | Título | Plano de reducción | Lugar | Nivel medio [m] |
|---------|---------------------------------------|--|--|-----------------|
| H-360 | Rada Puerto Deseado | Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias | Puerto. Deseado | 3.20 |
| H-361 | Río Deseado | Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias | Puerto Deseado | 3.20 |
| | | | Bahía Uruguay | 3.20 |
| 2 | Puerto Santa Cruz | Reducidas al nivel de las mayores bajamares de sicigias | Punta Quilla | 6.22 |
| | | | Punta Reparó | 6.86 |
| H-367 | Punta Quilla | Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias | Punta Quilla (Puerto Santa Cruz) | 6.20 |
| H-451-A | Puerto Río Gallegos (Barra Exterior) | Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias | Punta Loyola (Puerto Río Gallegos) | 6.20 |
| H-451-B | Punta Loyola. Muelle Presidente Illia | Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias | Punta Loyola | 6.20 |
| H-452 | Puerto Río Gallegos (Parte Interior) | Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias | Punta Loyola (Puerto Río Gallegos) | 6.20 |
| | | | Muelle El Turbio (Puerto Río Gallegos) | 6.20 |
| H-462 | Río Grande | Límite inferior de la media de las bajamares de sicigias | Puerto Río Grande (Exterior) | 3.60 |

4.3. Complementación satelital

La delimitación de la zona intermareal de los cinco estuarios se llevó a cabo mediante la adquisición y el procesamiento de imágenes satelitales. Las imágenes fueron obtenidas con la herramienta USGS *Earth Explorer*, la cual permite, entre otras cosas, la descarga rápida y gratuita de imágenes Landsat. Para este caso, se utilizaron las imágenes de los sensores OLI (*Operational Land Imager*) y TIRS (*Thermal Infrared Sensor*) a bordo del satélite Landsat 8, operativo desde 2013. Estos instrumentos recogen datos de imagen de nueve bandas de onda corta con resolución espacial de 30 m (visible, NIR y SWIR) y 15 m (pancromático), y dos bandas térmicas de onda larga con resolución espacial de 100 m, respectivamente. El Landsat 8, por su parte, tiene una órbita heliosincrónica (705 km de altitud) con un período de revisita de 16 días y una cobertura espacial por escena de 185x180 km.

También fue necesario disponer de los datos de las tablas de marea astronómica del SHN de los puertos más cercanos a los estuarios. De esta manera, fue posible vincular la fecha y hora de las imágenes obtenidas con una altura de marea. Del total de imágenes disponibles, se seleccionaron las más representativas de los eventos de marea de mayor y menor altura (Figura 4.9). Los criterios aplicados para dicha selección fueron: a) que el porcentaje de nubosidad sea bajo (<15%); b) que exista el menor lapso de tiempo posible entre los eventos; y c) que las imágenes sean recientes.

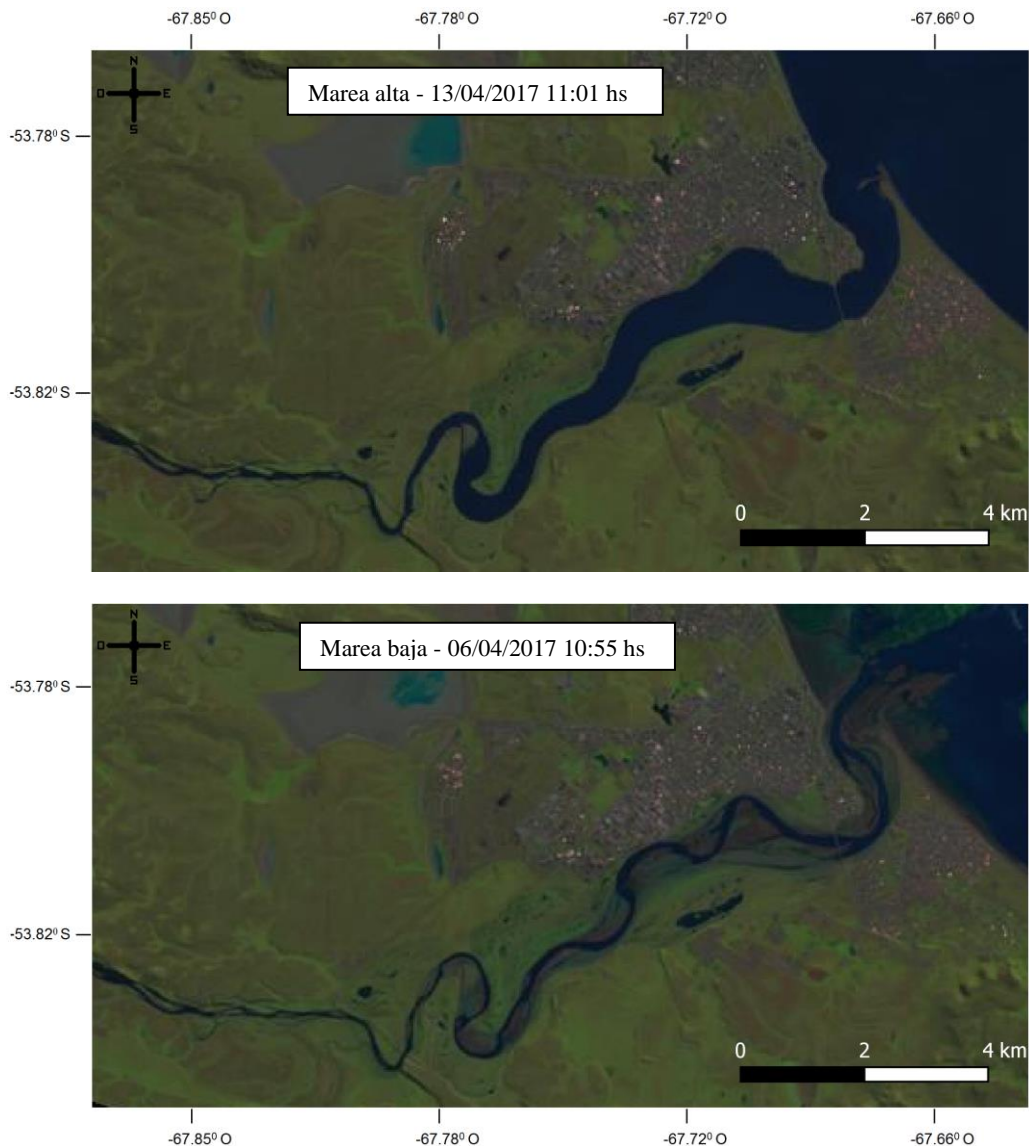


Figura 4.9. Eventos de marea de mayor (7,29 m) (superior) y menor (1,82 m) (inferior) altura en el estuario del río Grande.

Para desarrollar esta tarea fue necesario contar con datos de imagen de los estuarios para dos o más situaciones de marea contrastantes. En este sentido, el caso del estuario del río Grande resultó el ideal, pues se obtuvieron datos de imagen no sólo de eventos de marea alta (7,29 m) y baja (1,82 m), sino también de marea intermedia (3,47 m). Esto permitió elaborar dos curvas batimétricas para este estuario, que será utilizado como ejemplo para ilustrar la metodología.

Todas las operaciones con imágenes fueron realizadas con el software libre “*Quantum Gis 2.12.2 Lyon*”. Para delimitar la zona intermareal, el primer paso fue clasificar los píxeles de las imágenes seleccionadas en dos categorías: agua y tierra. Ello se realizó a partir de la utilización del Índice de Agua de Diferencia Normalizada Modificado (MNDWI), el cual permite diferenciar los territorios cubiertos por agua de aquellos que no lo están (Xu, 2006). La fórmula para su cálculo es la siguiente:

$$MNDWI = \frac{Green - MIR}{Green + MIR}$$

donde *Green* (banda del verde, banda 3 del sensor OLI) y *MIR* (banda del infrarrojo medio; banda 6 del sensor OLI).

Valores positivos del índice clasifican a los píxeles en la categoría agua, mientras que valores de cero o negativos están asociados a la vegetación, el suelo o las construcciones (Matsushita et al., 2016). No obstante, según Xu (2006), la mejor caracterización de la superficie de agua de una imagen se consigue utilizando un valor umbral de 0,09. Este valor fue el que se utilizó para clasificar los píxeles de las imágenes en agua (1 si $MNDWI > 0,09$) o tierra (0 si $MNDWI \leq 0,09$).

En las Figuras 4.10 y 4.11 se presentan dos aplicaciones de esta metodología, una para aguas altas y la otra para aguas bajas.

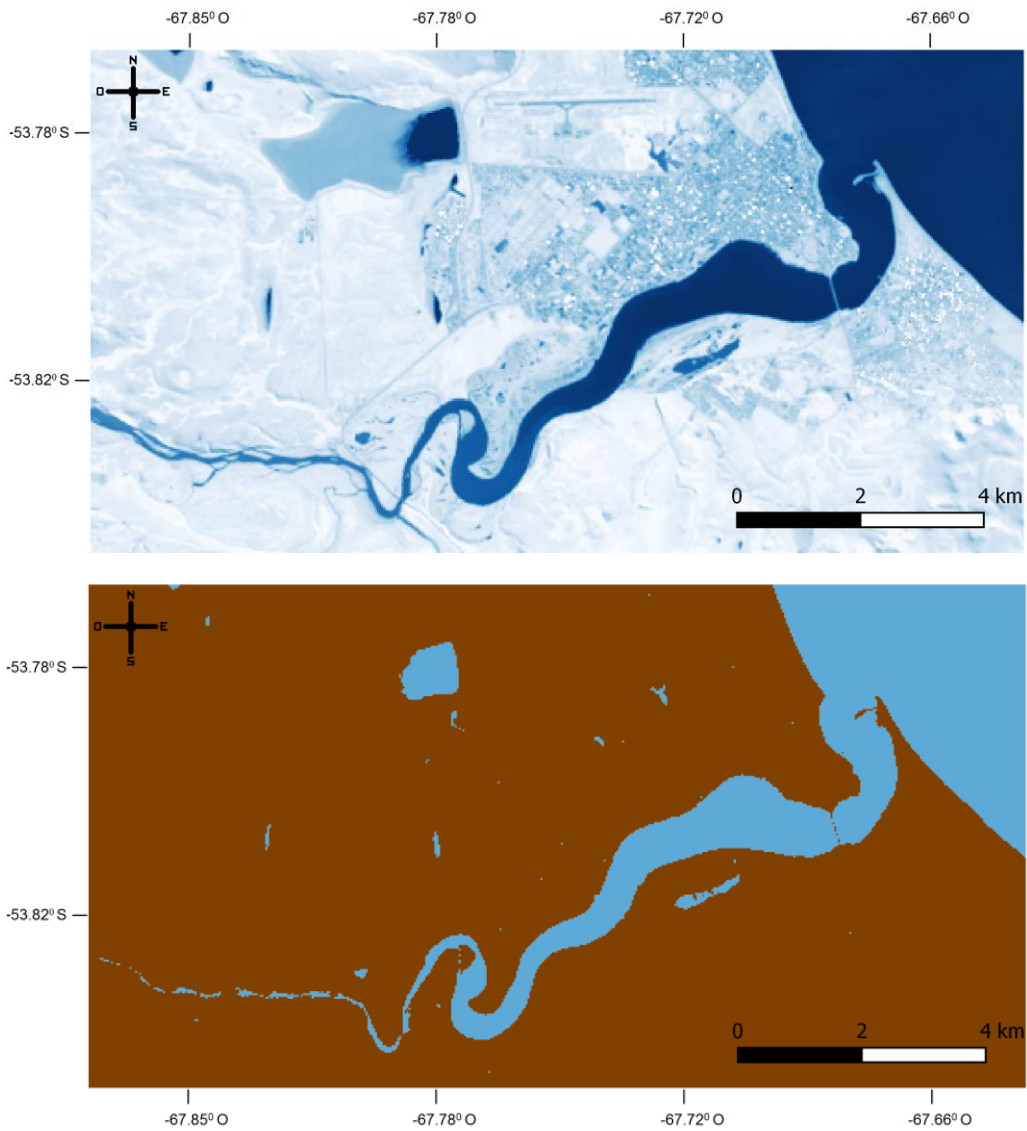


Figura 4.10. Valores del MNDWI antes (superior) y después (inferior) de utilizar el valor umbral en el evento de marea alta del río Grande.

