



INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA
SECRETARÍA 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 2 – Modelos numéricos y potencial energético



*Proyecto INA 372
Informe LHA 02-372-18
Ezeiza, mayo de 2020*

Laboratorio de Hidráulica

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Ing. Pablo D. SPALLETTI

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Ing. Julio C. DE LÍO

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. Martín A. IRIGOYEN

Ing. Luciano HERGENREDER

Lic. Nicolás E. ORTIZ

Ing. Lucas BINDELLI

INFORME PRODUCIDO POR

Ing. Lucas BINDELLI

Ing. Leandro D. KAZIMIERSKI

Ing. Mag. Mariano RE

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

RESUMEN

La Patagonia Argentina cuenta con numerosos sitios en donde las amplitudes de marea alcanzan valores característicos de regímenes macro-mareales, es decir, superiores a los 4 metros. Sin embargo, poco se conoce sobre la hidrodinámica de este sector de la costa Atlántica y menos aún sobre posibles aplicaciones de aprovechamientos energéticos relacionados con ese fenómeno natural.

En este informe se realiza un estudio hidrodinámico de cinco estuarios patagónicos, de los ríos Deseado, Santa Cruz, Coyle, Gallegos y Grande mediante herramientas de modelación numérica, con el fin de realizar una evaluación del potencial energético que presentan las corrientes de marea en dichos estuarios. Para ello se utiliza el software Delft3D, en su versión en dos dimensiones, y se aplica la metodología de anidados, o *downscaling*, que permite traer la onda de marea desde mar abierto hasta la boca de estos, manteniendo una precisión aceptable y sin aumentar en forma desproporcionada el tiempo computacional.

Como resultados principales de este análisis se distinguen las elevadas velocidades en todos ellos, aunque en valores y distribuciones espacio-temporales distintas. Esto, sumado a rangos de profundidades diversos lleva a conclusiones particulares para cada uno. En aspectos generales, cada uno de estos estuarios podría eventualmente ser aprovechado como fuente de energía, pero para ello resulta fundamental la correcta elección de un generador que se adapte a las condiciones que ofrece cada estuario.

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

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

Índice

1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Problema	4
1.2. Proyecto PIO CONICET-FYPF 2016-2017	5
1.3. Estuarios patagónicos	6
1.4. Esquema de trabajo	8
2. ESTRATEGIA DE MODELACIÓN	9
2.1. Introducción	9
2.2. Software	9
2.3. Metodología	10
2.4. Consideraciones generales	10
2.5. Modelos regionales	11
2.6. Modelos locales	20
2.7. Potencial energético	21
3. MODELO DEL ESTUARIO DEL RIO SANTA CRUZ	23
3.1. Introducción	23
3.2. Entorno del estuario del río Santa Cruz	23
3.3. Estuario del río Santa Cruz	26
4. MODELO DEL ESTUARIO DEL RIO COYLE	38
4.1. Introducción	38
4.2. Estuario del río Coyle	38
5. MODELO DEL ESTUARIO DEL RIO DESEADO	48
5.1. Introducción	48
5.2. Entorno del estuario del río Deseado	48
5.3. Estuario del río Deseado	51
6. MODELO DEL ESTUARIO DEL RIO GRANDE	60
6.1. Introducción	60
6.2. Entorno del estuario del río Grande	60
6.3. Estuario del río Grande	63

7. MODELO DEL ESTUARIO DEL RIO GALLEGOS	72
7.1. Introducción	72
7.2. Entorno del estuario del río Gallegos	72
7.3. Estuario del río Gallegos	75
8. POTENCIAL ENERGETICO POR ESTUARIOS	85
8.1. Introducción	85
8.2. Estuario del río Santa Cruz	86
8.3. Estuario del río Coyle	86
8.4. Estuario del río Deseado	86
8.5. Estuario del río Grande	87
8.6. Estuario del río Gallegos	87
9. CONCLUSIONES	88
REFERENCIAS	90
ANEXO I: RESUMEN DE INDICADORES DE CALIBRACIÓN	92
ANEXO II: RESUMEN DE VOLÚMENES Y CAUDALES	94

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 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.

¹ www.argentinainnovadora2020.mincyt.gov.ar/

² <http://www.pampazul.gob.ar/>

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/>

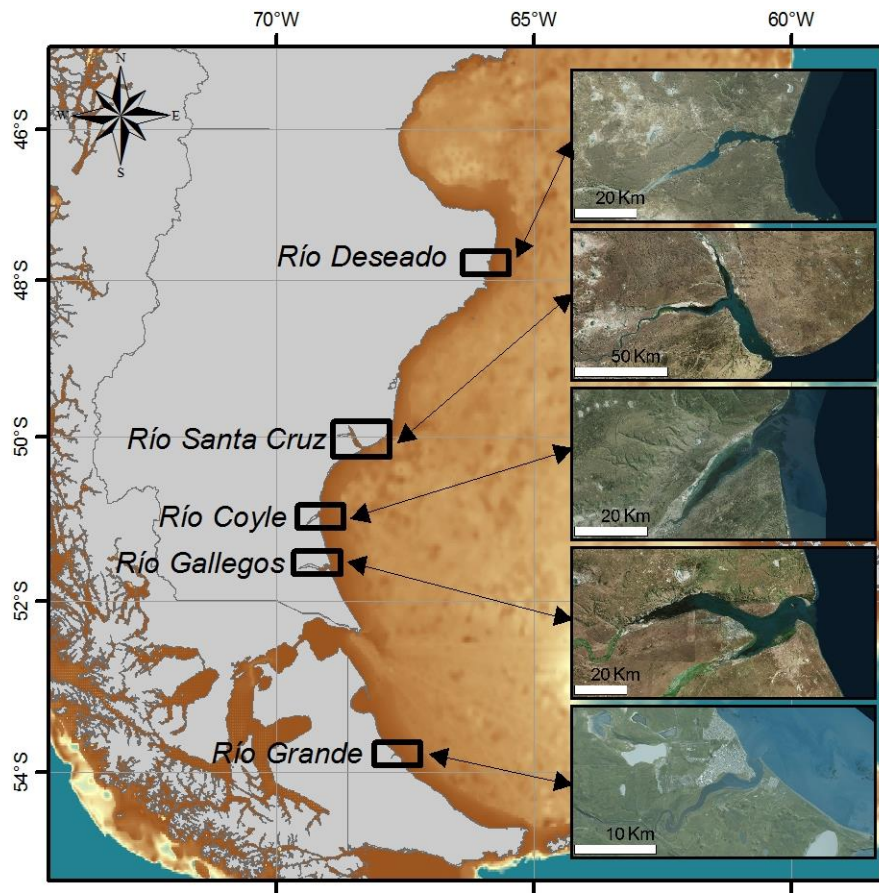


Figura 1.1. Localización de las zonas de estudio

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. Esquema de trabajo

Este proyecto se desarrolla 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 2D 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 el Informe 1 se abordaron los puntos del primer eje 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.

En este segundo informe se presenta la implementación de los modelos en cada uno de los estuarios, las estrategias de calibración y modelación abordadas y los resultados asociados al análisis del potencial energético en cada uno de ellos.

2. ESTRATEGIA DE MODELACIÓN

2.1. Introducción

La simulación numérica resulta la herramienta adecuada para establecer una primera etapa de análisis sobre la hidrodinámica de los estuarios patagónicos, cuestión que permitiría identificar el potencial energético en diferentes zonas puntuales. Entre los antecedentes se cuentan muy 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 Buono et al., 2016) y Río Grande (Francisca et al., 2005). En comparación con los costos y dificultades logísticas de campañas en esta región, la simulación numérica 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.

2.2. Software

La evaluación del potencial energético de los estuarios patagónicos se realizó mediante la implementación de un sistema de modelación numérica con el software Delft-3D FLOW, aplicando la técnica de modelos anidados con el objetivo de lograr representaciones lo suficientemente discretas en la zona problema.

El software Delft-3D FLOW es un modelo numérico, desarrollado por la *Delft University of Technology* en los Países Bajos, que consiste en un sistema acoplado compuesto por varios módulos que sirven para la modelación hidrodinámica, de transporte de sedimentos, de calidad de agua y de transporte de sustancias en general.

Para este estudio se aplicó el módulo Delft-3D FLOW, que permite resolver flujos impermanentes incluyendo los efectos de mareas, vientos, presión atmosférica, diferencias de densidad ocasionadas por temperatura o salinidad, olas, turbulencia y áreas inundables. Resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes sobre una malla curvilínea u ortogonal, 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 permitiendo un variado menú de opciones con los modelos de turbulencia de cierre. La integración temporal desarrollada en este software se basa en el método Cyclic que toma los conceptos del método ADI (*Alternating Direction Implicit*) y la elección del paso de discretización debe cumplir el criterio de Courant–Friedrichs–Lewy (*CFL number*).

2.3. Metodología

La estrategia de modelación se basa en una estructura de modelos anidados con los que se busca una buena representación de la propagación de las ondas de marea y una buena representación, con cierto grado de detalle, de la dinámica en cada uno de los estuarios a estudiar. En la Figura 2.1 se presenta la estructura de anidado, en donde se presentan dos etapas de modelación de escala regional (Atlántico Sur / Mar Argentino y Plataforma Continental / Costa Patagónica) y otras dos de escala local (estuarios).

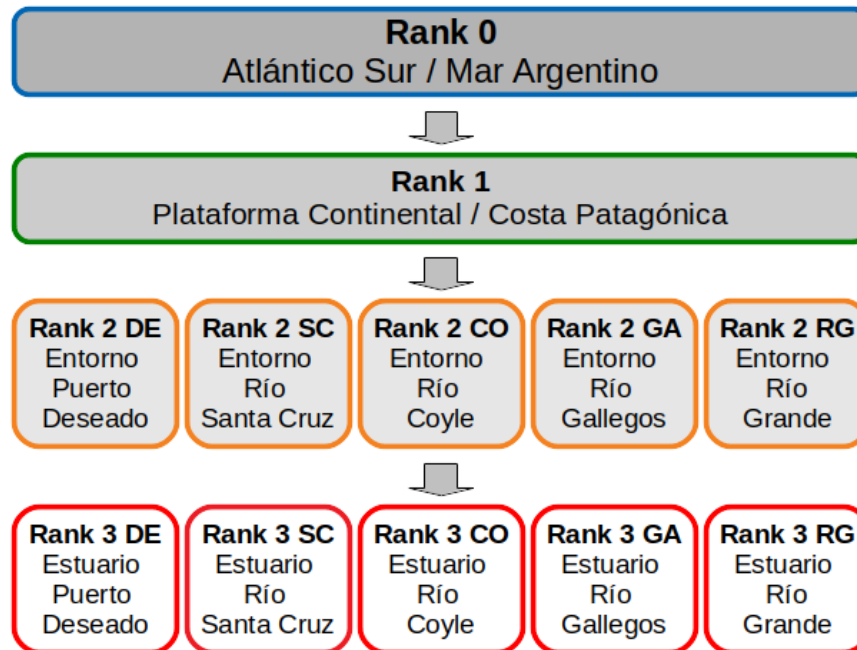


Figura 2.1. Estructura de modelos anidados.

Una ventaja adicional de esta metodología es que, una vez generadas las condiciones de borde, los modelos pueden ser trabajados independientemente. Esta situación contempla un costo computacional menor en todo el proceso de calibración y validación de los modelos.

El criterio de construcción de los dominios se basó en las relaciones del tamaño de los lados de las celdas entre los dos modelos anidados, adoptándose valores en el rango 1:3 a 1:5.

2.4. Consideraciones generales

Si bien a continuación se describe cada uno de estos modelos en detalle, hay algunas características que son comunes a todos ellos destacándose las siguientes:

- El período modelado fue del 1 de enero de 2017 al 31 de marzo de 2017 para poder captar varios ciclos de marea y de esa forma evitar que los cálculos posteriormente realizados dependan del rango temporal analizado. Aquellos indicadores anualizados que se exponen en este informe, fueron obtenidos a partir de la extrapolación de los resultados de las simulaciones de esta ventana temporal.
- La discretización temporal en cada modelo se estableció cumpliendo la condición CFL

(*criterio de Courant–Friedrichs–Lewy*). La relación entre pasos temporales de modelos anidados se basó en el criterio de múltiplos con el objetivo de simplificar la determinación de las series temporales que se transforman en condiciones de borde de los modelos más discretos.

- La discretización espacial se realizó en dos dimensiones y en horizontal (2D-H) para esta primera aproximación.
- La representación de los fenómenos de turbulencia en cada uno de los modelos se realizó a partir del esquema HLES (*horizontal large eddy simulation*) que consiste en la formulación de las componentes horizontales a escala de sub-grilla de la viscosidad y la difusividad turbulenta.
- Se adoptó un único valor para el coeficiente de rugosidad n de Manning en cada dominio. Esta hipótesis se estableció con el criterio de simplicidad que representa para la gestión de doce modelos diferentes.
- La información batimétrica se obtuvo de distintas fuentes según lo descrito en Re et al. (2018). Para los modelos regionales se utilizaron como base los datos batimétricos proporcionados por GEBCO⁴ (*General Bathymetric Chart of the Oceans*) que se interpolaron con el algoritmo *TopoToRaster* (Hutchinson, 1989) para obtener la resolución elegida para cada dominio. En el caso de los modelos locales, además de los datos de GEBCO se utilizaron las cartas batimétricas del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) y se complementó la información análisis de imágenes satelitales LANDSAT multitemporales en la zona intermareal de los estuarios (Re et al., 2018).
- En esta primera aproximación del análisis de la hidrodinámica de esta región, la densidad del agua fue definida con un valor constante y uniforme.
- Las condiciones de contorno en los bordes abiertos de los dominios (no costeros) se caracterizaron a partir de series temporales de nivel puntuales con suficiente cantidad como para garantizar la adecuada representación del forzante oceánico.
- No se consideraron condiciones de oleaje.
- No se incluyen los aportes de las descargas de los ríos tributarios a los estuarios. Se considera que los volúmenes de agua aportados por los tributarios a los estuarios son despreciables respecto de la masa de agua que se renueva en cada ciclo de marea. Ezcurra y Schmidt S.A. (2017) evidencian esta situación para el caso del estuario del río Santa Cruz.

2.5. Modelos regionales

El dominio principal de este esquema de modelación denominado Atlántico Sur / Mar Argentino (*Rank 0*) anida al modelo de la Plataforma Continental / Costa Patagónica (*Rank 1*). Las dimensiones de cada dominio y la construcción de las batimetrías de cada uno se detallaron en Re et al. (2018).

El modelo Atlántico Sur / Mar Argentino fue forzado en sus bordes libres con las series de nivel del mar representativas de la marea astronómica generadas a partir de las componentes de marea del modelo FES2014 presentado en Re et al. (2018). Siguiendo lo planteado por Fernández (2011), se relevaron las 13 componentes principales de marea utilizándose las

⁴ <https://www.gebco.net/>

siguientes: *M2*, *S2*, *N2*, *K2*, *2N2*, *K1*, *O1*, *P1*, *Q1*, *M1*, *Mf*, *Mm*, *Msqm*. Los resultados de la modelación con este dominio (*Rank 0*) resultan en condiciones de borde del modelo de Plataforma Continental / Costa Patagónica (*Rank 1*) según el esquema de anidado. Tanto en el dominio planteado en el *Rank 0* como en el *Rank 1* no se impusieron condiciones de borde de caudal. En la Figura 2.2 se presentan los dominios de los modelos regionales y las características propias de cada modelo se exponen en la Tabla 2.1.



Figura 2.2. Dominios de modelación: Atlántico Sur / Mar Argentino (*Rank 0*) y Plataforma Continental / Costa Patagónica (*Rank 1*).

Tabla 2.1 Características de las simulaciones con los modelos regionales (Rank 0 y Rank 1).

Parámetro	Atlántico Sur / Mar Argentino	Plataforma Continental / Costa Patagónica
Período simulado	01/01/2017 – 31/03/2017	01/01/2017 – 31/03/2017
Discretización temporal [s]	300	60
Modelo de turbulencia	Viscosidad de turbulencia constante: 4000	Modelo 2D HLES (Horizontal Large Eddy Simulation)
Batimetría	GEBCO	GEBCO interpolado (TopoToRaster)
Rango de profundidades [m]	0 - 6595	0 - 4440
Discretización espacial (tamaño aproximado de celdas) [m]	8000 x 11000	2350 x 3700
Cantidad máxima de elementos en la dirección M	241	238
Cantidad máxima de elementos en la dirección N	316	322
Cantidad máxima de elementos en la dirección K	1	1
Cantidad total de celdas	48426	57845

La estrategia de calibración se desarrolló para el modelo Atlántico Sur / Mar Argentino (Rank 0) utilizando al coeficiente de rugosidad n de Manning como variable de ajuste. La performance de los niveles simulados se evaluó en cinco puntos coincidentes con la ubicación del puerto patrón de cada estuario: Puerto Río Grande, Punta Loyola, Punta Quilla, Puerto Coyle y Puerto Deseado. En cada una de estas estaciones de control se cuenta con las series de predicción de marea astronómica que provee el Servicio de Hidrografía Naval (salvo Puerto Coyle que es secundario, el resto son puertos patrones para las predicciones).

En la Figura 2.3 y la Figura 2.4 se presentan los indicadores de performance ECM (Error Cuadrático Medio) y R^2 para cada una de las simulaciones con diferentes coeficientes de rugosidad. Se observa que adoptando el coeficiente de rugosidad n de Manning igual a 0.015 se obtiene el mejor comportamiento general del sistema. A modo ilustrativo se presenta en la Figura 2.5 y la Figura 2.6 la evolución de los niveles simulados en Punta Quilla (estuario del río Santa Cruz) según cada coeficiente de rugosidad utilizado durante el proceso de calibración.

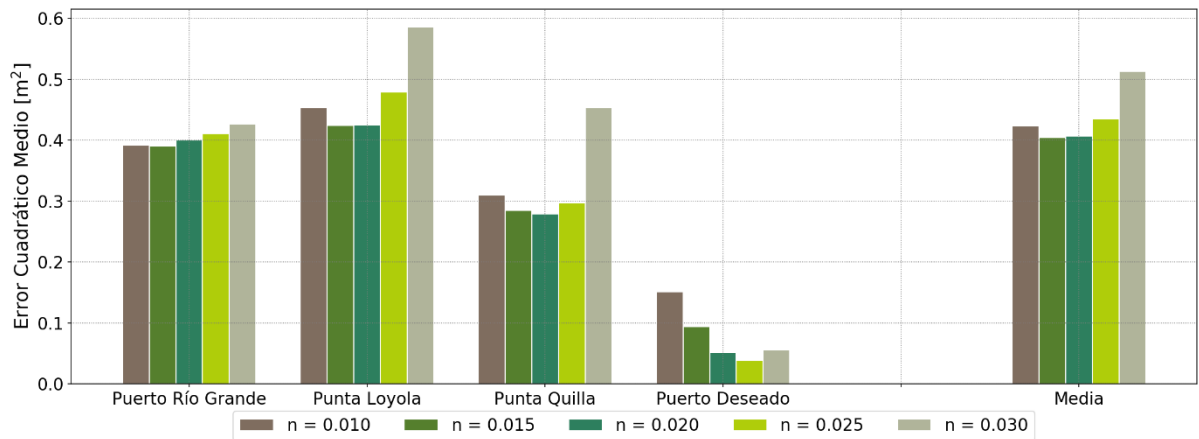


Figura 2.3. Calibración del modelo del Atlántico Sur / Mar Argentino. Error Cuadrático Medio (ECM) en los cinco estuarios de estudio para distintos valores del coeficiente de rugosidad n de Manning.

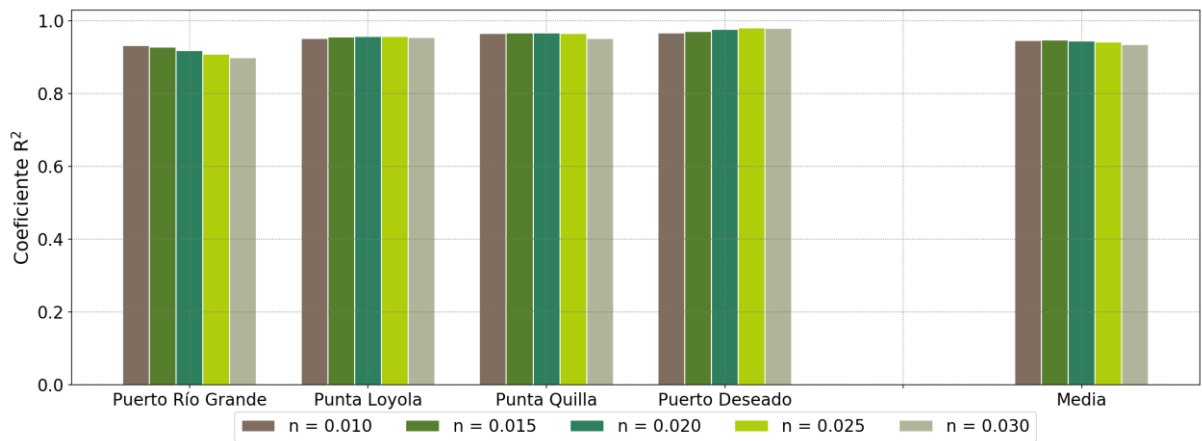


Figura 2.4. Calibración del modelo del Atlántico Sur / Mar Argentino. Coeficiente R^2 en los cinco estuarios de estudio para distintos valores del coeficiente de rugosidad n de Manning.

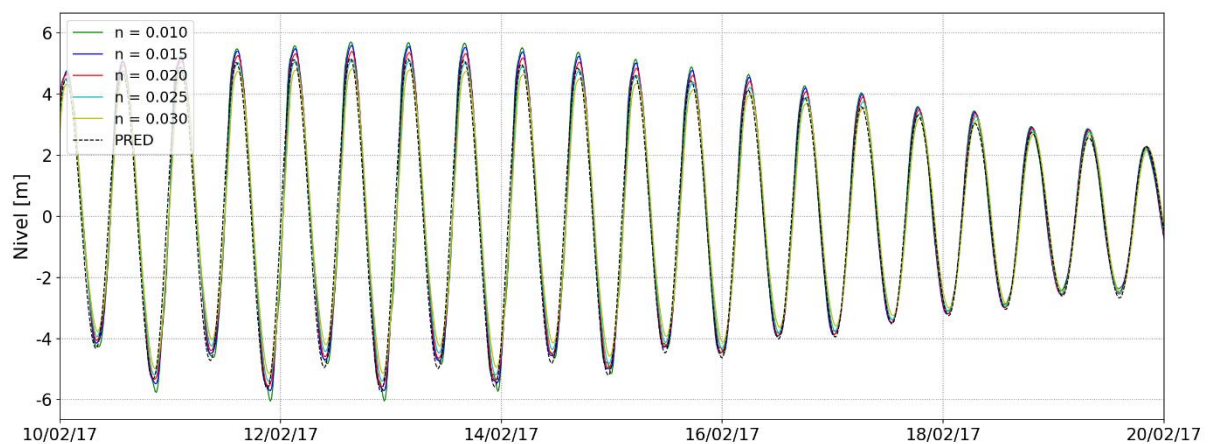


Figura 2.5. Comparación de las series de nivel simuladas y predicha en Punta Quilla para distintos coeficientes de rugosidad n de Manning.

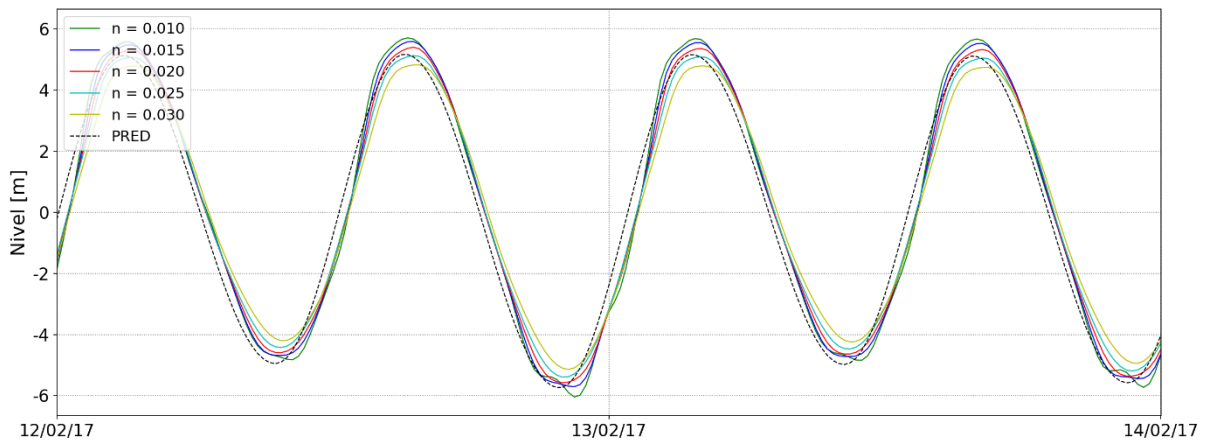


Figura 2.6. Comparación de las series de nivel simuladas y predicha en Punta Quilla para distintos coeficientes de rugosidad n de Manning (detalle).

Las comparaciones de las series simuladas con el modelo calibrado versus la predicción de mareas en los puntos elegidos se presentan de la Figura 2.7 a la Figura 2.11. En general se observaron buenas performances en la modelación de las ondas de marea astronómica en cada uno de los puntos de control elegidos. Se destacan las muy buenas comparaciones en Punta Loyola, Punta Quilla y Puerto Coyle. Además, se observa las sobreestimaciones que se dan en la representación de las bajamares durante los periodos de sicigia en Puerto Río Grande y Puerto Deseado, posiblemente por dificultades en la representación batimétrica de estos puntos.

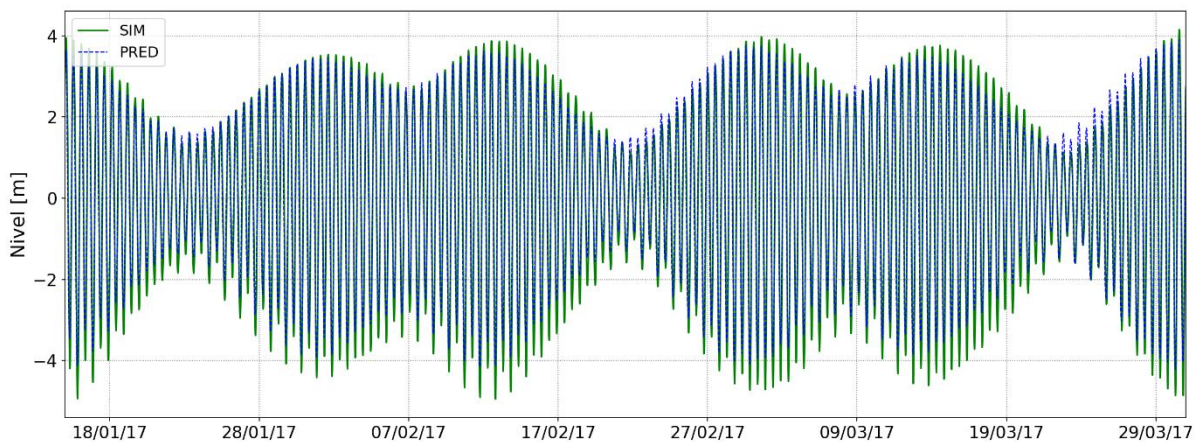


Figura 2.7. Series de niveles simulados y predicción: Puerto de Río Grande. Modelo Atlántico Sur / Mar Argentino calibrado (Rank 0).

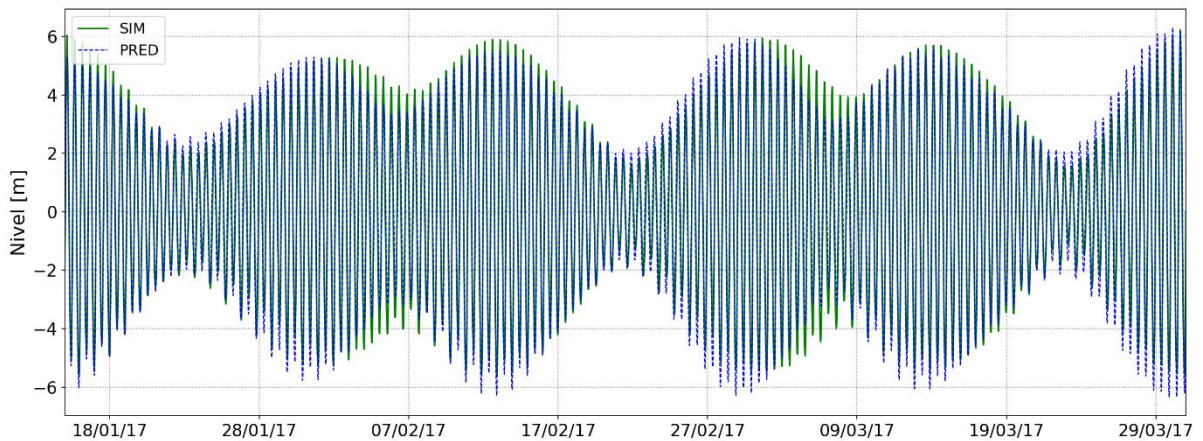


Figura 2.8. Series de niveles simulados y predicción: Punta Loyola. Modelo Atlántico Sur / Mar Argentino calibrado (Rank 0).

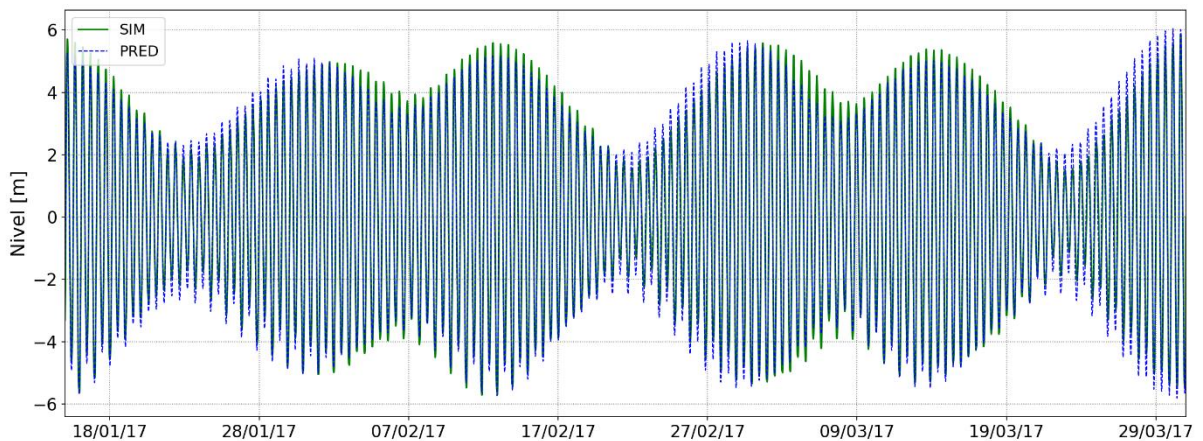


Figura 2.9. Series de niveles simulados y predicción: Punta Quilla. Modelo Atlántico Sur / Mar Argentino calibrado (Rank 0).

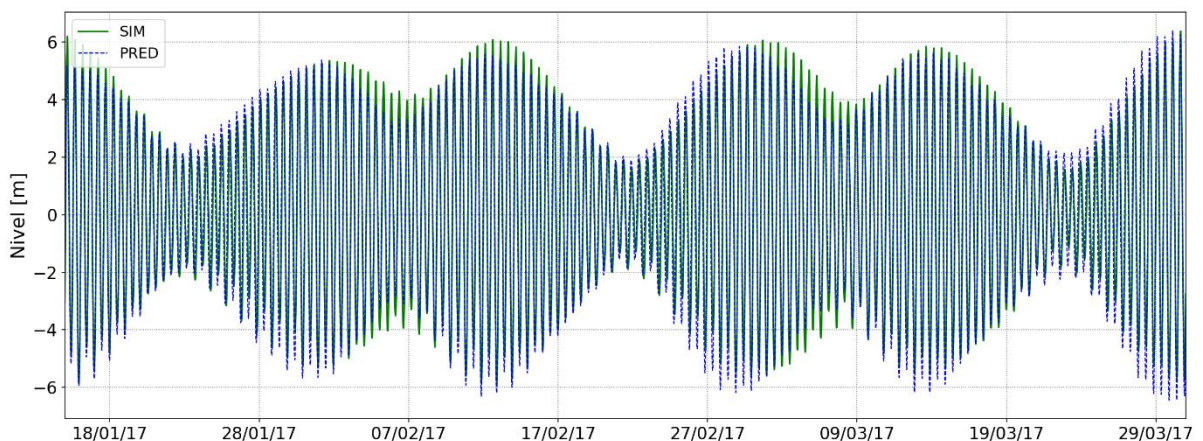


Figura 2.10. Series de niveles simulados y predicción: Puerto Coyle. Modelo Atlántico Sur / Mar Argentino calibrado (Rank 0).

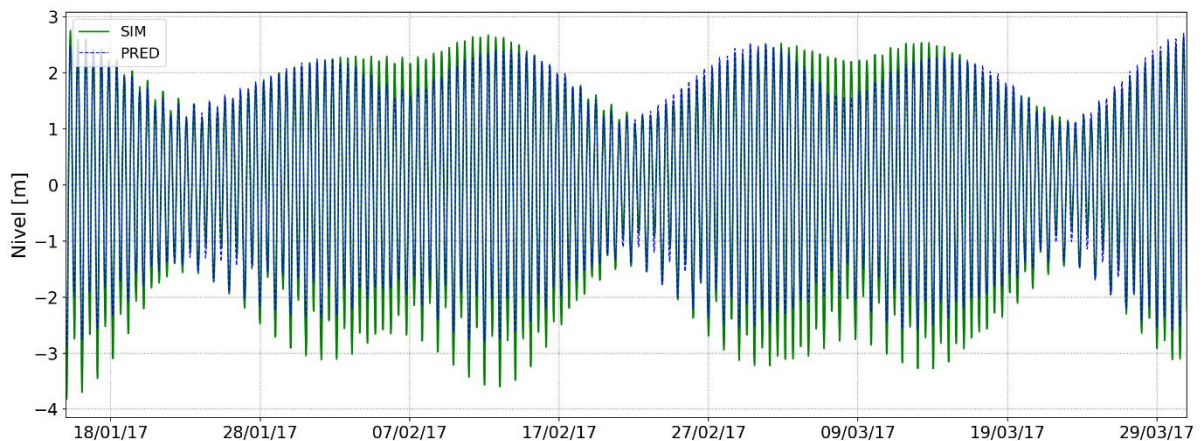


Figura 2.11. Series de niveles simulados y predicción: Puerto Deseado. Modelo Atlántico Sur / Mar Argentino calibrado (Rank 0).

En la Figura 2.12 se ilustran dos instantes en la evolución de la onda de marea en todo el dominio, pudiéndose observar como esta presenta mayores amplificaciones en las latitudes más australes.

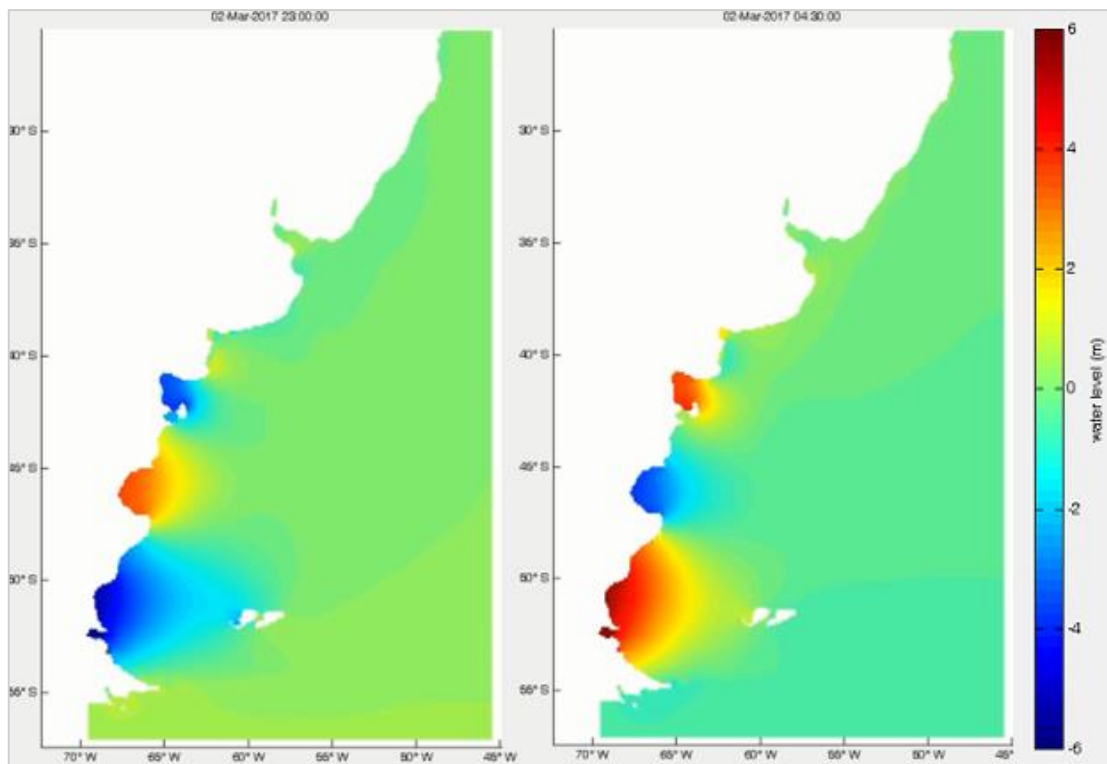


Figura 2.12. Amplitud de marea. Modelo Atlántico Sur / Mar Argentino calibrado (Rank 0).

El coeficiente de rugosidad adoptado durante el proceso de calibración del modelo Atlántico Sur / Mar Argentino fue utilizado en los modelos anidados sucesivos. Específicamente en el caso del modelo de Plataforma Continental / Costa Patagónica (Rank 1) la comparación de las series simuladas versus las predicciones de marea de las estaciones de control ya presentadas funciona como proceso de validación. De la Figura 2.13 a la Figura 2.16 se presentan estas comparaciones, mientras que en la Figura 2.17 y la Figura 2.18 se resumen los resultados de los indicadores de performance de la modelación.

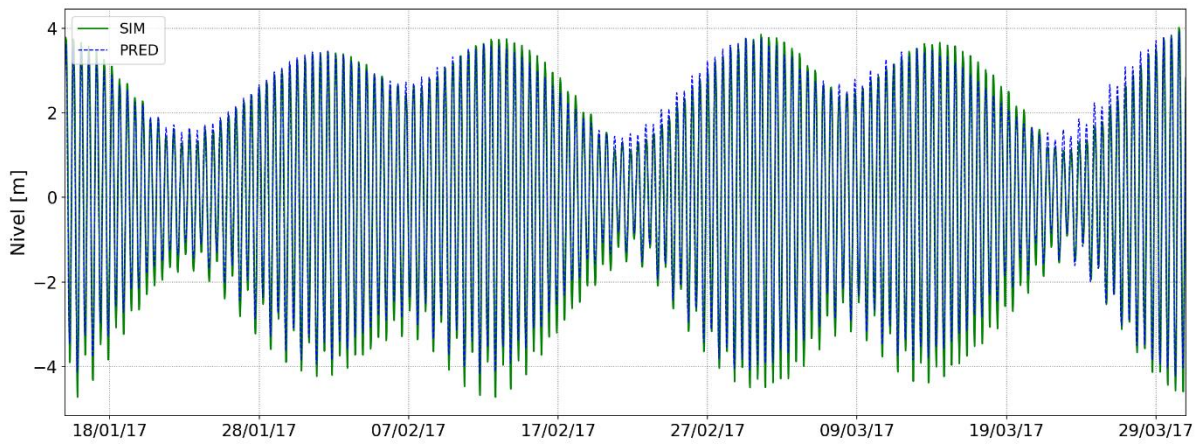


Figura 2.13. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 1 – Puerto de Río Grande.

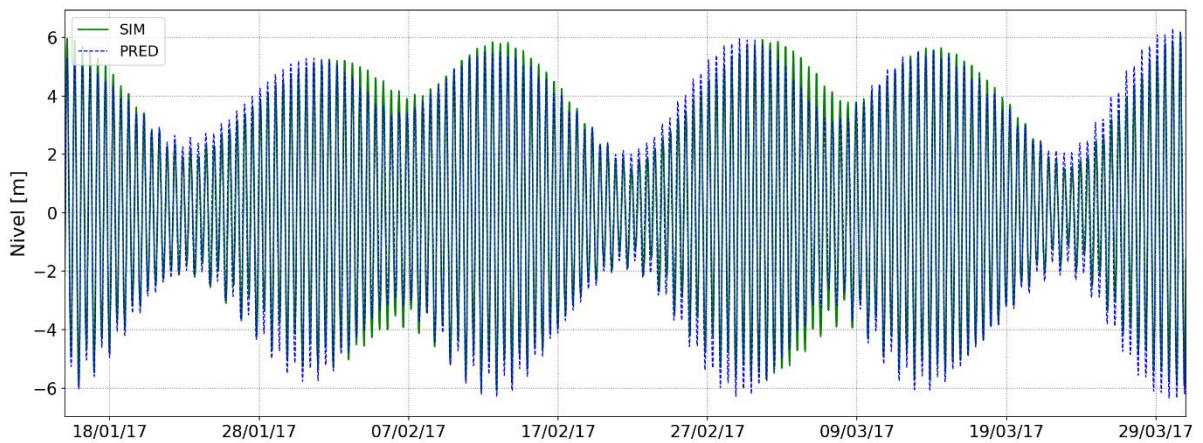


Figura 2.14. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 1 – Puerto de Punta Loyola.