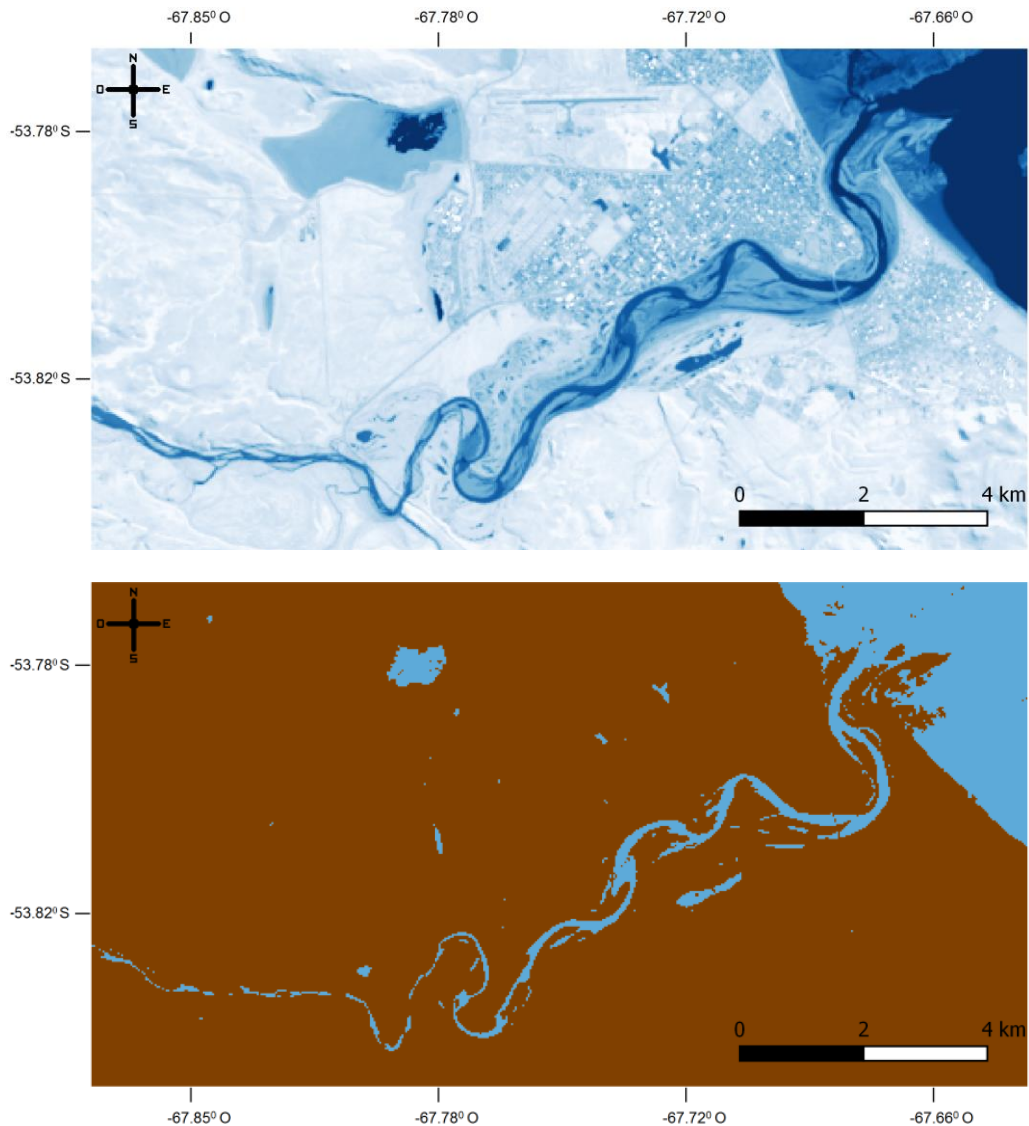


Figura 4.11. Valores del MNDWI antes (superior) y después (inferior) de utilizar el valor umbral en el evento de marea baja del río Grande.

En un segundo y último paso se realizó la operación matemática de suma entre los valores de los píxeles de las imágenes de marea alta y de marea baja. En la imagen resultante, los píxeles con valor 0 quedaron clasificados como tierra; aquellos con valor 1 fueron clasificados como zona intermareal; y los píxeles con valor 2 se clasificaron como agua. Además, la imagen fue procesada para remover las áreas que cambiaron entre las situaciones de marea alta y marea baja, y que no correspondían a la zona intermareal, como es el caso de las lagunas. El resultado final para cada estuario se puede ver en las Figuras 4.12 a 4.16.

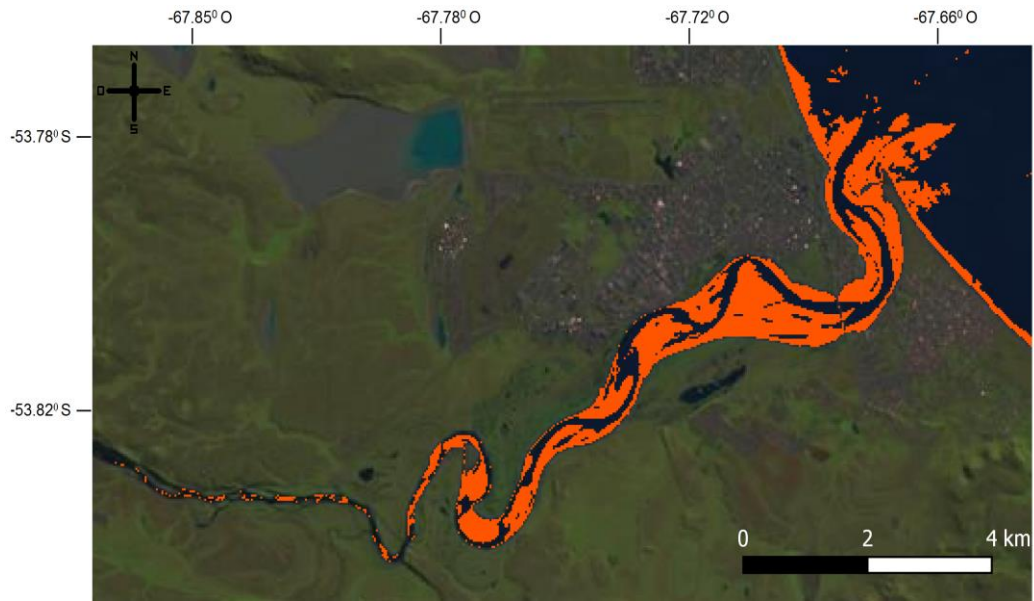


Figura 4.12. Zona intermareal del estuario del río Grande.

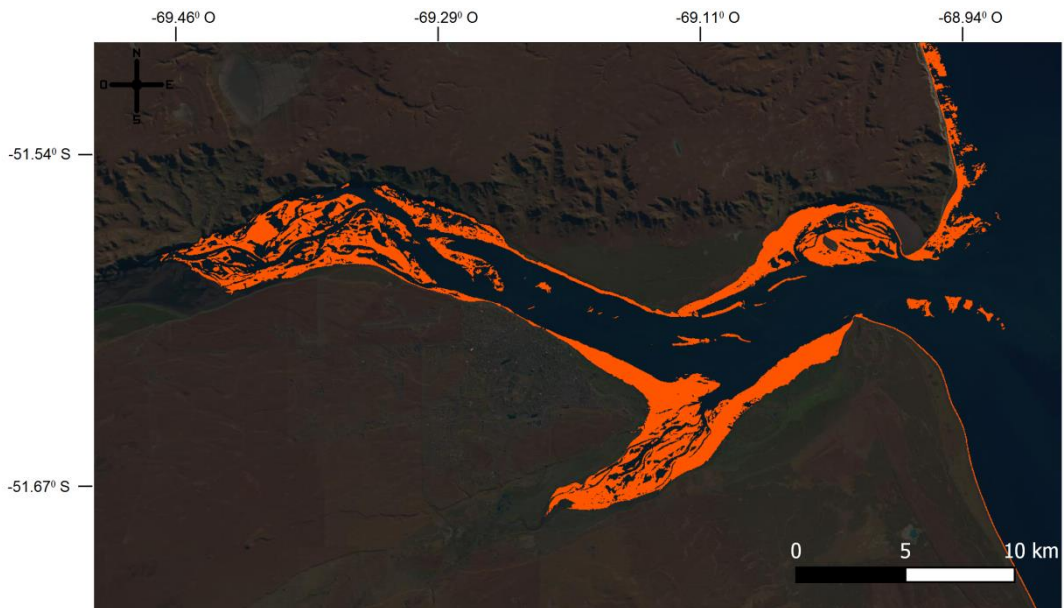


Figura 4.13. Zona intermareal del estuario del río Gallegos.

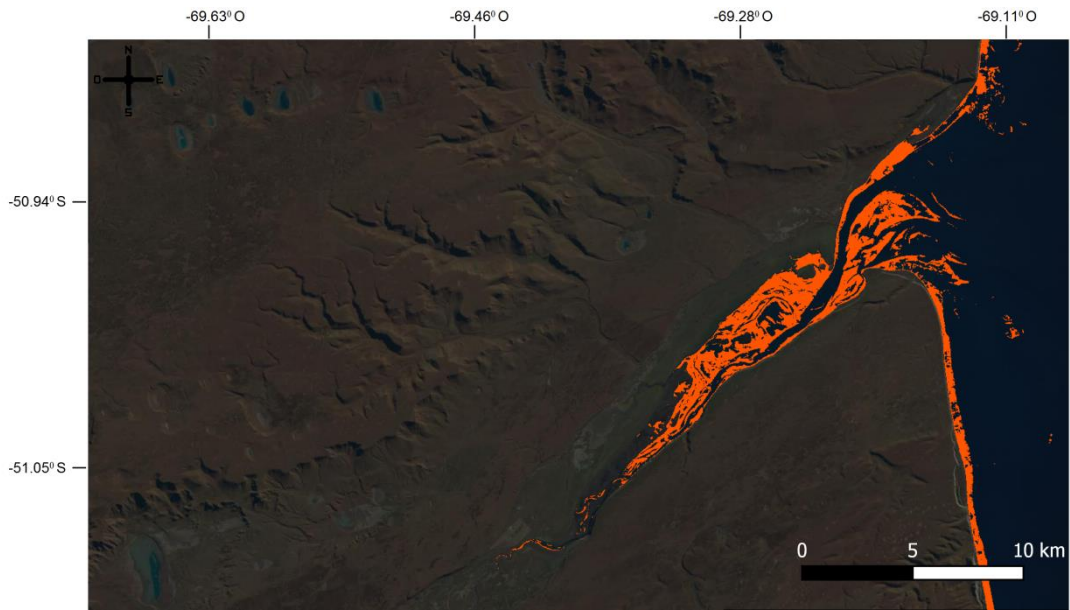


Figura 4.14. Zona intermareal del estuario del río Coyle.

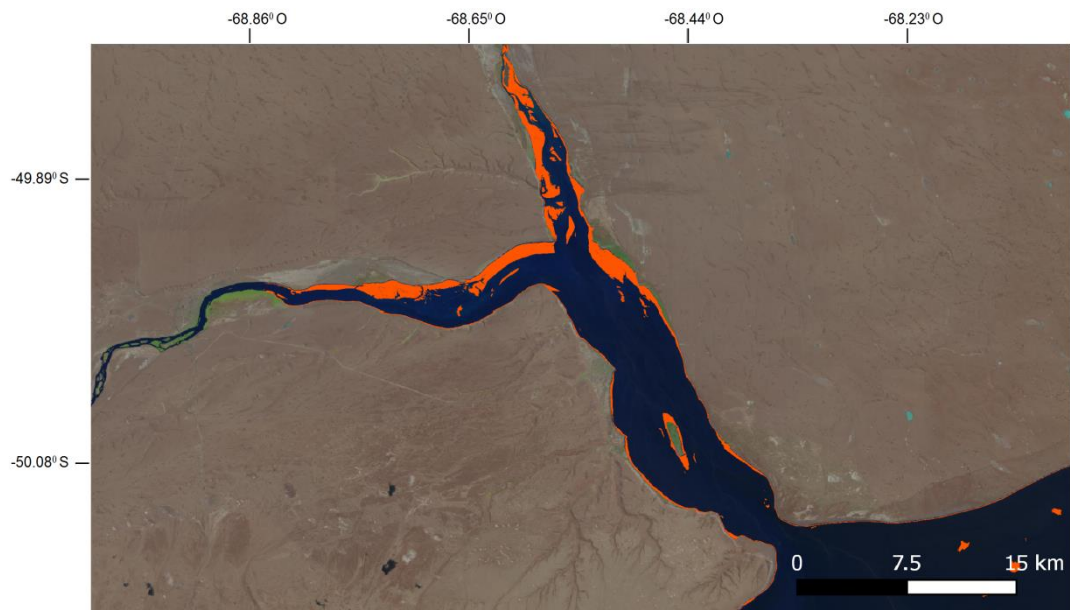


Figura 4.15. Zona intermareal del estuario del río Santa Cruz.

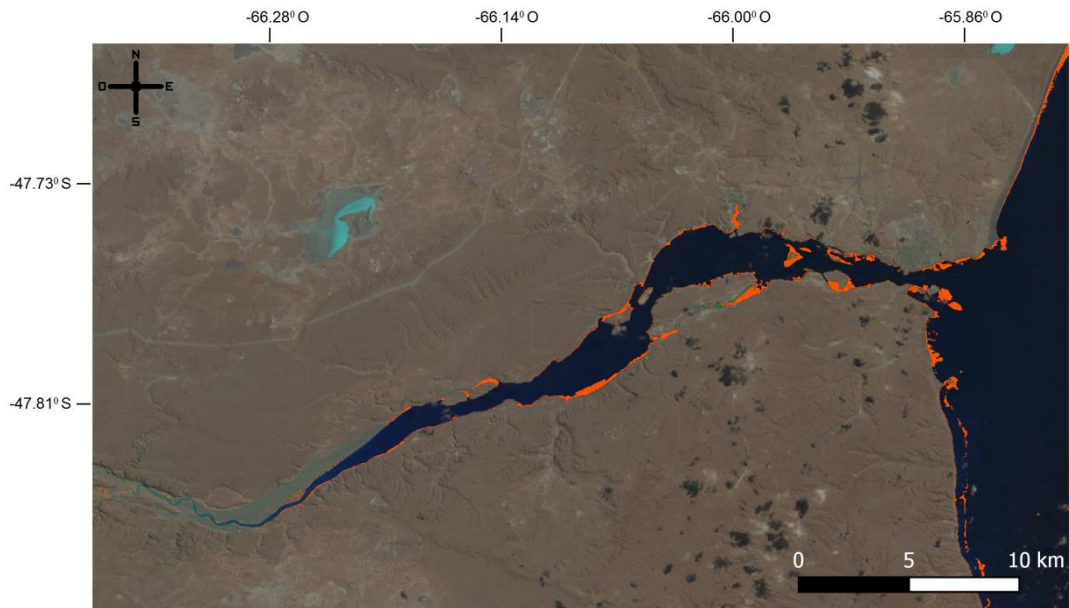


Figura 4.16. Zona intermareal del estuario del río Deseado.

4.3.1. Área intermareal por estuario

Para calcular la superficie que representa la zona intermareal dentro de cada estuario fue necesario en primer lugar el establecimiento de los límites de cada uno de ellos (Figura 4.17).



Figura 4.17. Superficie del estuario del río Grande.

Teniendo en cuenta estos límites, se vectorizaron y recortaron imágenes ráster previamente utilizadas para la delimitación de la zona intermareal (Figura 4.18). Esto facilitó el cálculo de las superficies a partir de las herramientas básicas del software SIG utilizado.

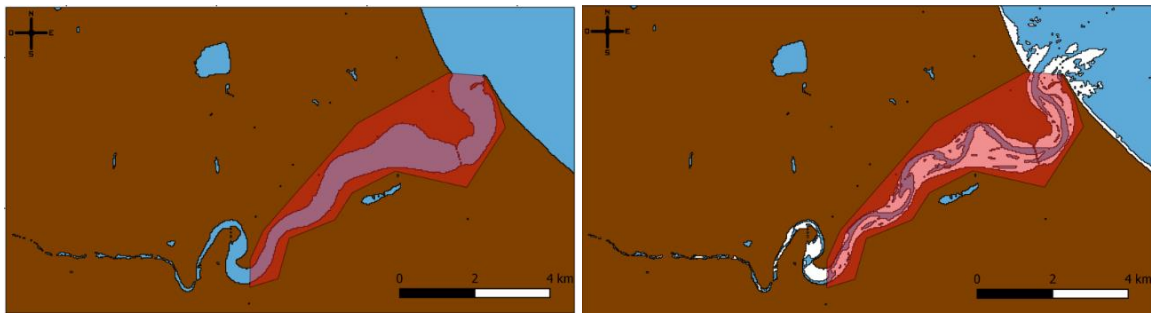


Figura 4.18. Imágenes ráster luego de ser vectorizadas y polígonos de corte para la superficie del estuario (izquierda) y de la zona intermareal (derecha).

Finalmente, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 4.9. Áreas intermareales y niveles adoptados para su determinación.

| Estuario | Pleamar media [m] | Bajamar media [m] | Marea alta (imágenes) [m] | Marea baja (imágenes) [m] | Superficie estuario [km ²] | Superficie intermareal [km ²] | Superficie intermareal [%] |
|----------------|-------------------|-------------------|---------------------------|---------------------------|--|---|----------------------------|
| Río Grande | 7,43 | 1,82 | 7,29 | 1,82 | 6,36 | 4,32 | 68 |
| Río Gallegos | 11,04 | 2,69 | 10,76 | 3,76 | 164,33 | 63,22 | 38 |
| Río Coyle | 11,04 | 2,69 | 10,89 | 3,56 | 48,62 | 23,5 | 48 |
| Río Santa Cruz | 10,36 | 2,26 | 10,29 | 6,03 | 210,73 | 38,43 | 18 |
| Río Deseado | 5,89 | 1,30 | 4,28 | 1,05 | 48,02 | 5,84 | 12 |

4.3.2. Obtención de curvas de nivel

Para la obtención de nuevas curvas de nivel complementarias, basadas en información satelital, se siguieron los siguientes pasos. En primer lugar, los píxeles de las tres imágenes fueron clasificados como agua/tierra utilizando el MNDWI y el valor umbral recomendado. Luego, se realizó la operación matemática de suma entre los valores de los píxeles de las imágenes de marea alta y de marea baja y, seguidamente, entre los de las imágenes de marea alta y marea intermedia (Figura 4.19).

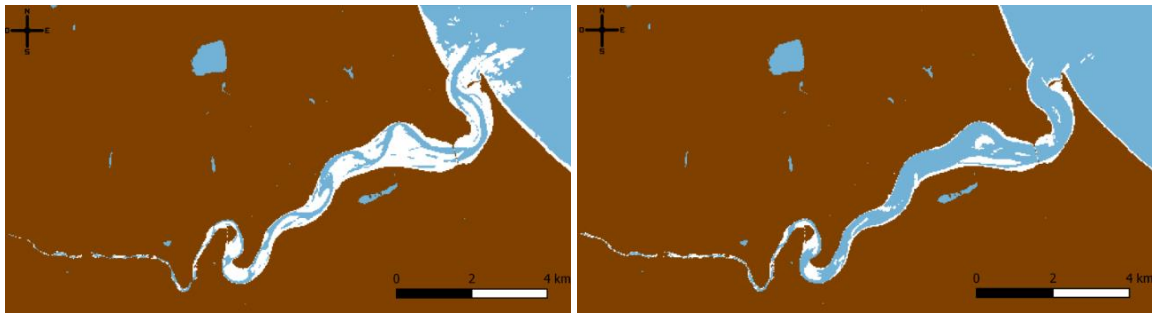


Figura 4.19. Superficie del estuario cubierta por agua (celeste) cuando se compara: marea alta y marea baja (izquierda); y marea alta y marea intermedia (derecha).

Habiendo previamente transformado las imágenes de la Figura 4.19 al formato vectorial, se aisló de cada una de ellas el área clasificada como agua (MNDWI = 2). Dichas áreas (capas vectoriales) fueron superpuestas sobre la también vectorizada imagen del estuario en el evento de marea alta (Figura 4.20 a Figura 4.24).