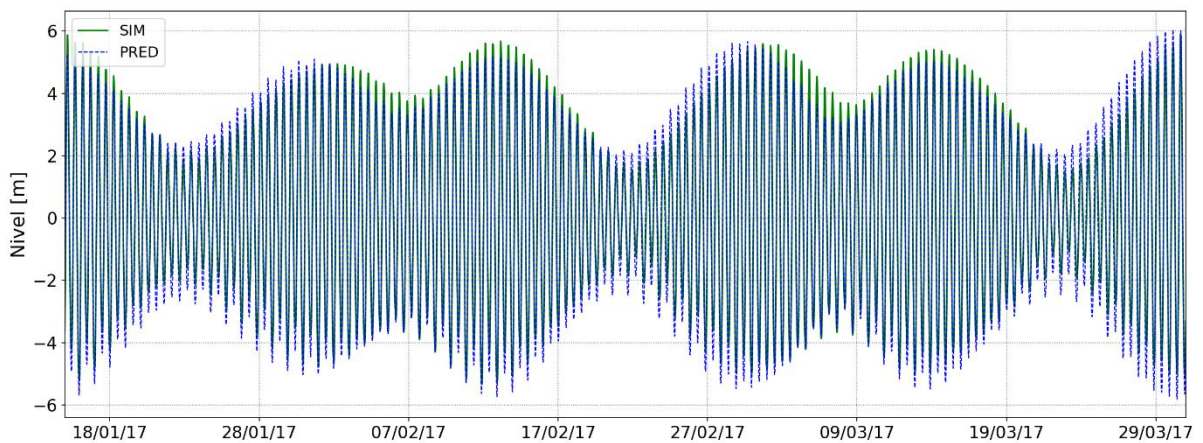


Figura 2.15. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 1 – Puerto de Punta Quilla.

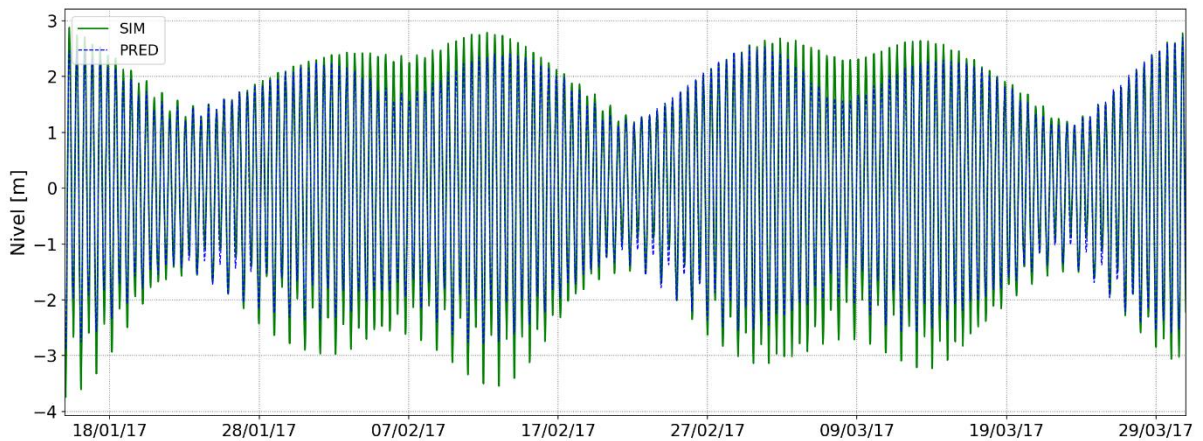


Figura 2.16. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 1 – Puerto Deseado.

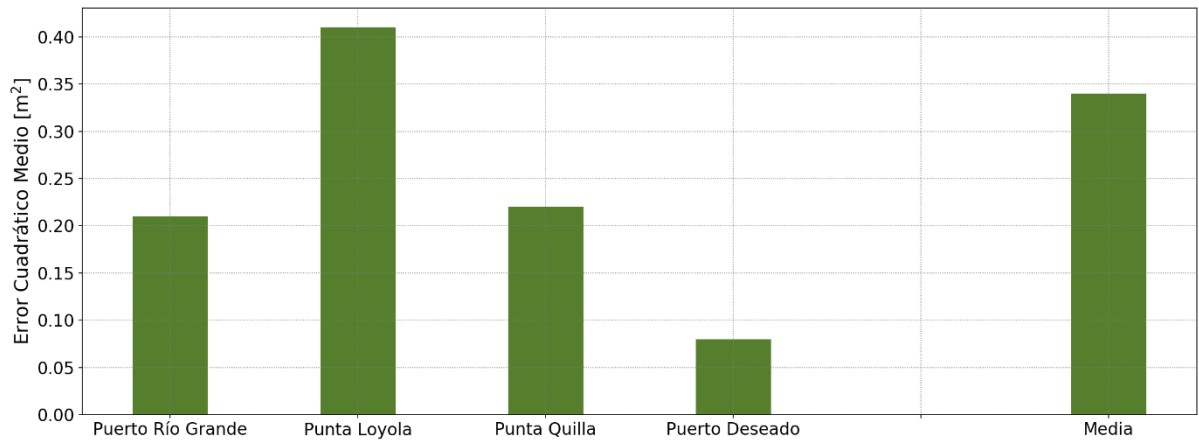


Figura 2.17. Validación del modelo de la Plataforma Continental / Costa Patagónica. Error Cuadrático Medio (ECM) en los cinco estuarios de estudio para el coeficiente de rugosidad n de Manning de calibración ($n=0.015$).

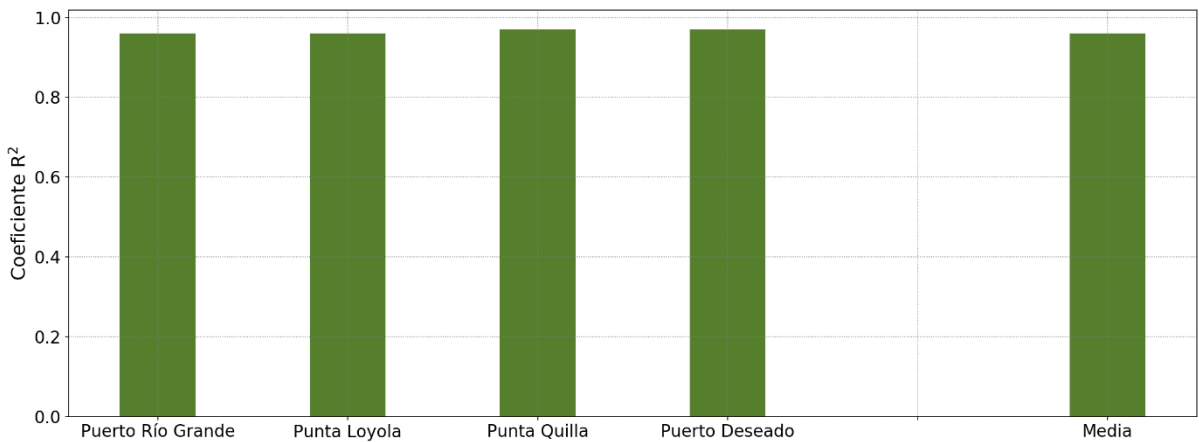


Figura 2.18. Validación del modelo de la Plataforma Continental / Costa Patagónica. Coeficiente R² en los cinco estuarios de estudio para el coeficiente de rugosidad n de Manning de calibración ($n=0.015$).

La resolución que plantea el dominio del modelo de la Plataforma Continental / Costa Patagónica (Rank 1) permite comenzar a analizar tanto campos de niveles como de velocidades de corrientes de marea. Como puede verse en la Figura 2.19, son varias las zonas en donde las velocidades de corrientes de marea alcanzan valores interesantes de ser vinculadas con el potencial energético de las mismas.

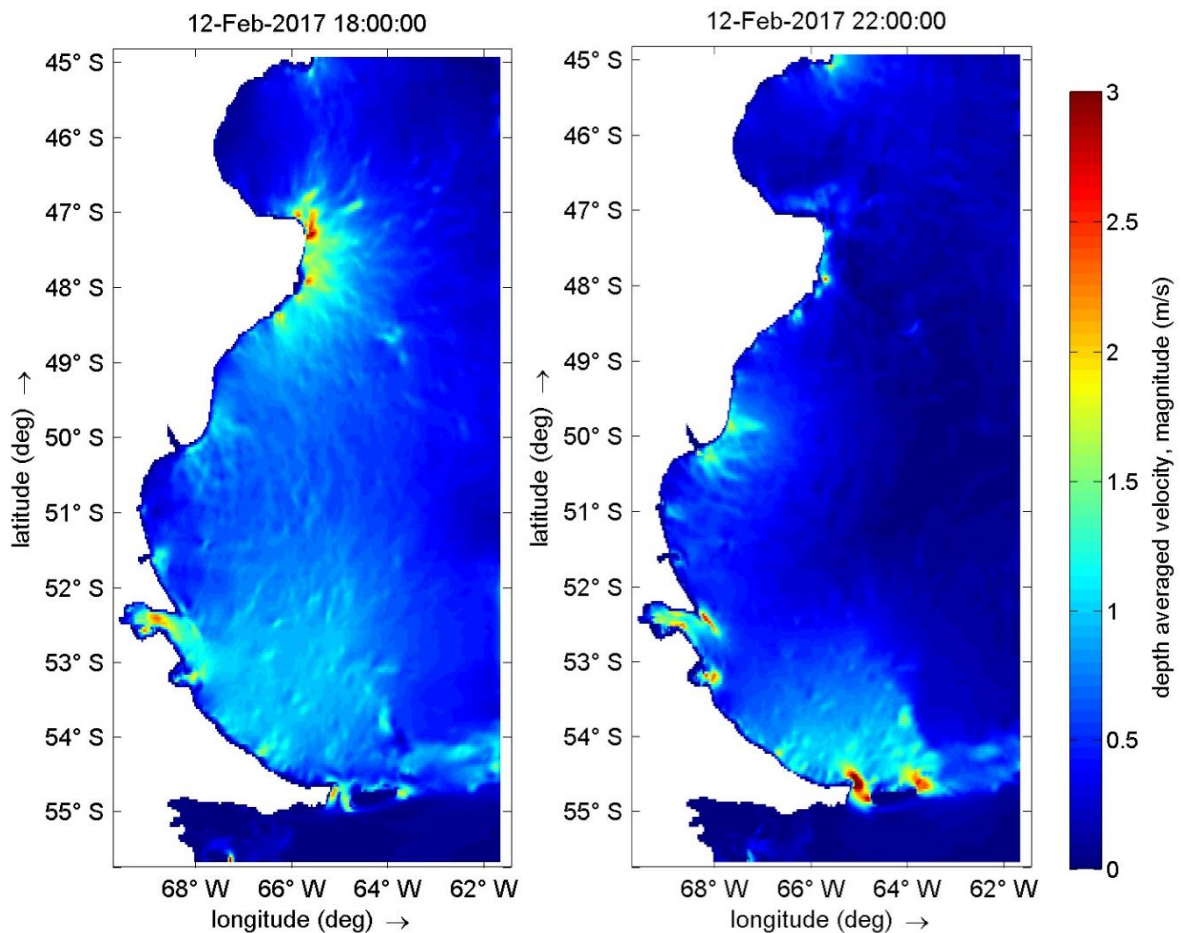


Figura 2.19. Velocidades de corrientes de marea. Modelo de la Plataforma Continental / Costa Patagónica (Rank 1).

2.6. Modelos locales

A modo de poder comprender con mayor detalle la disponibilidad energética que resulta de tener elevadas amplitudes de marea, y consecuentemente altas velocidades, se implementaron modelos locales en el entorno de cada uno de los estuarios a estudiar. El sistema de modelación local planteado involucra el anidado de un modelo por estuario que contemple todo su entorno. En la Figura 2.20 se presentan los dominios de estos modelos clasificados como Rank 2 de cada estuario.

Luego en cada estuario se implementaron los modelos correspondientes al Rank 3 en la escala de anidado en donde se busca obtener detalle en la representación de las corrientes de marea.



Figura 2.20. Dominios de modelación Rank 1 y Rank 2 de cada estuario.

2.7. Potencial energético

La energía hidrocínética consiste en aquella parte de la energía que se encuentra en el movimiento del agua. Cuando se la considera como aprovechamiento energético, la dinámica del agua se analiza a partir de las velocidades de corriente. En el caso de ambientes marinos las velocidades de interés son producto de las corrientes de marea.

La ecuación que relaciona el movimiento del fluido con la energía cinética que este contiene, que puede escribirse como:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (1)$$

Donde E_c es la energía cinética, m es la masa de agua y v la velocidad del escurrimiento. Dado que la masa es el volumen de agua multiplicado por su densidad, y que la potencia puede expresarse como:

$$P = \frac{E_c}{t} \quad (2)$$

Siendo P la potencia, E_c la energía cinética y t el tiempo. Si se aplican ambos conceptos a la primera ecuación, se obtiene:

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2}\rho v^3 \quad (3)$$

Con P la potencia, A el área que atraviesa el fluido, ρ su densidad y v su velocidad de escurrimiento.

Esta ecuación permite relacionar la potencia por unidad de área teórica que puede obtenerse a partir de la velocidad del fluido. Luego, si lo que interesa es saber cuál es la energía presente en el desplazamiento del agua en un determinado período de tiempo, resulta:

$$\frac{E}{A} = \int_0^t \frac{P}{A} dt = \int_0^t \frac{1}{2}\rho v^3 dt \quad (4)$$

Esta es la ecuación de la energía hidrocínética del fluido, por unidad de área que este atraviese. Es importante remarcar que la relación de la energía con la velocidad es al cubo, por lo que, para una misma masa de agua, el doble de velocidad implica una energía disponible ocho veces mayor.

Desde el punto de vista de la modelación numérica de la hidrodinámica de los estuarios la variable clave a resolver es la velocidad de la corriente de marea.

3. MODELO DEL ESTUARIO DEL RIO SANTA CRUZ

3.1. Introducción

El estuario del río Santa Cruz abarca una superficie de 141 km^2 , recibiendo las descargas de los ríos Santa Cruz y Chico de aproximadamente $715 \text{ m}^3/\text{s}$ y $25 \text{ m}^3/\text{s}$ en valor módulo respectivamente (Bindelli, 2018). Dentro de esta superficie se destaca la presencia de dos puertos: Puerto Santa Cruz y Punta Quilla. El primero, originalmente el puerto principal de la zona, cayó en desuso por la presencia del segundo, más próximo a la salida al mar y con mayores facilidades para su acceso.

Actualmente Puerto Santa Cruz tiene a su alrededor un emplazamiento urbano de unos 4.430 habitantes (INDEC, 2010) y oficia como puerto deportivo y recreacional. Junto con la ciudad de Comandante Piedra Buena, de unos 6.400 habitantes (INDEC, 2010) y ubicada en la desembocadura del río Santa Cruz en el estuario, representan las dos urbanizaciones más importantes de la zona. Como actividades económicas principales en el estuario se destacan la pesca comercial, actividades deportivas y de investigación.

Resulta importante destacar la presencia en este entorno del Parque Nacional Monte León, cuya extensión comienza en la mitad exterior de la margen sur del estuario, abarcando 62.170 Ha . hacia el sur y cuyo límite este es la Costa Atlántica.

3.2. Entorno del estuario del río Santa Cruz

Para la implementación de este modelo se partió de la grilla del modelo de la Plataforma Continental / Costa Patagónica (Rank 1), refinando la misma 9 veces y luego recortándola al dominio Rank 2 SC (entorno del estuario del río Santa Cruz) descrito en Re et al. (2018) (Figura 3.1). Si bien lo aconsejable es mantener una relación de entre 3 a 1 y 5 a 1, y dado las características del forzante, en este caso se aumentó el refinamiento para poder obtener un modelo final con dimensiones adecuadas para el análisis del potencial energético. Luego, no habiéndose presentado inconsistencias numéricas en los resultados de las simulaciones, se consideró que la relación entre grillas era aceptable para esta instancia de la modelación. Las características generales del dominio Rank 2 SC se presentan en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1 Características de las simulaciones con el modelo local Rank 2 SC.

Parámetro	Entorno del estuario del río Santa Cruz
Período simulado	01/01/2017 – 31/03/2017
Discretización temporal [s]	30
Modelo de turbulencia	Viscosidad de turbulencia constante: 600
Batimetría	Cartas 2, H4, H367 y H367B del SHN + Imágenes LANDSAT
Rango de profundidades [m]	0 - 118
Discretización espacial (tamaño aproximado de celdas) [m]	260 x 410
Cantidad máxima de elementos en la dirección M	535
Cantidad máxima de elementos en la dirección N	285
Cantidad máxima de elementos en la dirección K	1
Cantidad total de celdas	100,307

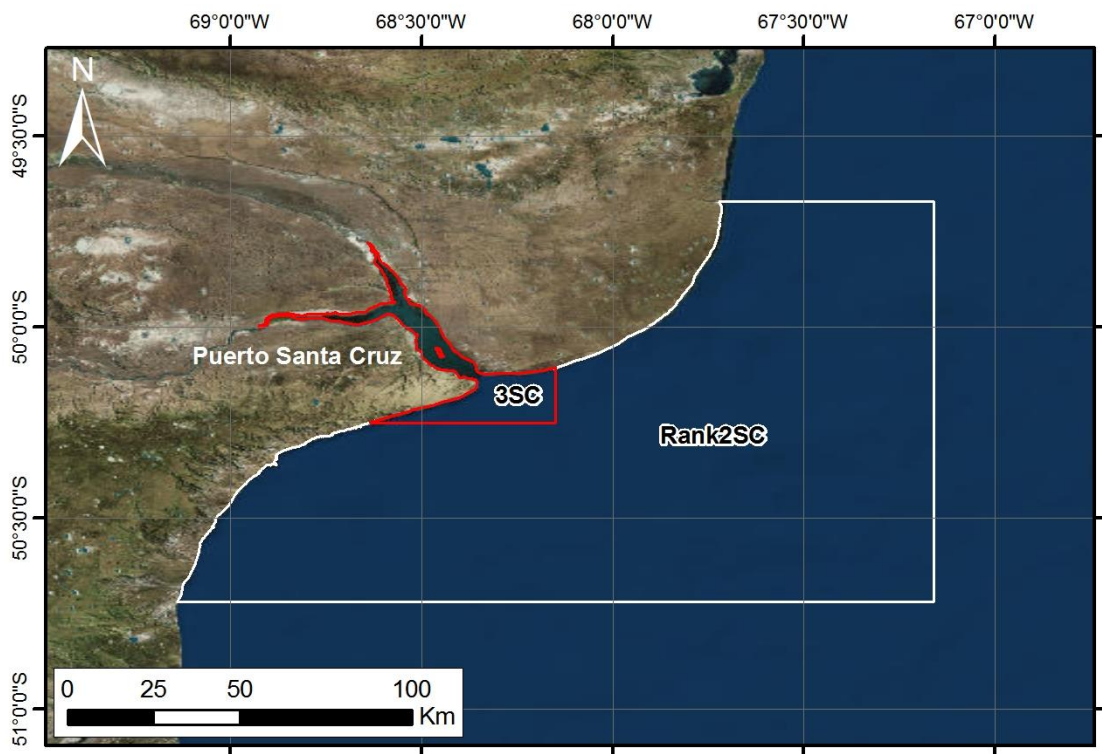


Figura 3.1. Dominios de los modelos locales del estuario del río Santa Cruz: Rank 2 SC y Rank 3 SC.

La performance de la modelación se evaluó comparando la serie simulada contra la predicha de marea astronómica en Punta Quilla (Figura 3.2).

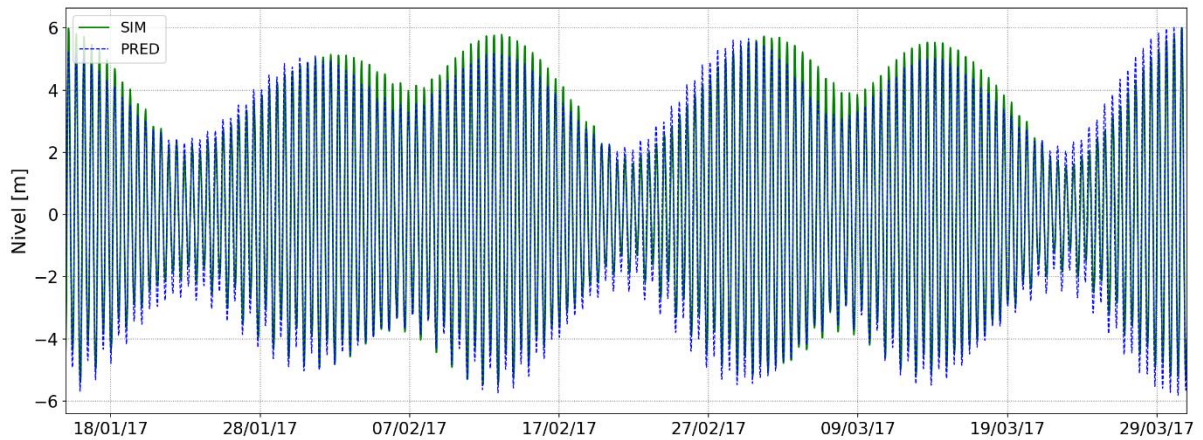


Figura 3.2. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 2 SC – Puerto de Punta Quilla, estuario del río Santa Cruz.

Además, el análisis de la performance se realizó cuantitativamente resultando un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.45 m y un coeficiente de correlación R^2 de 0.95 . En esta instancia de la modelación se observaron amplitudes de hasta 12 metros, coincidentes con los valores de la onda predicha. En cuanto a las velocidades presentes en el estuario, estas alcanzan valores de hasta $2,5\text{ m/s}$. Si bien los valores de amplitud se alcanzan en gran parte de este, pareciera que las altas velocidades se concentran en zonas puntuales, en las proximidades de su boca. En la Figura 3.3 y la Figura 3.4, en donde se muestran valores de amplitudes y velocidades máximas en el entorno del estuario.

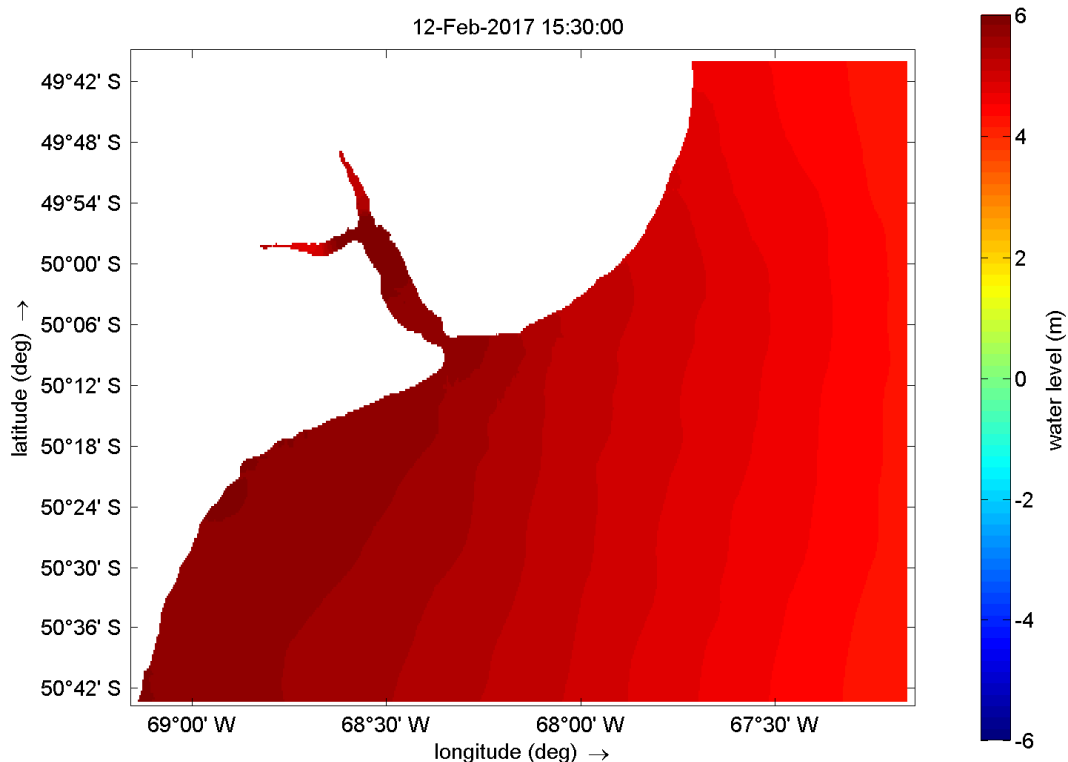


Figura 3.3. Amplitudes máximas en el estuario del río Santa Cruz.

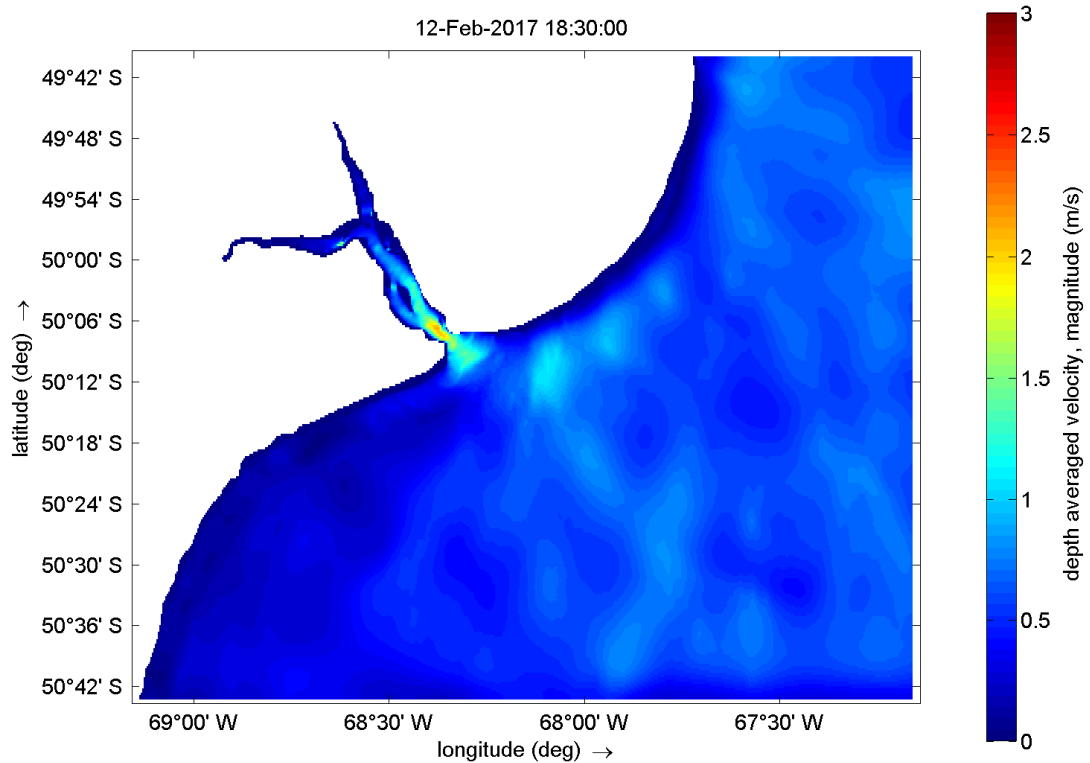


Figura 3.4. Velocidades máximas en el estuario del río Santa Cruz y su entorno.

3.3. Estuario del río Santa Cruz

El dominio de mayor detalle del estuario del río Santa Cruz, Rank 3 SC, abarca únicamente la zona del estuario y su desembocadura al Mar Argentino. Su extensión va desde el final de los brazos de los ríos Chico y Santa Cruz, Punta Beagle, hasta la zona exterior de Punta Entrada (Figura 3.5). En este caso, el modelo cuenta con dos bordes abiertos: uno de 16 km al Este y otro de 54 km al Sur. Las características generales del modelo implementado se exponen en la Tabla 3.2.

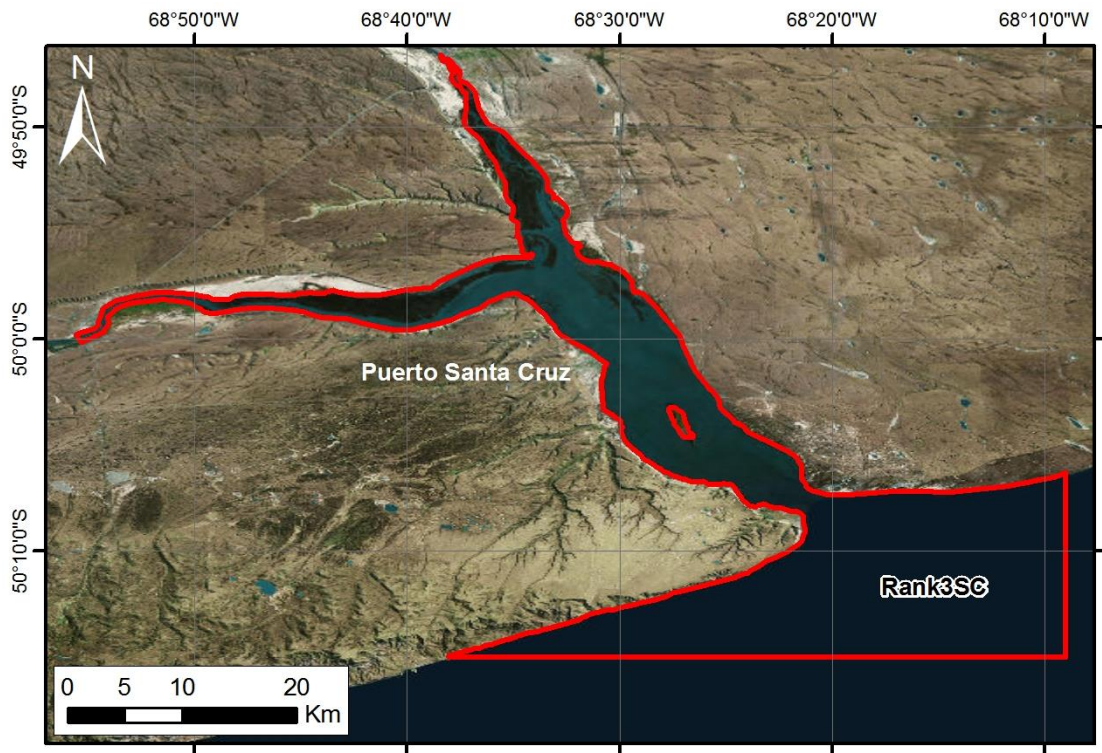


Figura 3.5. Dominio del Rank 3 – Estuario del río Santa Cruz.

Tabla 3.2 Características de las simulaciones con el modelo local Rank 3 SC.

Parámetro	Estuario del río Santa Cruz
Período simulado	01/01/2017 – 31/03/2017
Discretización temporal [s]	15
Modelo de turbulencia	Viscosidad de turbulencia constante: 200
Batimetría	Cartas 2, H4, H367 y H367B del SHN + Imágenes LANDSAT
Rango de profundidades [m]	0 - 37
Discretización espacial (tamaño aproximado de celdas) [m]	89 x 137
Cantidad máxima de elementos en la dirección M	630
Cantidad máxima de elementos en la dirección N	384
Cantidad máxima de elementos en la dirección K	1
Cantidad total de celdas	44430

La performance de la modelación se evaluó comparando la serie simulada contra la predicha de marea astronómica en Punta Quilla (Figura 3.6). Los indicadores de performance mostraron un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.32 m y un coeficiente de correlación R^2 de

0.96.

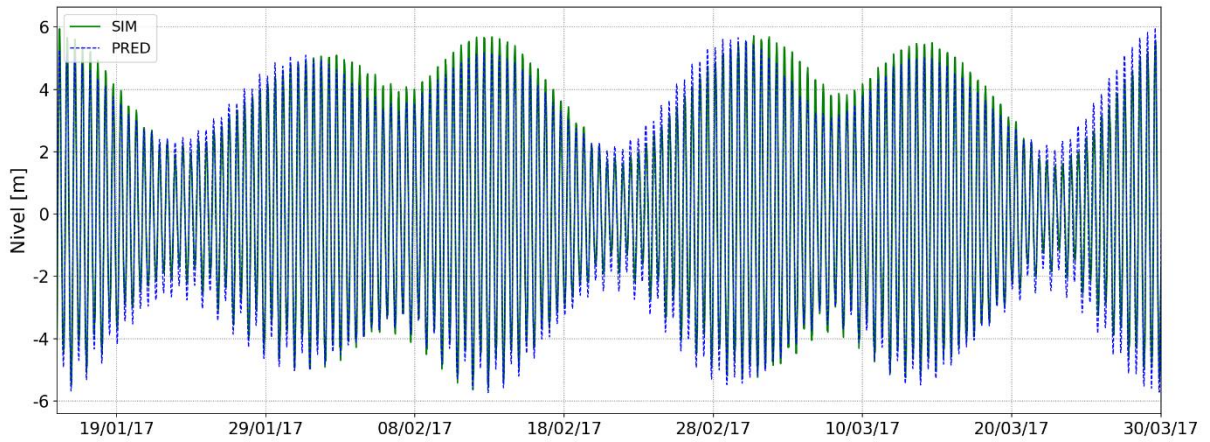


Figura 3.6. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 3 SC – Puerto de Punta Quilla, estuario del río Santa Cruz.

Al igual que en el dominio Rank 2 SC (en anterior en la escala de anidado), se pueden observar con mayor precisión que existen zonas en las que se alcanzan velocidades del orden de los 2.5 m/s, con máximos de hasta 3 m/s. En la Figura 3.7 se presentan este tipo de resultados.

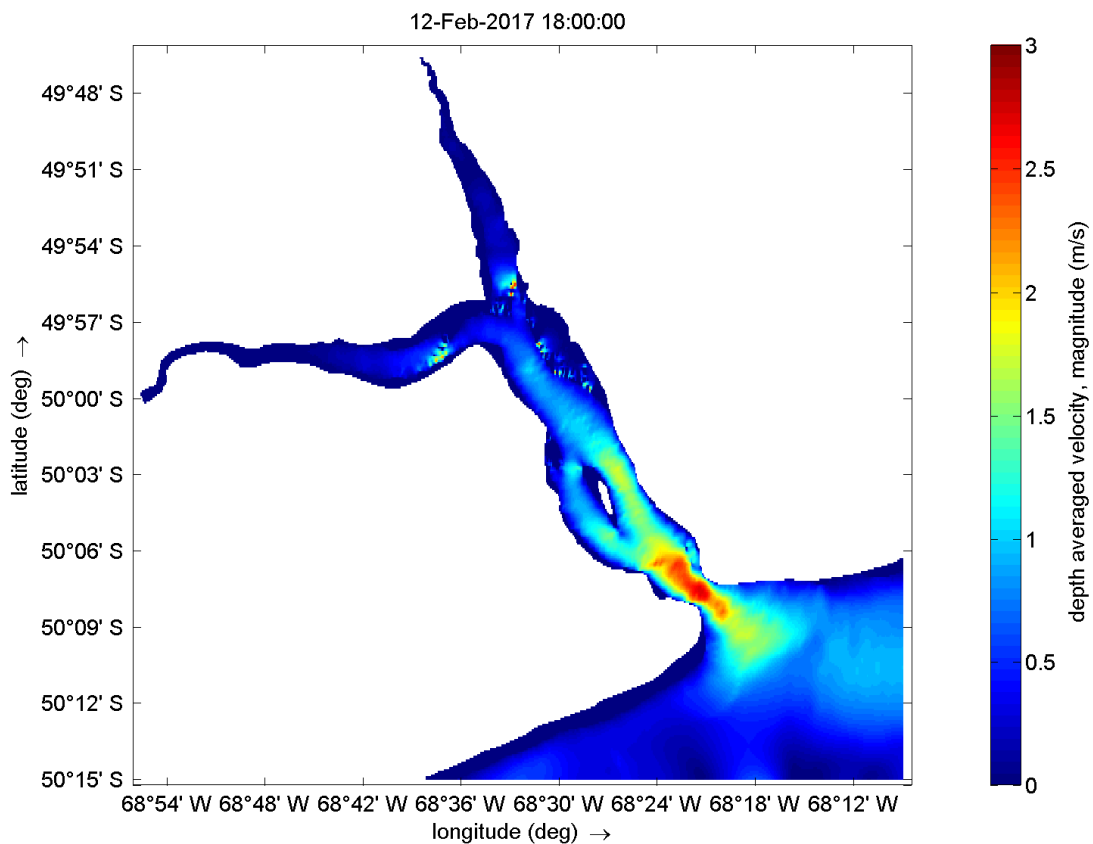


Figura 3.7. Velocidades instantáneas en el Estuario del río Santa Cruz – Rank 3 SC.

Dada esta caracterización de las velocidades del estuario, resulta importante abordar un análisis integral de las distintas variables interesantes para la cuantificación de su potencial energético. Por lo tanto, se analizaron valores de profundidad media, máxima y mínima, velocidades medias y máximas y potencia y energía medias anuales.

De la Figura 3.8 a la Figura 3.10 se muestran las profundidades medias, mínimas y máximas en la boca del estuario. Se pueden observar dos grandes sectores en los que se superan los 20 m en valor medio: en la desembocadura del estuario y en un pequeño sector situado entre Punta Ojos e Islas Leones. Dada la gran amplitud de marea que ocurre dentro del estuario, es de esperar que las zonas enunciadas anteriormente aumenten o disminuyan con la fluctuación de la marea, pero es importante remarcar, que aún en los momentos de menor amplitud, se conservan zonas con al menos 20 m de profundidad.

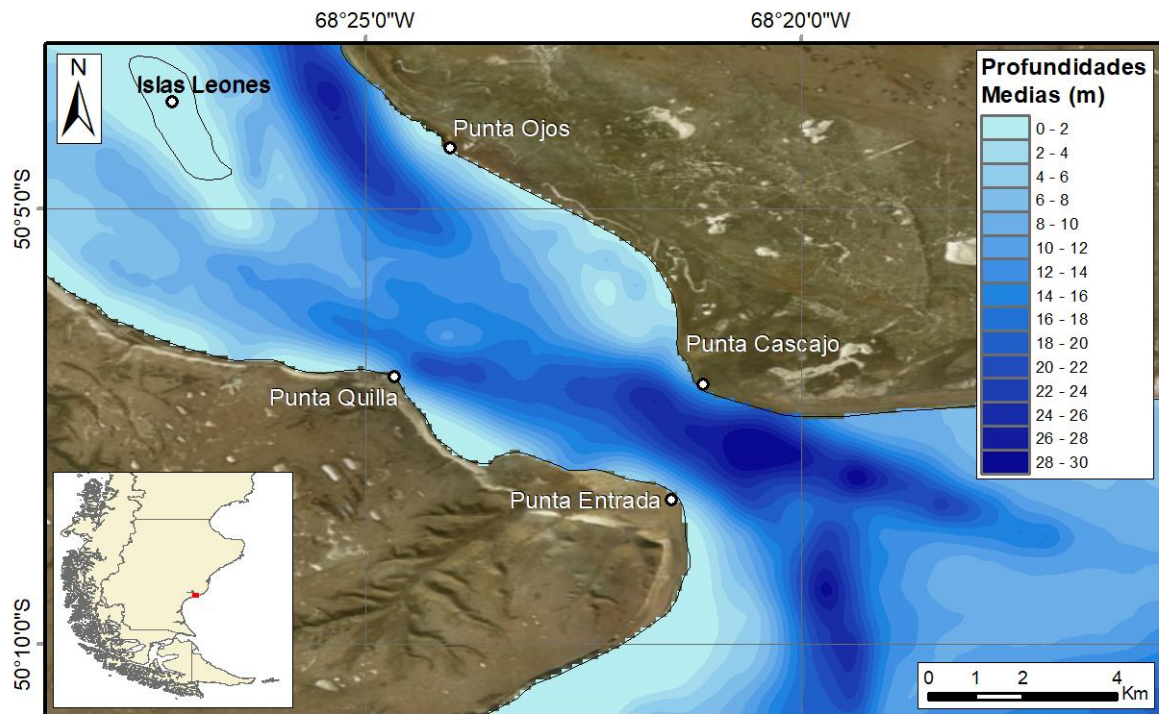


Figura 3.8. Profundidades medias en el estuario del río Santa Cruz.