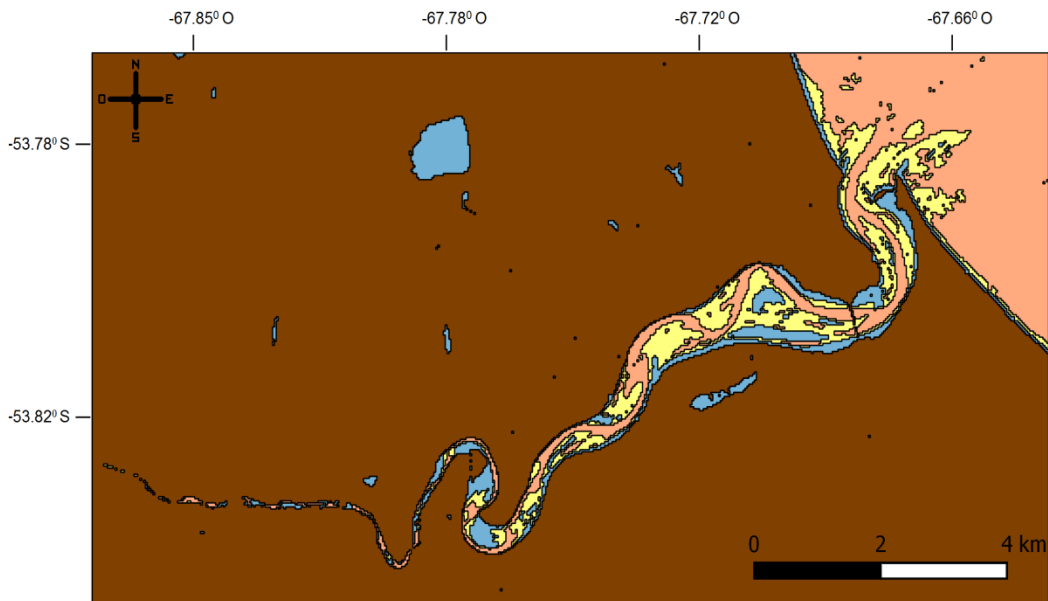


Figura 4.20. Zonificación del estuario del río Grande en base a la profundidad.

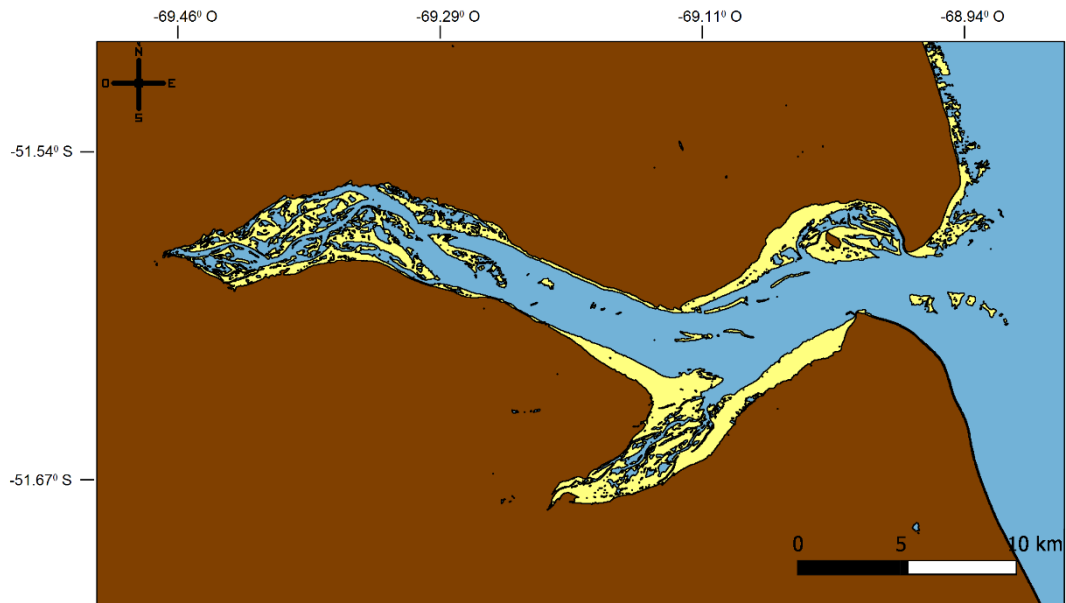


Figura 4.21. Zonificación del estuario del río Gallegos en base a la profundidad.

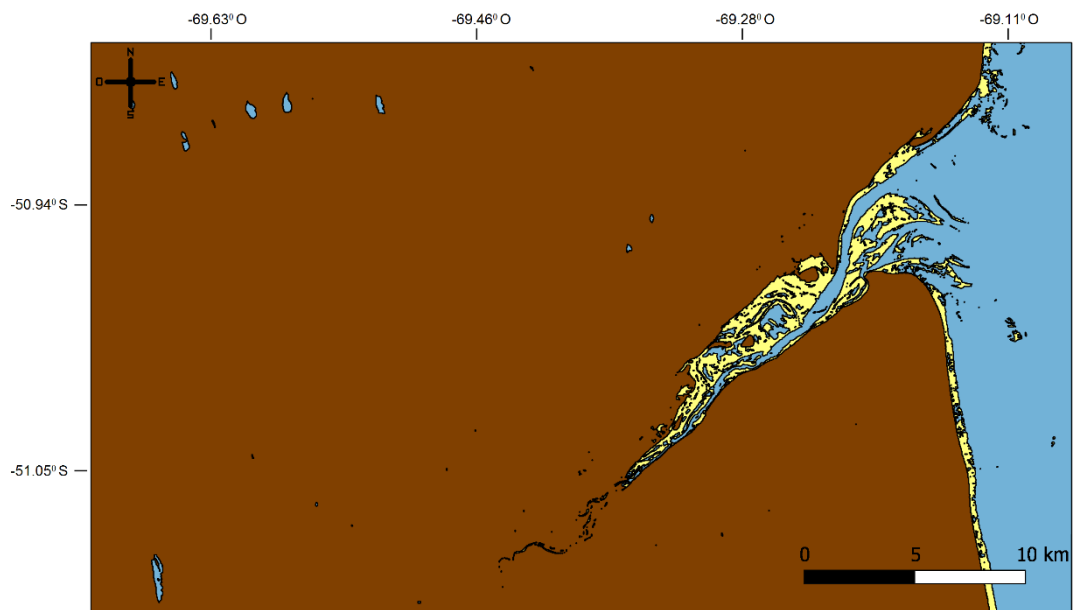


Figura 4.22. Zonificación del estuario del río Coyle en base a la profundidad.

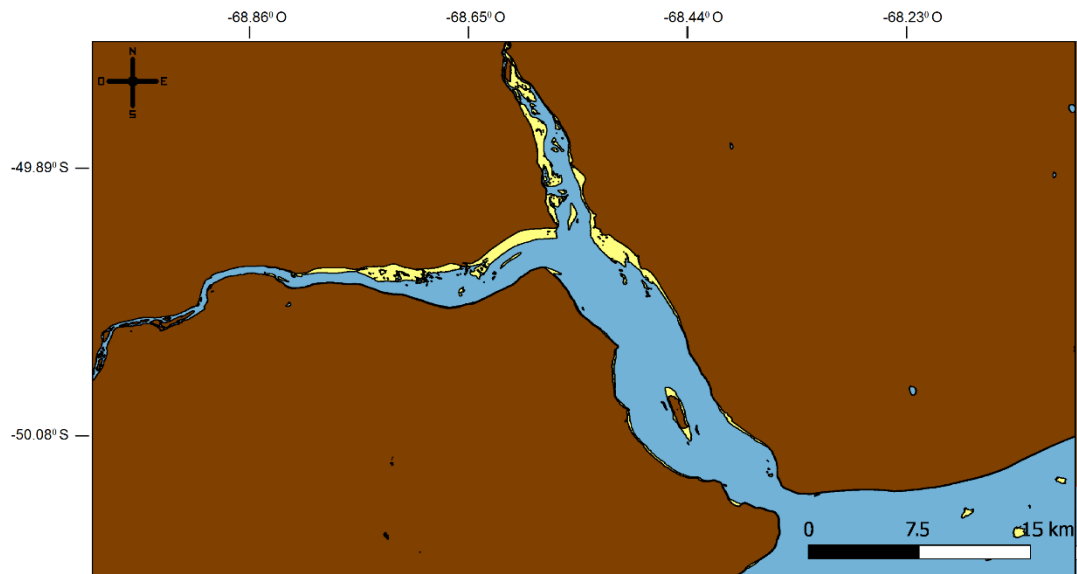


Figura 4.23. Zonificación del estuario del río Santa Cruz en base a la profundidad.

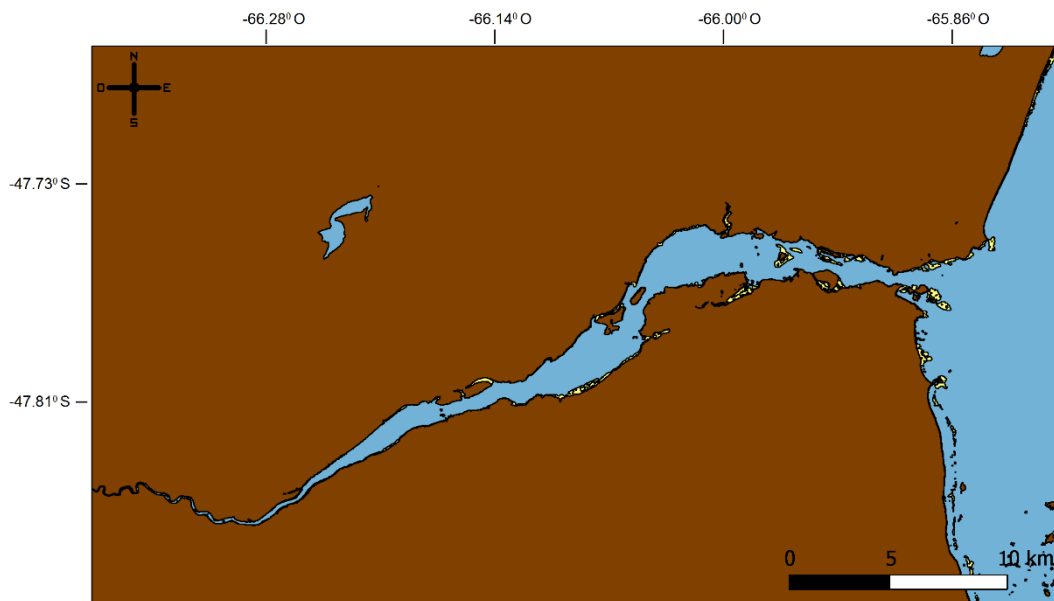


Figura 4.24. Zonificación del estuario del río Deseado en base a la profundidad.

La superposición de capas permitió diferenciar distintas zonas dentro del estuario, cuyos límites se interpretaron como curvas batimétricas. El valor aproximado de las curvas batimétricas se determinó operando con los valores de altura de los distintos eventos de marea. Así, por ejemplo, las curvas de 5,47 m y de 3,84 m de la Figura 4.25 surgieron de calcular la diferencia entre las alturas de los eventos de marea alta y baja, y los de marea alta e intermedia, respectivamente.

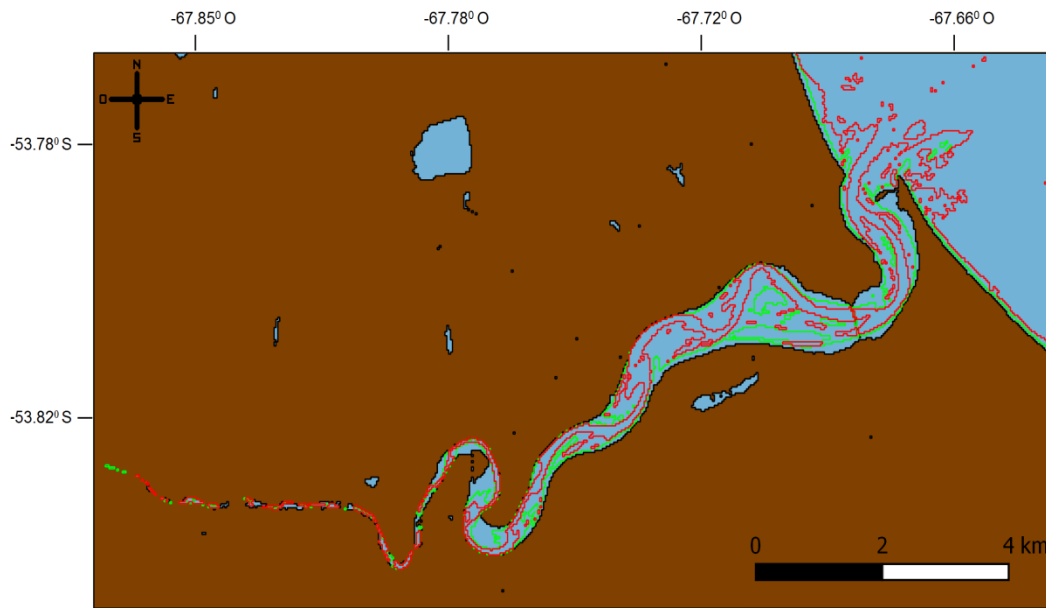


Figura 4.25. Curvas batimétricas de 5,47 m (rojo) y 3,84 m (verde) para el estuario del río Grande.