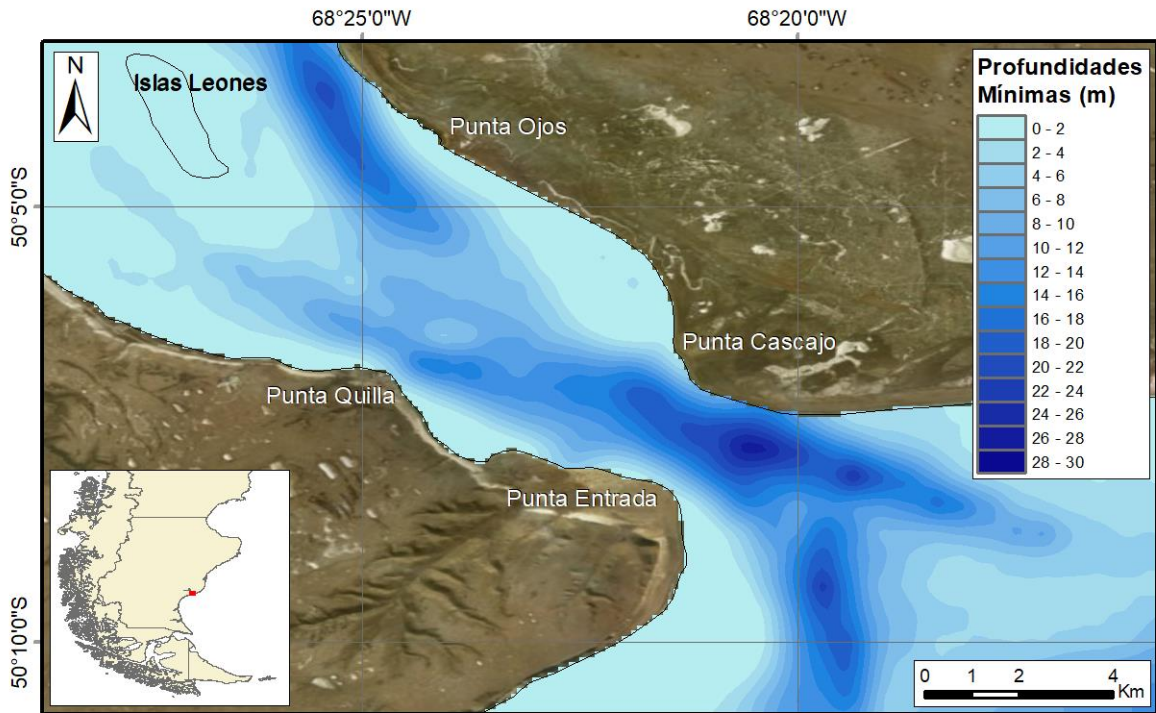


Figura 3.9. Profundidades mínimas en el estuario del río Santa Cruz.

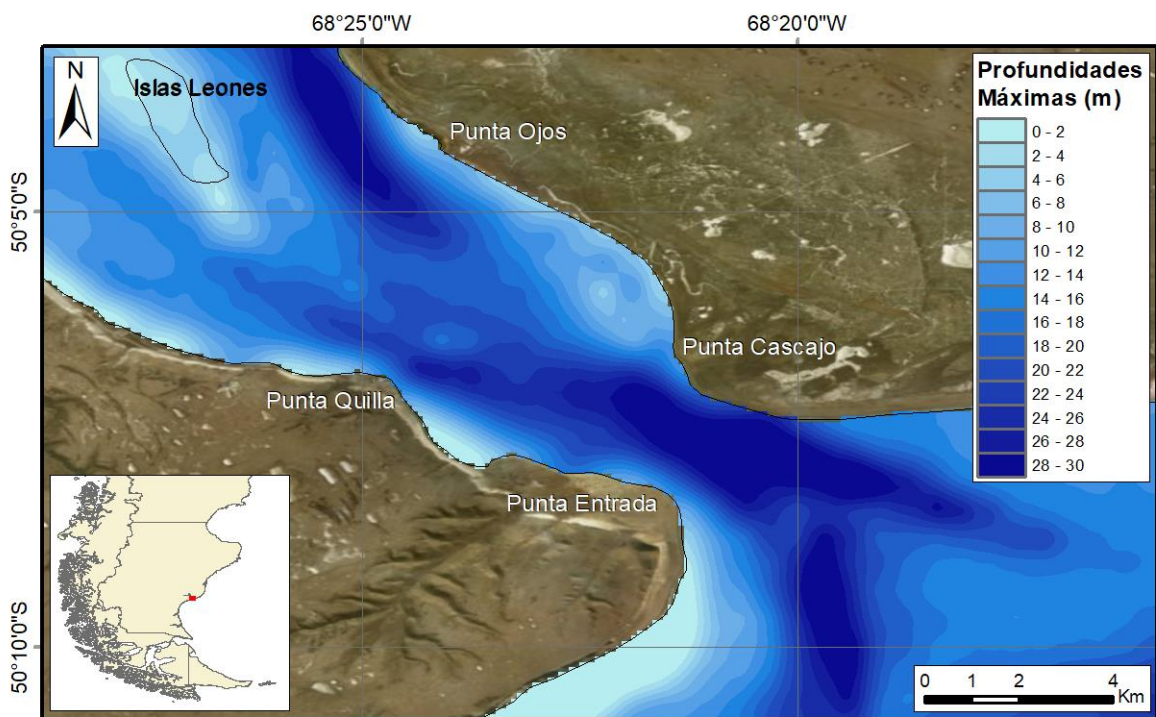


Figura 3.10. Profundidades máximas en el estuario del río Santa Cruz.

En lo que respecta a las velocidades, en la Figura 3.11 y la Figura 3.12, se puede observar que se supera en una importante zona el valor umbral de 1 m/s tanto en creciente como en

bajante. Si solo se analizan las velocidades medias, esa zona se da entre Punta Entrada y Punta Quilla.

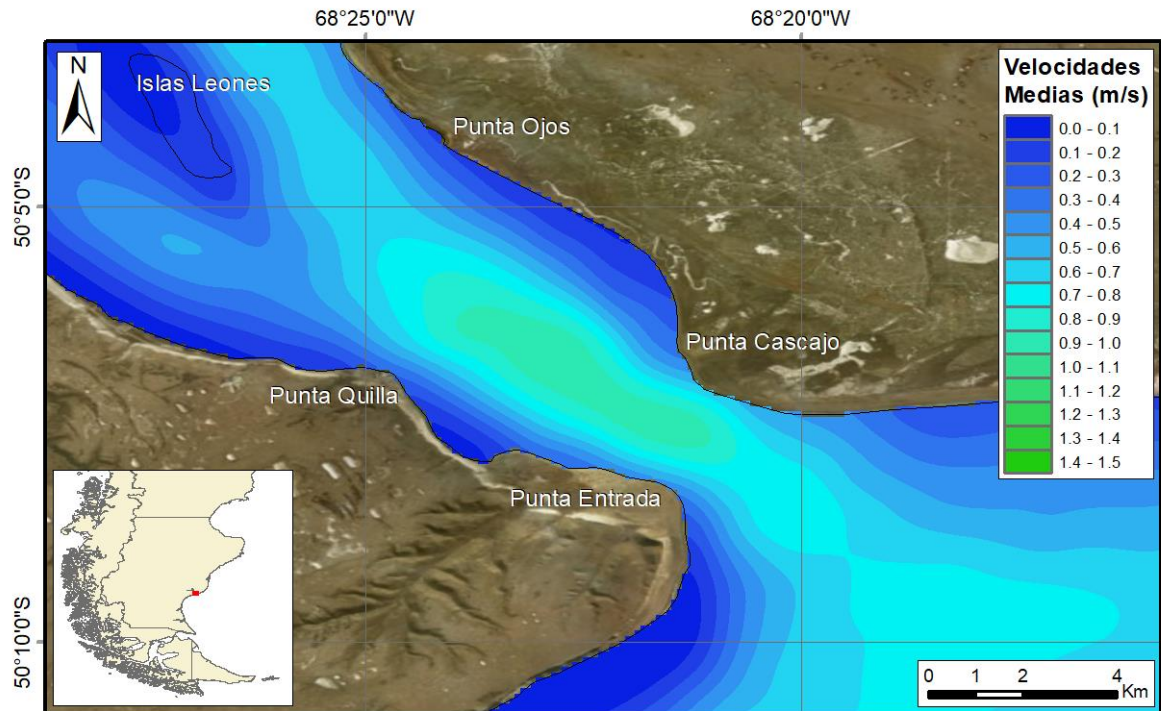


Figura 3.11. Velocidades medias en el estuario del río Santa Cruz.

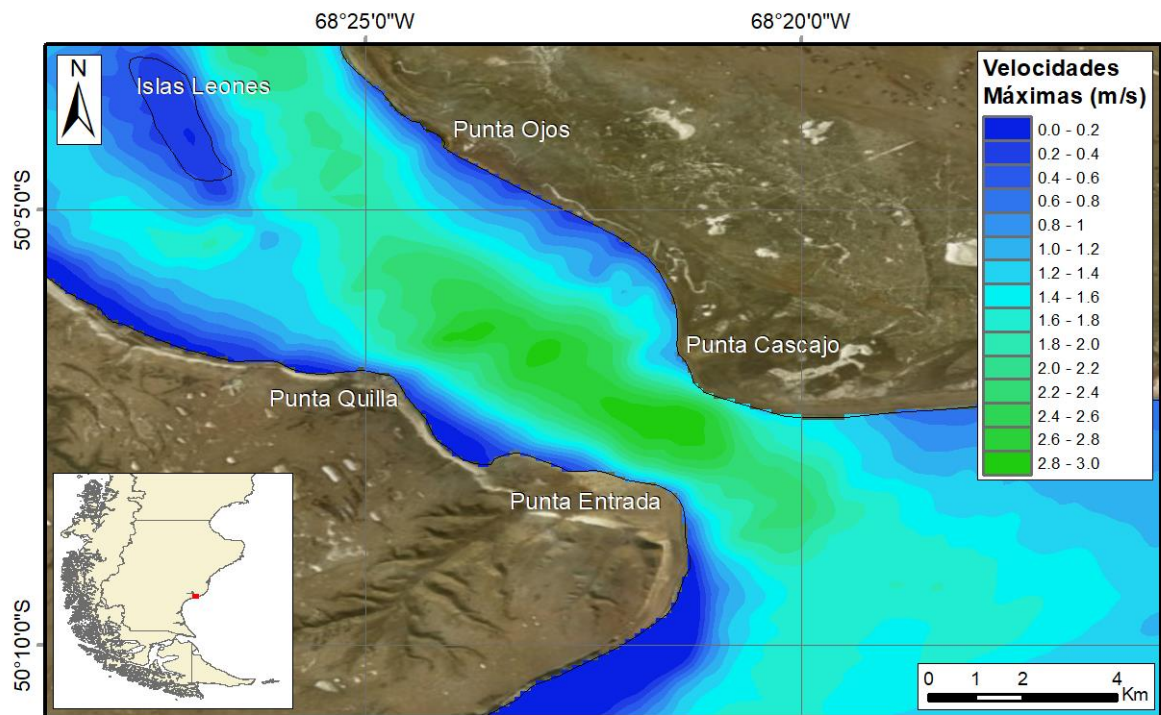


Figura 3.12. Velocidades máximas en el estuario del río Santa Cruz.

Si bien las áreas de mayores profundidades no coinciden exactamente con aquellas de mayores velocidades, si puede constatar que tienen sectores comunes. Para corroborar esto, se determinó la superficie que hay disponible para distintas categorías de profundidad, de todas las áreas que presentan velocidades medias anuales superiores a 1 m/s. La Figura 3.13 representa las superficies disponibles según rango de profundidad, para los niveles de marea más bajos a modo de garantizar en todo momento la sumergencia de los equipos.

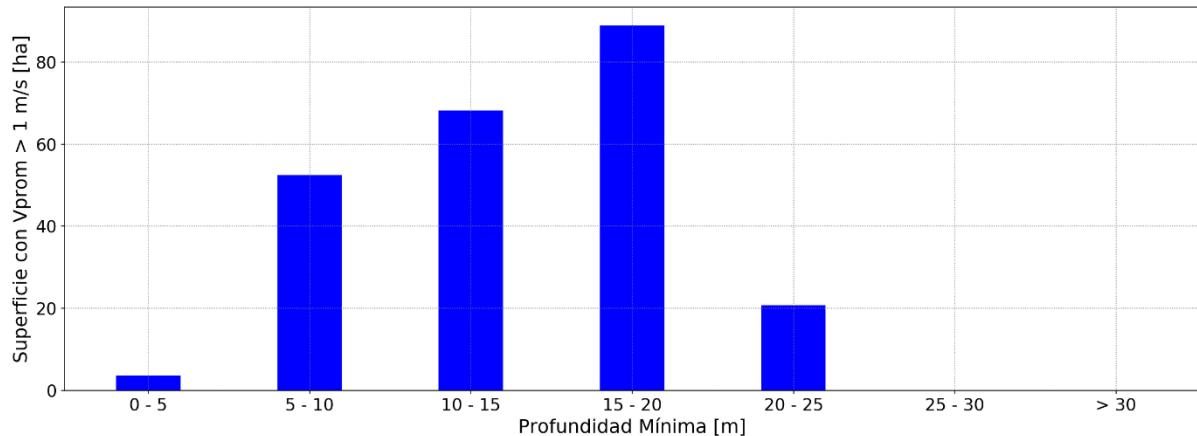


Figura 3.13. Histograma de superficies con velocidades medias anuales superiores a 1 m/s en función de la profundidad para el estuario del río Santa Cruz.

La Figura 3.14 refleja la variación de la velocidad en una zona con elevado potencial energético. Se observan mayores diferencias entre las dos partes del ciclo en períodos de cuadratura y en algunos casos ninguna parte del período supera el umbral de 1 m/s durante unos 4 días. Por otro lado, este umbral es superado por ambas partes del ciclo el resto del tiempo, exceptuando aquellos intervalos de tiempo en los que la marea cambia de sentido.

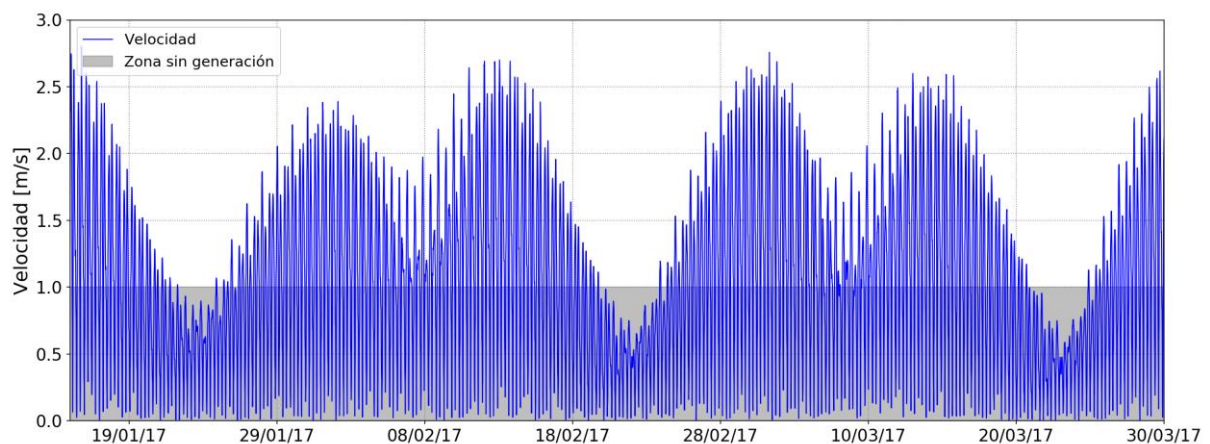


Figura 3.14. Evolución de la velocidad para el período modelado en un punto ubicado dentro de la zona de mayores velocidades. Estuario del río Santa Cruz – Rank 3.

Otra característica a remarcar es que tanto el caudal como el volumen de agua que ingresa al estuario con cada ciclo de marea presenta una importante amplitud (Figura 3.15 y Figura 3.16). Resulta importante destacar que los caudales ingresantes menores son muy superiores

a los aportes de los tributarios, representando estos últimos apenas un 5% del aporte⁵ (Tabla 3.3).

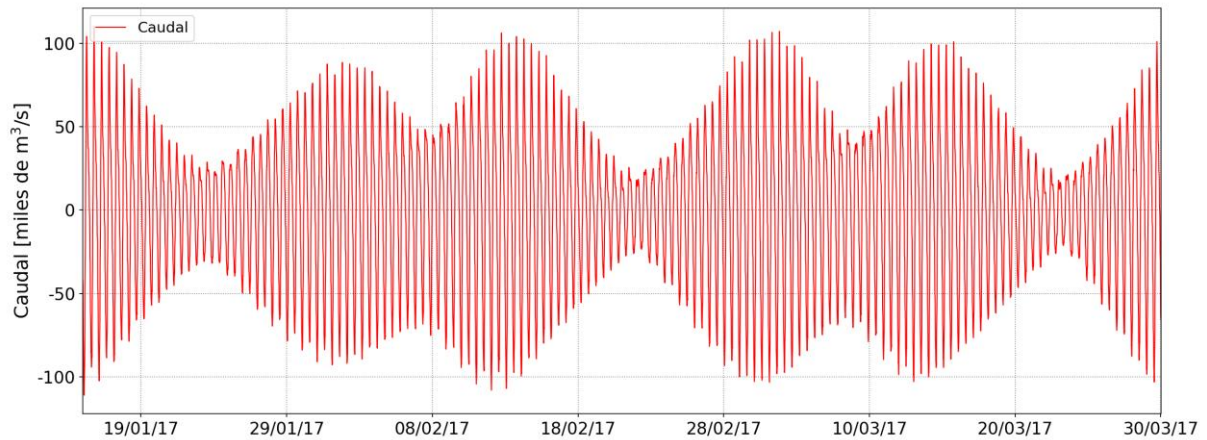


Figura 3.15. Evolución del caudal en la boca del estuario del río Santa Cruz – Rank 3 SC.

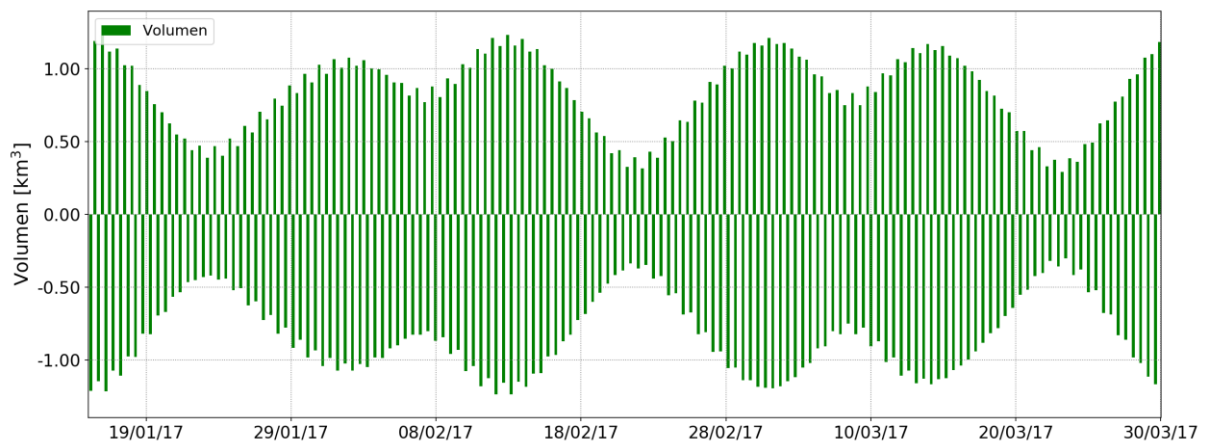


Figura 3.16. Evolución del volumen en la boca del Estuario del río Santa Cruz – Rank 3.

Tabla 3.3 Volúmenes y caudales entrantes para el período modelado – Estuario del río Santa Cruz.

Volumen máximo	1.27 km ³
Volumen mínimo	0.29 km ³
Volumen promedio	0.84 km ³
Caudal máximo	11,090 m ³ /s
Caudal promedio	37,902 m ³ /s

⁵ Para hacer esta comparativa se tomó el menor caudal máximo del período modelado, ya que en los cambios de sentido de la corriente de marea el caudal es prácticamente nulo, pero eso ocurre durante breves instantes de tiempo.

Comprendida la dinámica de los niveles y las velocidades de corrientes de marea se procedió a realizar los cálculos de potencial energético en las zonas de interés descritas. Para cada celda del dominio de cálculo Rank 3 SC, con dimensiones del orden de los 100 m, se calcularon la potencia y la energía media anual por metro cuadrado de sección transversal al escurrimiento se distribuyen como se muestra en las siguientes imágenes. Las zonas de mayor potencia alcanzan los 1,5 kW, mientras que las de mayor energía, coincidentes con las primeras, superan los 13 MW.hr al año.

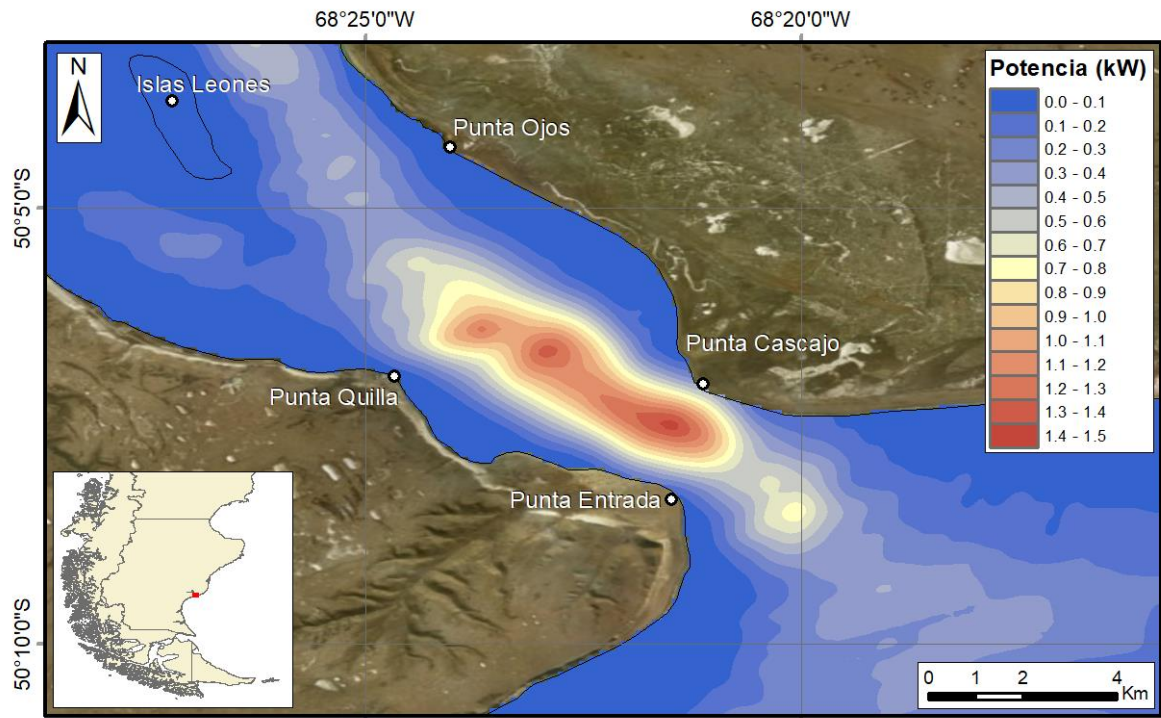


Figura 3.17. Potencia media anual por metro cuadrado de sección transversal a la corriente de marea en el estuario del río Santa Cruz.

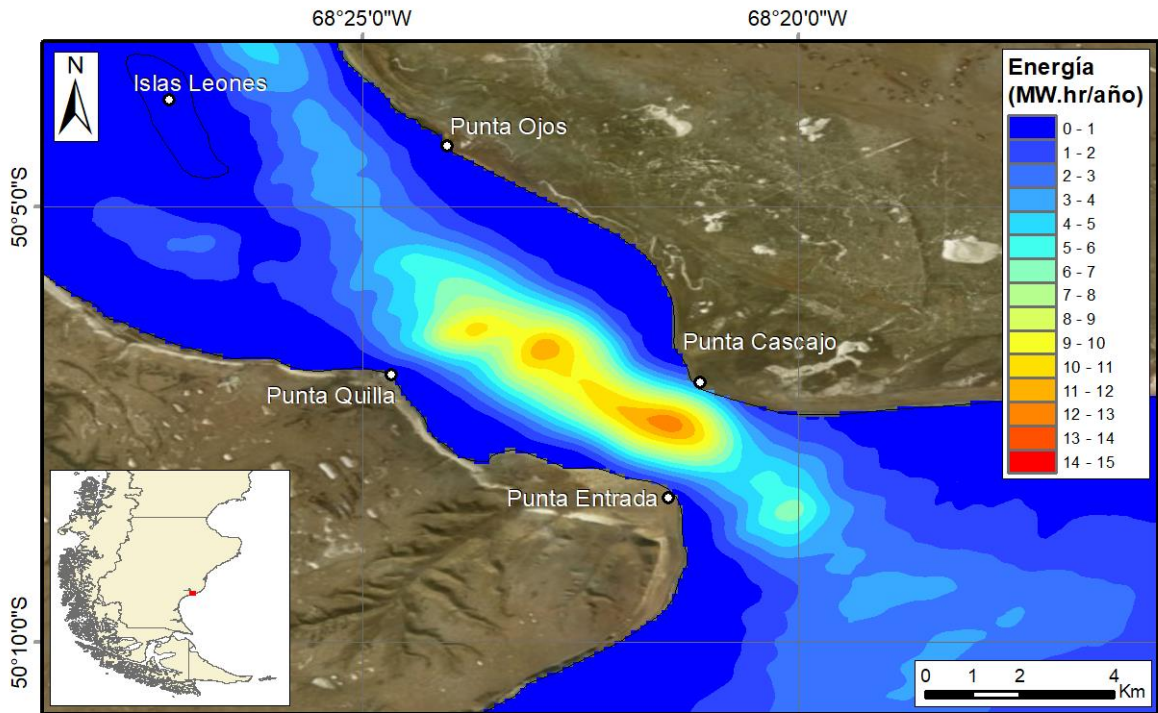


Figura 3.18. Energía media anual por metro cuadrado de sección transversal a la corriente de marea en el estuario del río Santa Cruz.

En la Figura 3.19, se presenta un análisis integrado en el que calcula la superficie del estuario según rangos de energía anual disponible. En este caso resulta que hay unas 107 Ha. en el interior del estuario que cuentan con más de 10 MWh/m²/año, con zonas puntuales que alcanzan los 13 MWh/m²/año.

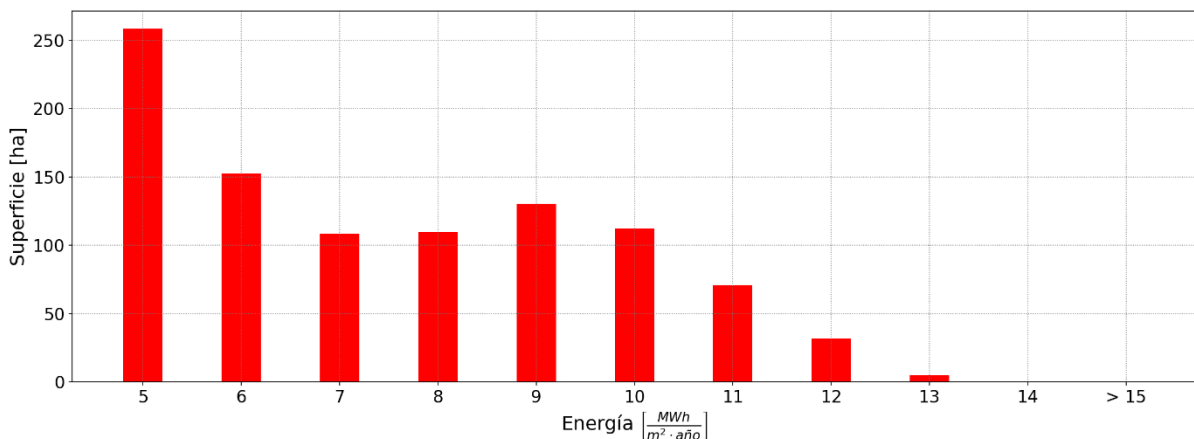


Figura 3.19. Histograma de superficies en función de la energía disponible en el estuario del río Santa Cruz.

Con estos resultados, a modo ilustrativo, se realizó para este estuario una estimación del potencial energético aprovechable a partir de la selección de un tipo de generador comercial. Dado que este estuario presenta un sector que mantiene en forma constante una profundidad

de al menos 20 m, se eligió el generador SeaGen⁶ de 1.2 MW de potencia, que tiene unas hélices de 16 m de diámetro y se supuso que se requiere al menos unos 2 m de revancha inferior y otros dos de revancha superior para lograr un correcto funcionamiento (la hipótesis surge del hecho de que esa información actualmente no es pública). La curva de generación de electricidad en función de la velocidad de la corriente indica que la generación comienza a partir de una velocidad de 1 m/s, adoptando la forma de una función cúbica hasta el valor máximo de potencia producida, en este caso alcanzado a los 2,5 m/s y constante para velocidades mayores.

Luego, teniendo en cuenta las características del equipamiento se propuso una cantidad de generadores y su distribución espacial en la zona de mayor interés (24 en total, lo suficientemente separados para no provocar interferencia entre ellos), como se observa a continuación.

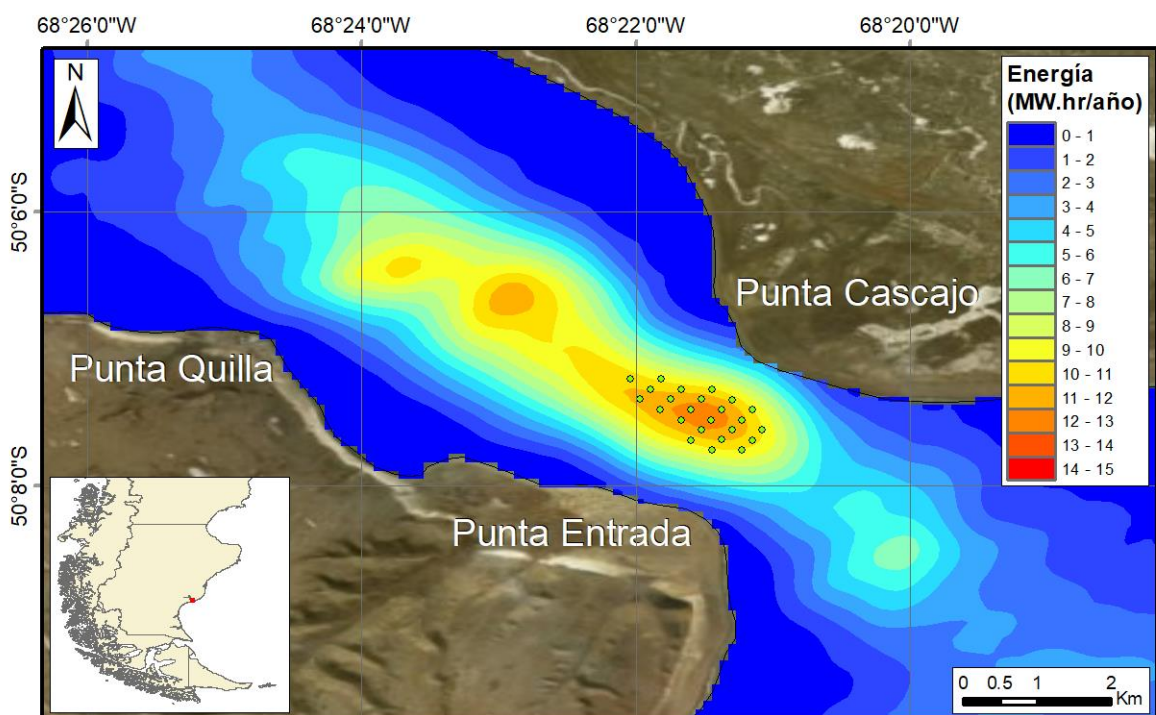


Figura 3.20. Distribución espacial de los 24 generadores adoptados (mejorada de Bindelli, 2018).

Para cada uno de estos equipos, la curva de generación de energía adopta la forma siguiente, en la que pueden observarse períodos de generación nula, un valor techo obtenido cuando las velocidades superan los 2.5 m/s y valores intermedios que oscilan entre los extremos anteriores.

⁶ <https://simecatlantis.com/>

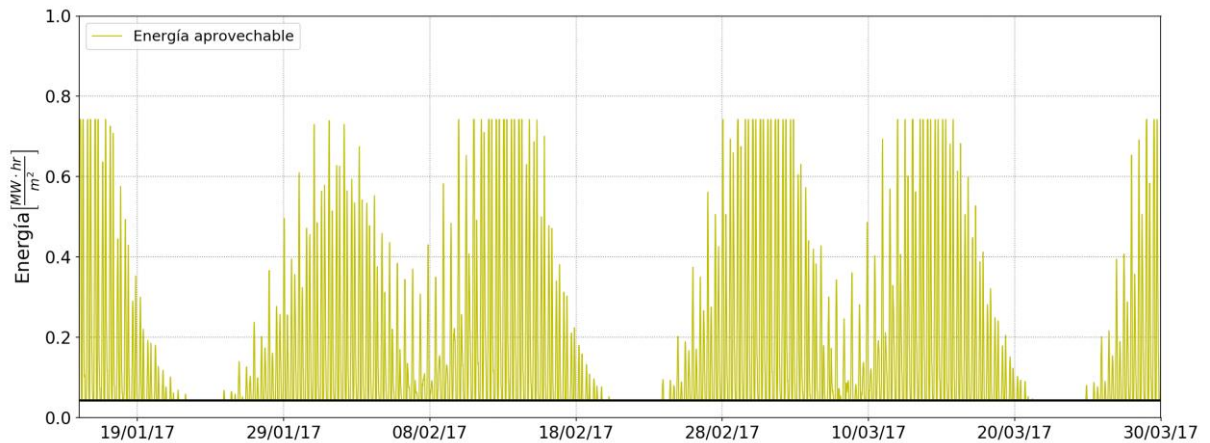


Figura 3.21. Curva de generación energética para un dispositivo SeaGen de 1,2 MW en el estuario del río Santa Cruz.

Si se adiciona la cantidad de energía que en principio podría producir cada generador, resulta que habría disponible unos 37 GW.hr/año de energía eléctrica, capaces de satisfacer el consumo de unas 14,000 personas (una población similar a la de los ejidos urbanos del entorno de este estuario).

De este análisis se desprende también que son las zonas que presentan velocidades superiores a 1 m/s en valor medio las que tienen un mayor potencial energético para ser aprovechado y por lo tanto, aquellas que se podrían pre-seleccionar como zonas de interés.

4. MODELO DEL ESTUARIO DEL RIO COYLE

4.1. Introducción

El estuario del río Coyle abarca una superficie de 20 km^2 y se encuentra a 75 km al Norte de la ciudad de Río Gallegos y a 115 km al Suroeste de Puerto Santa Cruz. El río Coyle posee un caudal módulo de $5 \text{ m}^3/\text{s}$ y la margen Norte de su estuario delimita el Sur del Parque Nacional Monte León, abarcando este último el territorio costero entre los estuarios de los ríos Santa Cruz y Coyle.

Hacia fines del siglo XIX el estuario contaba con una población estable, producto de la cercanía de la Ruta Nacional 3 (RN3) y de la existencia del Puerto Coyle, que fomentaban tanto la actividad ganadera de la zona como el movimiento marítimo. Sin embargo, con la modificación de la traza de la RN3, los embarques de la zona se re-direccionaron hacia la localidad de Río Gallegos o Puerto Santa Cruz. Esto provocó que hacia 1960 tanto el Puerto Coyle como la población del estuario dejen de existir. Actualmente, no se encuentran emplazamientos urbanos en los alrededores del estuario, a excepción de unas pocas estancias distribuidas a lo largo de las costas fluviales y marítimas.

4.2. Estuario del río Coyle

La implementación de este modelo se basó en la grilla del modelo de la Plataforma Continental / Costa Patagónica (Rank 1), refinando la misma 6 veces y definiendo el dominio Rank 2 CO (entorno del estuario del río Coyle) descrito en Re et al. (2018) (Figura 4.1). Luego se procedió a hacer un nuevo anidado refinando la grilla del Rank 2 CO en una relación de 5 a 1 para obtener el dominio Rank 3 CO. Las características generales de ambos modelos se presentan en la Tabla 4.1. La extensión del Rank 3 CO abarca el interior del estuario y tres bordes abiertos a las afueras de este, de unos 15 km al Norte, 29 km al Este y 16 km al Sur (Figura 4.2).

Tabla 4.1 Características de las simulaciones con los modelos locales Rank 2 CO y Rank 3 CO.

Parámetro	Entorno del estuario del río Coyle	Estuario del río Coyle
Período simulado	01/01/2017 – 31/03/2017	01/01/2017 – 31/03/2017
Discretización temporal [s]	30	15
Modelo de turbulencia	Modelo 2D HLES (Horizontal Large Eddy Simulation)	Modelo 2D HLES (Horizontal Large Eddy Simulation)
Batimetría	GEBCO + Imágenes LANDSAT	GEBCO + Imágenes LANDSAT
Rango de profundidades [m]	0 - 112	0 – 34

Discretización espacial (tamaño aproximado de celdas) [m]	350 x 557	70 x 111
Cantidad máxima de elementos en la dirección M	288	498
Cantidad máxima de elementos en la dirección N	210	316
Cantidad máxima de elementos en la dirección K	1	1
Cantidad total de celdas	46659	66416

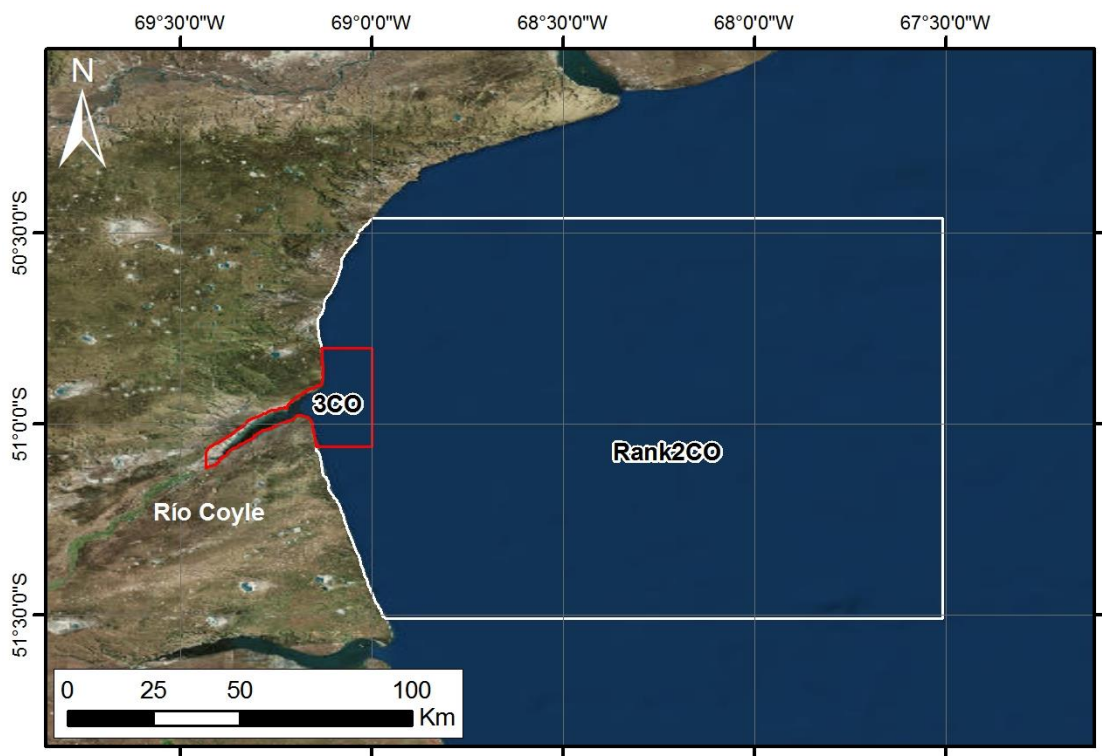


Figura 4.1. Dominios del Rank 2 CO y Rank 3 – Estuario del río Coyle.

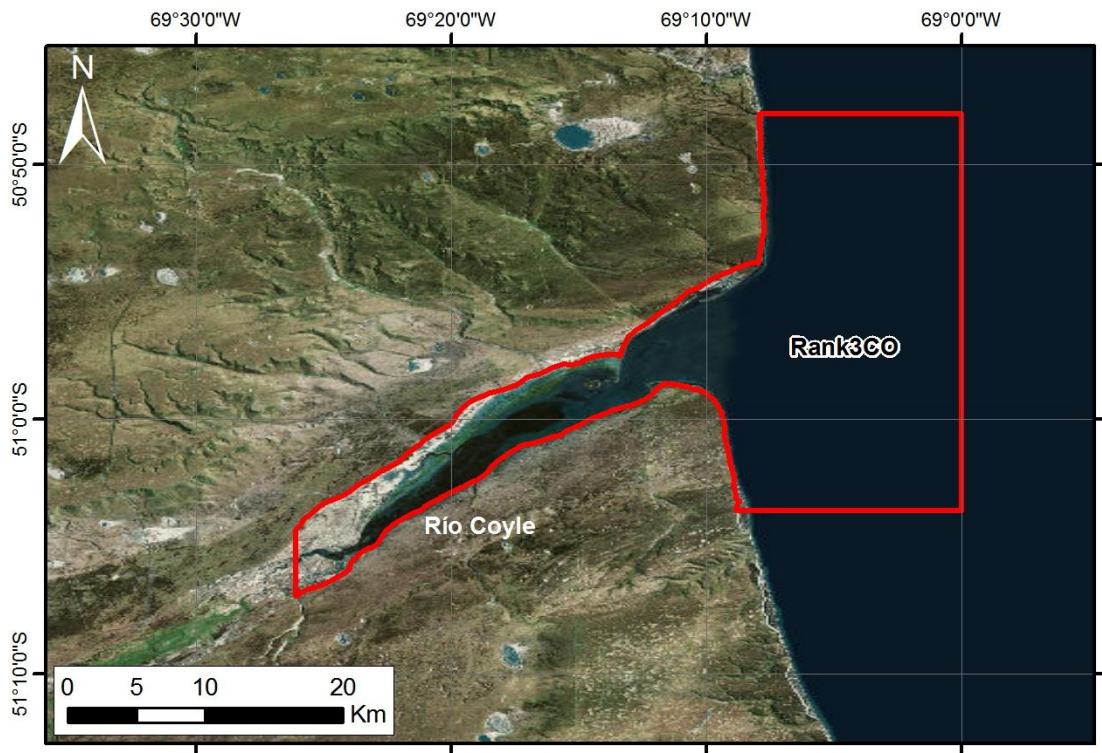


Figura 4.2. Dominios del Rank 3 – Estuario del río Coyle.