Siguiendo la misma metodología se construyeron también curvas batimétricas para el resto de los estuarios estudiados en este proyecto (Figura 4.26 a Figura 4.29).

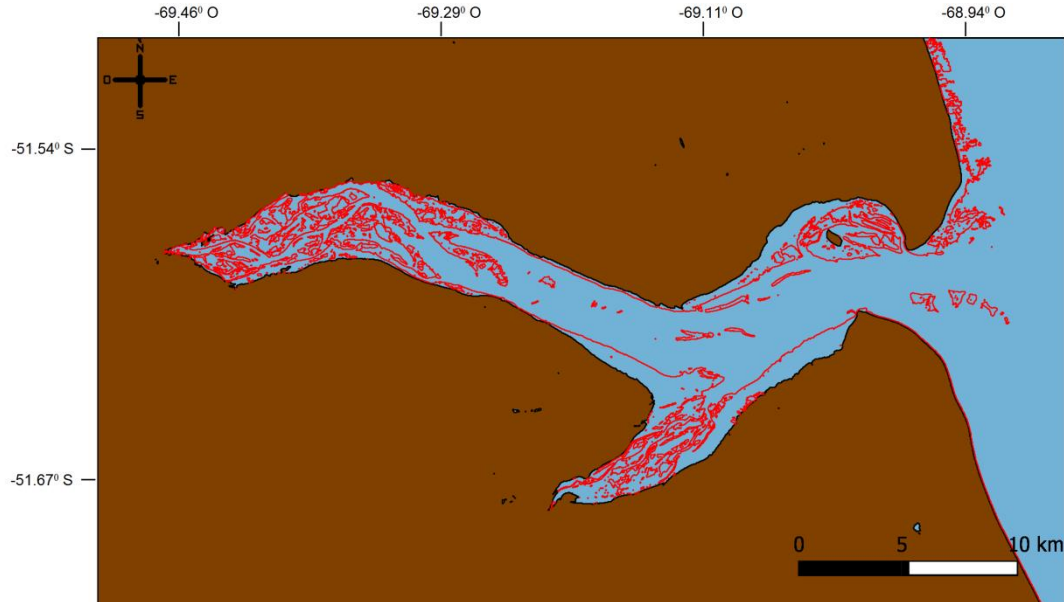


Figura 4.26. Curva batimétrica de 6,99 m (rojo) para el estuario del río Gallegos.

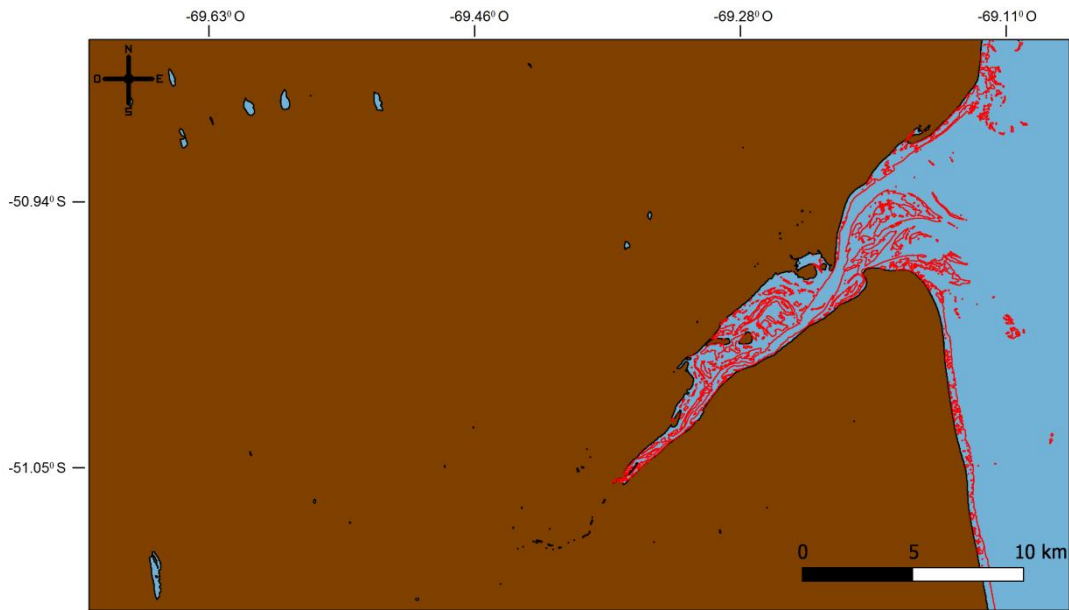


Figura 4.27. Curva batimétrica de 7,33 m (rojo) para el estuario del río Coyle.

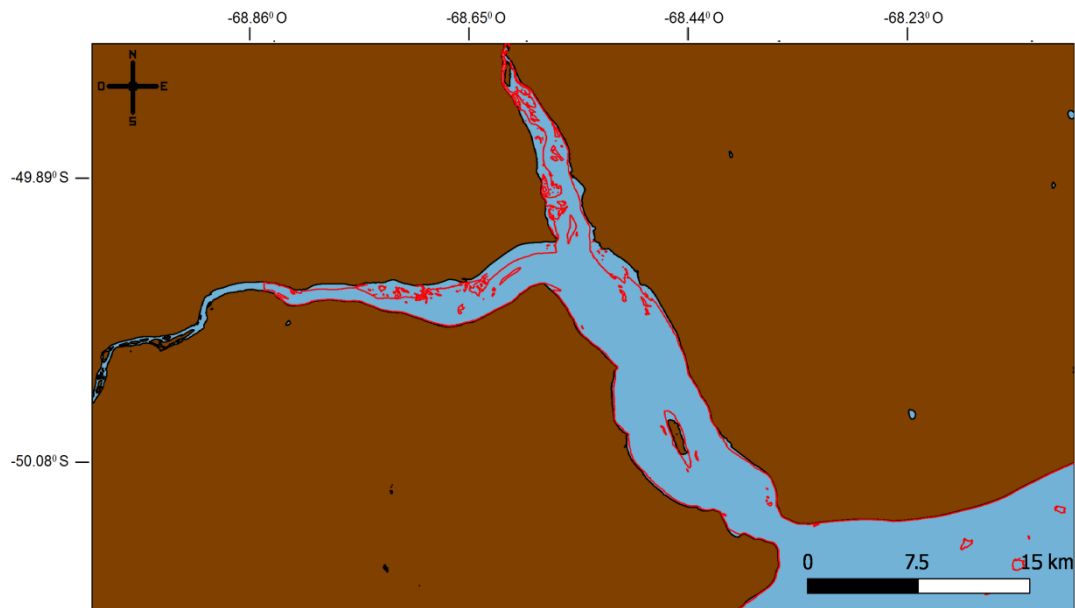


Figura 4.28. Curva batimétrica de 4,25 m (rojo) para el estuario del río Santa Cruz.

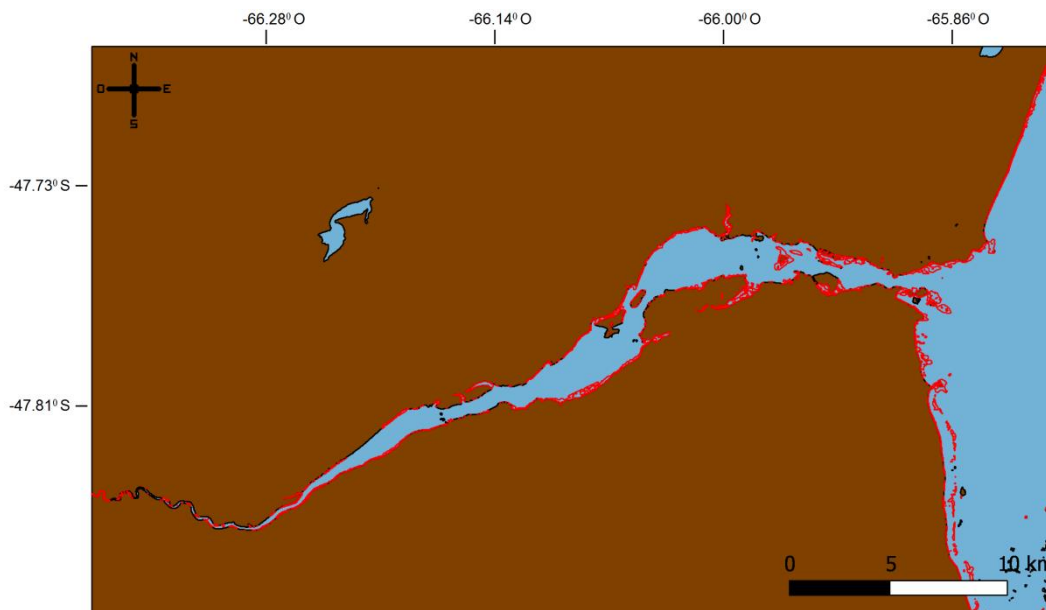


Figura 4.29. Curva batimétrica de 3,23 m (rojo) para el estuario del río Deseado.

4.4. Producción de batimetrías

Se realizaron batimetrías específicas para los *Rank 3* de cada estuario integrando las distintas fuentes de información. El procesamiento de interpolado se realizó utilizando la herramienta *TopoToRaster* (algoritmo ANUDEM) con una resolución final de aproximadamente celdas de 100 m de lado (0.001°). La topo-batimetría GEBCO (y la ETOPO1 para el caso de la batimetría del estuario del río Gallegos) se convirtió a formato de puntos vectorizados correspondiente al centro de celda del ráster. En la zona donde existía duplicidad de información entre cartas del SHN e información de los modelos globales se realizó una limpieza de estos últimos eliminando los puntos y procurando un acople suave entre las distintas fuentes de información.

Finalmente, el dominio de cálculo es más amplio que los *Rank 3* de los estuarios pudiendo incluir gran parte del área de los *Rank 2*. A continuación se detallan los datos utilizados y las batimetrías finales de cada uno de los estuarios.

4.4.1. Batimetría del río Grande

Para la construcción de la batimetría del estuario del río Grande en el área comprendida en el *Rank3GR* se utilizaron los datos de la batimetría global GEBCO con resolución de 30 segundos, los datos batimétricos digitalizados de las cartas H-462 y H-462B y las curvas de nivel interpretadas del estudio de áreas intermareales. Además, se utilizó información de relevamientos aerofotogramétricos realizados por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) para representar la zona continental (Figura 4.30 y Figura 4.31). Los puntos y curvas de nivel de las cartas de hidrografía fueron llevados al mismo plano de reducción (nivel medio del mar).

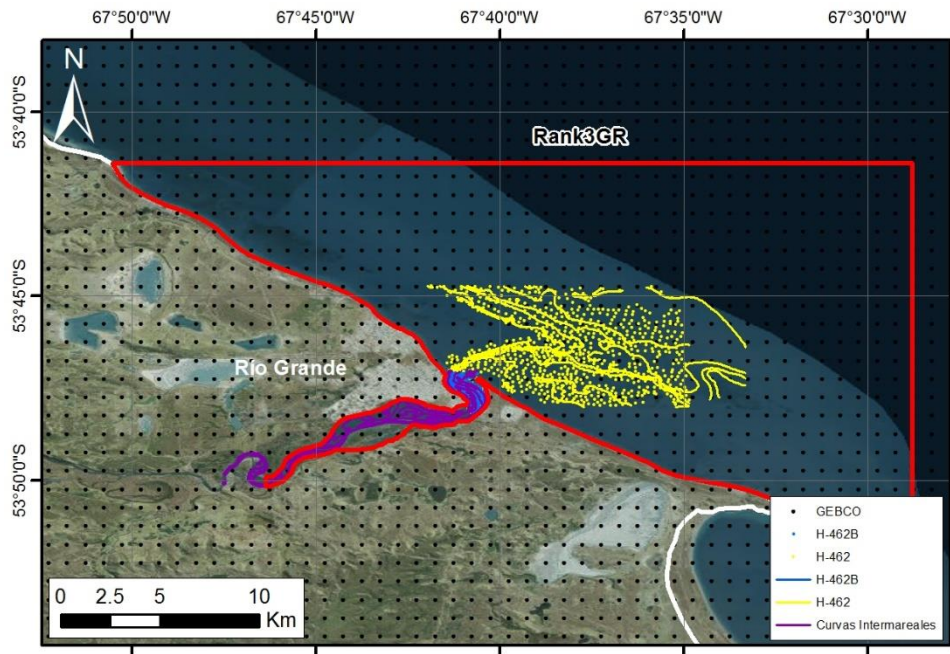


Figura 4.30. Datos batimétricos utilizados para la confección de la batimetría del estuario del río Grande.

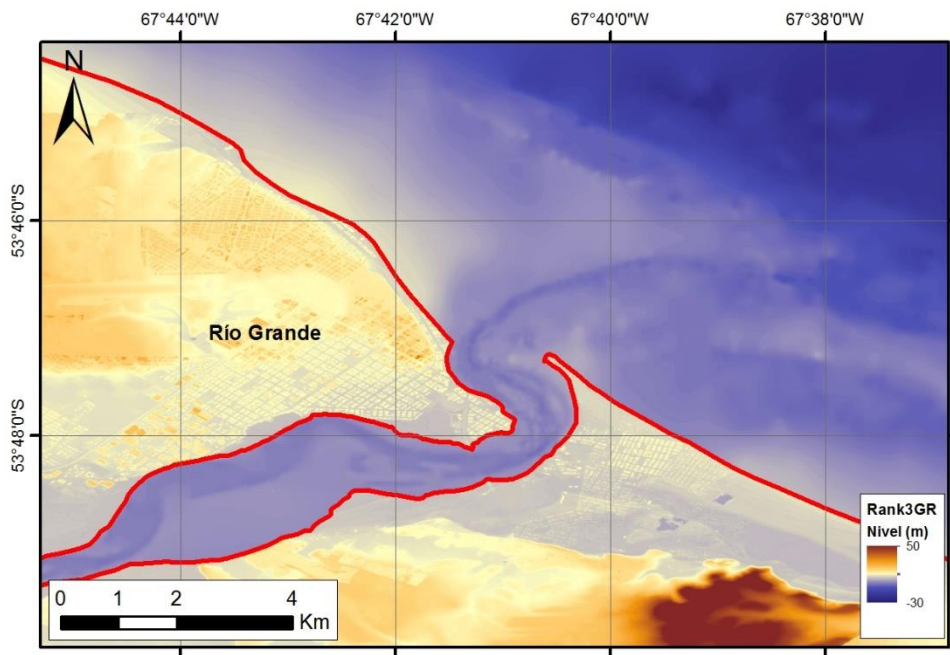


Figura 4.31. Detalle de la batimetría del estuario del río Grande.

Se destaca la presencia del canal y algunos bancos de menor profundidad. En las sicigias el mar se retira cientos de metros de la costa y dentro del estuario se aprecia el talweg del río de apenas unas decenas de metros mientras que el resto del estuario no cuenta con agua.

4.4.2. Batimetría del río Gallegos

Para la construcción de la batimetría del estuario del río Gallegos en el área comprendida en el Rank3GA se utilizaron los datos de la batimetría global ETOPO1 con resolución de 1 minuto, los puntos batimétricos digitalizados de las cartas H-4, H-451A, H-451B y H-452 y las curvas de nivel interpretadas del estudio de áreas intermareales (Figura 4.32 y Figura 4.33). Los puntos y curvas de nivel de las cartas de hidrografía fueron llevados al mismo plano de reducción (nivel medio del mar).

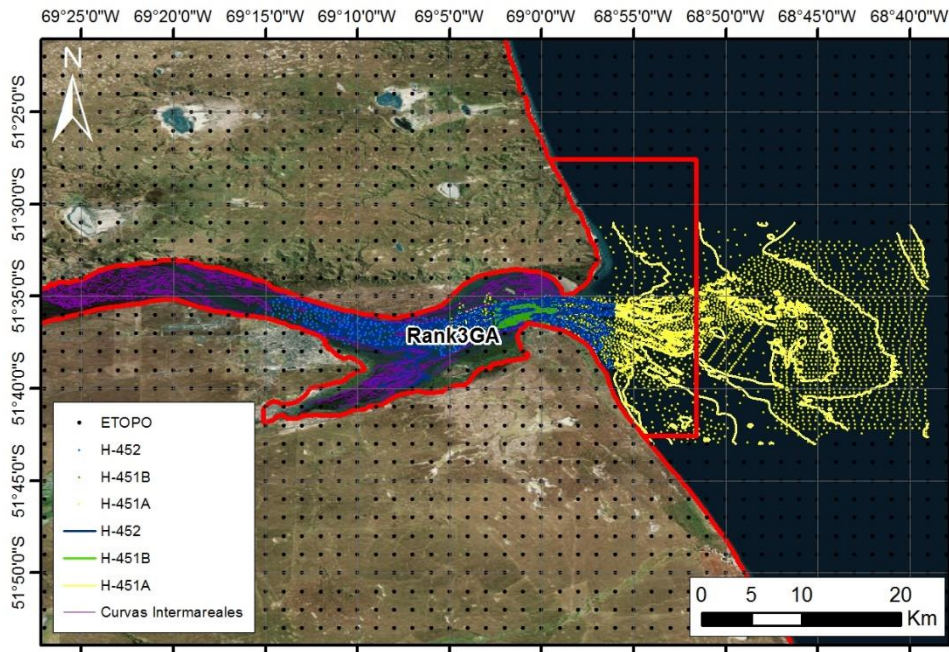


Figura 4.32. Datos batimétricos utilizados para la confección de la batimetría del estuario del río Gallegos.

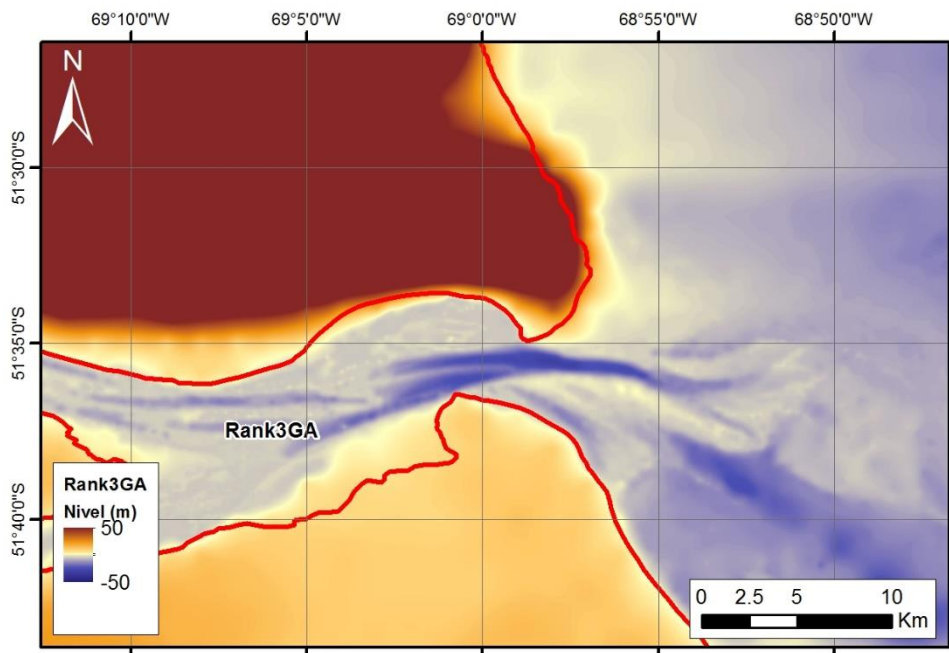


Figura 4.33. Detalle de la batimetría del estuario del río Gallegos.

4.4.3. Batimetría del río Coyle

Para la construcción de la batimetría del estuario del río Coyle en el área comprendida en el *Rank3CO* se utilizaron los datos de la batimetría global GEBCO con resolución de 30 segundos y las curvas de nivel interpretadas del estudio de áreas intermareales a partir de imágenes satelitales (Figura 4.34).

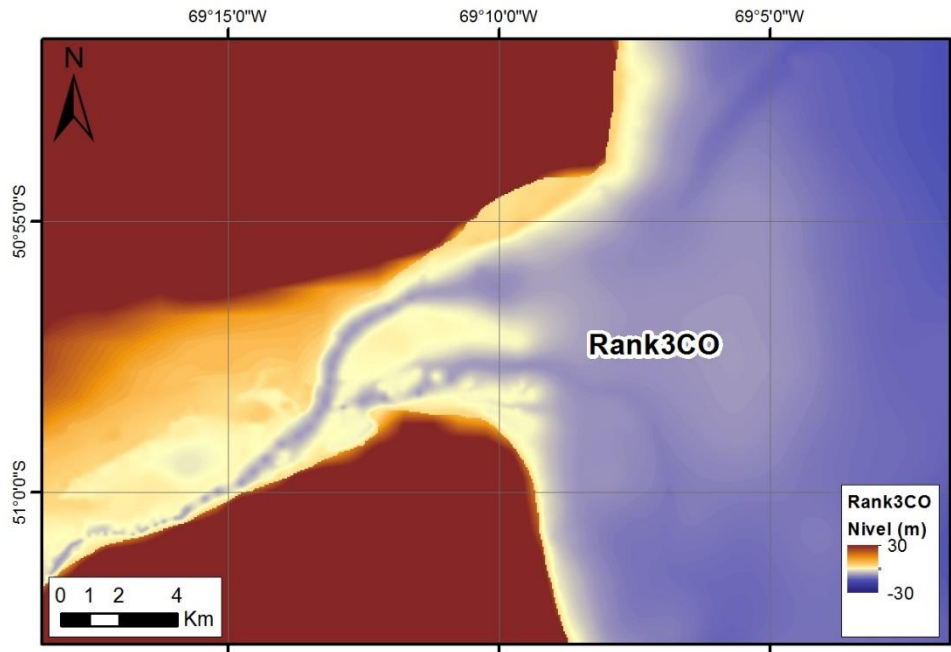


Figura 4.34. Detalle de la batimetría del estuario del río Coyle.