Debido al tamaño de este estuario y a las características del dato contra el que se analiza la performance de la modelación (predicción de marea de un puerto secundario según el SHN), se presenta la validación de los resultados del modelo local de mayor detalle (Rank 3 CO). En la Figura 4.3 se muestra la comparación entre la serie simulada y la predicción de marea astronómica. Se observa un buen acuerdo en la modulación y en la representación de las amplitudes, aunque los indicadores de performance no se presenten altamente satisfactorios (ECM 0.69 m y R^2 0.93). A modo ilustrativo, la Figura 4.4 muestra la distribución de velocidades en un instante particular, destacándose zonas con valores mayores a 1 m/s.

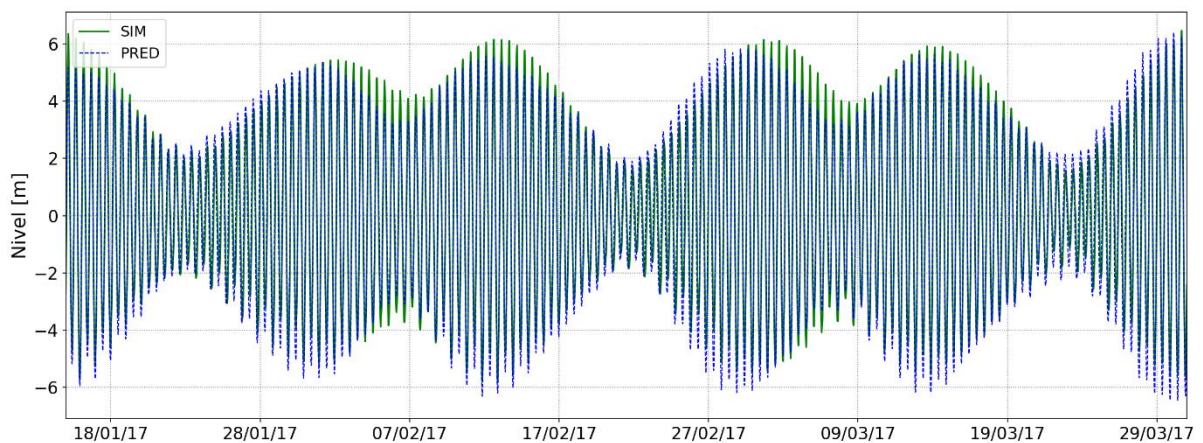


Figura 4.3. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 3 – Puerto Coyle.

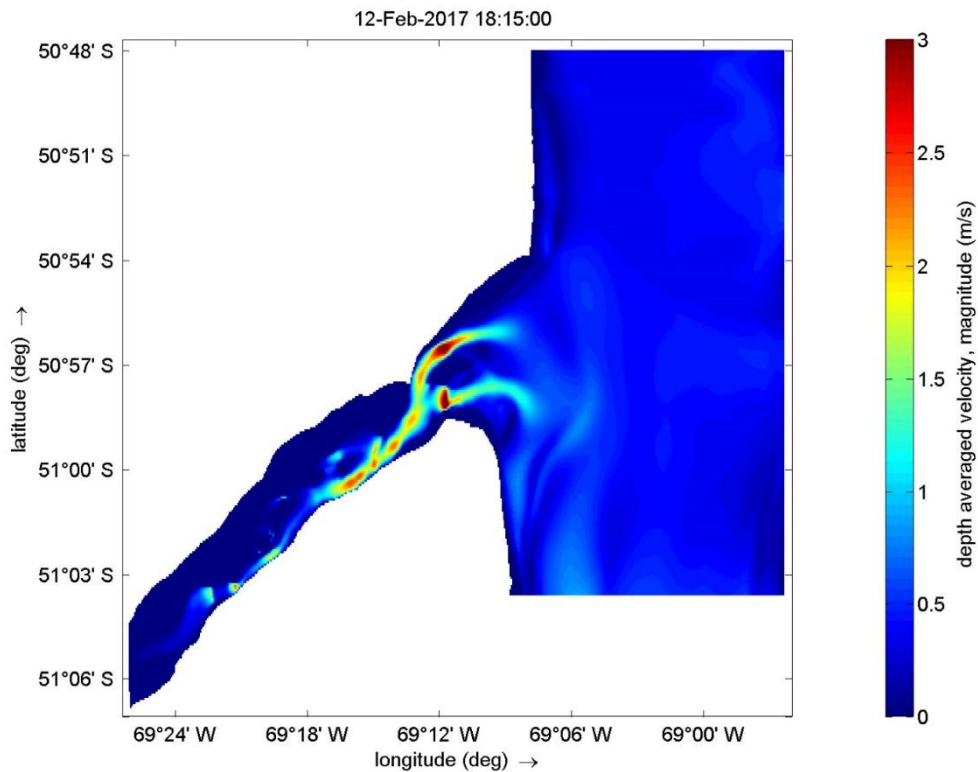


Figura 4.4. Velocidades instantáneas en el Estuario del río Coyle – Rank 3.

A diferencia del caso del estuario del río Santa Cruz, el estuario del río Coyle presenta muy bajas profundidades, alcanzando apenas los 6 m de profundidad en zonas de extensión reducida. Recién a las afueras del estuario es que se pueden obtener profundidades del orden de los 15 m. Si además se tiene en cuenta las profundidades mínimas alcanzadas en los ciclos de mayor amplitud, resulta que la totalidad del estuario cuenta con una profundidad inferior a los 2 m. Una caracterización detallada de las profundidades medias, mínimas y máximas del estuario del río Coyle se presenta de la Figura 4.5 a la Figura 4.7.

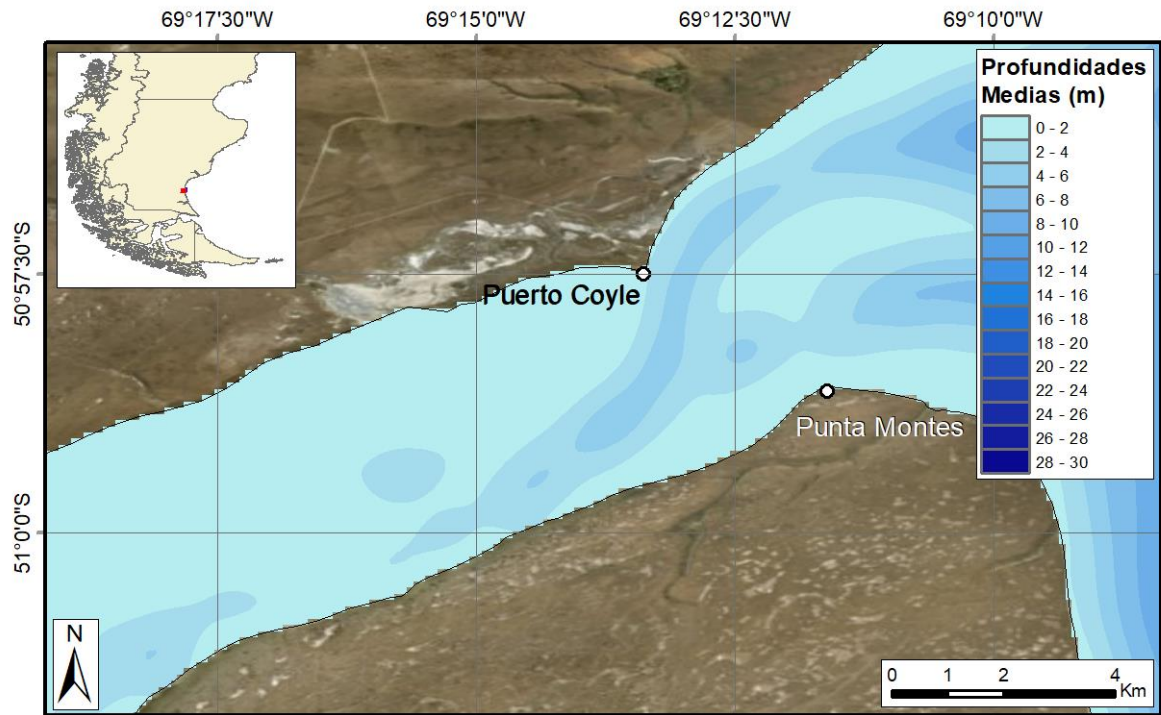


Figura 4.5. Profundidades medias en el estuario del río Coyle.

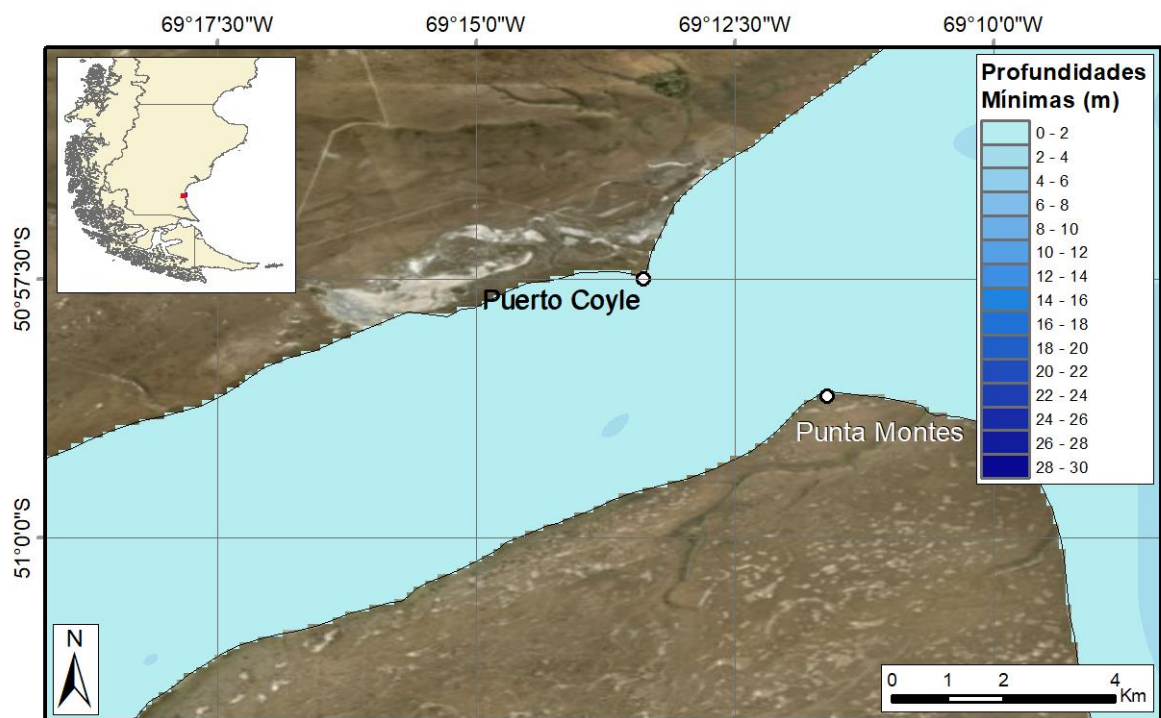


Figura 4.6. Profundidades mínimas en el estuario del río Coyle.

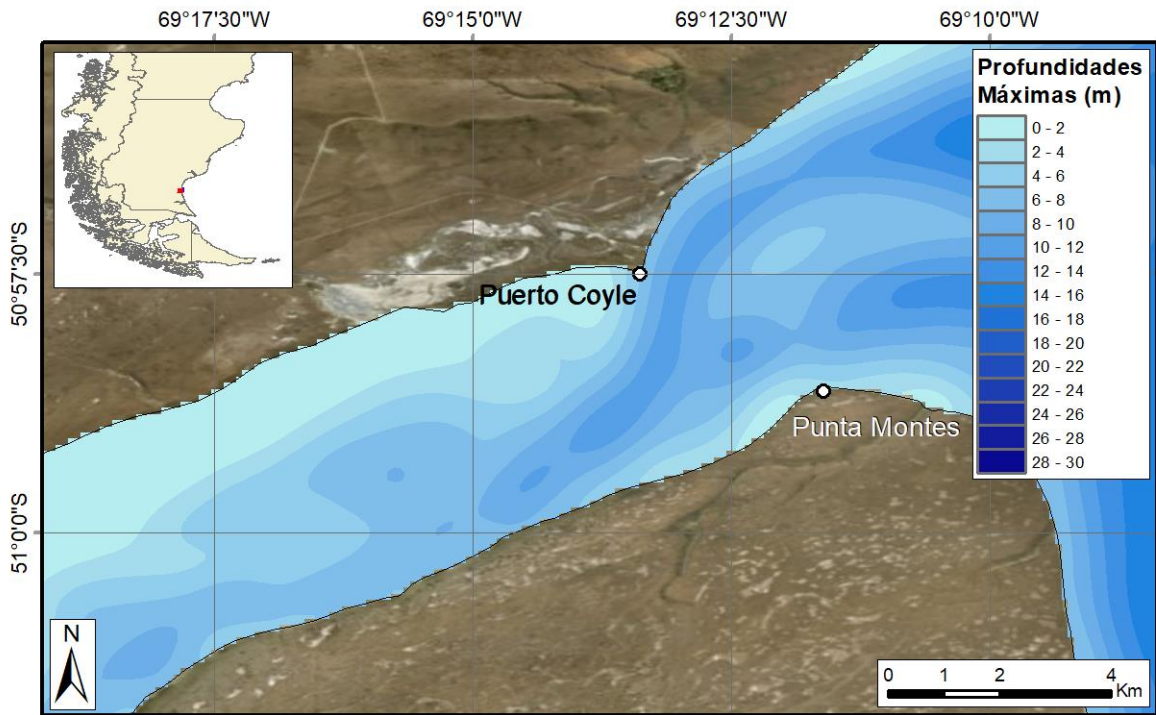


Figura 4.7. Profundidades máximas en el estuario del río Coyle.

En lo que respecta a las velocidades en el estuario del río Coyle, se obtuvieron resultados en algunas zonas de velocidades medias superiores a 1 m/s y velocidades máximas de hasta 3 m/s (por ejemplo en la boca del estuario) (Figura 4.8 y Figura 4.9).

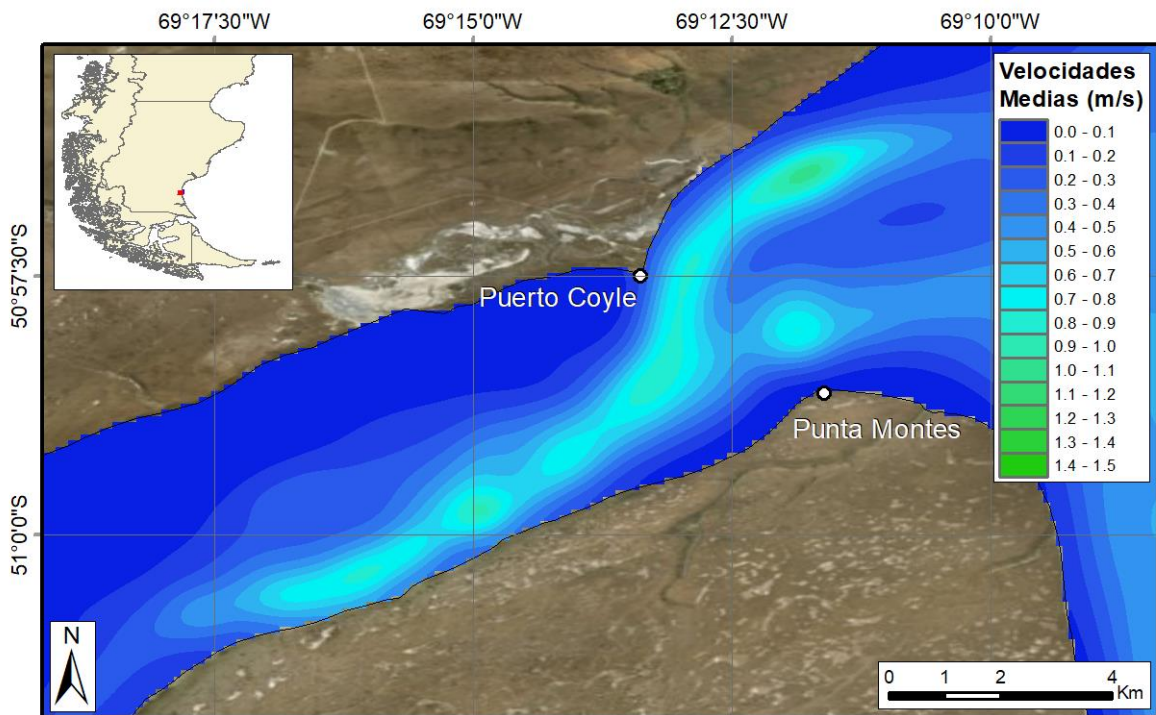


Figura 4.8. Velocidades medias en el estuario del río Coyle.

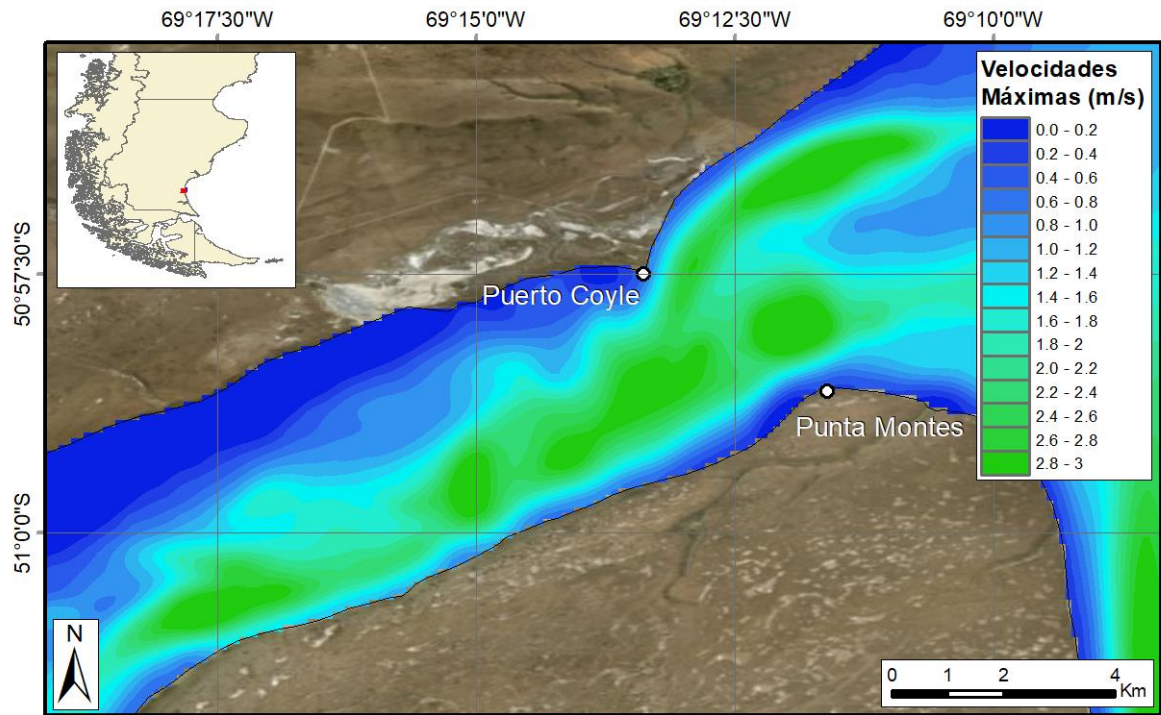


Figura 4.9. Velocidades máximas en el estuario del río Coyle.

Analizando las profundidades mínimas presentes en los puntos de velocidades medias mayores a 1 m/s, resulta evidente lo que se podía predecir de la observación de las imágenes anteriores: la totalidad de la superficie de interés tiene una profundidad menor a los 5 m. Sin embargo, cabe destacar la gran dimensión del área con velocidades medias en este rango (145 Ha) (Figura 4.10).

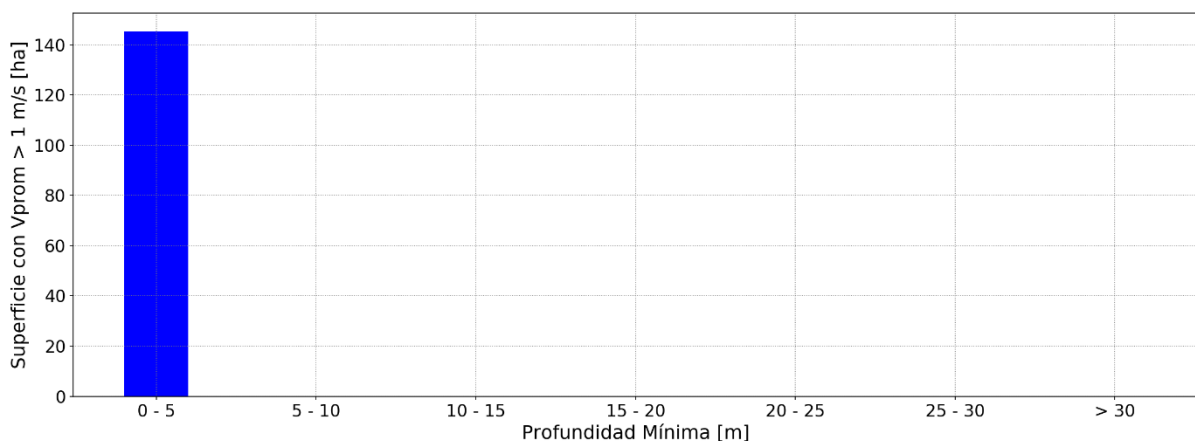


Figura 4.10. Histograma de superficies con velocidades medias anuales superiores a 1 m/s en función de la profundidad para el estuario del río Coyle.

En este caso las velocidades tienen una permanencia mucho mayor por sobre el umbral de 1 m/s, con períodos reducidos de bajas velocidades, de unos dos días. Se observa también una gran diferencia entre las velocidades de las dos partes del ciclo de marea, que llegan incluso a ser del 100% (Figura 4.11).

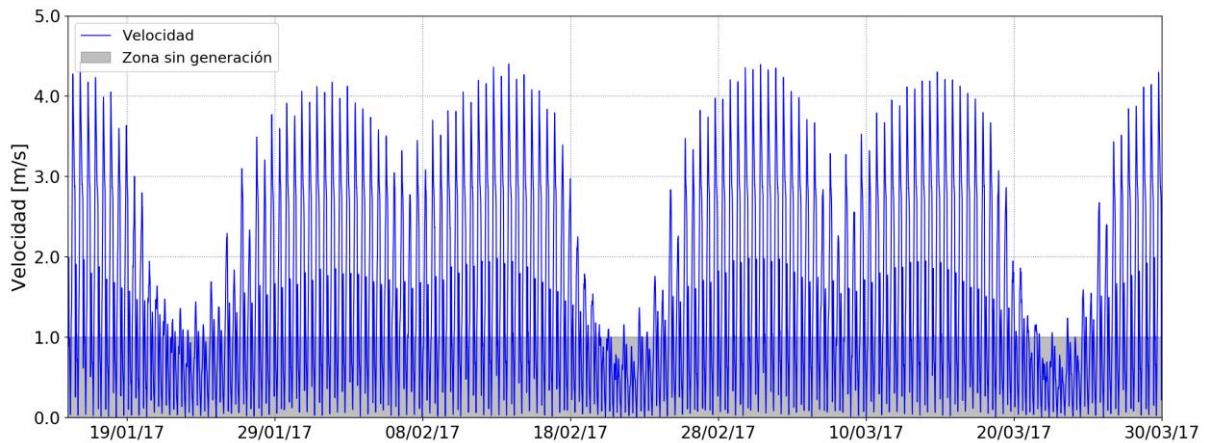


Figura 4.11. Evolución de la velocidad para el período modelado en un punto ubicado dentro de la zona de mayores velocidades. Estuario del río Coyle – Rank 3.

En lo que respecta a los volúmenes intercambiados en cada semi-ciclo, estos son la sexta parte de los que ocurren en el estuario del río Santa Cruz. A pesar de esto, el caudal que aporta el río Coyle es despreciable respecto de los volúmenes que ingresan por la marea (2.400 m³/s contra 5 m³/s para mareas de cuadratura)⁷ (Figura 4.12 y Figura 4.13, Tabla 4.2).

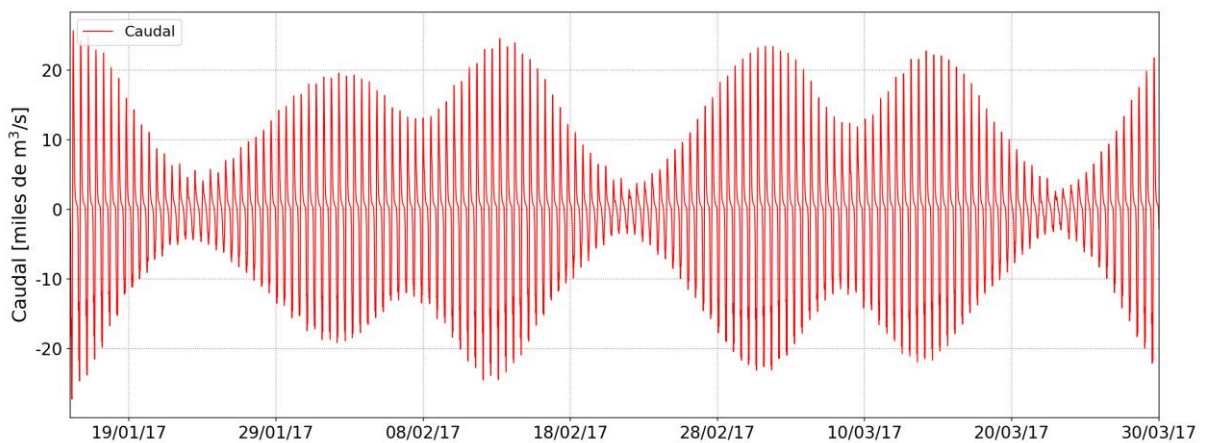


Figura 4.12. Evolución del caudal en la boca del Estuario del río Coyle – Rank 3.

⁷ Para hacer esta comparativa se tomó el menor caudal máximo del período modelado, ya que en los cambios de sentido de la corriente de marea el caudal es prácticamente nulo, pero eso ocurre durante breves instantes de tiempo.

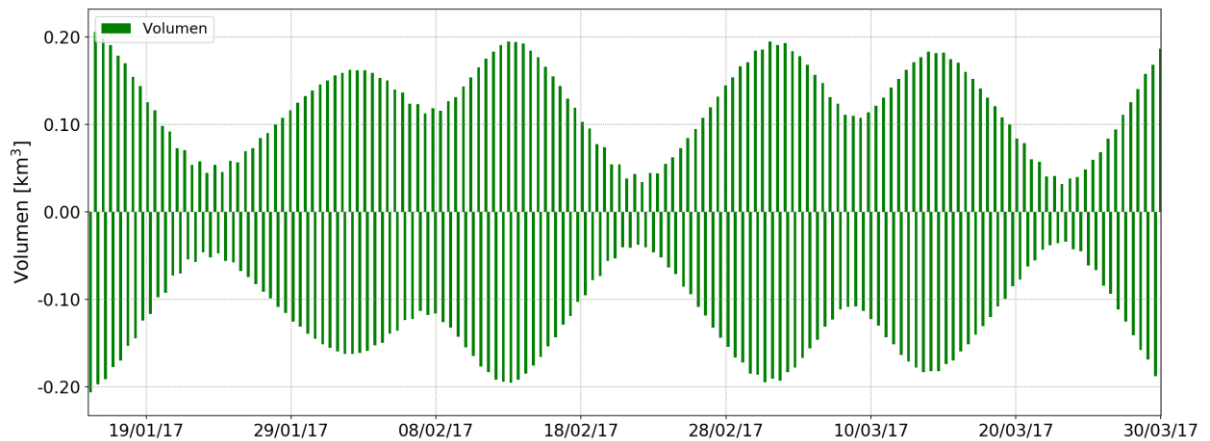


Figura 4.13. Evolución del volumen en la boca del Estuario del río Coyle – Rank 3.

Tabla 4.2 Volúmenes y caudales entrantes para el período modelado – Estuario del río Coyle.

Volumen máximo	0.20 km ³
Volumen mínimo	0.03 km ³
Volumen promedio	0.13 km ³
Caudal máximo	27,307 m ³ /s
Caudal promedio	5,572 m ³ /s

En cuanto a la potencia disponible, hay tres sectores en los que se alcanzan potencias del orden de 1,5 kW. Dos hacia la boca del estuario y uno pequeño en el interior, próximo a la margen en la que se ubica Punta Montes (Figura 4.14). Estos mismos tres sectores presentan energías medias anuales superiores a los 15 MW.hr/año/m² (Figura 4.15).

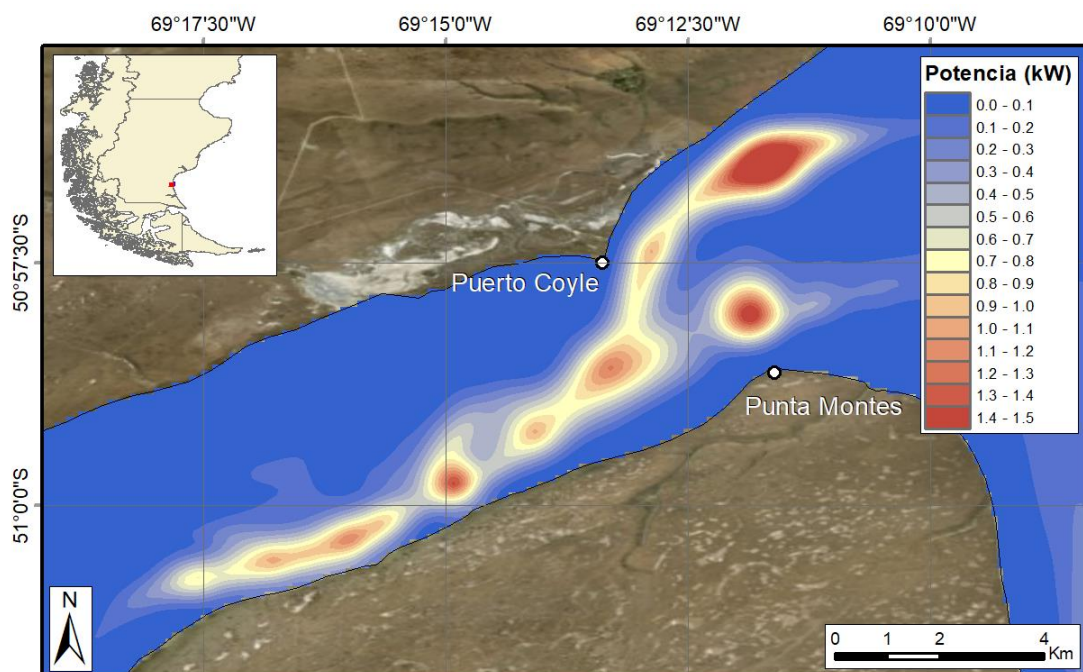


Figura 4.14. Potencia media anual por metro cuadrado de sección transversal a la corriente de marea en el estuario del río Coyle.

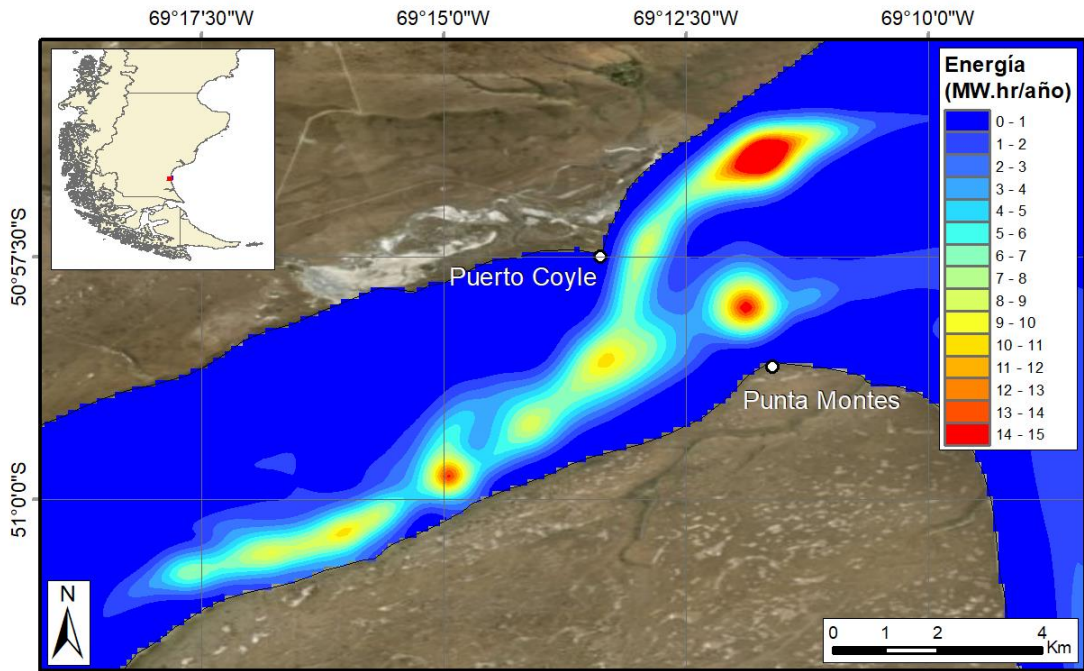


Figura 4.15. Energía media anual por metro cuadrado de sección transversal a la corriente de marea en el estuario del río Coyle.

En este caso los valores obtenidos resultan de mayor interés, puesto que unas 101 hectáreas poseen una energía disponible superior a los 10 MW.hr/año/m², de los cuales la gran mayoría (61 hectáreas) posee un valor superior a 15 MW.hr/año/m² (Figura 4.16).

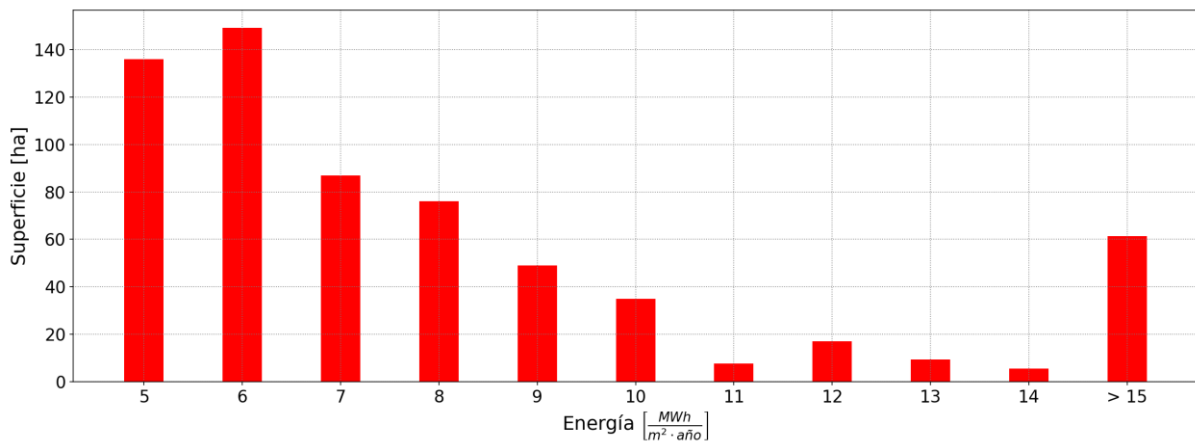


Figura 4.16. Histograma de superficies en función de la energía disponible en el estuario del río Coyle.

5. MODELO DEL ESTUARIO DEL RIO DESEADO

5.1. Introducción

El estuario del río Deseado se encuentra a 313 km al Noreste del estuario del río Santa Cruz, se extiende unos 108 km² en sentido Oeste-Este y recibe un caudal módulo de 5 m³/s. El estuario en sí mismo es una Reserva Natural Provincial declarada en 1977. La ciudad de Puerto Deseado cuenta con una población de 14,283 habitantes (INDEC, 2010) y se encuentra ubicada sobre la margen Norte y próxima a la desembocadura en el Océano Atlántico teniendo a la pesca comercial como principal actividad productiva.

5.2. Entorno del estuario del río Deseado

Para la generación de este modelo fue necesario refinar la grilla del Rank 1 en una relación de lados de 6 a 1. Luego se delimitaron los bordes abiertos, los cuales presentan una extensión de 150 km al Norte, 117 km al Este y 217 km al Sur (Figura 5.1).



Figura 5.1. Dominios del Rank 2 y Rank 3 – Estuario del río Deseado.

En este caso, el modelo cuenta con las siguientes características:

Tabla 5.1 Características de la simulación con el modelo local Rank 2 DE.

Parámetro	Valor
Período simulado	01/01/2017 – 31/03/2017
Discretización temporal [s]	30
Modelo de turbulencia	Funcionalidad HLES
Batimetría	Cartas H360 y H361 del SHN + Imágenes LANDSAT
Rango de profundidades [m]	0 - 117
Discretización espacial (tamaño aproximado de celdas) [m] x [m]	374 x 557
Cantidad máxima de elementos en la dirección M	291
Cantidad máxima de elementos en la dirección N	212
Cantidad máxima de elementos en la dirección K	1
Cantidad total de celdas	41,459
Coefficiente de estratificación del estuario (ED)	No aplica
Tiempo computacional [hs]	6.87

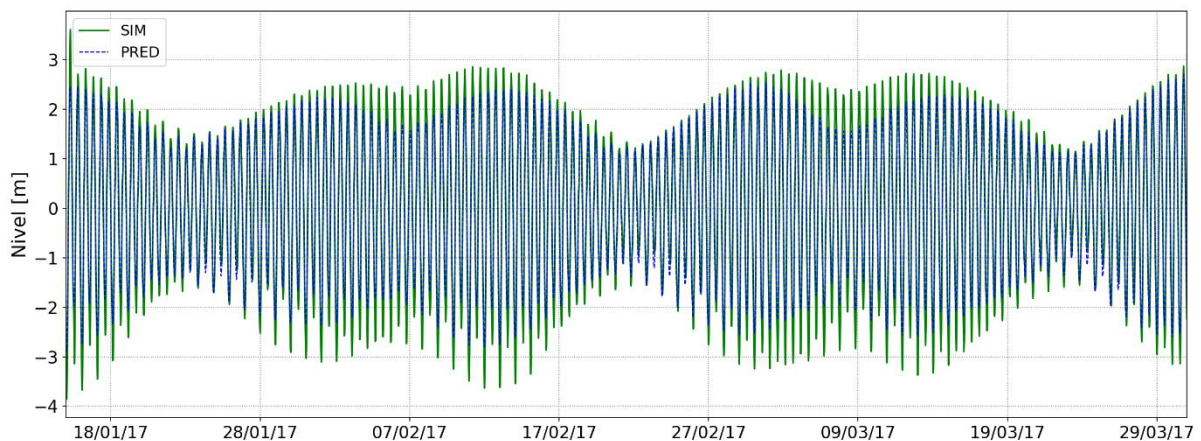


Figura 5.2. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 2 – Puerto Deseado.

Los indicadores de performance mostraron un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.12 m y un coeficiente de correlación R^2 de 0.97.

Puede observarse en las imágenes siguientes que en la boca del estuario se presentan amplitudes cercanas a los 6 metros en su punto máximo, coincidente con los valores de marea predicha. En este caso no se observan velocidades elevadas en la zona de interés, sino que

apenas se alcanzan los 1.5 m/s. Existen otros puntos con velocidades que superan los 3 m/s, como la Bahía del Oso Marino, al Sur del estuario.

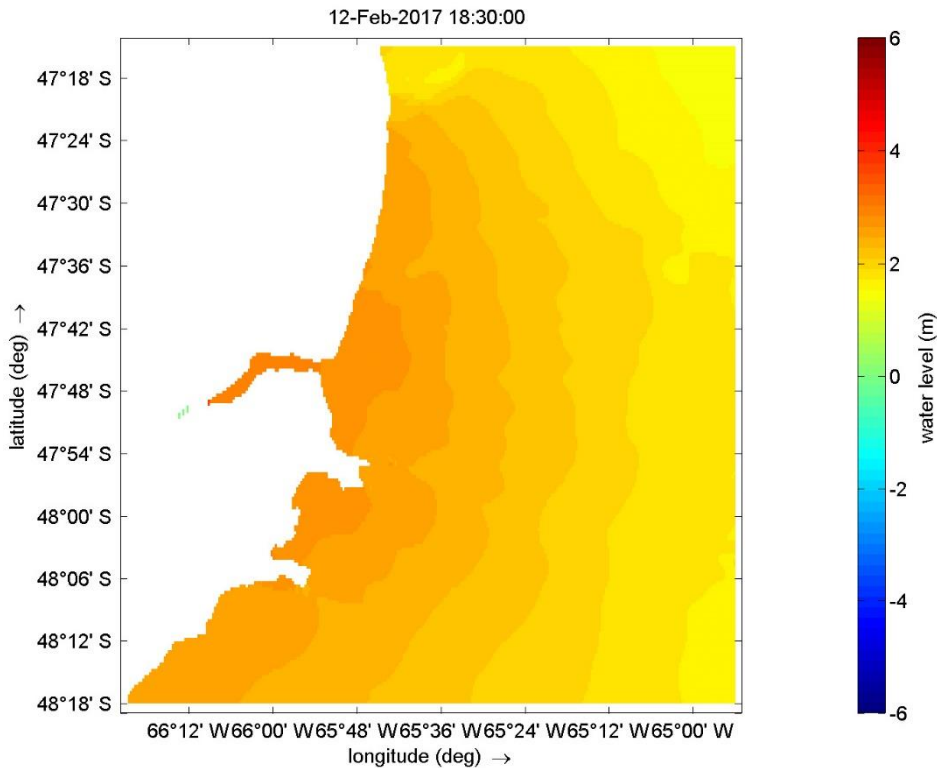


Figura 5.3. Amplitudes máximas en el estuario del río Deseado y su entorno.

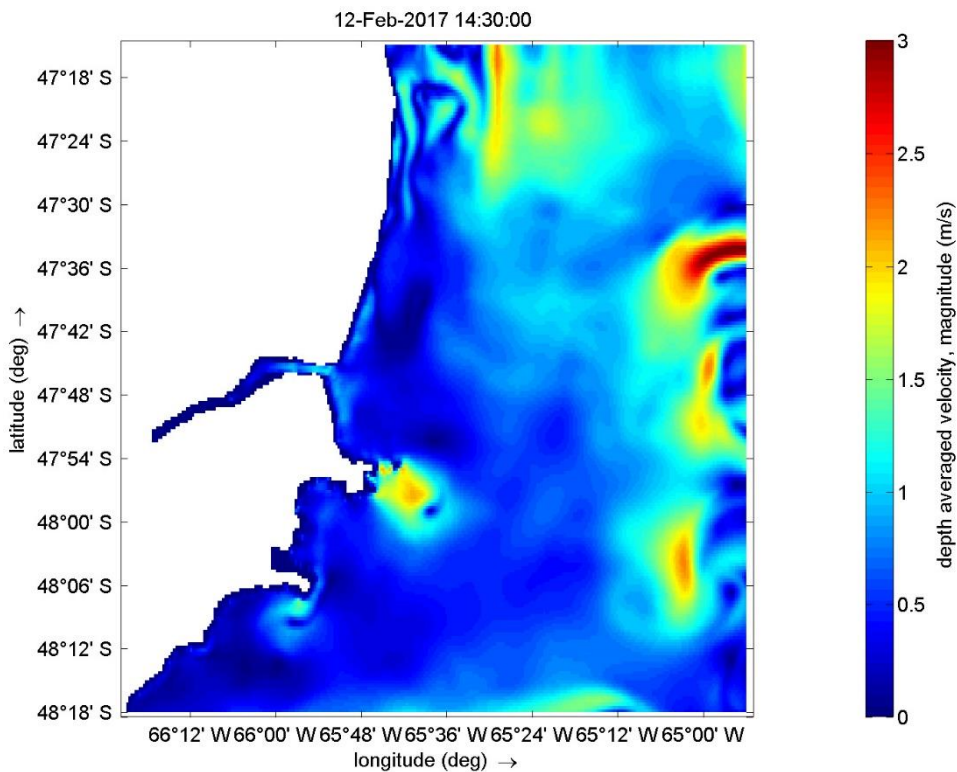


Figura 5.4. Velocidades instantáneas en el estuario del río Deseado y su entorno.

En esta última imagen pueden observarse algunas turbulencias poco consistentes con la realidad. Sin embargo, dado que estas ocurren alejadas del estuario, más bien próximas a los bordes abiertos, se considera que el interior del Rank 2 actúa de zona buffer o zona de amortiguamiento y permite mitigar las imperfecciones del propio modelo, verificándose que la onda que llega al estuario es similar a la onda predicha. Por otro lado, no se observan velocidades elevadas dentro del estuario, sino que apenas se supera el metro por segundo, aunque lo más probable es que esto se deba a errores de representación por el gran tamaño de celdas respecto del espacio que representan.

5.3. Estuario del río Deseado

Finalmente, para una mejor performance numérica, el dominio del Rank 3 del modelo del estuario del río Deseado es el que se presenta en la Figura 5.5.

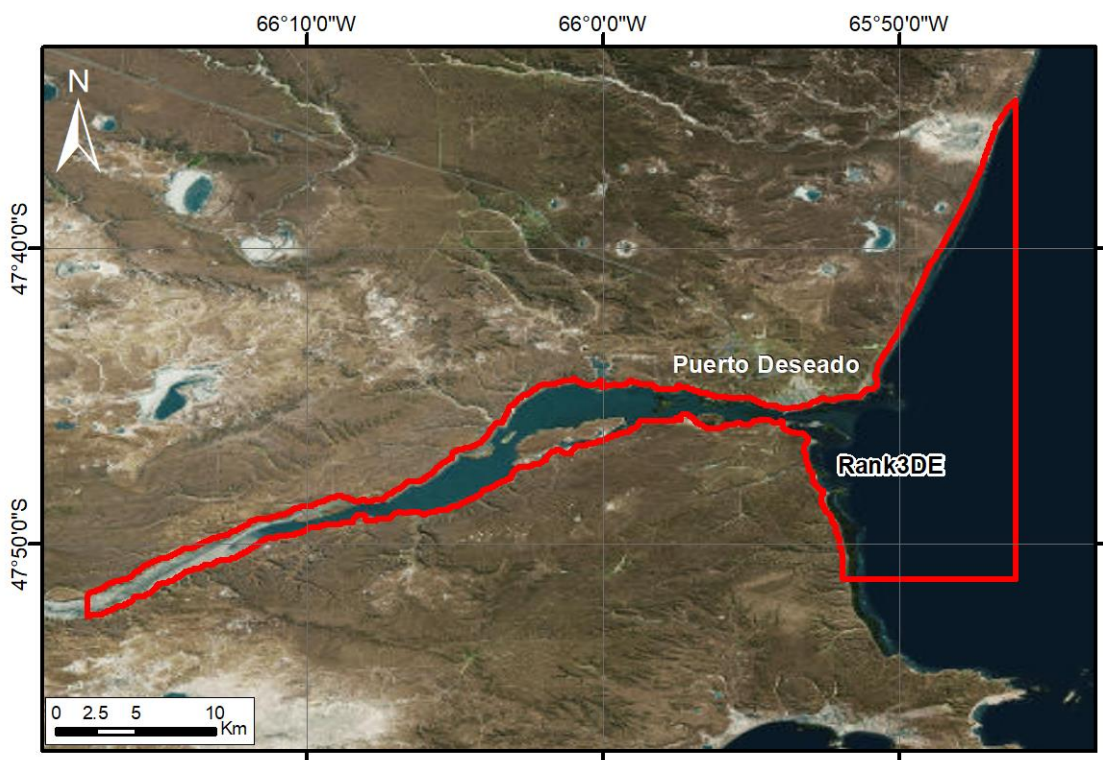


Figura 5.5. Dominio adoptado para el Rank 3 – Estuario del río Deseado.

Este Rank se encuentra delimitado por dos bordes abiertos, al Este y Sur, de 30 y 11 km de longitud respectivamente. En cuanto a su grilla, la misma mantiene una relación de 5 a 1 con su modelo padre y sus características se muestran a continuación.

Tabla 5.2 Características de la simulación con el modelo local Rank 3 DE.

Parámetro	Valor
Período simulado	01/01/2017 – 31/03/2017
Discretización temporal [s]	15
Modelo de turbulencia	Funcionalidad HLES
Batimetría	Batimetría del Rank 2 (interpolación TopoToRaster)
Rango de profundidades [m]	0 - 31
Discretización espacial (tamaño aproximado de celdas) [m]	75 x 111
Cantidad máxima de elementos en la dirección M	524
Cantidad máxima de elementos en la dirección N	293
Cantidad máxima de elementos en la dirección K	1
Cantidad total de celdas	26,490
Coefficiente de estratificación del estuario (ED)	8.31 (Bien Mezclado)
Tiempo computacional [hs]	24.38

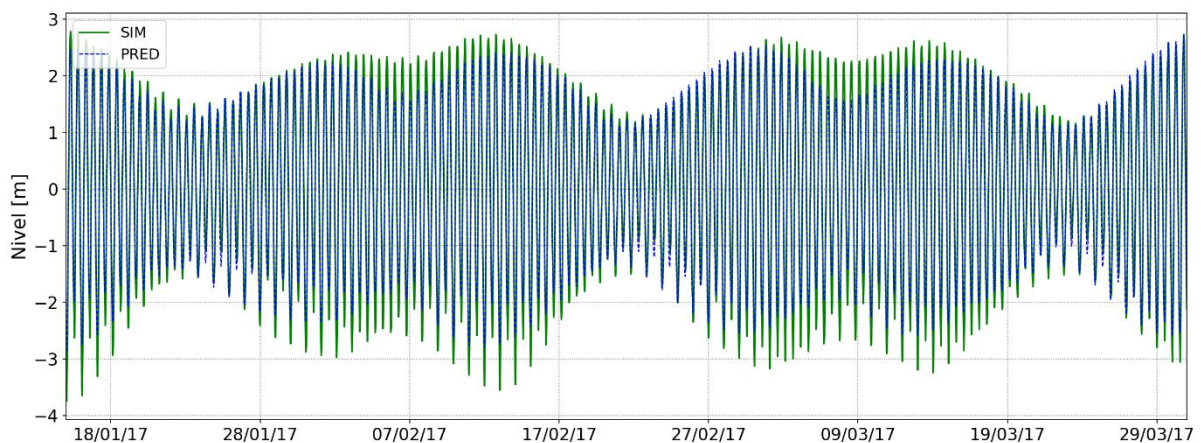


Figura 5.6. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 3 – Puerto Deseado.

Los indicadores de performance mostraron un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.10 m y un coeficiente de correlación R^2 de 0.96.

Por otro lado, en una primera observación de las velocidades instantáneas en el estuario, se destacan dos zonas con valores que alcanzan los 2.5 m/s (Figura 5.7).

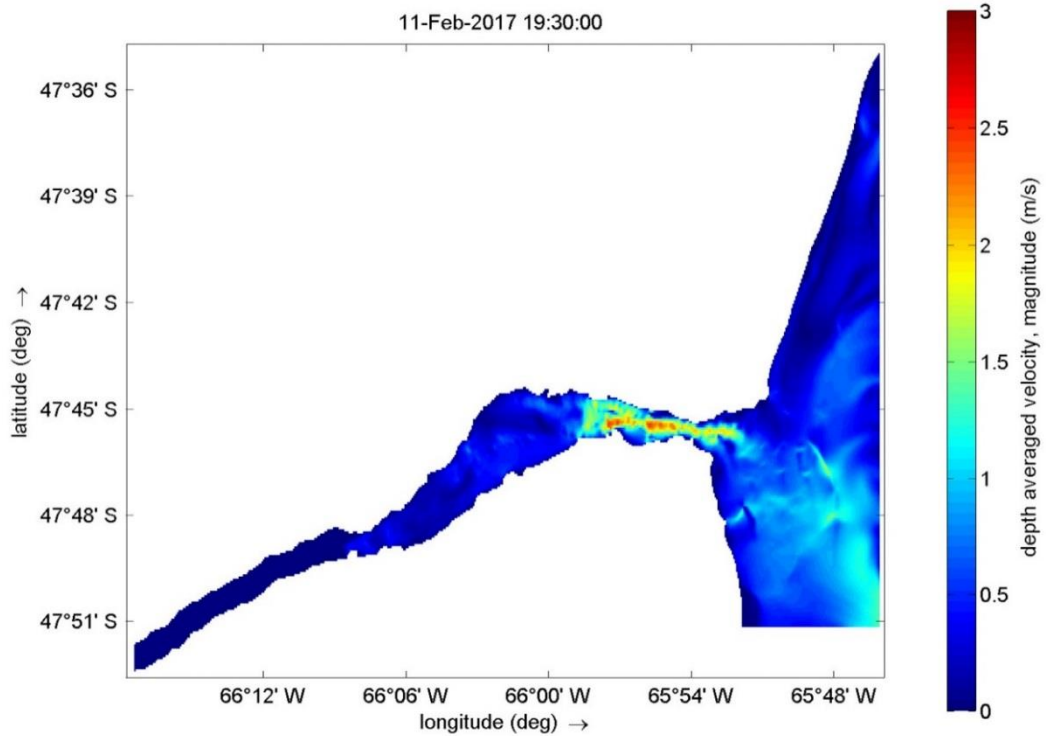


Figura 5.7. Velocidades instantáneas en el Rank 3 – Estuario del río Deseado.

Una de las características que llaman la atención es que el estuario mantiene un canal de acceso hasta su interior con buenas profundidades. Si bien se presentan tramos que varían considerablemente en su anchura, el canal central mantiene profundidades de unos 20 metros aproximadamente, alternando zonas que superan los 25 metros (Figura 5.8 a Figura 5.10).

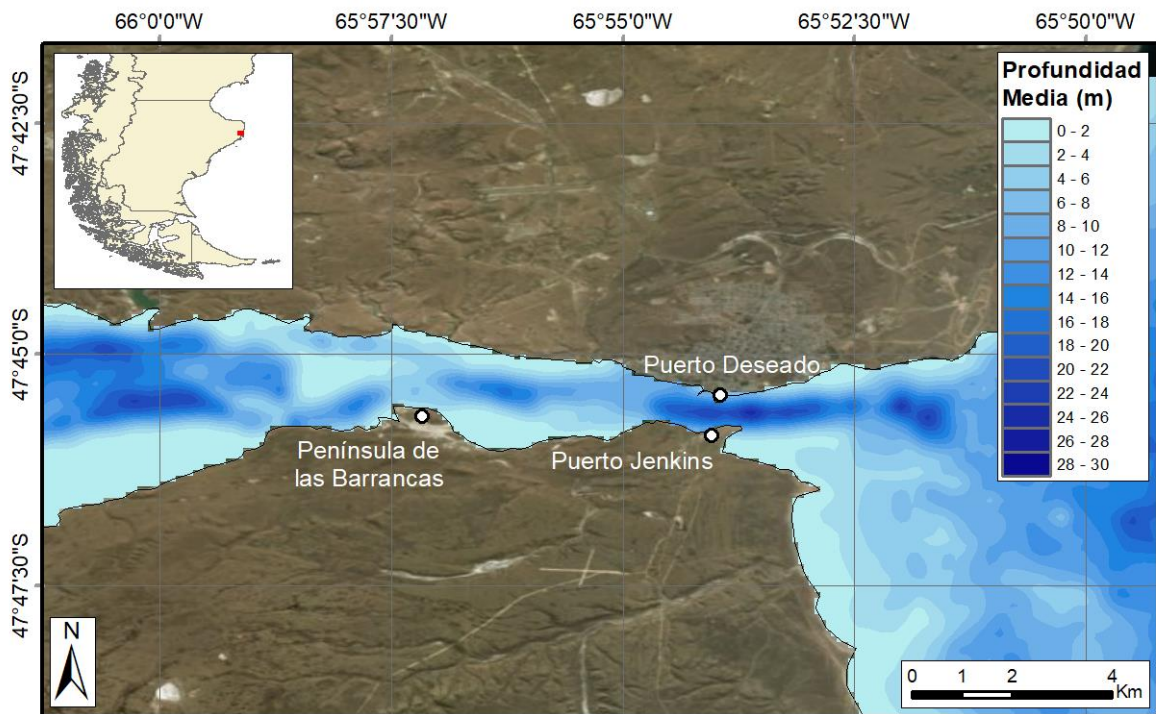


Figura 5.8. Profundidades medias en el estuario del río Deseado.

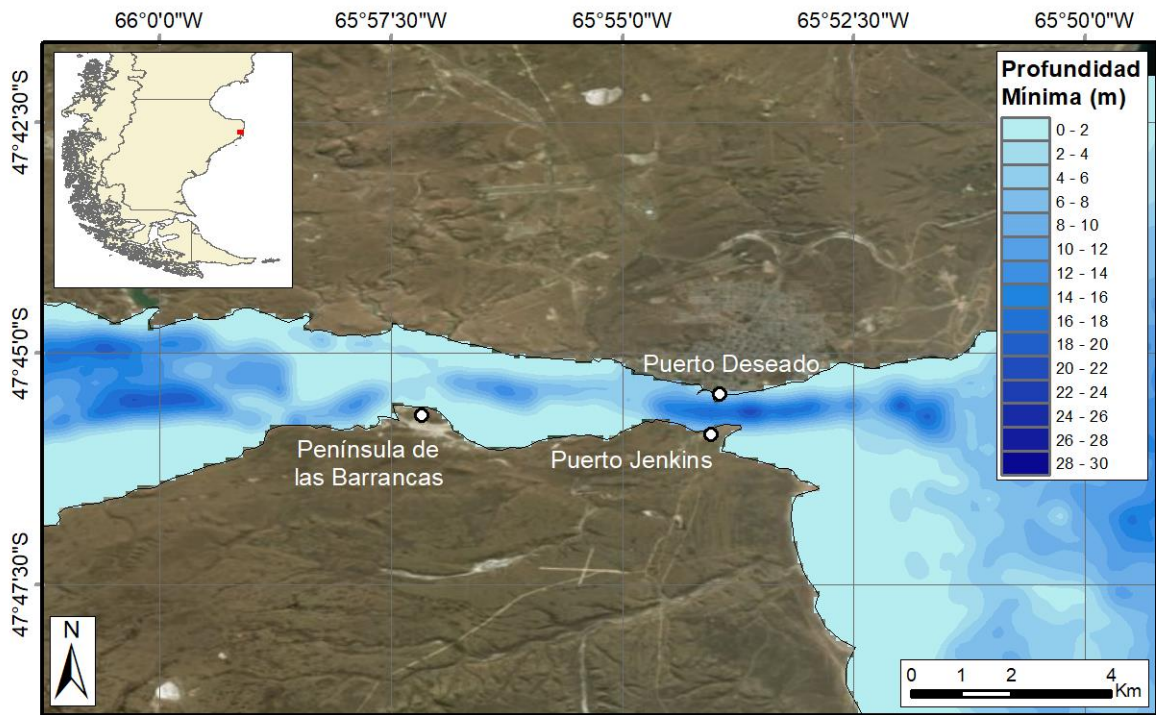


Figura 5.9. Profundidades mínimas en el estuario del río Deseado.



Figura 5.10. Profundidades máximas en el estuario del río Deseado.

En lo que respecta a las velocidades los resultados obtenidos son mejores que en el caso de Punta Quilla alcanzando los 1.5 m/s en valor medio, lo que da indicios de que los valores máximos obtenidos (del orden de los 3 m/s) se alcanzan con cierta regularidad (Figura 5.11,

Figura 5.12 y Figura 5.14). Estos valores no se condicen geográficamente con los puntos de mayores profundidades, pero logran compartir una zona situada entre Puerto Deseado y la Península de las Barrancas.

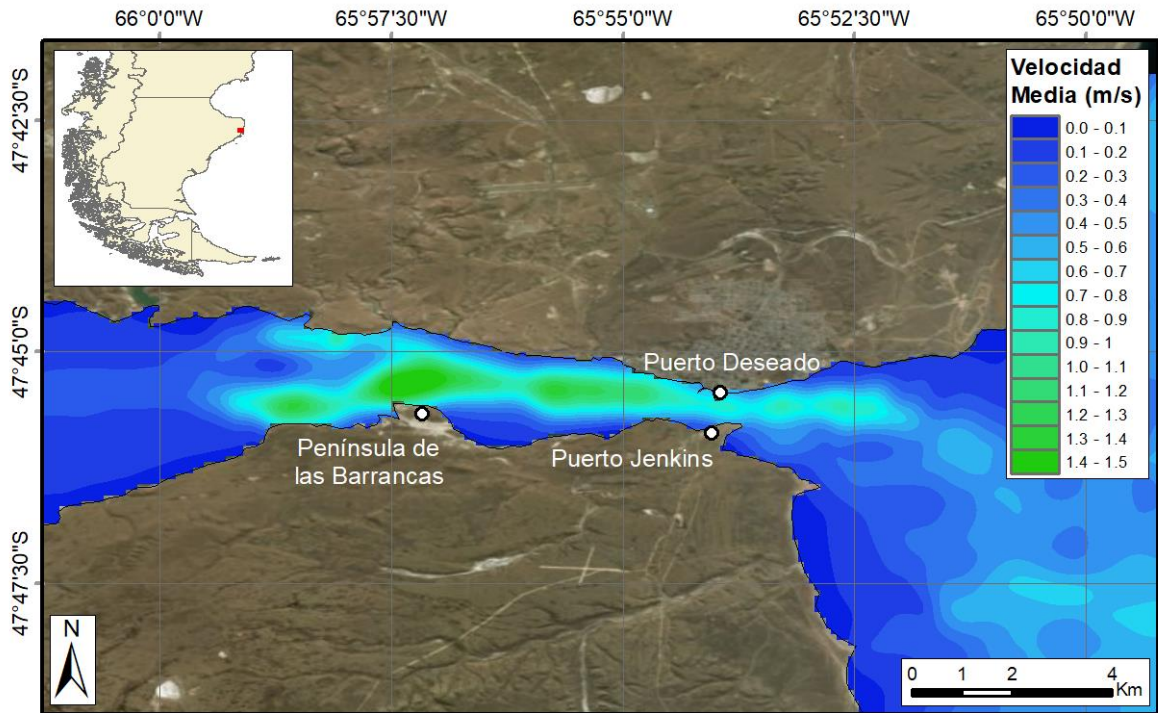


Figura 5.11. Velocidades medias en el estuario del río Deseado.

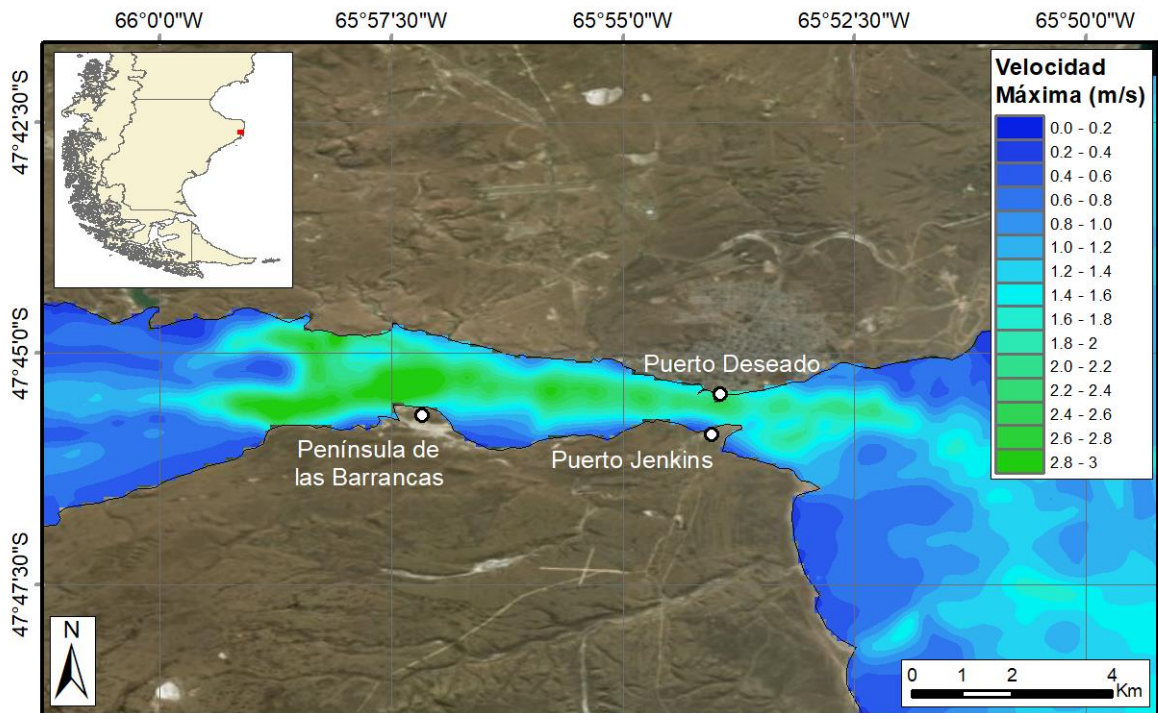


Figura 5.12. Velocidades máximas en el estuario del río Deseado.

Las velocidades obtenidas con las simulaciones son consistentes con los resultados de las observaciones realizadas por Speroni et al. (2005).

En el histograma siguiente puede observarse que la zona compartida entre elevadas velocidades y profundidades adecuadas no supera los 20 metros de profundidad, contando con unas 14 hectáreas en el rango 15 – 20 metros.

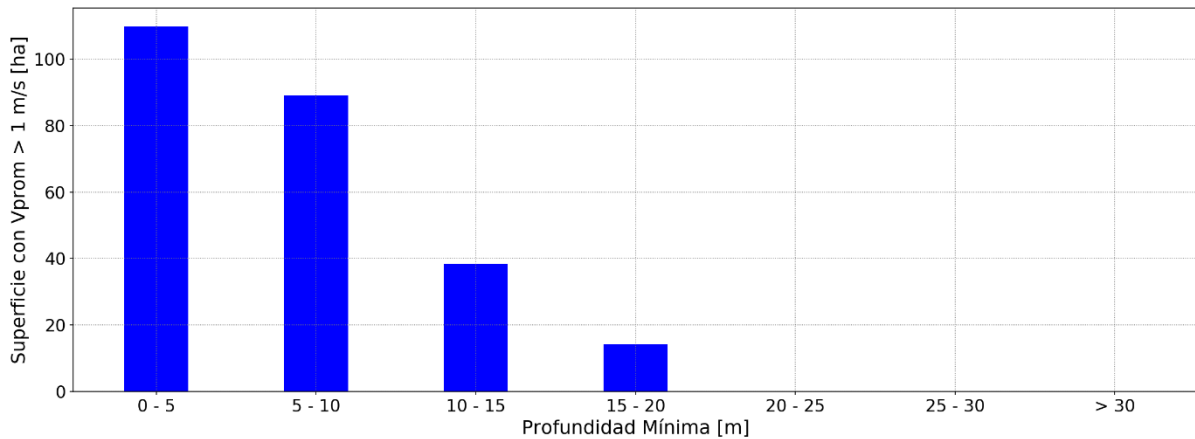


Figura 5.13. Histograma de superficies con velocidades medias anuales superiores a 1 m/s en función de la profundidad para el estuario del río Deseado.

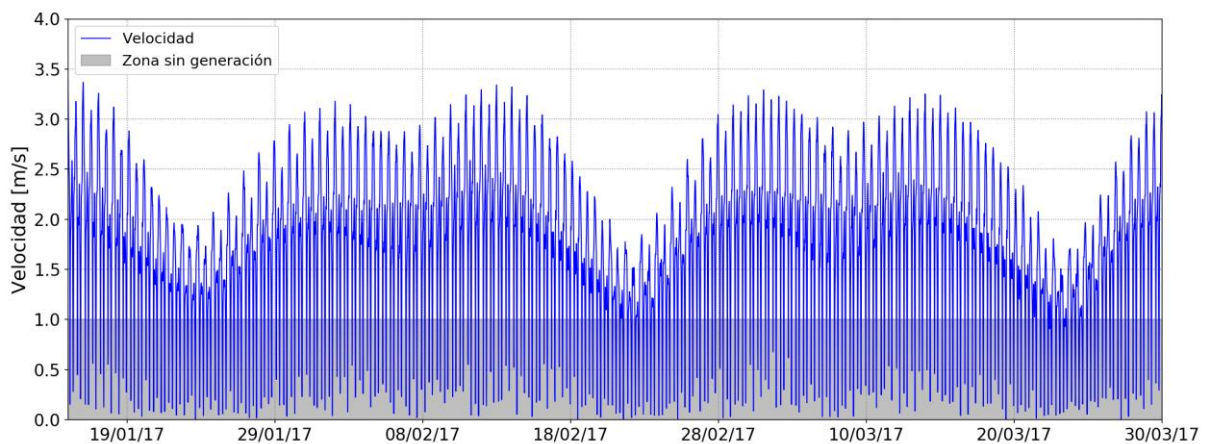


Figura 5.14. Evolución de la velocidad para el período modelado en un punto ubicado dentro de la zona de mayores velocidades. Estuario del río Deseado – Rank 3.

De la Figura 5.14 resulta que las velocidades en los puntos de mayor energía superan en algunos casos los 3 m/s, pero presenta diferencias notables (cercano al 30% en el caso de mareas de sicigias) respecto de los valores alcanzados en las dos partes del ciclo. Por otro lado, no se observan períodos en los que se esté por debajo del valor umbral, salvo para momentos en los que ocurren cambios de dirección de la corriente de marea.

Nuevamente se verifica que el caudal aportado por el río es despreciable respecto del volumen que ingresa con cada ciclo de marea (menor al 1‰)⁸. Por su parte, los volúmenes

⁸ Para hacer esta comparativa se tomó el menor caudal máximo del período modelado, ya que en los cambios de sentido de la corriente de marea el caudal es prácticamente nulo, pero eso ocurre durante breves instantes de tiempo.

intercambiados en cada semi-ciclo son un 40% menor que para el estuario del río Coyle, pero en este caso las variaciones presentan menores rangos de amplitud (Figura 5.15, Figura 5.16 y Tabla 5.3).

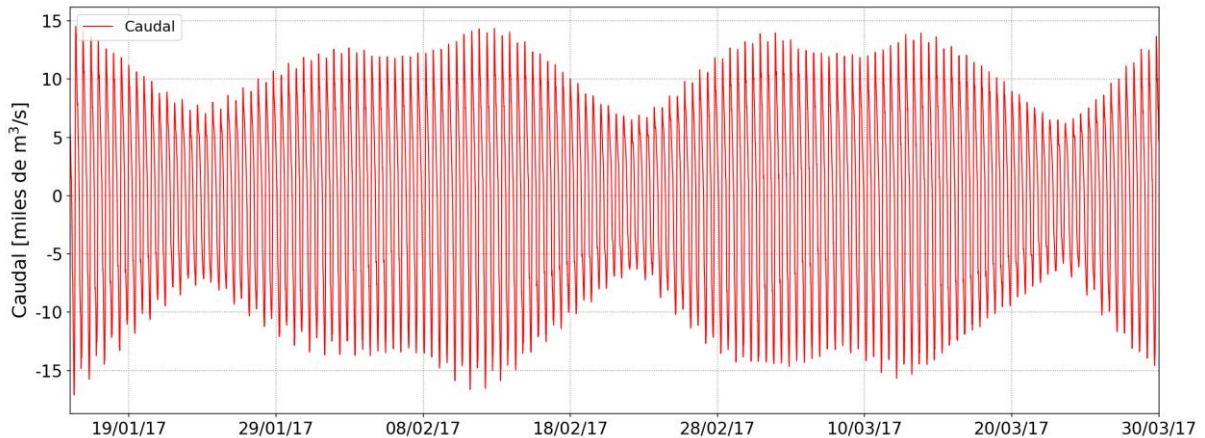


Figura 5.15. Evolución del caudal en la boca del Estuario del río Deseado – Rank 3.

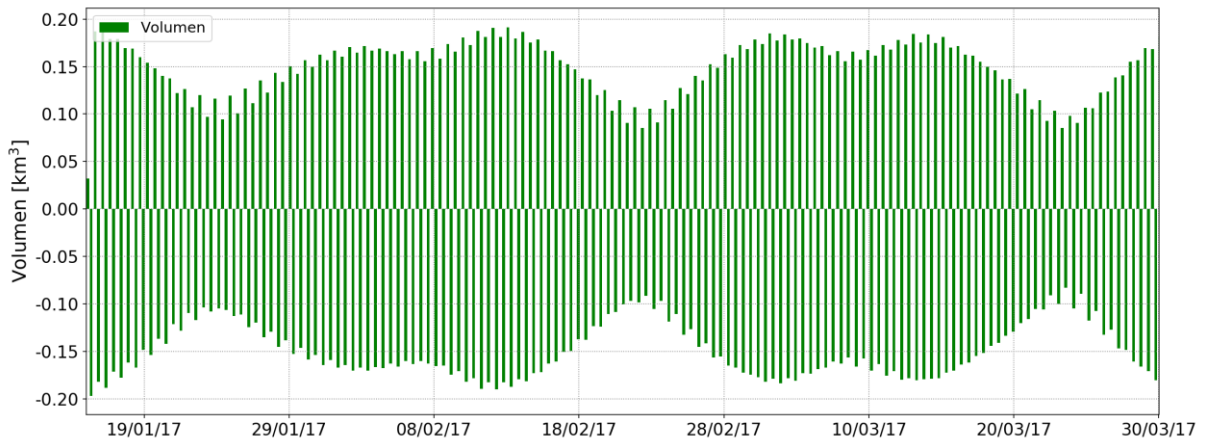


Figura 5.16. Evolución del volumen en la boca del Estuario del río Deseado – Rank 3.

Tabla 5.3 Volúmenes y caudales entrantes para el período modelado – Estuario del río Deseado.

Volumen máximo	0.20 km ³
Volumen mínimo	0.08 km ³
Volumen promedio	0.15 km ³
Caudal máximo	17,108 m ³ /s
Caudal promedio	6,731 m ³ /s

Los elevados valores de velocidades medias en el interior del estuario, presentan zonas se obtienen potencias que superan los 1.5 kW/m², al igual que valores de energía disponible superiores a los 15 MW.hr/año/m² (Figura 5.17 y Figura 5.18).

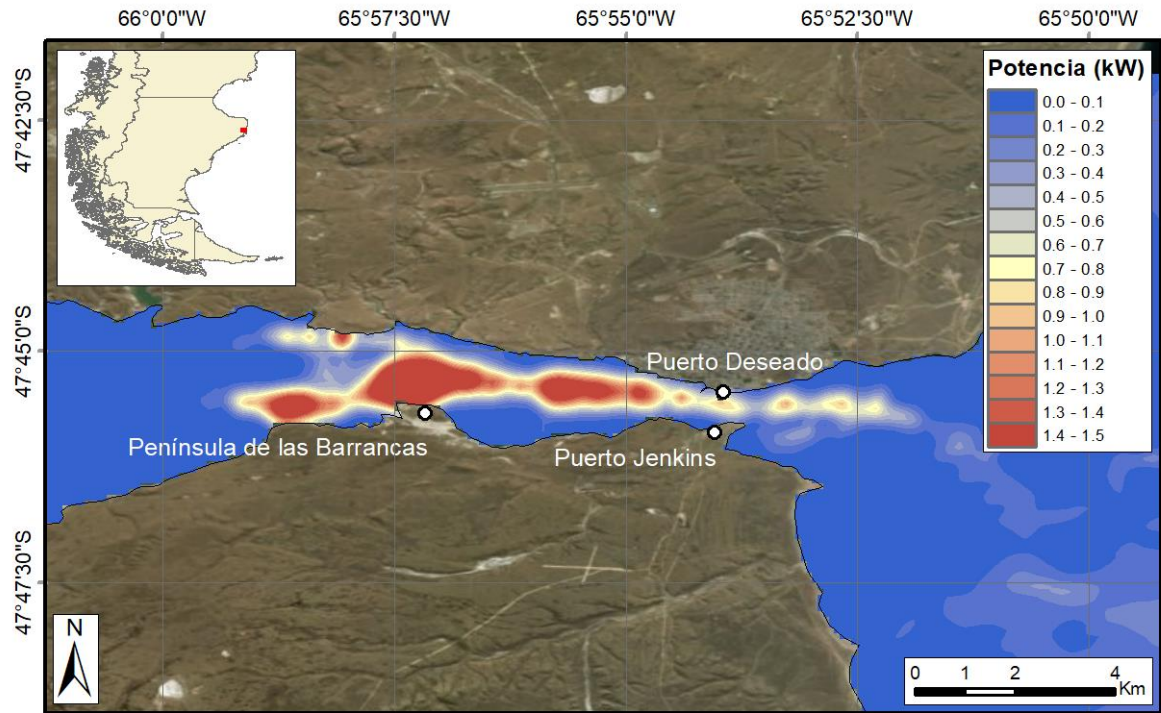


Figura 5.17. Potencia media anual por metro cuadrado de sección transversal a la corriente de marea en el estuario del río Deseado.

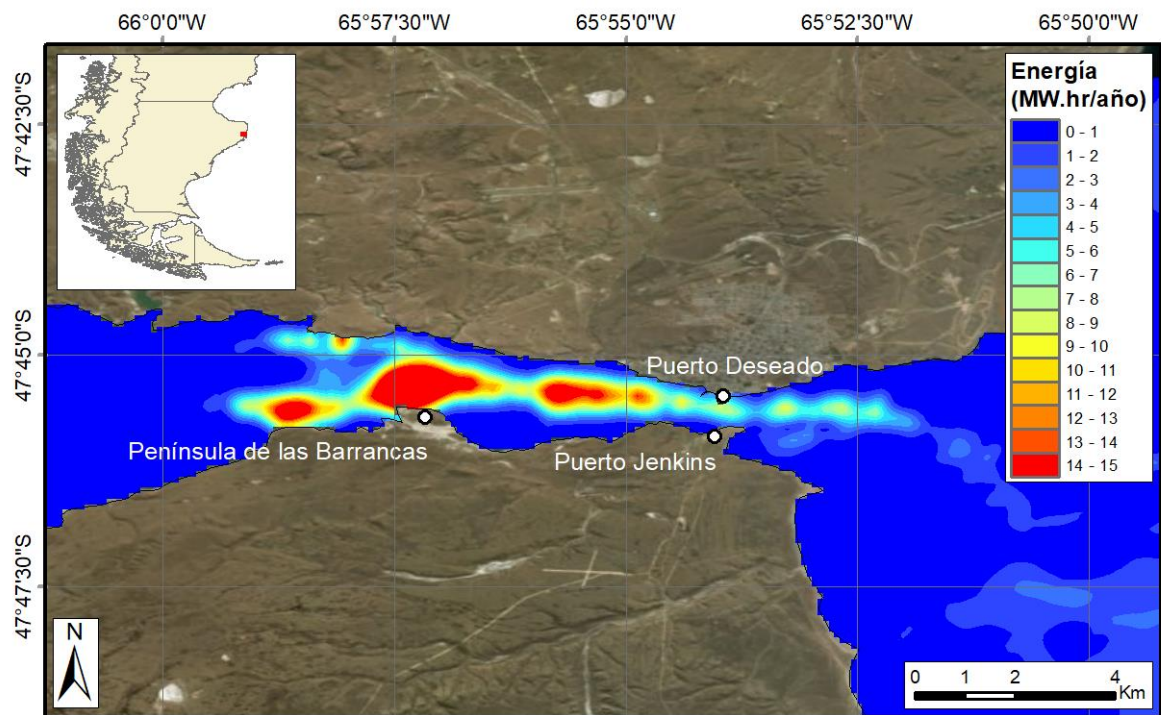


Figura 5.18. Energía media anual por metro cuadrado de sección transversal a la corriente de marea en el estuario del río Deseado.

Como en el caso del estuario del río Coyle, resulta que los valores energéticos obtenidos son mucho más importantes que las zonas con profundidades adecuadas. En este caso, se obtuvieron casi 100 hectáreas únicamente para la categoría de más de 15 MW.hr/año/m², lo

que amerita generar un segundo histograma para poder apreciar mejor la distribución interna del área que la abarca (Figura 5.19 y Figura 5.20).

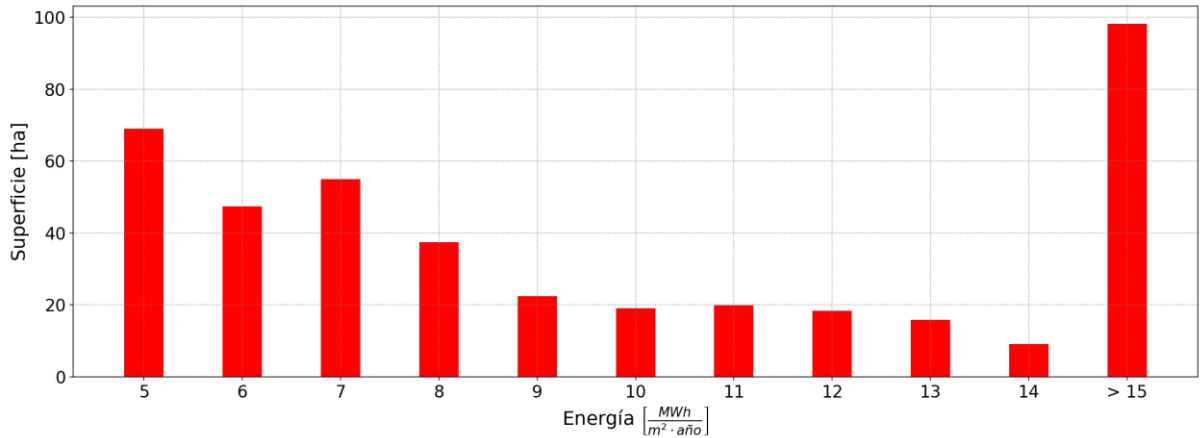


Figura 5.19. Histograma de superficies en función de la energía disponible en el estuario del río Deseado.