4.4.4. Batimetría del río Santa Cruz

Para la construcción de la batimetría del estuario del río Santa Cruz en el área comprendida en el *Rank3SC* se utilizaron los datos de la batimetría global GEBCO con resolución de 30 segundos, los puntos y curvas batimétricos digitalizados de las cartas H-2 y H-367 y las curvas de nivel intermareales (Figura 4.35 y Figura 4.36). Los puntos y curvas de nivel de las cartas del SHN fueron llevados al mismo plano de reducción (nivel medio del mar).

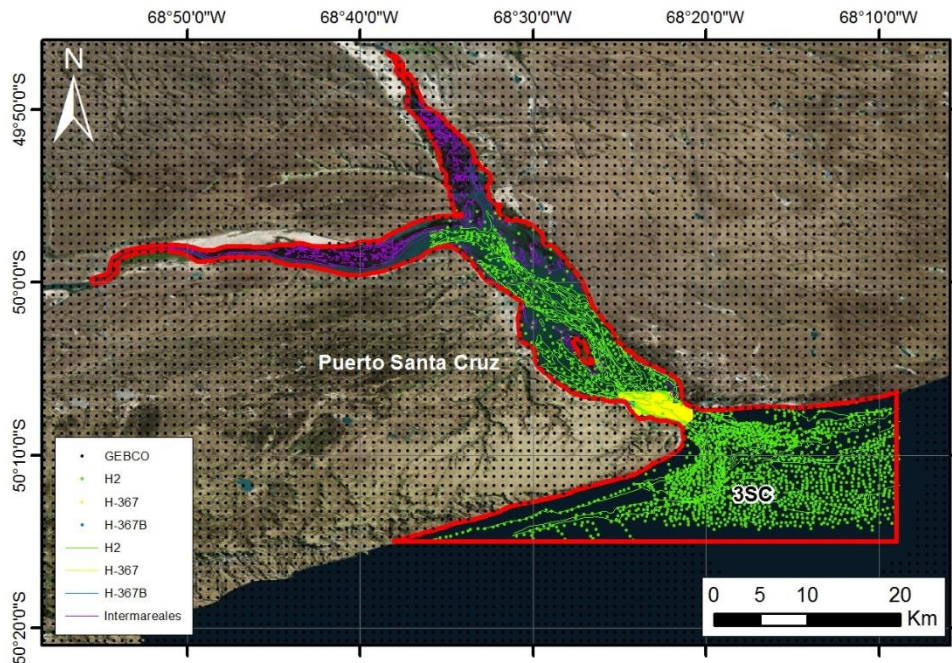


Figura 4.35. Datos batimétricos utilizados para la confección de la batimetría del estuario del río Santa Cruz.

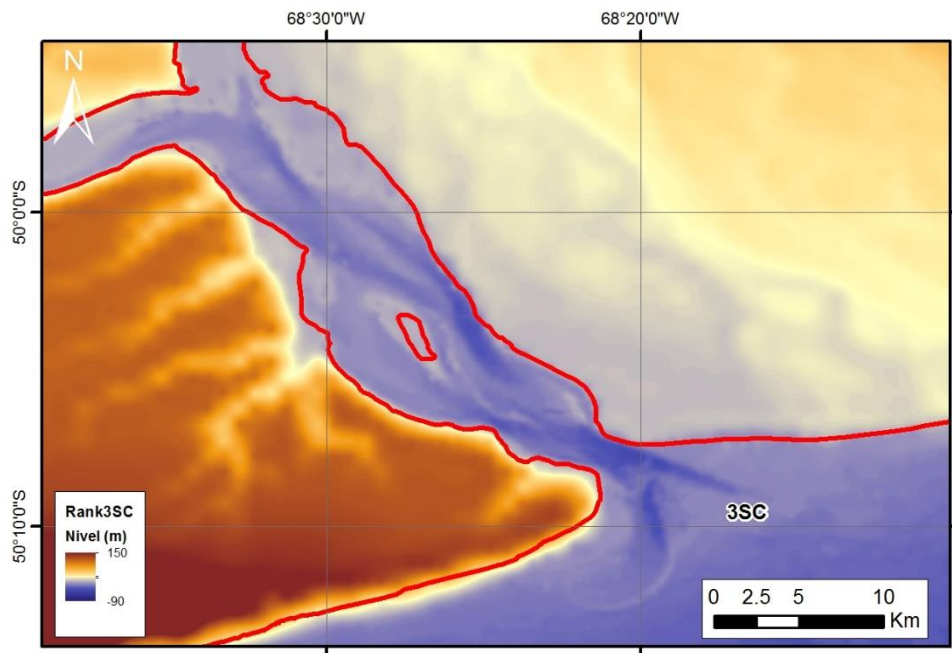


Figura 4.36. Detalle de la batimetría del estuario del río Santa Cruz.

4.4.5. Batimetría del río Deseado

Para la construcción de la batimetría del estuario del río Deseado en el área comprendida en el Rank3DE se utilizaron los datos de la batimetría global GEBCO con resolución de 30 segundos, los puntos y curvas de nivel batimétricos digitalizados de las cartas H-360 y H-361 y las curvas de nivel intermareales (Figura 4.37 y Figura 4.38). Los puntos y curvas de nivel de las cartas del SHN fueron llevados al mismo plano de reducción (nivel medio del

mar).

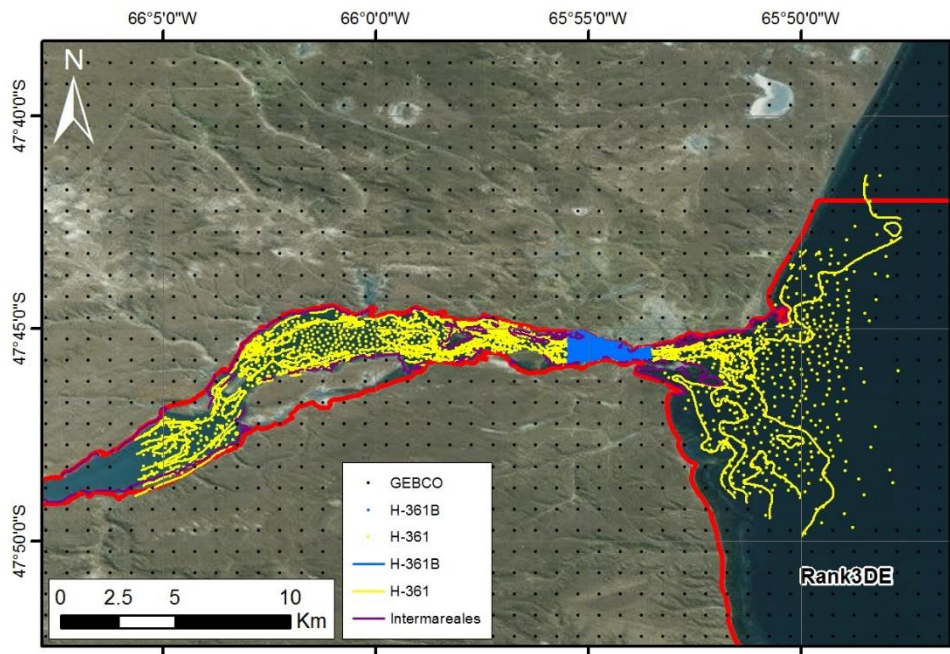


Figura 4.37. Datos batimétricos utilizados para la confección de la batimetría del estuario del río Deseado.

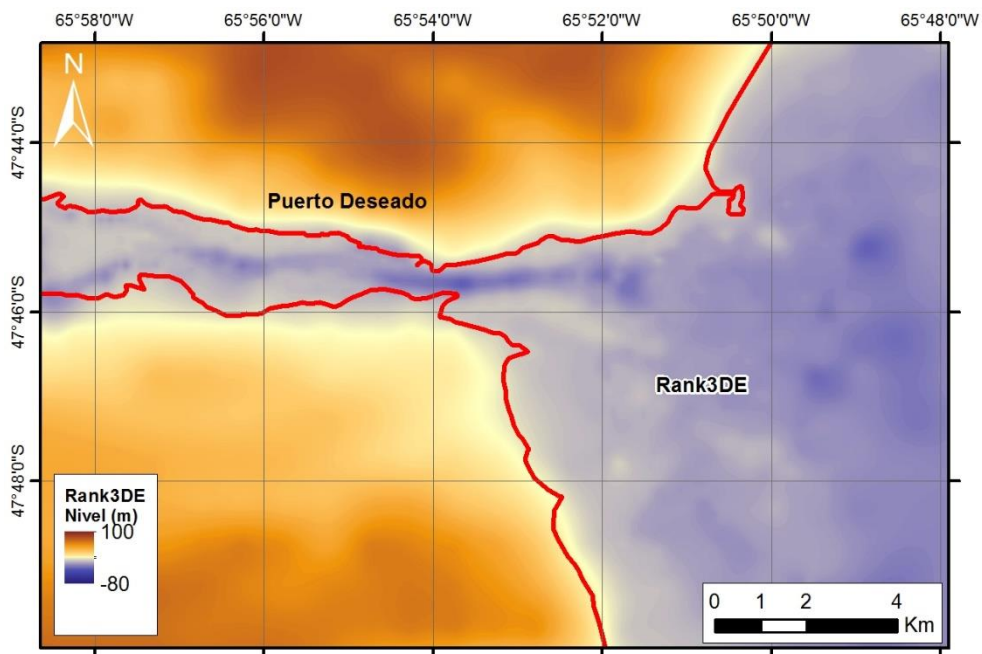


Figura 4.38. Detalle de la batimetría del estuario del río Deseado.

4.5. Zonas aptas para generación hidrocínética

Utilizando las batimetrías de los cinco estuarios se generó un primer producto que muestra las áreas con profundidades aptas para la instalación de generadores hidrocínéticos. Se propone como referencia un generador de centro abierto de 16 m de diámetro con 4 m de

revancha mínima y sumergido el 100% del tiempo. Esto quiere decir que las zonas aptas son aquellas con más de 20 m de profundidad respecto al nivel medio de las bajamareas de sicigias mostradas en la Tabla 4.8.

La zonificación indica que los estuarios del río Coyle y río Grande no tienen zonas aptas para la instalación de los generadores propuestos, mientras que existe un área de solamente 15 Ha en el estuario del río Deseado que debería relevarse para su corroboración. Por otro lado, en el estuario del río Santa Cruz se cuenta con 535 Ha aprovechables, dividido en la zona de Punta Ojos y Punta Cascajo y con 162 Ha en el estuario del río Gallegos frente a Punta Loyola (Figura 4.39).