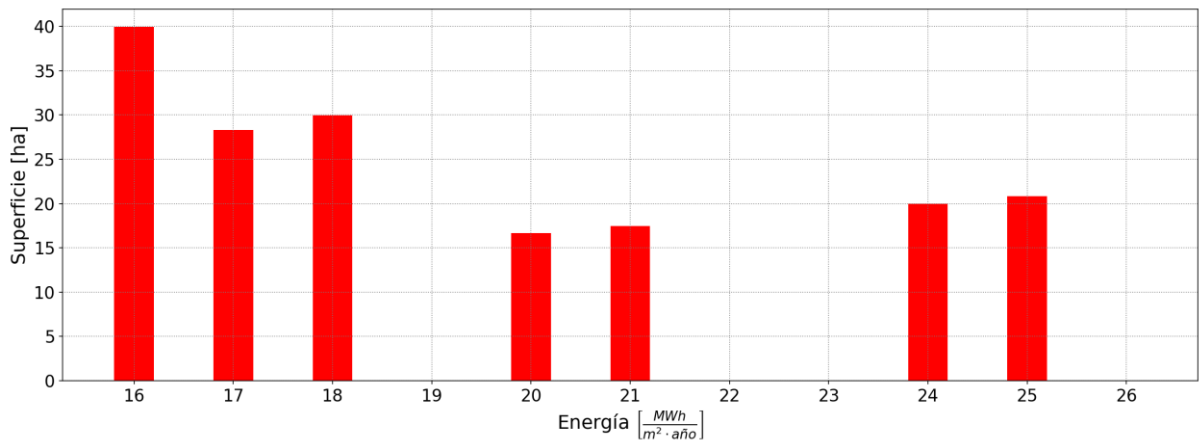


Figura 5.20. Histograma de detalle de superficies en función de la energía disponible en el estuario del río Deseado para la categoría de superficies con más de 15 MW.hr/año/m².

En este último histograma se destaca la existencia de unas casi 41 hectáreas para el rango 24 – 25 MW.hr/año/m² y otras 34 para el rango 20 – 21 MW.hr/año/m².

6. MODELO DEL ESTUARIO DEL RIO GRANDE

6.1. Introducción

El estuario de Río Grande ocupa una superficie de 16 km² en sentido Suroeste-Noreste, recibiendo un caudal módulo de 45 m³/s que lo hace el río más caudaloso de la isla de Tierra del Fuego.

En su desembocadura en el Océano Atlántico, sobre ambas márgenes, se encuentra la ciudad de Río Grande, de unos 66,475 habitantes (INDEC, 2010), siendo la ciudad más poblada de la Provincia de Tierra del Fuego, Antártida e Islas del Atlántico Sur, e incluso la ciudad más poblada de la isla teniendo en cuenta al sector perteneciente a Chile. Sus principales actividades económicas son las industrias electrónica y fabril, y en sus alrededores también se desarrolla la actividad petrolera.

6.2. Entorno del estuario del río Grande

Para la confección de este modelo fue necesario efectuar un refinamiento con una relación de lados de 7 a 1 con respecto al Rank 1 (Tabla 6.1). A su vez, se redujeron los bordes abiertos a dos, con extensiones de 236 km al Norte y 117 km al Este (Figura 6.1).

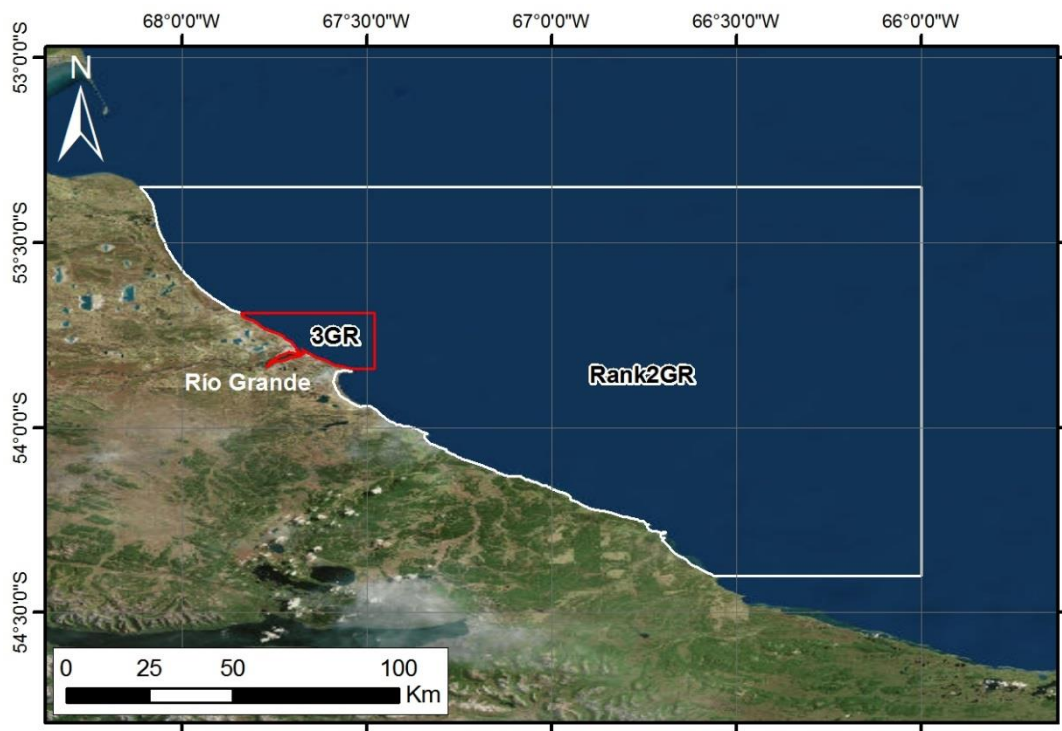


Figura 6.1. Dominios del Rank 2 y Rank 3 – Estuario del río Grande.

Las características de este modelo se muestran a continuación:

Tabla 6.1 Características de la simulación con el modelo local Rank 2 GR.

Parámetro	Valor
Período simulado	01/01/2017 – 31/03/2017
Discretización temporal [s]	30
Modelo de turbulencia	Funcionalidad HLES
Batimetría	Cartas H4 y 462 del SHN + Imágenes LANDSAT
Rango de profundidades [m]	0 - 94
Discretización espacial (tamaño aproximado de celdas) [m] x [m]	330 x 557
Cantidad máxima de elementos en la dirección M	283
Cantidad máxima de elementos en la dirección N	188
Cantidad máxima de elementos en la dirección K	1
Cantidad total de celdas	33,247
Coefficiente de estratificación del estuario (ED)	No aplica
Tiempo computacional [hs]	6.43

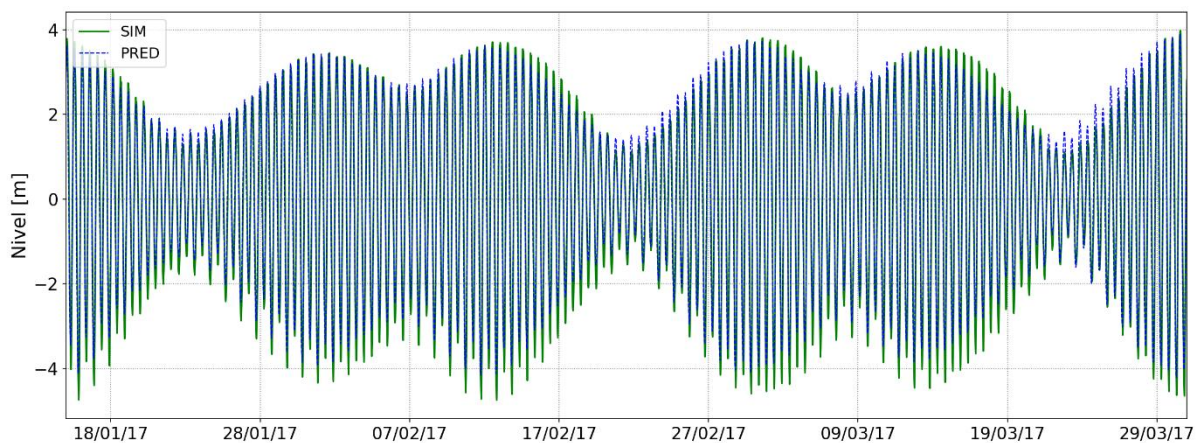


Figura 6.2. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 2 – Puerto de Río Grande.

Los indicadores de performance mostraron un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.26 m y un coeficiente de correlación R^2 de 0.95.

Como se indica en las imágenes siguientes, este estuario presenta amplitudes de casi 8 metros, pero con velocidades que apenas superan 1 m/s, incluso dentro del estuario. Las

bajas velocidades se deben a la pobre representación del estuario dentro del dominio del modelo.

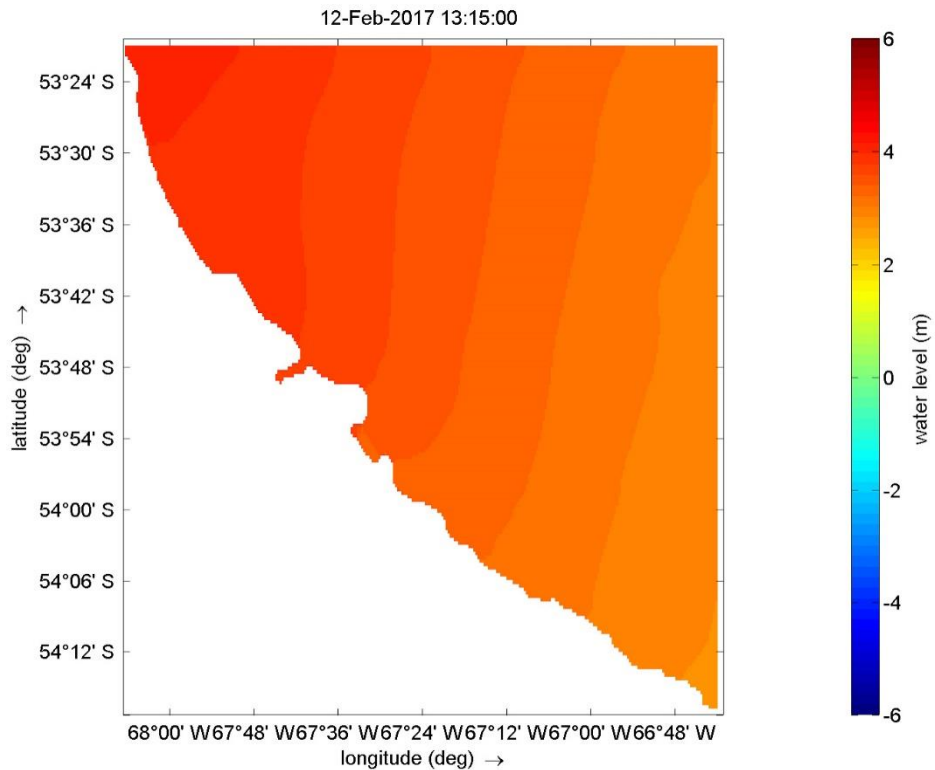


Figura 6.3. Amplitudes máximas en el estuario del río Grande y su entorno.

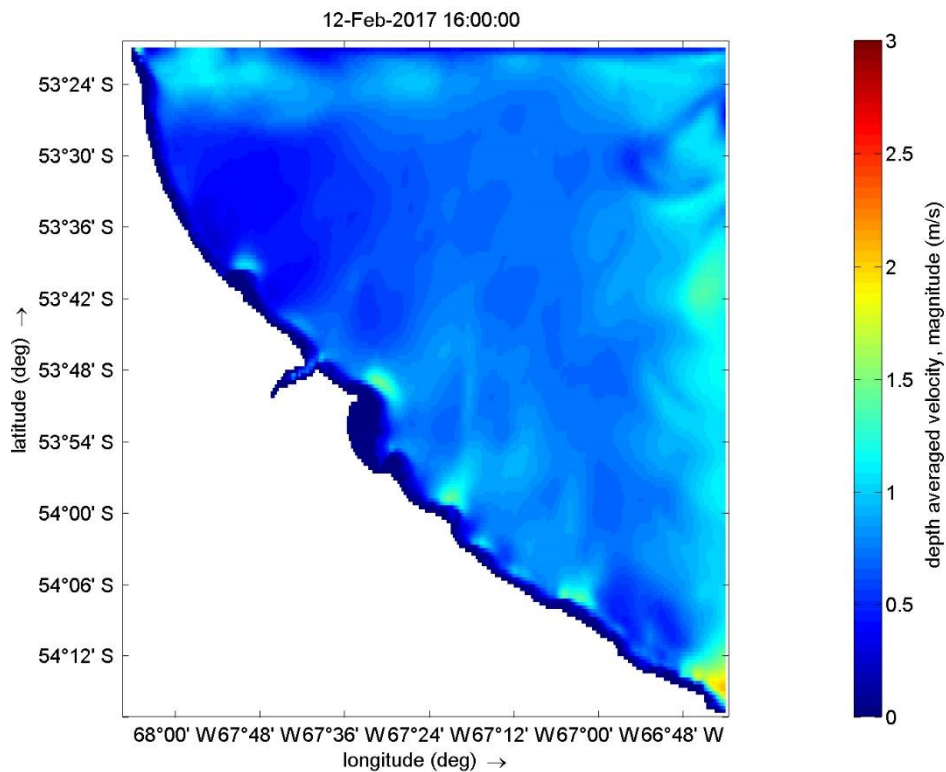


Figura 6.4. Velocidades instantáneas en el estuario del río Grande y su entorno.

6.3. Estuario del río Grande

En este caso la grilla se obtuvo refinando 10 veces aquella utilizada en el Rank 2. Finalmente, para una mejor performance numérica, el dominio de este modelo resultó el que se muestra en la Figura 6.5. Se mantienen sólo dos bordes abiertos, al Norte y al Este, de 23 y 11 km de extensión respectivamente.

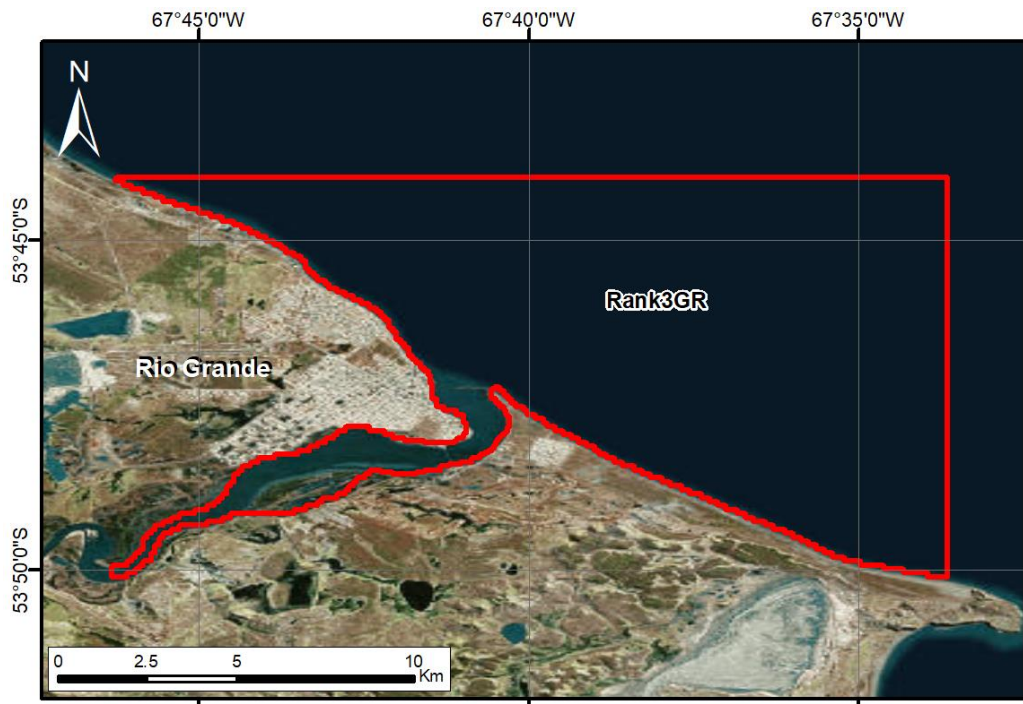


Figura 6.5. Dominio adoptado para el Rank 3 – Estuario del río Grande.

Las características de este modelo se muestran a continuación:

Tabla 6.2 Características de la simulación con el modelo local Rank 3 GR.

Parámetro	Valor
Período simulado	01/01/2017 – 31/03/2017
Discretización temporal [s]	30
Modelo de turbulencia	Funcionalidad HLES
Batimetría	Batimetría del Rank 2 con interpolación con TopoToRaster
Rango de profundidades [m]	0 - 38
Discretización espacial (tamaño aproximado de celdas) [m] x [m]	33 x 56
Cantidad máxima de elementos en la dirección M	424
Cantidad máxima de	204

<i>elementos en la dirección N</i>	
<i>Cantidad máxima de elementos en la dirección K</i>	1
<i>Cantidad total de celdas</i>	51,100
<i>Coefficiente de estratificación del estuario (ED)</i>	13.84 (Bien Mezclado)
<i>Tiempo computacional [hs]</i>	23.85

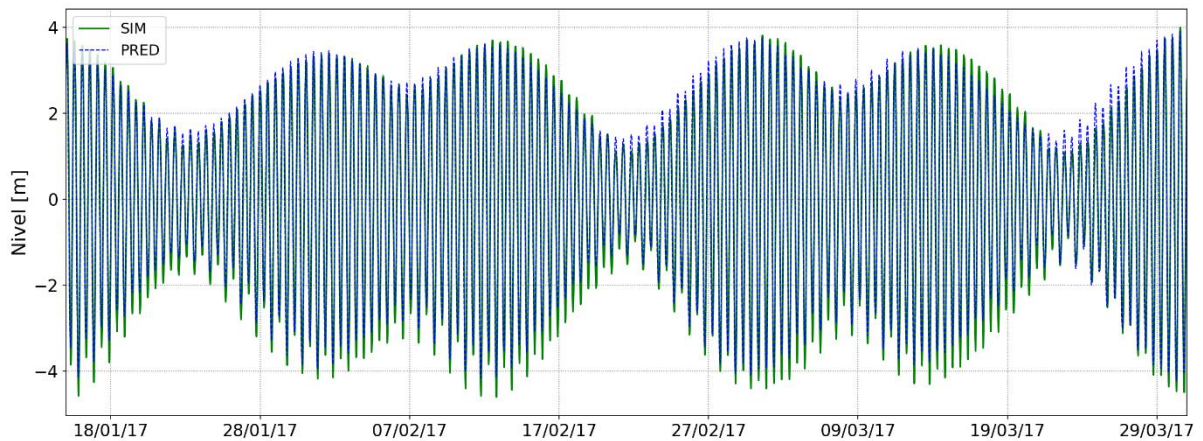


Figura 6.6. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 3 – Puerto de Río Grande.

Los indicadores de performance mostraron un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.21 m y un coeficiente de correlación R^2 de 0.95.

En este caso sí se pueden observar elevadas velocidades (2.5 – 3 m/s) en la boca del estuario, llegando incluso hasta el exterior de este (Figura 6.7).

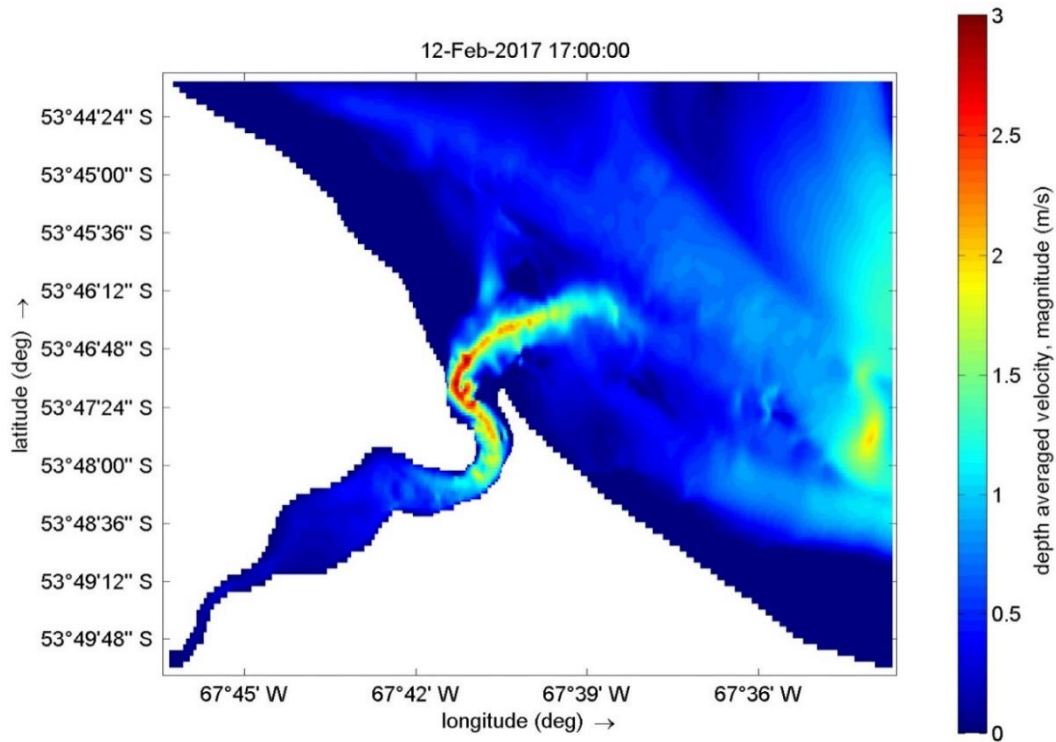


Figura 6.7. Velocidades instantáneas en el Rank 3 – Estuario del río Grande.

Tal como ocurre en el caso del río Coyle, resulta que las profundidades medias del estuario de Río Grande son muy bajas, rondando en los 7 metros en el canal central. Para las amplitudes más bajas, el río reduce su cauce junto con las profundidades en forma considerable, manteniéndose por debajo de los 2 metros (Figura 6.8 a Figura 6.10).

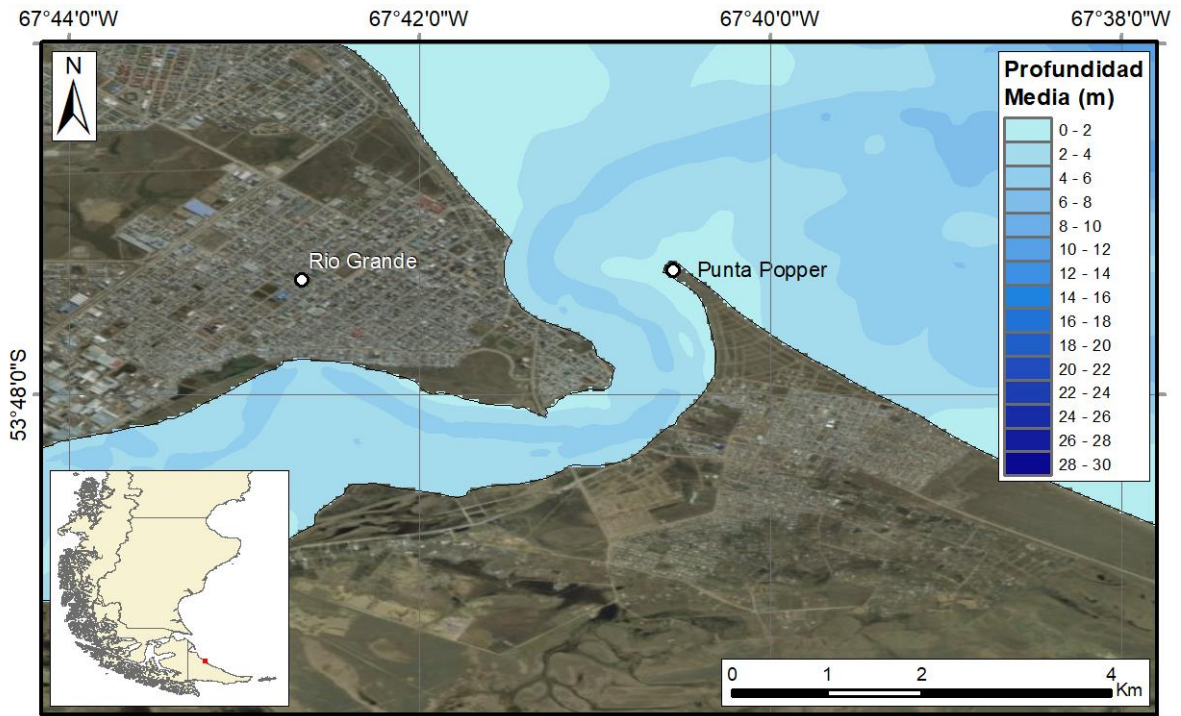


Figura 6.8. Profundidades medias en el estuario del río Grande.

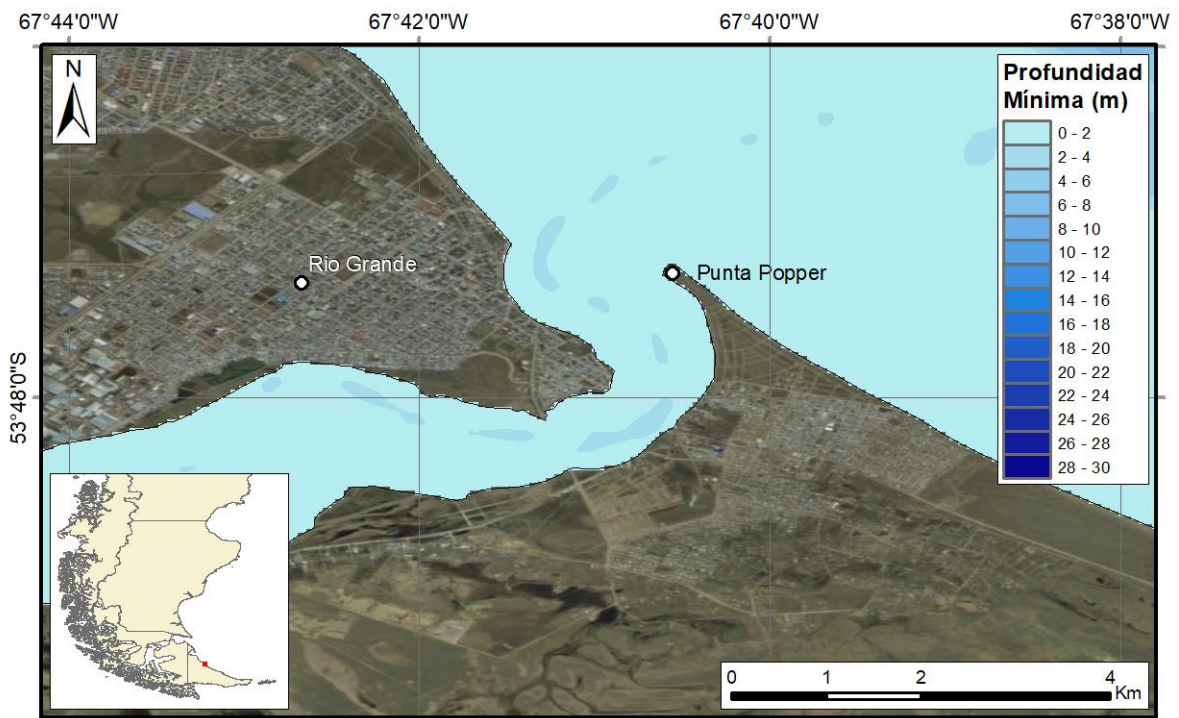


Figura 6.9. Profundidades mínimas en el estuario del río Grande.

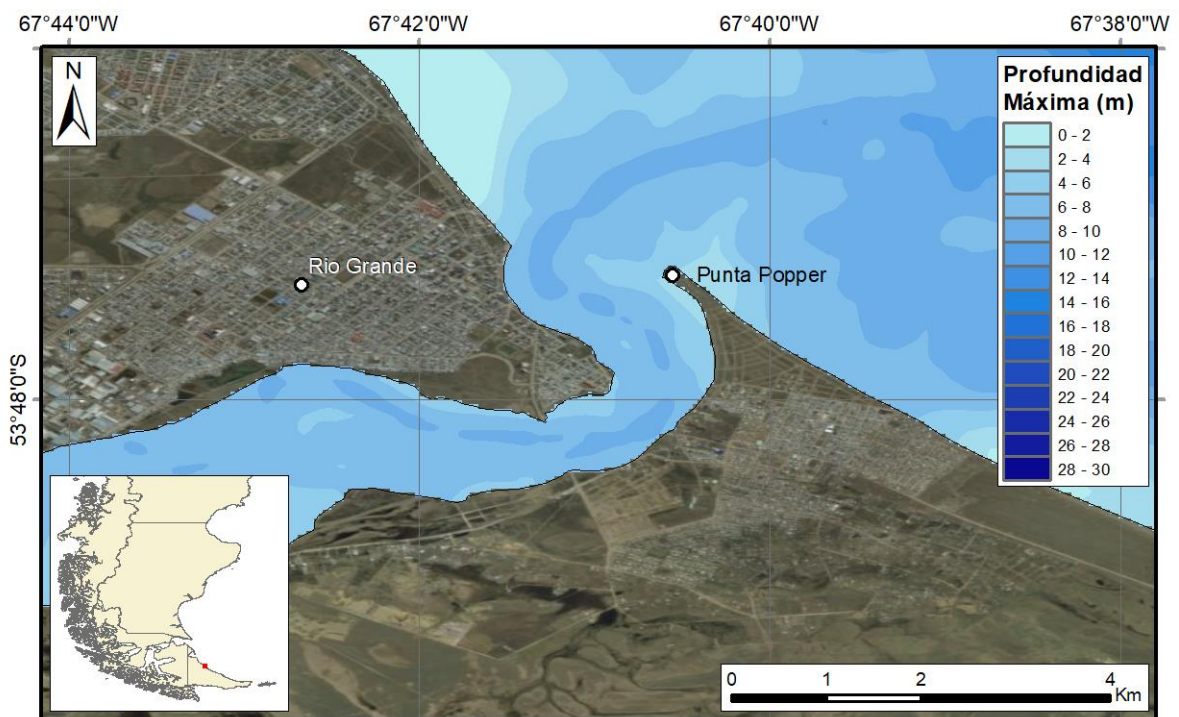


Figura 6.10. Profundidades máximas en el estuario del río Grande.

Por otro lado, se observan velocidades medias importantes en la boca del estuario en coincidencia con el canal central del río, alcanzando los 1.3 m/s en valor medio (Figura 6.11). Respecto a los valores máximos alcanzados, gran parte del estuario cuenta con una corriente

de marea que supera los 2.5 m/s en algún momento del ciclo de marea y que pueden encontrarse también en las afueras del estuario donde se alcanzan mayores profundidades (8 -10 metros), pero con muy baja permanencia durante el ciclo de marea (Figura 6.12).

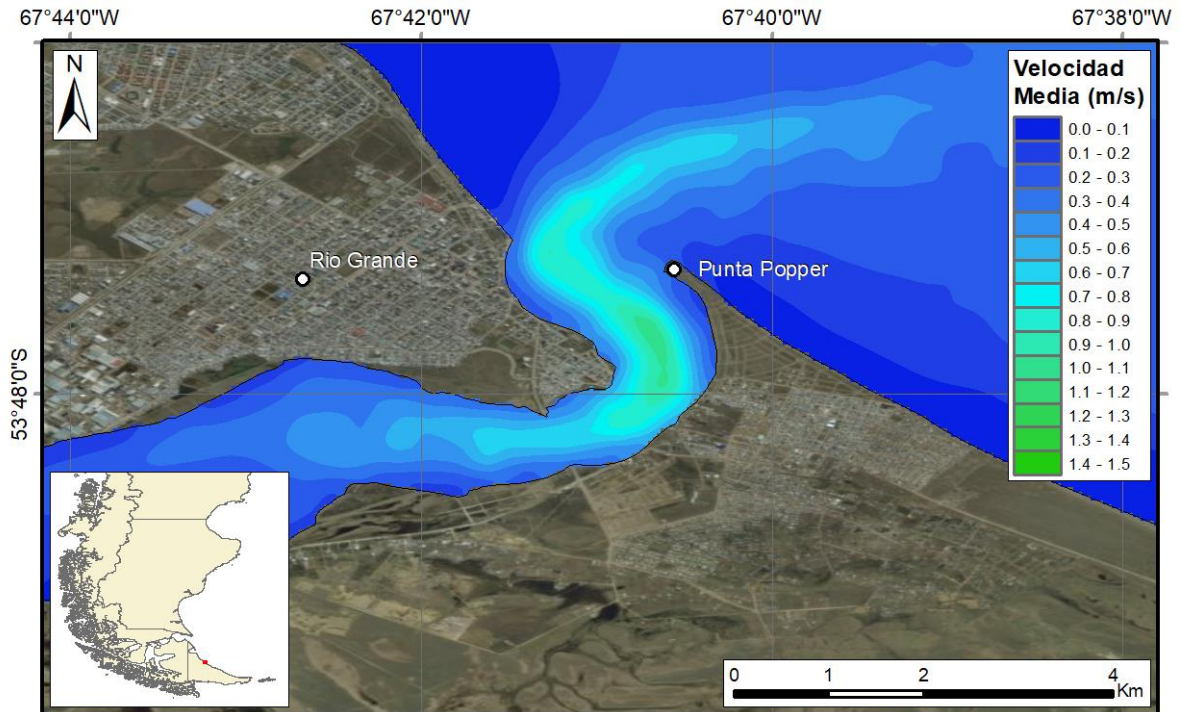


Figura 6.11. Velocidades medias en el estuario del río Grande.

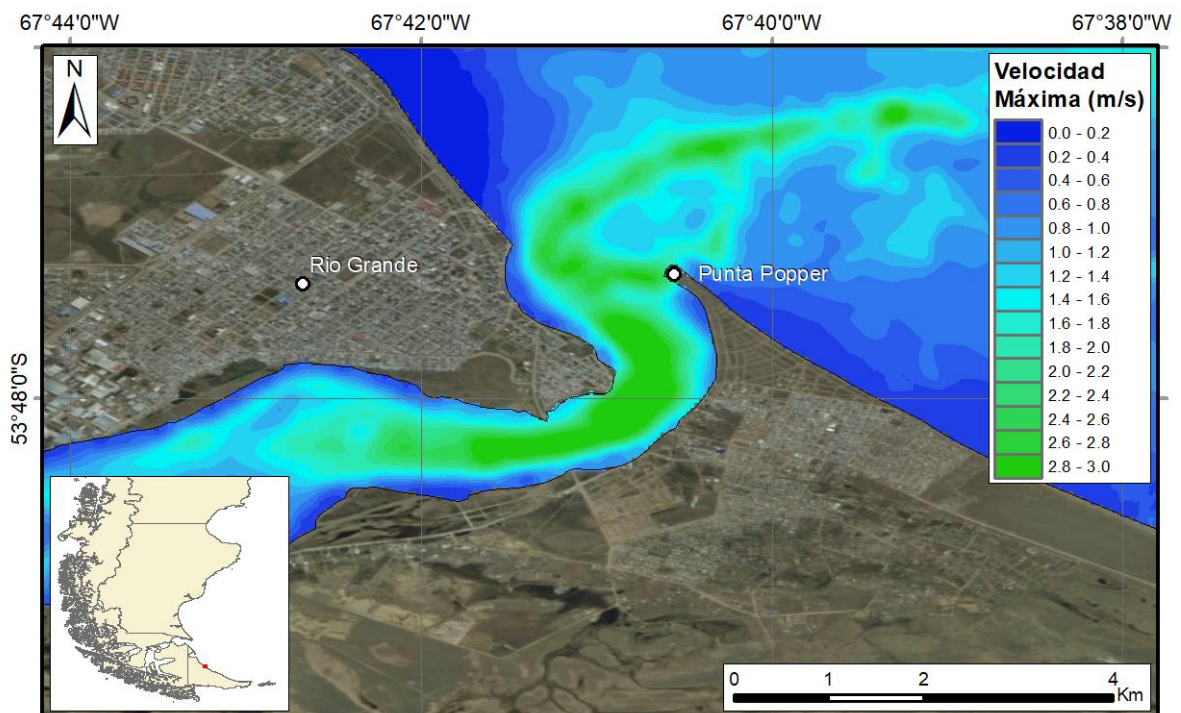


Figura 6.12. Velocidades máximas en el estuario del río Grande.

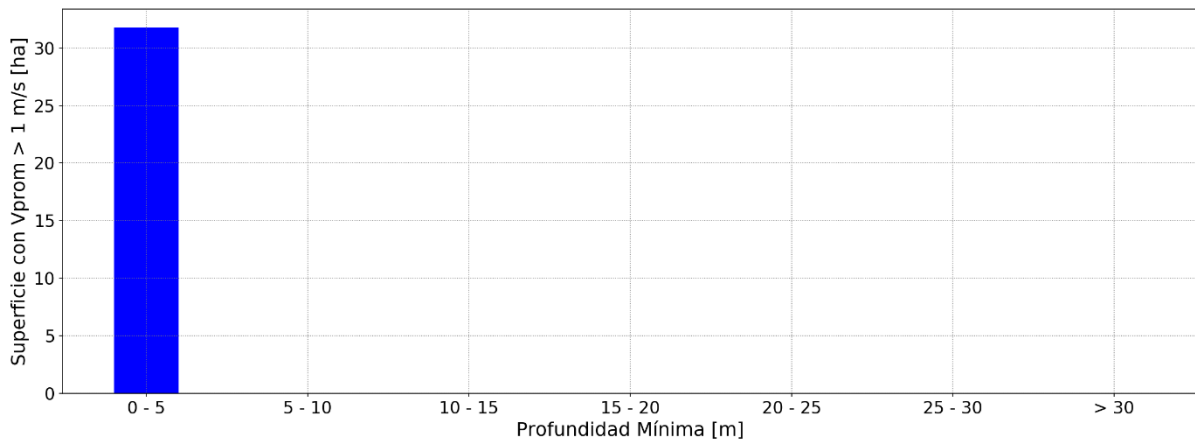


Figura 6.13. Histograma de superficies con velocidades medias anuales superiores a 1 m/s en función de la profundidad para el estuario del río Grande.

El histograma anterior refleja lo indicado previamente respecto a que la totalidad de la superficie con velocidades medias superiores a 1 m/s se encuentra en zonas con profundidades menores a los 5 metros.

En este caso la distribución de las velocidades a lo largo del ciclo de marea presenta una forma muy similar a la del estuario del río Coyle, con la diferencia de que la totalidad de la serie se encuentra por sobre el umbral de 1 m/s a excepción de los momentos en que la corriente de marea cambia de sentido (Figura 6.14).

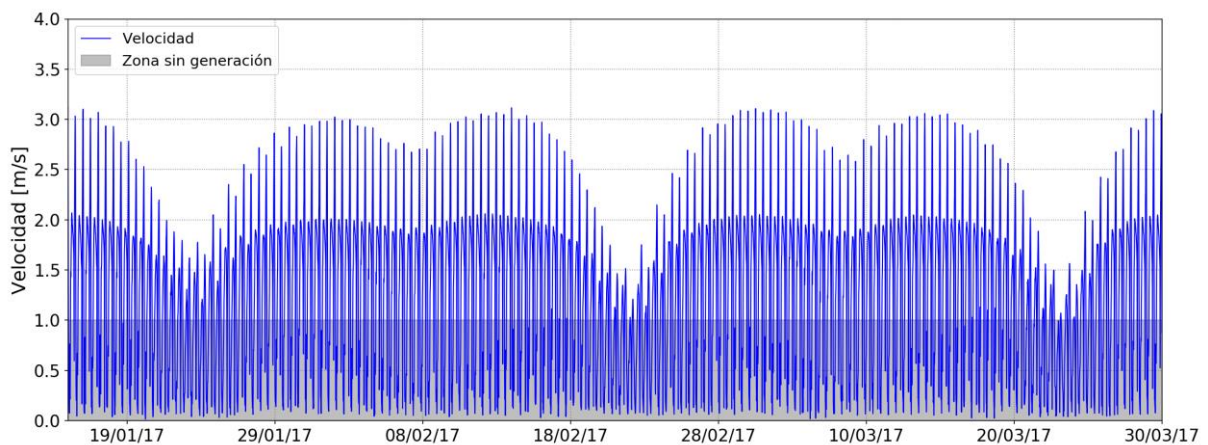


Figura 6.14. Evolución de la velocidad para el período modelado en un punto ubicado dentro de la zona de mayores velocidades. Estuario del río Grande – Rank 3.

El estuario del río Grande resulta el único de los cinco estudiados que presenta una gran asimetría en la tasa de ingreso y egreso de caudales con caudales de ingreso pico de 3,000 m³/s y de egreso de casi 7,000 m³/s (Figura 6.15). A pesar de esto, los volúmenes de ingreso/egreso de cada semi-ciclo presentan un bajo rango de amplitud (Figura 6.16). Este estuario también se caracteriza por ser el que recibe los menores caudales por parte de la marea, pero como puede observarse en la Tabla 6.3, este sigue siendo muy superior al caudal que aporta el río Grande (1,000 m³/s contra 45 m³/s)⁹.

⁹ Para hacer esta comparativa se tomó el menor caudal máximo del período modelado, ya que en los cambios de sentido de la corriente de marea el caudal es prácticamente nulo, pero eso ocurre durante

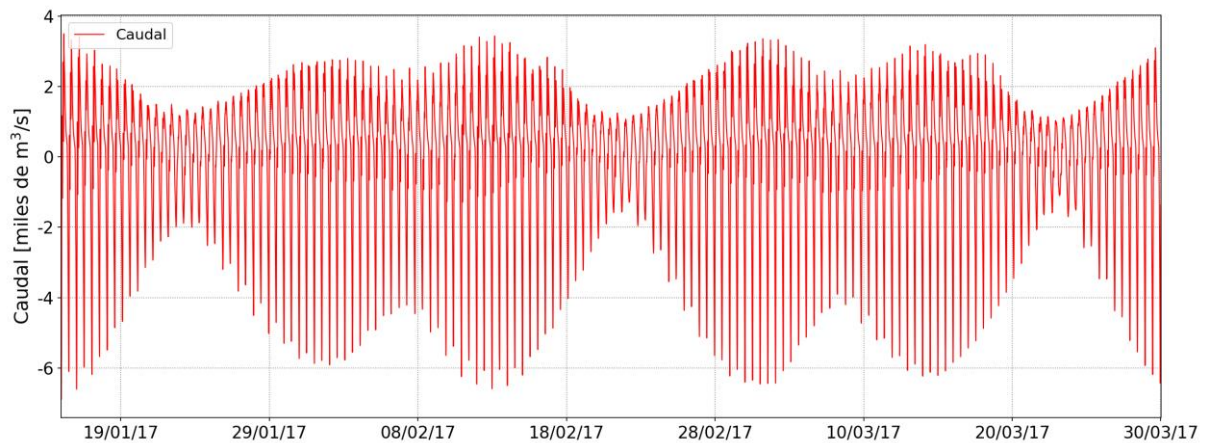


Figura 6.15. Evolución del caudal en la boca del Estuario del río Grande – Rank 3.

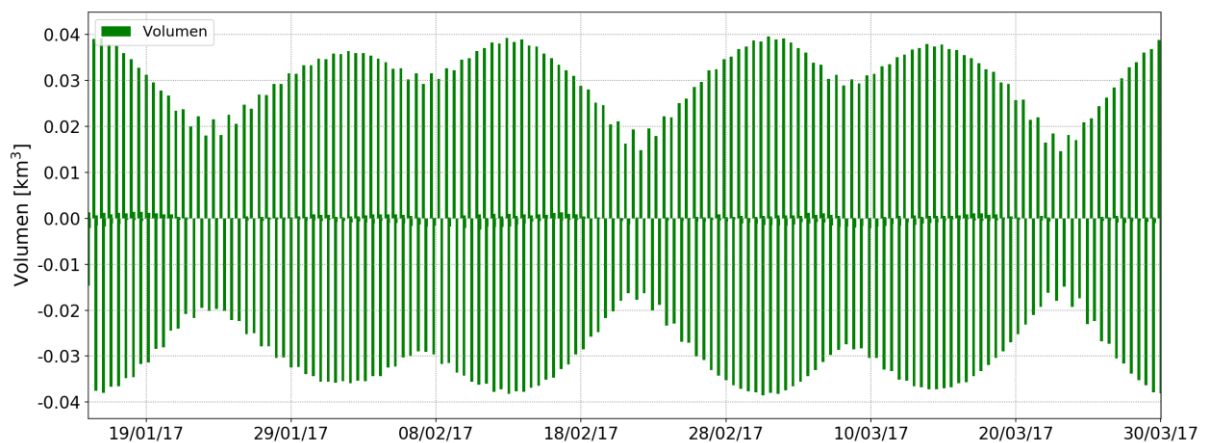


Figura 6.16. Evolución del volumen en la boca del Estuario del río Grande – Rank 3.

Tabla 6.3 Volúmenes y caudales entrantes para el período modelado – Estuario del río Grande¹⁰.

Volumen máximo	0.04 km ³
Volumen mínimo	0.02 km ³
Volumen promedio	0.03 km ³
Caudal máximo	6,888 m ³ /s
Caudal promedio	1,399 m ³ /s

Como en los casos anteriores, en las zonas en las que se supera el umbral de velocidad en valor medio resultan potencias superiores a los 1.5 kW y energías superiores a los 15 MW.hr (Figura 6.17 y Figura 6.18).

breves instantes de tiempo.

¹⁰ Para los valores de la tabla anterior no se tuvieron en cuenta los intercambios de volúmenes de agua de pequeña cantidad que se ven en la Figura 6.16.

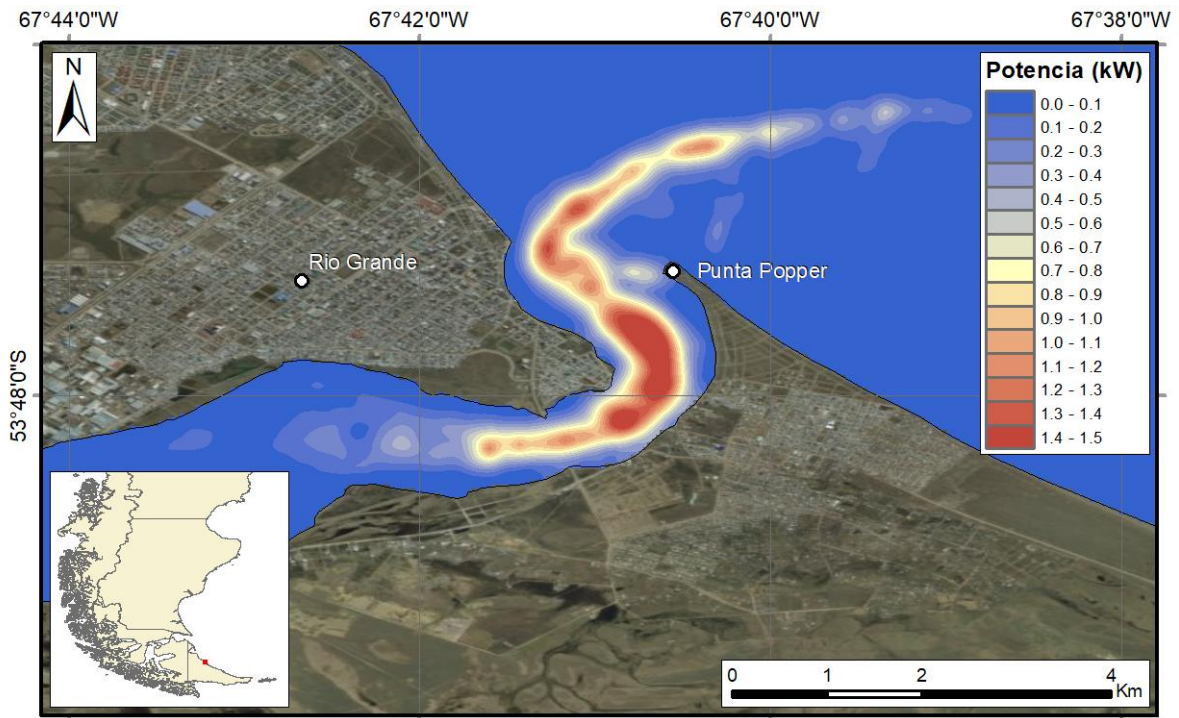


Figura 6.17. Potencia media anual por metro cuadrado de sección transversal a la corriente de marea en el estuario del río Grande.

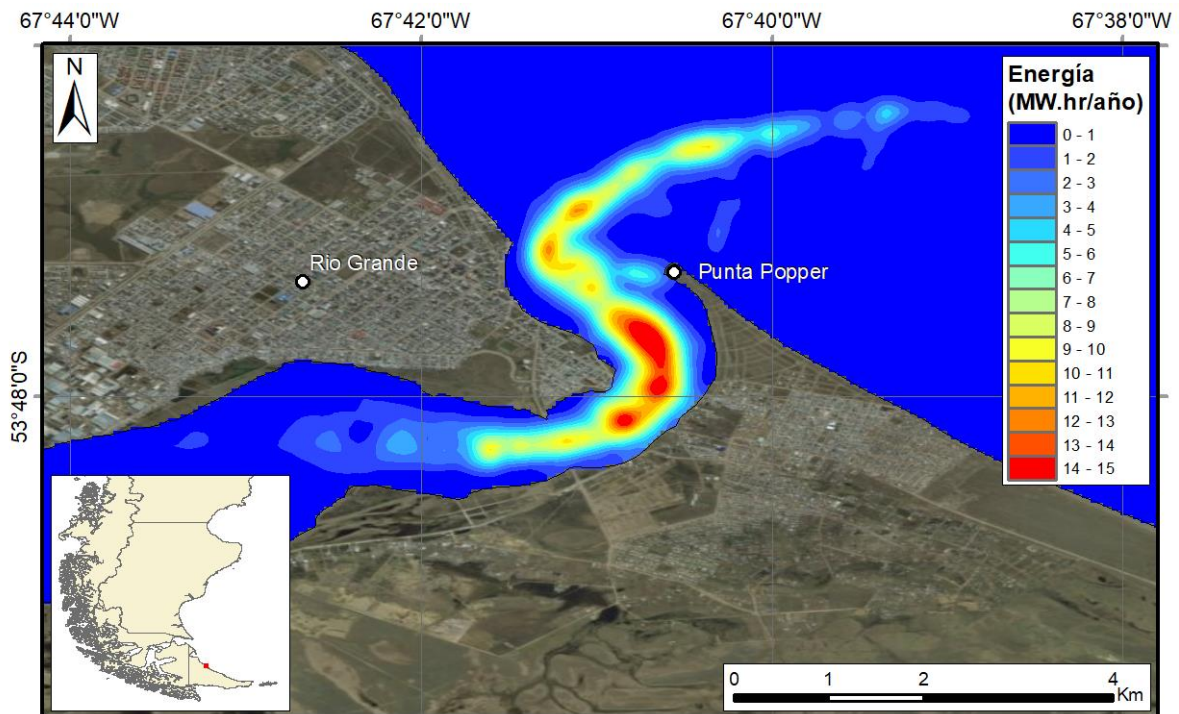


Figura 6.18. Energía media anual por metro cuadrado de sección transversal a la corriente de marea en el estuario del río Grande.

Si bien en este caso la polarización de la distribución energética no es tan marcada como en el caso del río Deseado, resulta que dentro de las categorías que superan los 10

MW.hr/año/m² aquella que mayor superficie disponible posee es la de valores superiores a los 15 MW.hr/año/m², superando las 15 hectáreas (Figura 6.19).

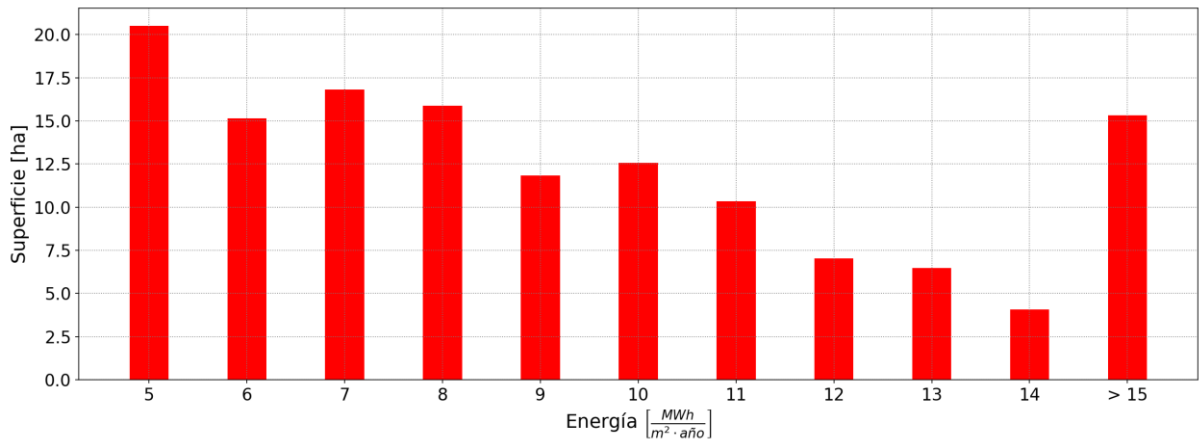


Figura 6.19. Histograma de superficies en función de la energía disponible en el estuario del río Grande.

7. MODELO DEL ESTUARIO DEL RIO GALLEGOS

7.1. Introducción

El estuario de Río Gallegos se ubica a unos 75 km al Sur del estuario del Río Coyle. Tiene un desarrollo de Oeste a Este y abarca unos 373 km². Recibe las aguas de los ríos Gallegos y Carmen Silva (también conocido como río Chico), con caudales módulos de 34 m³/s y 14 m³/s respectivamente.

Hacia la margen Norte del estuario, a unos 2 km de la desembocadura, se encuentra la Bahía Gallegos en cuyo centro se ubica la Isla Deseada (también conocida como Isla de los Pingüinos o Isla de los Pájaros), de unas 37 ha que posee presencia de abundante avifauna.

En la confluencia de ambos ríos se sitúa la ciudad de Río Gallegos con unos 95,796 habitantes (INDEC, 2010). Como principales actividades económicas se encuentran las industrias petrolíferas y gasíferas, junto con el comercio y la construcción.

7.2. Entorno del estuario del río Gallegos

La grilla de este modelo se obtuvo al refinar 7 veces la malla del Rank 1, limitando sus bordes abiertos presentes al Norte, Este y Sur, a extensiones de 204 km, 122 km y 131 km respectivamente (Figura 7.1 y Tabla 7.1).

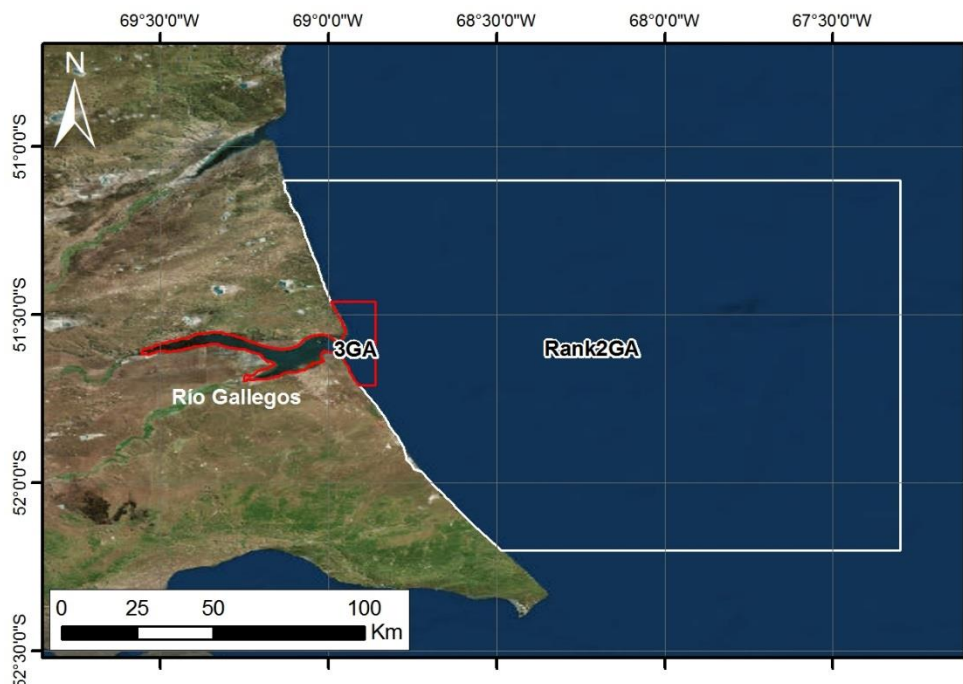


Figura 7.1. Dominio del Rank 2 – Estuario del río Gallegos.

Las características de este modelo se detallan a continuación:

Tabla 7.1 Características de la simulación con el modelo local Rank 2 GA.

Parámetro	Valor
Período simulado	01/01/2017 – 31/03/2017
Discretización temporal [s]	15
Modelo de turbulencia	Funcionalidad HLES
Batimetría	Cartas H451A, H451B y H452 del SHN + Imágenes LANDSAT
Rango de profundidades [m]	0 – 110
Discretización espacial (tamaño aproximado de celdas) [m] x [m]	346 x 557
Cantidad máxima de elementos en la dirección M	453
Cantidad máxima de elementos en la dirección N	222
Cantidad máxima de elementos en la dirección K	1
Cantidad total de celdas	70,502
Coefficiente de estratificación del estuario (ED)	No aplica
Tiempo computacional [hs]	11.43

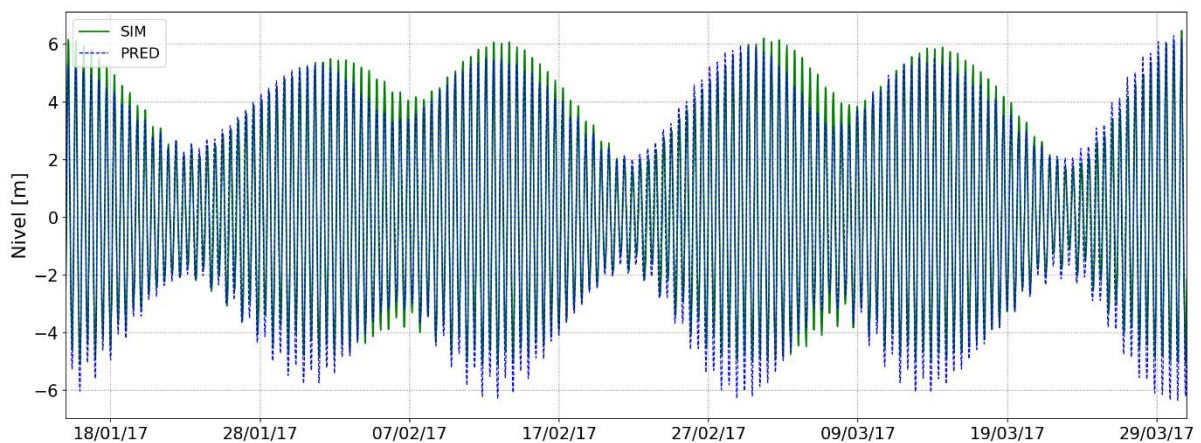


Figura 7.2. Validación de la calibración del Rank 0 ($n = 0.015$). Rank 2 – Puerto de Punta Loyola, estuario del río Gallegos.

Los indicadores de performance mostraron un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.56 m y un coeficiente de correlación R^2 de 0.94.

En esta instancia se cuenta con resultados similares a aquellos obtenidos para el estuario del río Santa Cruz. Se puede observar una amplitud superior a los 12 metros en sus valores máximos (Figura 7.3) y la presencia de elevadas velocidades en el interior del estuario ocurriendo en los períodos de elevadas amplitudes. En este caso, sin embargo, pareciera que las velocidades alcanzadas no sólo son superiores a las del estuario del río Santa Cruz, sino que también ocurren a lo largo de una mayor superficie (Figura 7.4).

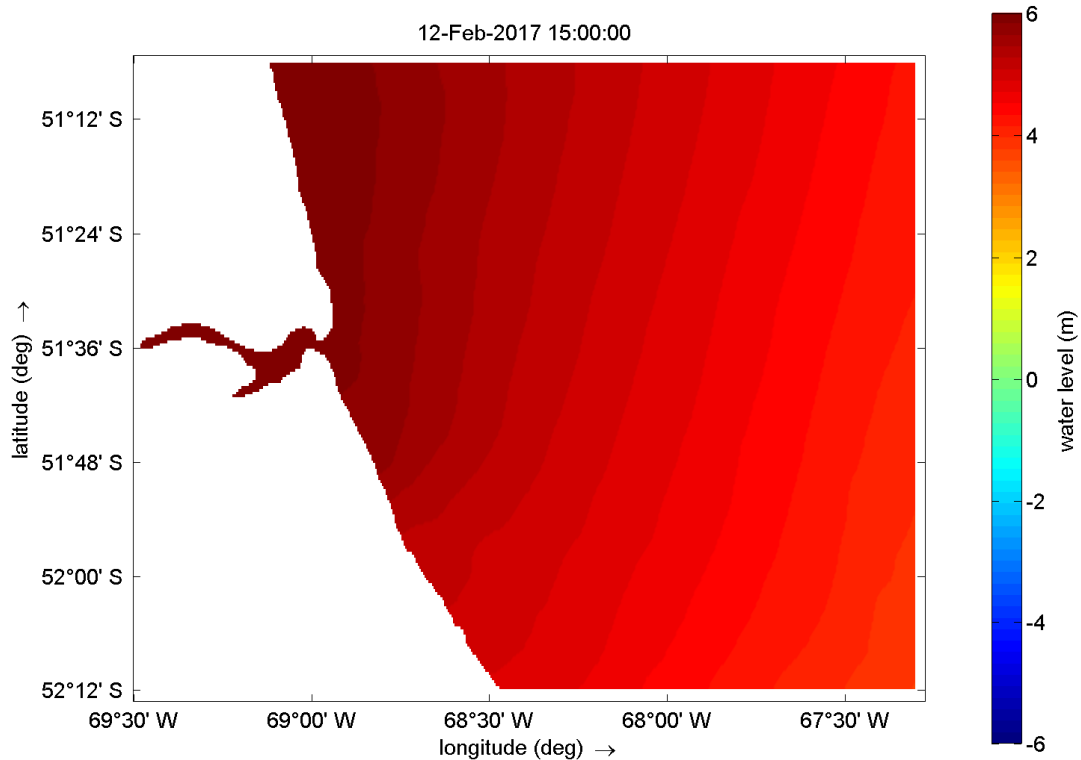


Figura 7.3. Amplitudes máximas en el estuario del río Gallegos y su entorno.

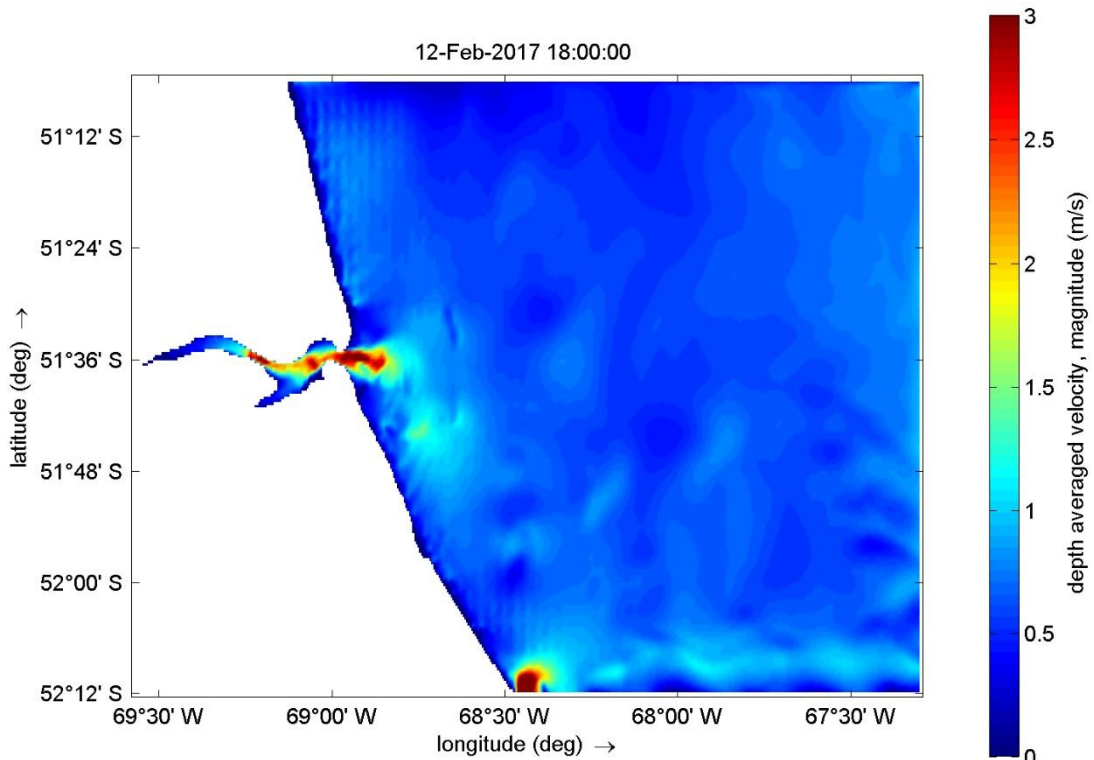


Figura 7.4. Velocidades instantáneas en el estuario del río Gallegos y su entorno.

7.3. Estuario del río Gallegos

Partiendo del Rank anterior se efectuó un refinamiento de la grilla con una relación de 5 a 1. Finalmente, para una mejor performance numérica se planteó un dominio con únicamente dos bordes abiertos, uno al Norte de 54 km y el otro al Este 88 km (Figura 7.5 y Tabla 7.2).



Figura 7.5. Dominio adoptado para el Rank 3 – Estuario del río Gallegos.

Las características de este modelo se pueden observar a continuación:

Tabla 7.2 Características de la simulación con el modelo local Rank 3 GA.

Parámetro	Valor
Período simulado	01/01/2017 – 31/03/2017
Discretización temporal [s]	15
Modelo de turbulencia	Funcionalidad HLES
Batimetría	Ídem Rank 2
Rango de profundidades [m]	0 – 49
Discretización espacial (tamaño aproximado de celdas) [m] x [m]	69 x 111
Cantidad máxima de elementos en la dirección M	1007
Cantidad máxima de elementos en la dirección N	797
Cantidad máxima de elementos en la dirección K	1
Cantidad total de celdas	266,047
Coefficiente de estratificación del estuario (ED)	13.13 (Bien mezclado)
Tiempo computacional [hs]	187.96

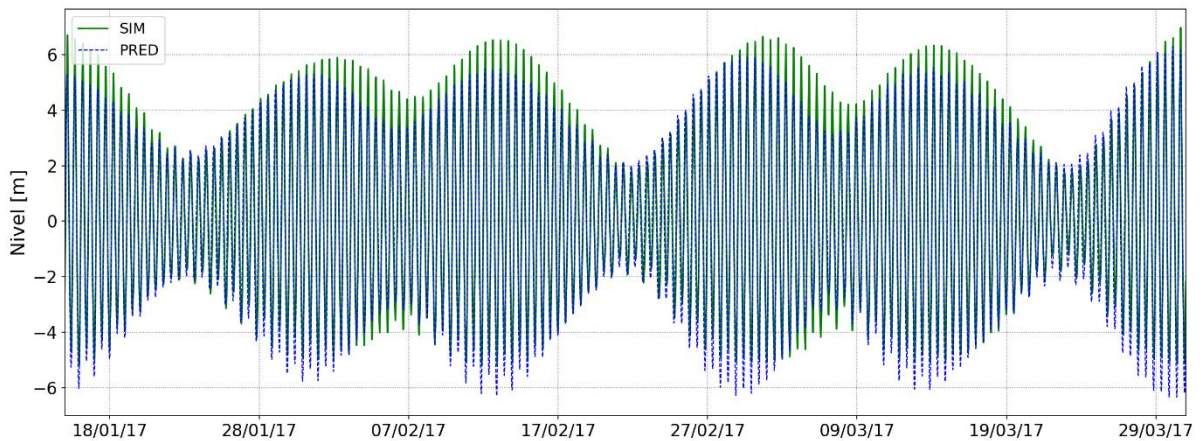


Figura 7.6. Validación de la calibración efectuada para el Rank 0 ($n = 0.015$). Series Predicha y Modelada, Rank 3 – Puerto de Punta Loyola, estuario del río Gallegos.

Los indicadores de performance mostraron un Error Cuadrático Medio (ECM) de 0.59 m y un coeficiente de correlación R^2 de 0.94 . Respecto a las velocidades instantáneas presentes en el Rank 3, se destaca la presencia de una importante superficie con valores superiores a los 3 m/s (Figura 7.7).

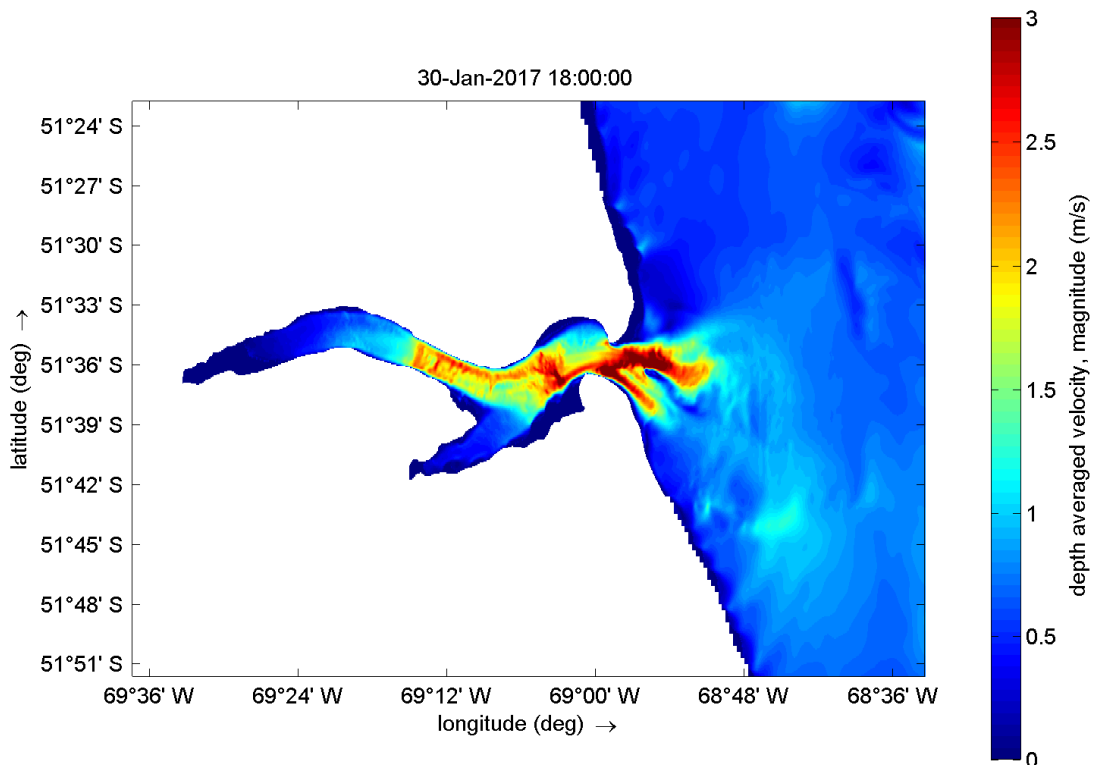


Figura 7.7. Velocidades instantáneas en el Rank 3 – Estuario del río Gallegos.

El estuario del río Gallegos alcanza profundidades mayores a los 30 metros en un área de unas 253 Ha. para los ciclos con marea más baja. Estas profundidades máximas son comparables al estuario del río Santa Cruz, pero con una menor área aprovechable (Figura 7.8 a Figura 7.10).

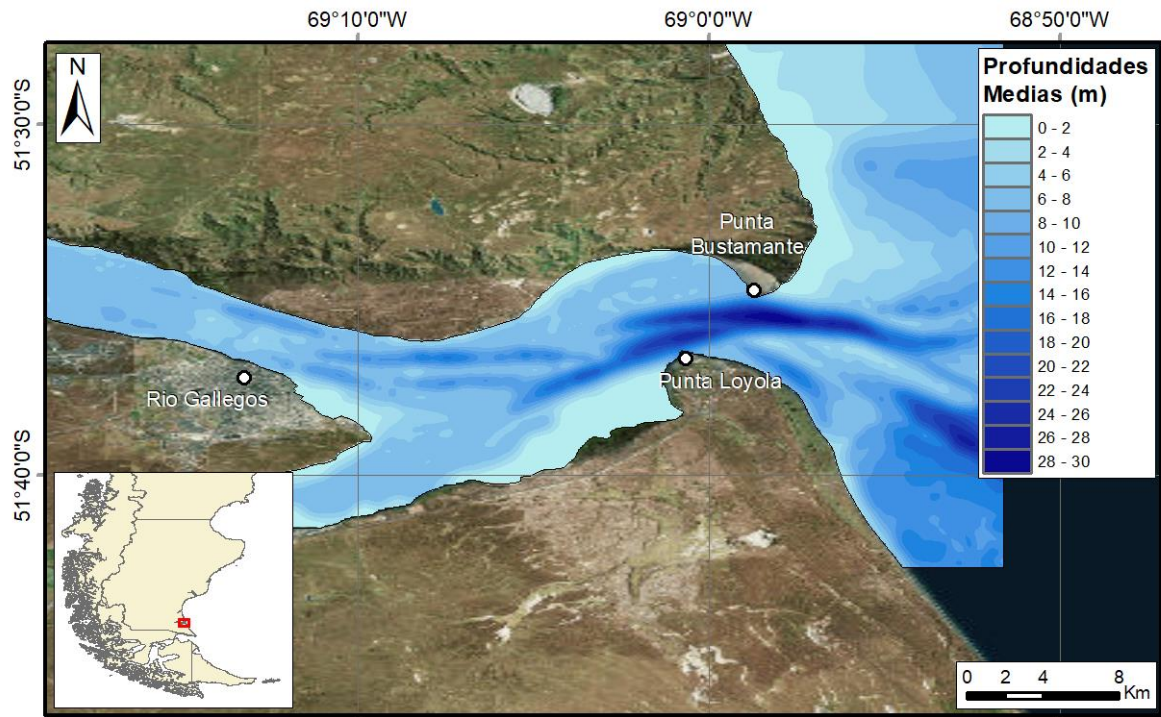


Figura 7.8. Profundidades medias en el estuario del río Gallegos.

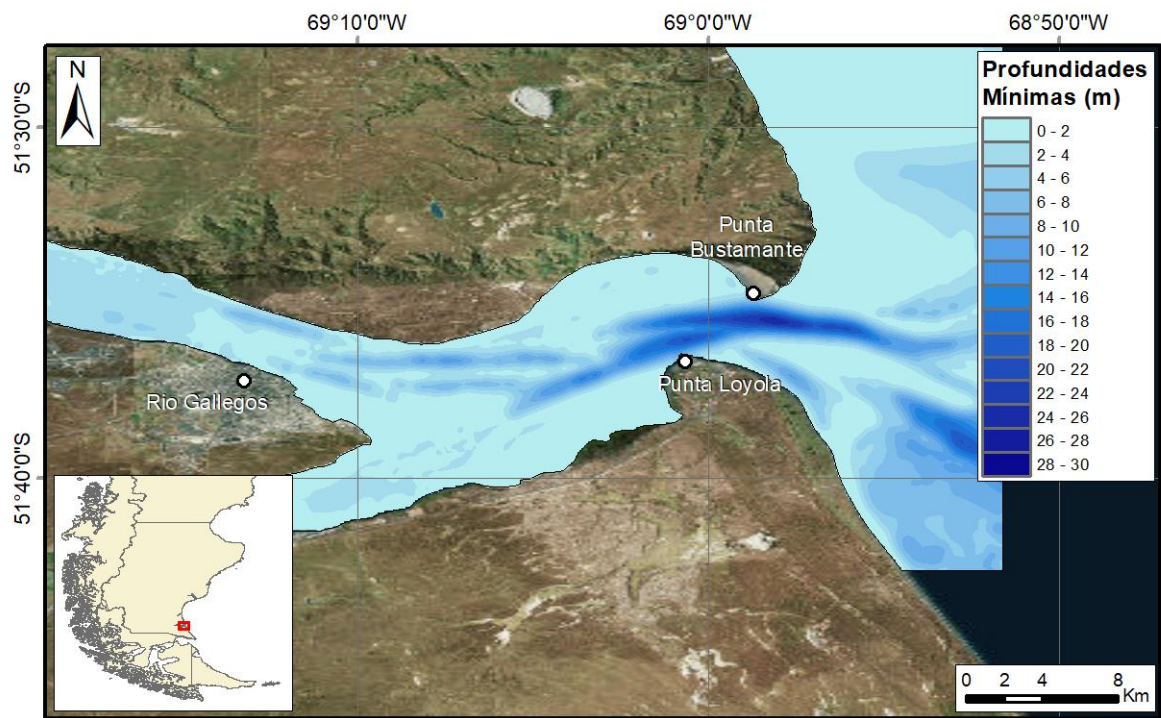


Figura 7.9. Profundidades mínimas en el estuario del río Gallegos.

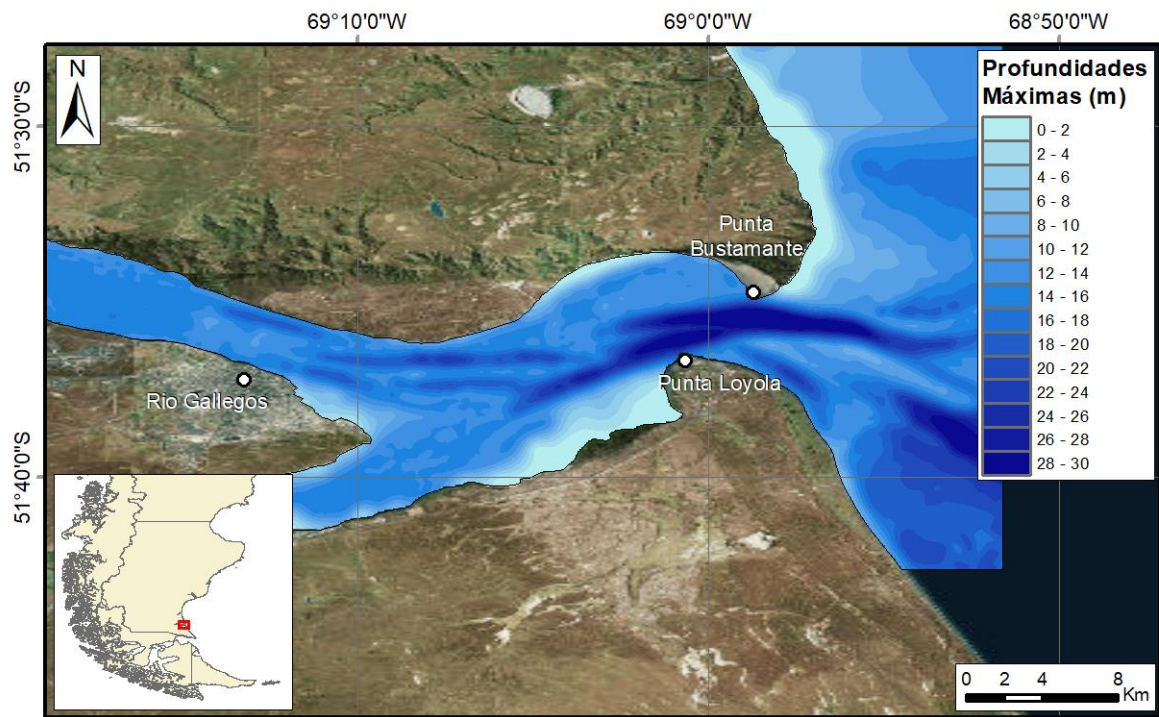


Figura 7.10. Profundidades máximas en el estuario del río Gallegos.

En cuanto a las velocidades medias obtenidas (Figura 7.11), se encuentran en valor medio entre 1.2 y 1.5 m/s a lo largo de todo el estuario y del tramo final del brazo principal, resultando en una extensa superficie (unas 4,600 has) con elevado potencial energético.

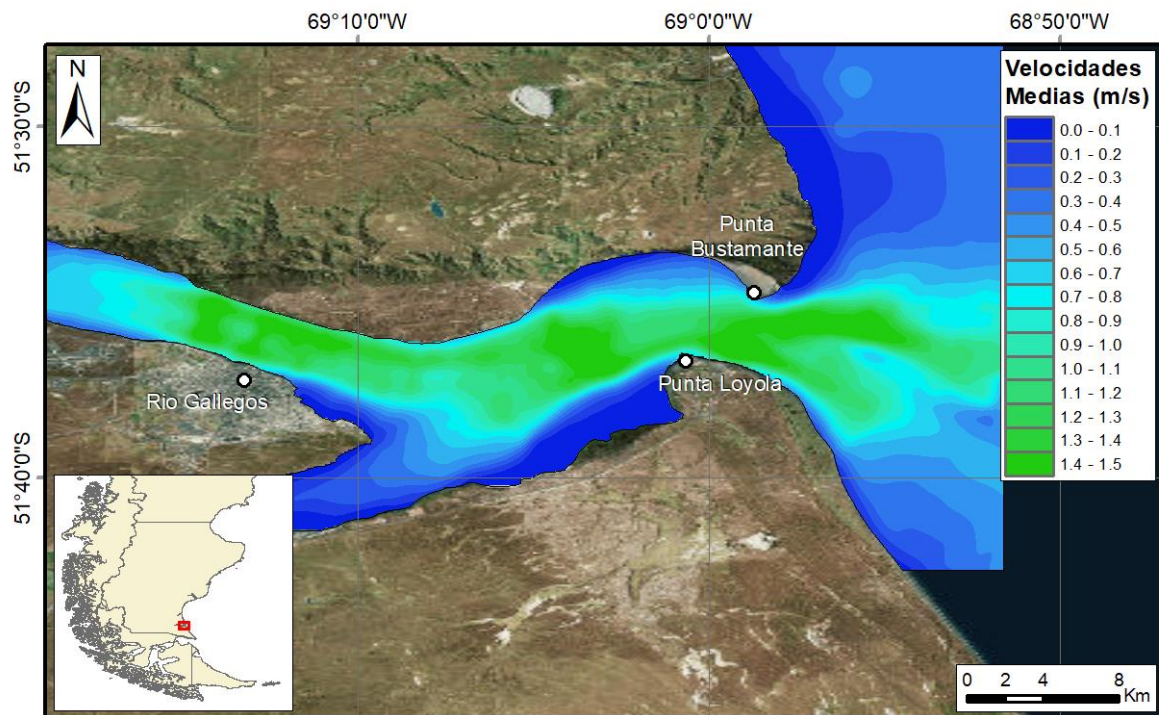


Figura 7.11. Velocidades medias en el estuario del río Gallegos.