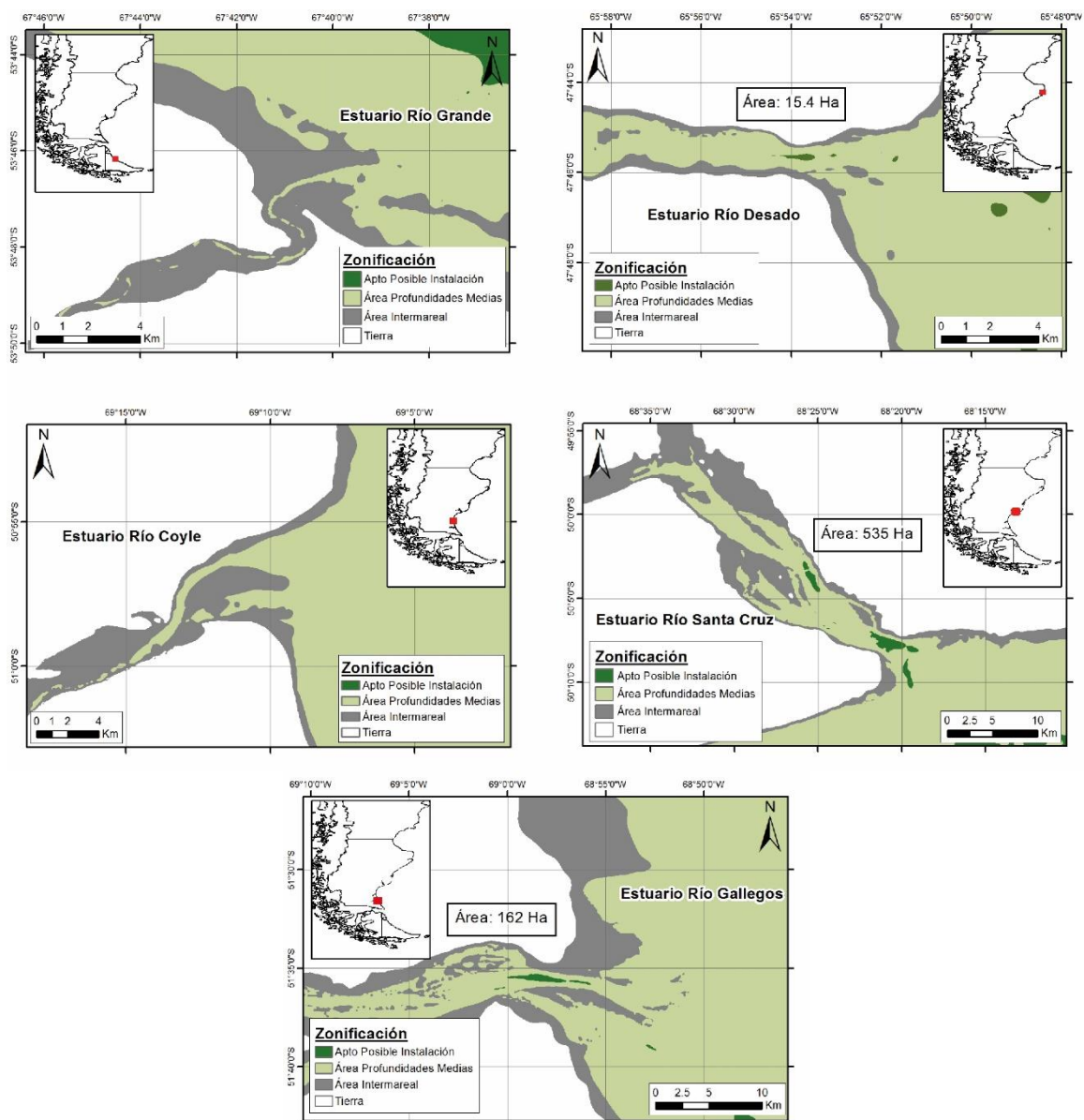


Figura 4.39. Áreas de posible localización de turbinas de centro abierto de 16 m de diámetro.

5. CONCLUSIONES

El estado del arte del aprovechamiento de las energías marinas y las posibilidades de la costa argentina, indica que desde la perspectiva de la acción de las mareas particulares que se dan en la costa patagónica hay dos tipos principales de energías aprovechables en la actualidad: la energía mareomotriz y la energía hidrocínética.

Si bien la energía mareomotriz representa un tipo de energía renovable con elevado potencial aprovechable, hoy en día se presenta como una alternativa no amigable ambientalmente. El aprovechamiento de la energía hidrocínética se encuentra en crecimiento a nivel mundial, pero todavía está en pleno desarrollo. Esto implica una gran variedad de dispositivos, cada uno con condiciones de funcionamiento particulares asociadas a cada sitio de implantación. Hasta el momento los casos de éxito son solo unos pocos, pero ya existen pequeños grupos de turbinas en funcionamiento que inyectan energía a la red, como son el caso de Cape Sharp Tidal en la bahía de Fundy (Canadá) y el de Meygen en Escocia.

La modelación numérica resulta la herramienta adecuada para conocer el recurso ofrecido por las mareas con buen detalle temporal y espacial. En el marco de este proyecto, la implementación de modelos numéricos en cada uno de los cinco estuarios patagónicos seleccionados permite la determinación del potencial energético aprovechable. La estrategia de modelos anidados permite una mejor discretización espacial en las zonas de interés.

El forzante principal del sistema se representa a través de la onda de marea astronómica a partir de un modelo global. La batimetría a utilizar, el condicionante principal del sistema, se generó a partir de la integración de diversas fuentes: datos de las cartas náuticas del Servicio de Hidrografía Naval, datos de modelos globales (GEBCO y ETOPO1) e información obtenida a partir de imágenes satelitales.

El análisis preliminar batimétrico realizado para cada estuario, vinculando las profundidades disponibles y las dimensiones aproximadas de un dispositivo capaz de ser utilizado en estas locaciones, permite obtener una primera aproximación sobre las posibilidades de este tipo de aprovechamientos.

Independientemente del potencial energético disponible, las características batimétricas de los estuarios indican que solo una porción de los mismos permite la implantación de grandes turbinas hidrocínéticas. En algunos casos, como en el de los ríos Coyle y Grande, no se dispone de profundidades suficientes para alojar este tipo de infraestructura.

REFERENCIAS

- Archer, A.W., 2013. World's highest tides: Hypertidal coastal systems in North America, South America and Europe. *Sedimentary Geology*, 284–285, 1–25.
- Bernshtein L.B., 1972. Kislaya Guba Experimental Tidal Power Plant and Problem of the Use of Tidal Energy. In: Gray T.J., Gashus O.K. (eds) *Tidal Power*. Springer, Boston, MA
- Buono, N., Zabaleta, F., Cáceres, R., Tomazin, N., Cecotti, R., 2016. Estudio del recurso energético marino sobre el estuario del Río Gallegos. III Encuentro de Investigadores en Formación en Recursos Hídricos, Ezeiza, Argentina.
- Byun, D., Hart, D.E., Jeong, W., 2013. Tidal Current Energy Resources off the South and West Coasts of Korea: Preliminary Observation-Derived Estimates. *Energies* 2013, 6, 566-578.
- Chaineux, M.C., Charlier, R.H., 2008. Women's tidal power plant Forty candles for Kislaya Guba TPP. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, 2515–2524-
- Esteves, J.L., Gil, M., Commendatore, M., Santinelli, N., Sastre, V., Solís, M., Ocariz, H., González Raies, C., 1997. Evaluación de la contaminación urbana de la ría de Deseado (Provincia de Santa Cruz). Informe Técnico 36, ISSN 0328-462X, Plan de Manejo Integrado de la Zona Costera Patagónica, GEF / PNUD.
- Fernández, M., 2011. Revisión de un modelo regional de marea astronómica implementado sobre la región suroeste del Océano Atlántico. Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.
- Ferrari, S., Albrieu, C., Gandini, P., 2002. Importance of the Rio Gallegos Estuary, Santa Cruz, Argentina, for migratory shorebirds. *Wader Study Group Bull.*, 99, 35-40.
- Francisca, F., Giovine, L., Rodríguez, A., Moya, G., Corral, M., Pagot, M., Hillman, G., 2005. Protección de las márgenes del Río Grande en Tierra del Fuego: Estudio de Caso. *Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, 21, pp. 59-69, ISSN 0326-1921.
- Grupo GEMA, 2014. Catálogo Energías del Mar 2014: Proyectos, iniciativas e instituciones sobre Energías del Mar Argentino. Grupo de interés en Energías del Mar Argentino, 1ra Edición, noviembre.
- Isla, F., Bujalesky, G., 2004. Morphodynamics of a gravel-dominated macrotidal estuary: Rio Grande, Tierra del Fuego. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (2): 220-228.
- Isla, F., Iantanos, N., Estda, E., 2004. Dinámica submareal y condiciones ambientales de la ría Deseado, Santa Cruz. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 59 (3), 367-375.
- Kim, G., Leeb, M.E., Lee, K.S., Park, J., Jeong, W., Kang, S.K., Soh, J., Kim, H., 2012. An overview of ocean renewable energy resources in Korea. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16, 2278– 2288.
- Lofiego, R., Noir, G., Urciuolo, A., Iturraspe, R., 2009. Evaluación hidro-ambiental del estuario del Río Grande de Tierra del Fuego, Congreso Nacional del Agua, CONAGUA 2009, Trelew, Argentina.
- Lloreda, L.A., Pellanda, L.A., 2008. Evaluación de los recursos pesqueros costeros de Santa Cruz, provincia de Santa Cruz, Patagonia Argentina. *Foro Iberoam. Rec. Mar. Acui.*, II, 535-548.
- Matsushita, B., Yang, W., Muhamad Jaelani, L., Setiawan, F., Fukushima, T., 2016. Monitoring water quality with remote sensing image data. En: Weng, Q. Editor, *Remote sensing for sustainability*,

- Boca Raton, Florida, EEUU, CRC Press/Taylor and Francis, 9, 163-184.
- Speroni, J.O., Dragani, W.C., Mazio, C.A., 2005. Estudio de corrientes en Puerto Deseado, Provincia de Santa Cruz, Informe técnico N° 02/05, Departamento de Oceanografía, Servicio de Hidrografía Naval.
- SHN, 2016. Servicio de Hidrografía Naval. Tablas de Marea. Argentina.
- SHN, 2017. Servicio de Hidrografía Naval. Tablas de Marea. Argentina.
- Tarela, P.A., van Avermaete, F., 2009. Modelado 3D en el litoral marino: impacto de vertidos industriales y alternativas sustentables, *Mecánica Computacional Vol XXVIII*, págs. 2833-2850. García Bauza, Lotito, Parente y Vénere (Eds.), Tandil, Argentina.
- Tarela, P.A., van Avermaete, F., Calamante, A., Perone, E., Michio, K., Hirai, R., 2005. Diseño Ambiental del emisario submarino de la ciudad de Río Gallegos. Congreso Nacional del Agua, CONAGUA 2005, Mendoza, Argentina.
- Uittenbogaard, R.E., van Kester, J.A.T.M. y Stelling, G.S., 1992. Implementation of Three Turbulence Models in Trisula for Rectangular Horizontal Grids: Including 2dv-Testcases. *Delft Hydraulics*, 169 p.
- Xu, H., 2006. Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. *Int. J. Remote Sens.*, 27, 3025-3033.