Las velocidades máximas alcanzadas (Figura 7.12) a su vez superan los 3 m/s en gran parte de la superficie del estuario (5,900 Ha.).

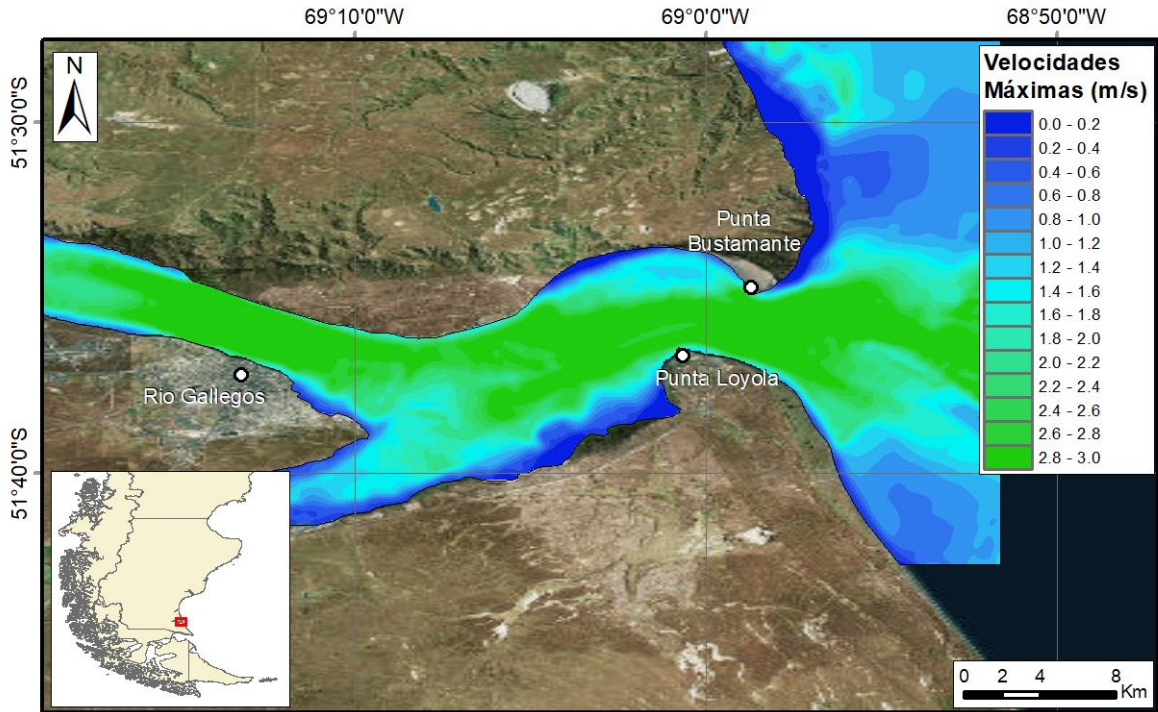


Figura 7.12. Velocidades máximas en el estuario del río Gallegos.

Si bien predominan profundidades muy bajas, inferiores a los 5 metros, dada la gran extensión del estuario, aún un pequeño porcentaje de su superficie con velocidades superiores al metro por segundo dan como resultado un gran número en valor absoluto, encontrándose unas 300 Ha. con profundidades mayores a los 20 metros y otras 55 Ha. con valores de entre 25 y 30 metros (Figura 7.13).

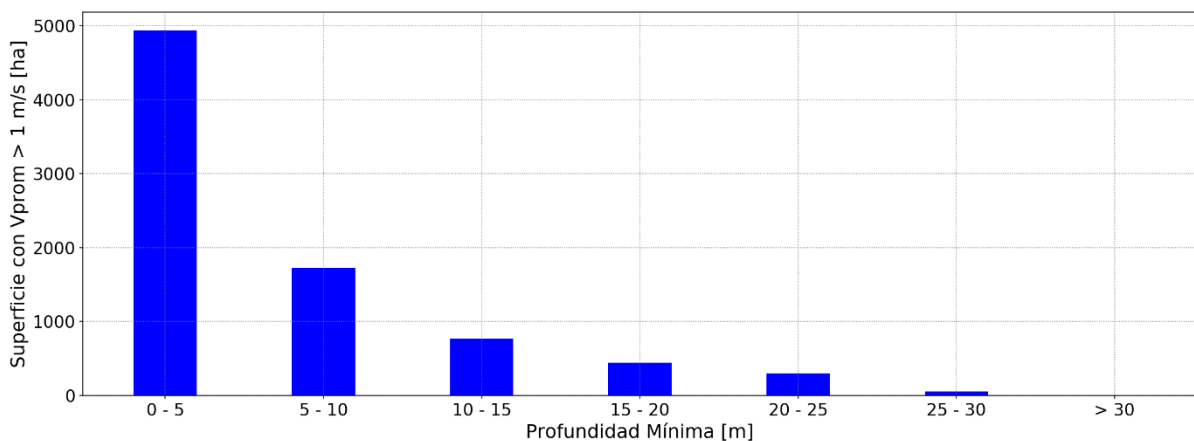


Figura 7.13. Histograma de superficies con velocidades medias anuales superiores a 1 m/s en función de la profundidad para el estuario del río Gallegos.

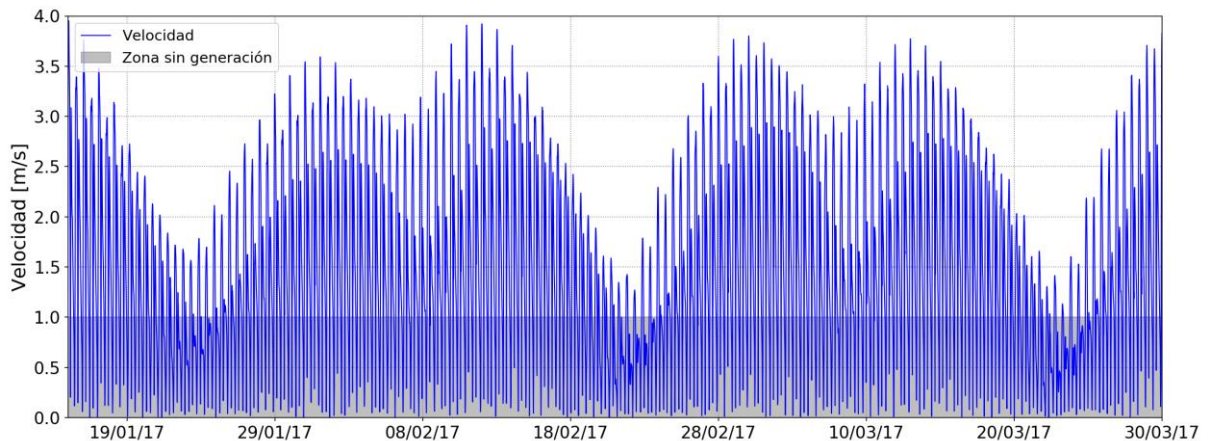


Figura 7.14. Evolución de la velocidad para el período modelado en un punto ubicado dentro de la zona de mayores velocidades. Estuario del río Gallegos – Rank 3.

De la imagen anterior resultan de interés numerosos aspectos. Más allá de la extensa área con valores de velocidad importantes, los valores máximos alcanzados son levemente inferiores a los del estuario del Río Coyle. Sin embargo, las dos partes del ciclo alcanzan velocidades importantes y muy cercanas entre sí. Además, una de estas partes se mantiene en forma permanente por encima del umbral mínimo, mientras que la otra apenas lo hace por unas 24 horas (sin contar claro, los cambios de dirección de la corriente de marea). Todo lo anterior explica los valores observados en la Figura 7.11 y la Figura 7.12.

En cuanto a los caudales que ingresan/egresan, este estuario resulta ser el que mayor volumen de agua recibe por efecto de la corriente de marea, y por ende, el que experimenta los mayores caudales ($> 184,000 \text{ m}^3/\text{s}$). Es, junto al estuario del río Deseado, aquél que recibe proporcionalmente los menores aportes por parte del cuerpo de agua que recibe, representando este apenas un 0.1% del caudal de marea¹¹ (Figura 7.15 y Figura 7.16, Tabla 7.3).

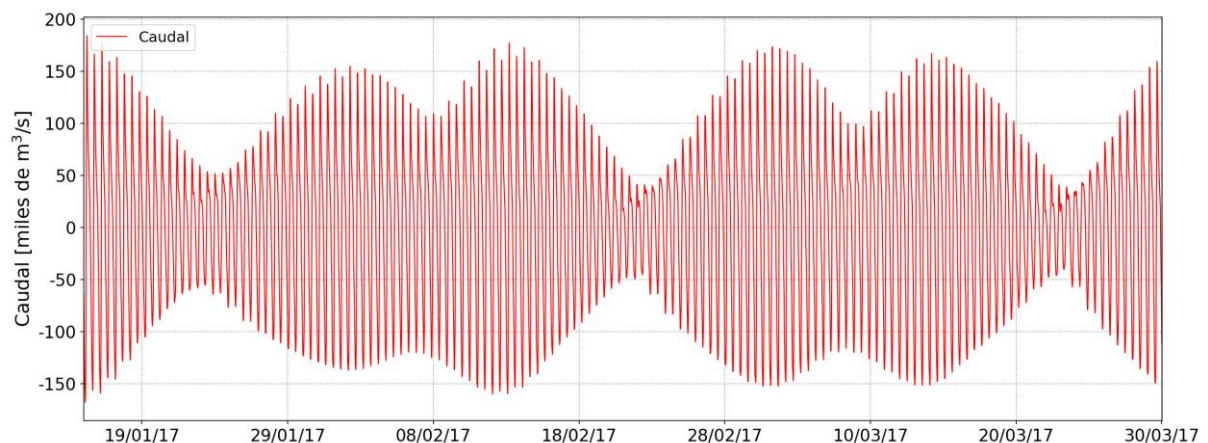


Figura 7.15. Evolución del caudal en la boca del Estuario del río Gallegos – Rank 3.

¹¹ Para esto se tomó el menor caudal máximo del período modelado, ya que en los cambios de sentido de la corriente el caudal es prácticamente nulo, pero eso ocurre durante breves instantes de tiempo.

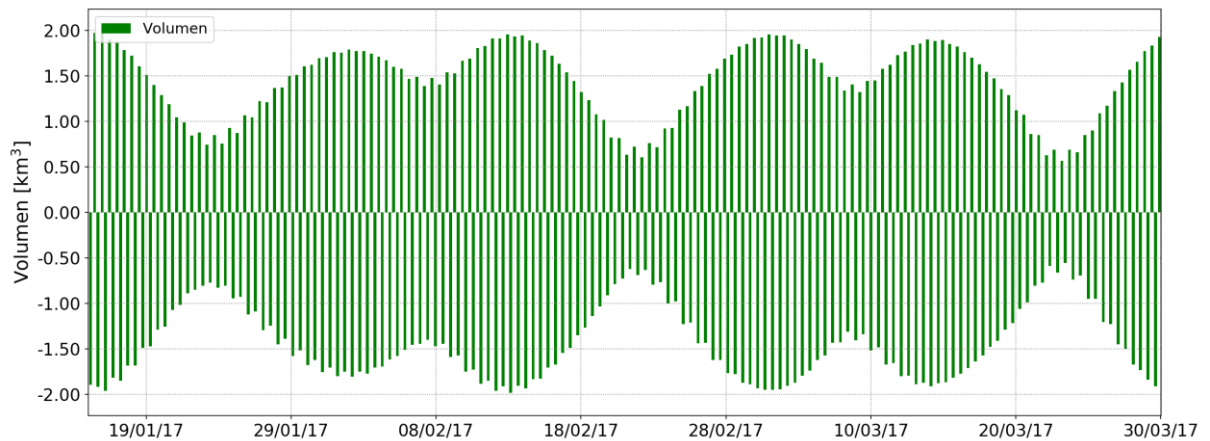


Figura 7.16. Evolución del volumen en la boca del Estuario del río Gallegos – Rank 3.

Tabla 7.3. Volúmenes y caudales entrantes para el período modelado – Estuario del río Gallegos.

Volumen máximo	2.03 km ³
Volumen mínimo	0.56 km ³
Volumen promedio	1.45 km ³
Caudal máximo	184,157 m ³ /s
Caudal promedio	65,184 m ³ /s

Lo anterior se traduce entonces en una extensa región (4,900 Ha.) con potencias superiores a los 1.5 kW y energías medias anuales superiores a los 15 GW.hr (Figura 7.17 y Figura 7.18).

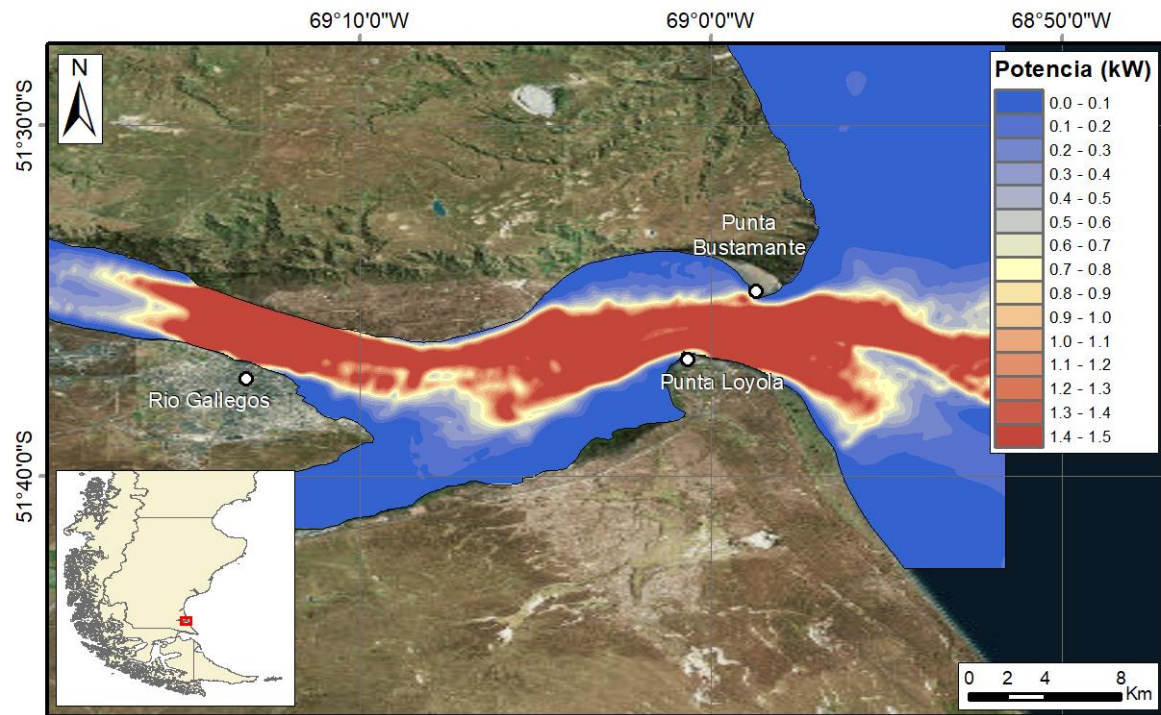


Figura 7.17. Potencia media anual por metro cuadrado de sección transversal a la corriente de marea en el estuario del río Gallegos.

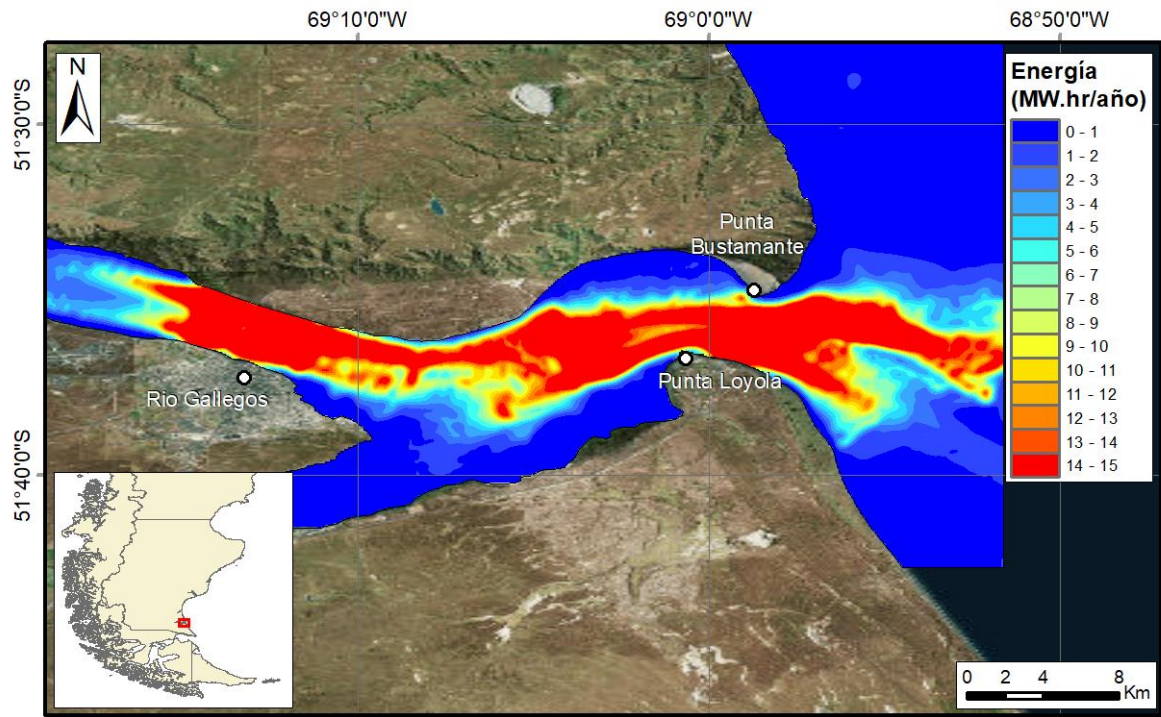


Figura 7.18. Energía media anual por metro cuadrado de sección transversal a la corriente de marea en el estuario del río Gallegos.

En función de las imágenes precedentes era previsible la obtención del histograma siguiente, en el que prácticamente 5,000 hectáreas cuentan con un potencial energético superior a los 15 MW.hr/año/m². Nuevamente es necesario generar un segundo histograma que permita apreciar mejor la distribución superficial de toda esa energía existente. De este último se desprende que hay unas 865 Ha. que superan incluso los 20 MW.hr/año/m², con una gran porción (alrededor de 80 Ha.) con valores de más de 26 MW.hr/año/m².

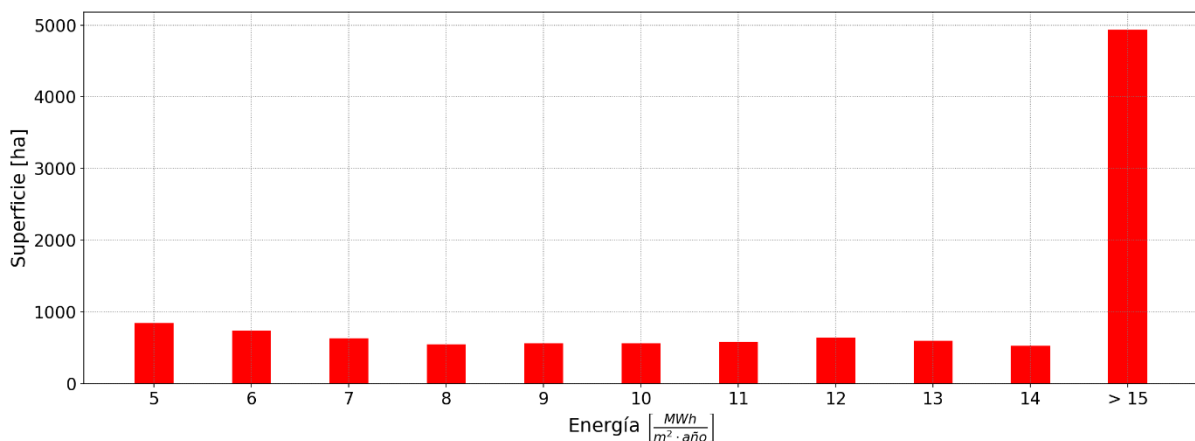


Figura 7.19. Histograma de superficies en función de la energía disponible en el estuario del río Gallegos.

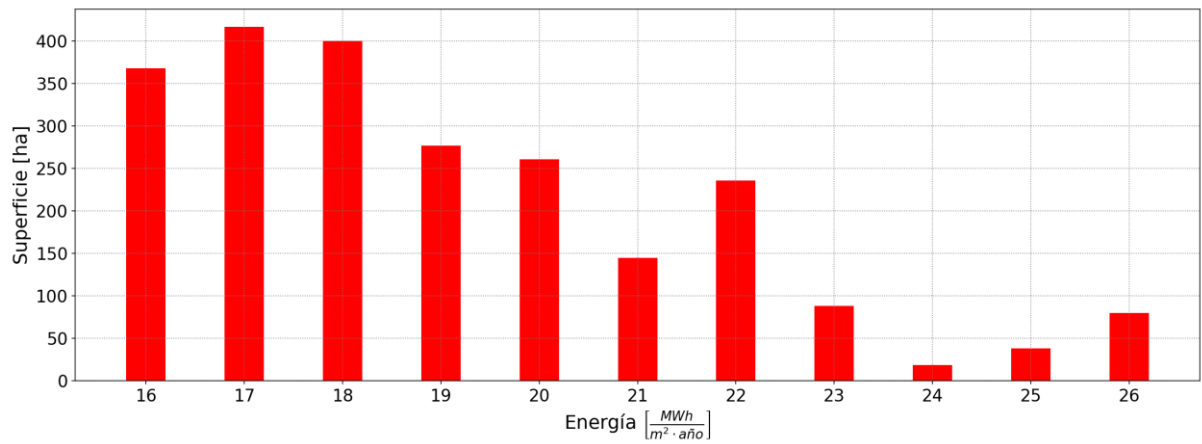


Figura 7.20. Histograma de detalle de superficies en función de la energía disponible en el estuario del río Gallegos para la categoría de superficies con más de $15 \text{ MW} \cdot \text{hr}/\text{año}/\text{m}^2$.

8. POTENCIAL ENERGETICO POR ESTUARIOS

8.1. Introducción

A partir de los modelos implementados y de sus resultados, se elaboraron una serie de consideraciones iniciales con el objetivo de un mejor análisis:

- Existe una alta correlación entre las zonas de mayor potencial energético aprovechable (por sus características de profundidades) y los valores de velocidad media anual superiores al metro por segundo.
- Se estableció un umbral mínimo de profundidad requerida para la implantación de generadores hidrocínicos de gran envergadura, adoptándose la convención que los distingue como a aquellos que son capaces de generar potencias superiores a 1 MW. (los generadores de estas características que se encuentran en el mercado o en desarrollo, presentan tamaños similares variando entre los 16 y los 20 metros de diámetro).

Con estas consideraciones, se mantiene la hipótesis de que se requieren al menos unos 20 metros de profundidad para mantener al dispositivo completamente sumergido o permitiendo contadas ocasiones de contacto con la atmósfera para aquellos de dimensiones mayores.

A continuación, se presenta un análisis por estuario en el que se vincula velocidades de las corrientes de marea con la superficie disponible como para implantar generadores cumpliendo con los criterios de distanciamiento mínimo. Un resumen de estos resultados se presenta en la Figura 8.1.

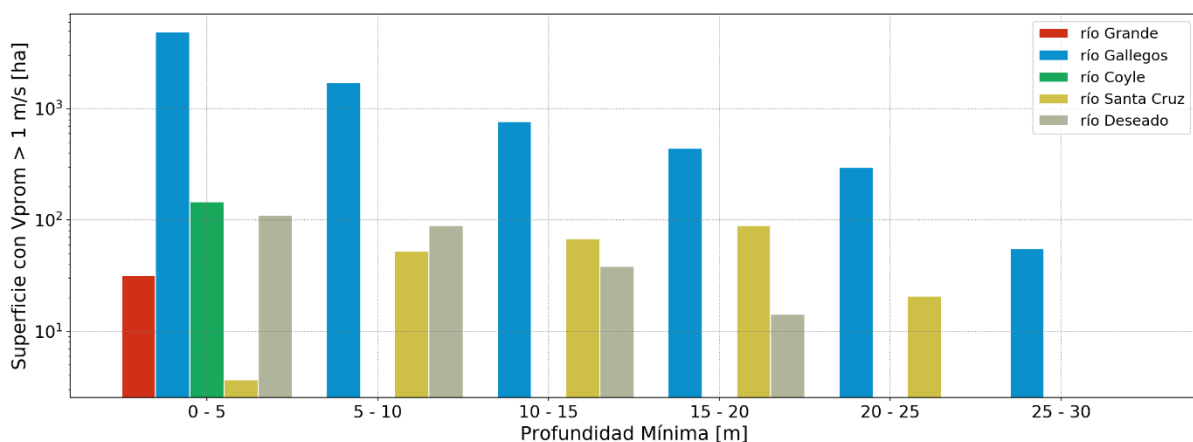


Figura 8.1. Relación entre áreas con velocidades importantes y su profundidad mínima por estuario.

8.2. Estuario del río Santa Cruz

Este estuario presenta un flujo reversible con velocidades similares en valor absoluto tanto en el ingreso como en el egreso del estuario, alcanzando valores máximos de hasta 3 m/s.

Las zonas de mayor energía potencial se ubican en la parte central de la boca del estuario, retiradas hacia el interior del mismo, y cuentan con valores medios anuales de velocidad de 1 m/s o levemente superior. Las profundidades para estas zonas varían entre los 15 y los 25 metros en su valor mínimo, habiendo unas 21 Ha. disponibles con profundidades mínimas superiores a los 20 metros y otras 157 Ha. con profundidades mínimas de entre 10 y 20 metros.

Si bien se requieren estudios detallados respecto al tipo de generador más adecuado para este estuario, algunos de los equipos adecuados serían a priori: AR1500 (1.5 MW), SeaGen S (2 MW), SeaGen (1.2 MW), Open-Hydro (2 MW).

8.3. Estuario del río Coyle

A falta de datos batimétricos confiables, la modelación del estuario del río Coyle fue la que presentó una menor calidad en los indicadores de calibración/validación. A pesar de esto, se considera que los resultados de las simulaciones obtenidas pueden ser adoptados como una primera aproximación a este análisis.

Este estuario presenta bajas profundidades, las cuales se encuentran por debajo de los 5 metros en las bajamares de sicigia para la totalidad del estuario. Sin embargo, resulta de gran interés la energía presente en él, puesto que existen unas 61 Ha. que cuentan con valores energéticos medios anuales superiores a los 15 MW.hr/m². Esto se debe a las elevadas velocidades que ocurren hacia la margen sur a lo largo de la mitad exterior del estuario, haciéndose presente incluso hacia las afueras de este en ambas márgenes. Como valores medios anuales en esta zona, se alcanzan los 1.63 m/s en ambos sentidos de la corriente de marea generada, mientras que como valores máximos se llega a los 5 m/s.

En este caso, generadores adecuados parecieran ser: Gorlov, Darrieus, Savonius y sus variantes, puesto que requieren profundidades de hasta 3 metros, pero limitan su potencia de generación hasta los 100 kW. Otra turbina que podría ser aplicada es la de INVAP (Argentina), actualmente en desarrollo, cuyas dimensiones se desconoce, pero dado que su potencia será de 30 kW, puede suponerse que tendrá requisitos similares a los modelos anteriores.

8.4. Estuario del río Deseado

En este caso, las zonas de interés se ubican en el interior del estuario, en su canal central, de profundidades que varían entre los 6 y los 27 metros. Si bien se alcanzan velocidades máximas del orden de los 4.6 m/s a lo largo de todo el tramo final del estuario, las velocidades medias anuales superiores al metro por segundo solo se manifiestan en las zonas en donde se pierde profundidad. Como consecuencia de esto, existen unas 173 Ha. con valores energéticos superiores a los 15 MW.hr/m², pero que se distribuyen en zonas de entre 5 y 20 metros de profundidad.

Es importante destacar que las zonas de mayor energía disponible se encuentran hacia el este de Puerto Deseado, lo que indica que la presencia de generadores no provocaría interferencias con el tráfico del puerto.

Respecto al tipo de generadores que podría instalarse, las características del estuario lo

ubican en un punto medio entre los de grande y pequeña escala, siendo quizás posible la implantación de turbinas como AR1500 (1.5 MW), Open-Hydro (2 MW) o SeaGen (1.2 MW), o de turbinas de menor envergadura, como SeaFlow (300 kW), StingRay (150 kW), Kobold (30 kW), o aquellas como Gorlov, Darrieus, Savonius (5-100 kW).

8.5. Estuario del río Grande

Se trata de un caso muy similar al del estuario del río Coyle, ya que las profundidades mínimas en este estuario están por debajo de los 5 metros, pero las velocidades presentes y la energía disponible lo hacen un sitio de interés en caso de sortear las dificultades técnicas que proporciona la baja profundidad.

La zona de mayor energía disponible se ubica a lo largo del canal central del meandro final del estuario. El tramo de mayor interés es aquél situado al sur de Punta Popper, en donde se alcanzan velocidades medias del orden de los 1.3 m/s y abarcando unas casi 26 Ha. con valores superiores a los 13 MW.hr/m² anuales.

Posiblemente resulte atractiva la alternativa de utilizar equipos de baja potencia, que son de menor tamaño y requieren en consecuencia menores profundidades. En este grupo se encuentran las turbinas Gorlov, Darrieus, Savonius y sus variantes, todas en el rango 5-100 kW, con profundidades requeridas de hasta 3 metros, y el generador en desarrollo INVAP (30 kW), cuyas profundidades requeridas se desconocen, pero que se estima estén en el mismo orden que las anteriores.

8.6. Estuario del río Gallegos

Sin dudas este es el estuario que mayor interés presenta, no sólo por la gran extensión de agua que cuenta con valores de potencial energético elevados, sino también por el hecho de que cuenta con profundidades sumamente atractivas para la utilización de generadores de gran envergadura.

Hay tres zonas de interés en este caso: en el último tramo del brazo principal, en el centro del estuario y en su boca. Dado que la ciudad de Río Gallegos se ubica hacia el interior del estuario, sobre el tramo final del brazo principal, podría haber problemas de interferencia entre el puerto de la ciudad y los generadores, pero esto posiblemente pueda sortearse fácilmente debido a la importante extensión en la que se hacen presente grandes cantidades de energía disponible.

En este estuario existen unas 442 Ha. que cuentan con velocidades medias anuales superiores al metro por segundo con profundidades entre los 15 y los 20 metros, y otras 352 Ha. con más de 20 metros. Asimismo, se manifiestan velocidades que alcanzan los 5 m/s, aunque en zonas puntuales y por breves instantes de tiempo.

Respecto a los generadores que posiblemente sean los más adecuados para el aprovechamiento, se destacan SeaGen (2 MW), Open-Hydro (2 MW), OCEAN 2_G (2 MW), SR2000 (2 MW).

9. CONCLUSIONES

En este informe se presentaron los modelos numéricos de detalle de cada uno de los cinco estuarios estudiados. La estrategia de modelos anidados ha permitido sostener una metodología de simulación uniforme para cada uno de los estuarios, lo que permite una comparación de resultados consistente.

La calidad de los modelos obtenidos resulta satisfactoria, abriendo camino a su explotación para el análisis de distintas problemáticas. Como principal limitación de la implementación de los modelos de detalle se destaca la representación batimétrica, señalándose por ese lado una instancia de mejora de esta estrategia de modelación. Por otra parte, la etapa de calibración/validación de los modelos se realizó a partir de la comparación con series de marea astronómica predicha, suficiente para un primer acercamiento al problema. La realización de campañas de medición en cada uno de los estuarios se impondría como otro elemento necesario en la dirección de mejorar estas aproximaciones.

En cada uno de los estuarios se simularon elevadas velocidades de corriente de marea, valores que se alcanzaron tanto en creciente como en bajante, lo que se traduce en un posible aprovechamiento de la energía hidrocínética en las dos instancias del flujo y, por lo tanto, con el empleo de generadores de flujo reversible.

En aspectos generales, cada uno de estos estuarios podría eventualmente ser aprovechado como fuente de energía, pero para ello resulta fundamental la correcta elección de un generador que se adapte a las condiciones que ofrece cada estuario.

A continuación, se presentan las principales características de cada estuario estudiado:

Estuario del río Santa Cruz: Las zonas de mayor energía potencial se ubican en la parte central de la boca del estuario, hacia el interior. Las profundidades para estas zonas varían entre los 15 y los 25 m en su valor mínimo, existiendo unas 21 Ha. disponibles con profundidades mínimas superiores a los 20 m y otras 157 Ha. con profundidades mínimas de entre 10 y 20 m.

Estuario del río Coyle: Presenta bajas profundidades, pero resulta de gran interés su potencial energético, dado que existen unas 61 Ha. que cuentan con valores energéticos medios anuales superiores a los 15 MW.hr/m². Como valores medios anuales en esta zona, se alcanzan los 1.6 m/s en ambos sentidos de la corriente de marea.

Estuario del río Deseado: Las zonas de interés se ubican en el interior del estuario, en su canal central, con profundidades que varían entre los 6 y los 27 m. Existen unas 173 Ha. con un potencial energético anual superior a los 15 MW.hr/m², pero que se distribuyen en zonas de entre 5 y 20 metros de profundidad (no interfieren a las actividades del Puerto).

Estuario del río Grande: Presenta bajas profundidades, pero las velocidades presentes y la energía disponible lo hacen un sitio de interés. La zona de mayor energía disponible se ubica a lo largo del canal central hacia la boca del estuario. El tramo de mayor interés es aquél situado al sur de Punta Popper, en donde se alcanzan velocidades medias del orden de los 1.3 m/s y abarcando unas casi 26 Ha. con valores superiores a los 13 MW.hr/m² por año.

Estuario del río Gallegos: Consiste en el sitio de mayor interés, tanto por la extensión con potencial energético elevado, como por las profundidades que permitirían la utilización de generadores de gran envergadura. Existen unas 442 Ha. que cuentan con velocidades medias anuales superiores a 1 m/s con profundidades entre los 15 y los 20 m, y otras 352 Ha. con más de 20 m.

REFERENCIAS

- Bindelli, L., 2018. Aprovechamiento hidrocínético en el estuario del río Santa Cruz. Trabajo Final de Ingeniería Civil, Facultad de Ingeniería, Universidad de Buenos Aires.
- Buono, N., Zabaleta, F., Cáceres, R., Tomazín, 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.
- Delft University of Technology, 2018. FLOW User Manual (ver. 3.15).
- 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.
- Ezcurra & Schmidt S.A., 2017. Modelación hidrodinámica, dispersión y transporte de sedimentos: Estuario del río Santa Cruz, Provincia de Santa Cruz – Informe de Avance.
- Fernández, M., 2011. Revisión de un modelo regional de marea astronómica implementado sobre la región suroeste del Océano Atlántico. Tesis de Maestría, IMFIA-FING (Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental, Facultad de Ingeniería), Universidad de la República, Uruguay.
- 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.
- INDEC, 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas para el total del país y por provincia. <https://www.indec.gov.ar/>
- Hutchinson, M.F., 1989. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. Journal of Hydrology, 106, pp. 211–232.
- 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.
- Kumar A., Saini R.P., 2017. Techno-economic Analysis of Hydrokinetic Turbines
- 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.
- 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.
- Re, M., Kazimierski, L.D., Peralta, L.S., Haspert, F., 2018. Evaluación del potencial energético de las corrientes de marea en estuarios patagónicos mediante modelación numérica. Informe 1: Estado del arte y análisis batimétrico. Informe LHA 01-372-18. Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.
- SHN, 2017. Servicio de Hidrografía Naval. Tablas de Marea. Argentina.

- 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.
- 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.

ANEXO I: Resumen de indicadores de calibración

En este Anexo se resumen los indicadores de calidad de los modelos numéricos implementados en este estudio: ECM (Error Cuadrático Medio) y coeficiente de correlación R^2 . Las evaluaciones se presentan en puntos de referencia de cada estuario: Quilla (río Santa Cruz), Loyola (río Gallegos), Deseado (río Deseado), Grande (río Grande) y Coyle (río Coyle).

Tabla AI.1 Calibración del Rank 0. ECM en los cinco estuarios de estudio para distintos valores del coeficiente de rugosidad n de Manning.

ECM	Coeficiente n de Manning				
	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030
Quilla	0.3095	0.2850	0.2793	0.2973	0.2973
Loyola	0.4536	0.4239	0.4254	0.4786	0.5858
Deseado	0.1516	0.0938	0.0517	0.0382	0.0554
Grande	0.3920	0.3899	0.4005	0.4108	0.4263
Coyle	0.8120	0.8270	0.8780	0.9482	1.0458
Media	0.4237	0.4039	0.4070	0.4346	0.4821

Tabla AI.2 Calibración del Rank 0. R^2 en los cinco estuarios de estudio para distintos valores del coeficiente de rugosidad n de Manning.

R^2	Coeficiente n de Manning				
	0.010	0.015	0.020	0.025	0.030
Quilla	0.9658	0.9673	0.9672	0.9661	0.9661
Loyola	0.9520	0.9553	0.9572	0.9567	0.9544
Deseado	0.9664	0.9712	0.9770	0.9805	0.9799
Grande	0.9322	0.9276	0.9184	0.9085	0.8990
Coyle	0.9161	0.9133	0.9072	0.9006	0.8939
Media	0.9465	0.9469	0.9454	0.9425	0.9386

Tabla A1.3 Resumen de indicadores de calibración – Rank 1.

ECM	n	R ²	n
	0.015		0.015
Quilla	0.22	Quilla	0.97
Loyola	0.41	Loyola	0.96
Deseado	0.08	Deseado	0.97
Grande	0.21	Grande	0.96
Coyle	0.77	Coyle	0.92
Media	0.34	Media	0.96

Tabla A1.3 Resumen de indicadores de calibración – Rank 2.

ECM	n	R ²	n
	0.015		0.015
Quilla	0.45	Quilla	0.95
Loyola	0.56	Loyola	0.94
Deseado	0.12	Deseado	0.97
Grande	0.26	Grande	0.95
Coyle	-	Coyle	-
Media	0.35	Media	0.95

Tabla A1.4 Resumen de indicadores de calibración – Rank 3.

ECM	n	R ²	n
	0.015		0.015
Quilla	0.32	Quilla	0.96
Loyola	0.59	Loyola	0.94
Deseado	0.10	Deseado	0.96
Grande	0.21	Grande	0.95
Coyle	0.69	Coyle	0.93
Media	0.38	Media	0.95

A partir de las tablas anteriores puede determinarse que se alcanzó el objetivo para el cual se aplicó la metodología de anidados, que era el de lograr hacer llegar a la onda de marea desde mar abierto hasta el interior de cada estuario, manteniendo una buena precisión, sin aumentar el costo computacional.

ANEXO II: Resumen de volúmenes y caudales

Se presenta aquí un resumen, que incluye a todos los estuarios estudiados, de las características de los caudales y los volúmenes. Debe tenerse presente que los datos aquí expuestos reflejan únicamente la información resultante del período simulado (01/01/2017 – 31/03/2017) por lo que no deben considerarse como valores absolutos, sino como órdenes de magnitud o valores usuales.

Tabla AII.1 Volúmenes entrantes por estuario – Rank 3.

Volumen [km ³]	Río Santa Cruz	Río Coyle	Río Deseado	Río Grande	Río Gallegos
Volumen máximo	1.27	0.21	0.20	0.04	2.03
Volumen mínimo	0.29	0.03	0.08	0.02	0.56
Volumen promedio	0.84	0.13	0.15	0.03	1.45

Tabla AII.2 Caudales entrantes por estuario – Rank 3.

Caudal [m ³ /s]	Río Santa Cruz	Río Coyle	Río Deseado	Río Grande	Río Gallegos
Caudal máximo [Q _{max}]	111,090	27,307	17,108	6,888	184,157
Caudal promedio [Q _{med}]	37,902	5,572	6,731	1,399	65,184
Caudal mínimo de los máximos obtenidos [Q _{max}] ^{min}	16,038	2,293	6,213	1,127	37,662
Caudal módulo del río [Q _{mod}]	815	5	5	45	48
[Q _{mod}] / [Q _{max}] ^{min}	5.1%	0.2%	0.1%	4.0%	0.1%