



Estudio hidrodinámico en el tramo inferior del Riachuelo para la determinación de tensiones sobre el lecho

Informe final



Programa de Hidráulica Fluvial - Programa Hidráulica Computacional
Subgerencia Laboratorio de Hidráulica - Instituto Nacional del Agua

Proyecto INA 401
Informe LHA 401-02-21
Ezeiza, noviembre de 2021

AUTORIDADES DEL INA

PRESIDENTE

Dr. Ing. Juan Carlos BERTONI

GERENTE DE PROGRAMAS Y PROYECTOS

Lic. Máximo LANZETTA

DIRECTOR DE LA SUBGERENCIA LABORATORIO DE HIDRÁULICA

Ing. Pablo D. SPALLETTI

Equipo de trabajo (por orden alfabético)

Programa Hidráulica Computacional – Subgerencia Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua

Ing. Lucas Bindelli | Julián Cortese | Dr. Ing. Pablo E. García | Ing. Santiago Guizzardi | Ing. Marina Lagos | Msc. Ing. Mariano Re

Programa Hidráulica Fluvial – Subgerencia Laboratorio de Hidráulica – Instituto Nacional del Agua

Ing. María Cecilia Lopardo | Ing. Pablo D. Spalletti | Ing. Mateo Zombori

Informe realizado por:

Mariano Re

Pablo E. García

Mateo Zombori

Santiago Guizzardi

Pablo D. Spalletti

Julián Cortese

Marina Lagos

Estudio hidrodinámico en el tramo inferior del Riachuelo para la determinación de tensiones sobre el lecho

Informe final

RESUMEN

Se implementó, calibró y validó un esquema de modelos anidados para simular la hidrodinámica bidimensional de detalle del tramo inferior del Riachuelo. Para esto se trabajó con un modelo regional del Río de la Plata que ofrece condiciones de borde de aguas abajo a un modelo local del Riachuelo que incluye el tramo Viejo Puente Pueyrredón - Cuatro Bocas. Se simularon seis escenarios hidrodinámicos y se obtuvieron las tensiones de corte máximas de cada uno de ellos para finalmente construir una envolvente representativa de la dinámica del sistema. Luego se calcularon las tensiones de corte máximas generadas por dos tipos de embarcaciones y para distintas potencias y velocidades de operación. Se determinaron las zonas del tramo Viejo Puente Pueyrredón - Cuatro Bocas donde, para las condiciones de operación evaluadas, las tensiones de corte máximas del propio cuerpo de agua son mayores que las generadas por la propulsión de embarcaciones.

Descriptor temático: Hidrodinámica; Modelación numérica; Tensiones de corte; Navegación.

Descriptor geográfico: Riachuelo; Cuenca Matanza-Riachuelo.

Tabla de contenido

1	Introducción	6
1.1	Tramo de estudio	6
1.2	Contenido del informe.....	7
2	Modelación Numérica	8
2.1	Software	8
2.2	Estrategia de modelación	8
2.2.1	Modelo Regional	8
2.2.2	Modelo Local	9
2.3	Condiciones de borde.....	11
2.3.1	Ventanas de análisis.....	11
2.3.2	Marea astronómica.....	13
2.3.3	Marea meteorológica	13
2.3.3.1	Sudestada.....	13
2.3.3.2	Bajante	14
2.3.4	Condiciones de borde del modelo regional	15
2.3.4.1	Caudales.....	15
2.3.4.2	Niveles.....	15
2.3.4.3	Vientos	15
2.3.5	Condiciones de borde del modelo local.....	15
2.3.5.1	Caudales.....	15
2.3.5.2	Niveles.....	18
2.3.6	Consideraciones generales	18
2.4	Calibración y validación	20
2.4.1	Calibración del Modelo Regional	20
2.4.2	Validación del Modelo Regional.....	21
2.4.3	Validación del Modelo Local	24
3	Tensiones de corte del cuerpo de agua.....	26
3.1	Análisis hidrodinámico.....	26
3.1.1	Escenarios hidrodinámicos	26
3.1.2	Análisis de escenarios	27
3.2	Análisis de niveles históricos	31

3.3	Análisis de tensiones de corte del cuerpo de agua.....	32
4	Tensiones de corte debidas a embarcaciones.....	36
4.1	Estructura del flujo generada por el paso de una embarcación	36
4.2	Formulaciones de las tensiones de corte	37
4.3	Sistema de propulsión	38
4.3.1	Estructura del flujo generada por la propulsión de una embarcación.....	38
4.3.2	Cálculo de velocidades.....	39
4.3.2.1	Velocidad inicial	39
4.3.2.2	Velocidad máxima en el lecho.....	40
4.3.3	Cálculo de tensiones de corte de fondo	42
4.4	Olas producto del paso de embarcaciones.....	42
4.4.1	Estructura del flujo generada por el oleaje.....	42
4.5	Tipos de embarcaciones	44
4.5.1	Características Embarcación Tipo 1	44
4.5.2	Embarcación Tipo 2.....	44
4.6	Condiciones de navegación	44
4.6.1	Potencia a utilizar.....	45
4.6.2	Velocidad de navegación	46
4.7	Análisis de tensiones de corte debidas a las embarcaciones.....	46
4.7.1	Escenarios analizados	46
4.7.2	Resultados.....	49
5	Análisis comparativo.....	56
5.1	Diferencia de tensiones máximas.....	56
5.2	Resumen.....	61
6	Conclusiones.....	71
	Referencias	76

1 Introducción

El planteo de condiciones de navegabilidad del Riachuelo en su tramo inferior exige la necesidad de contar con nuevo conocimiento de base que permita tomar decisiones en ese sentido. Específicamente, una caracterización detallada de la hidrodinámica de este sector, con mayor profundidad que la existente al momento, se transforma en una herramienta de importancia para facilitar la definición de una política de manejo.

El objetivo general de este trabajo consiste en estudiar las tensiones de corte sobre el lecho del tramo inferior del Riachuelo (Cuatro Bocas - Viejo Puente Pueyrredón) debido a los efectos dinámicos del escurrimiento y compararlas con aquellas posibles de ser inducidas por la navegación de embarcaciones para el transporte de pasajeros.

Para avanzar con esta comparación, se plantea la implementación de un modelo hidrodinámico del Río de la Plata Interior y del tramo inferior del río Matanza-Riachuelo que facilita la obtención de la distribución espacio-temporal de las tensiones de corte en la zona de estudio contemplando los caudales generados en la cuenca y la influencia de los efectos de marea impuestos por el Río de la Plata. Además, se efectúa un análisis de las tensiones de corte producidas por el desplazamiento de la masa de agua y el efecto de las hélices ante la eventual navegación de dos embarcaciones tipo definidas por la Autoridad de Cuenca Matanza-Riachuelo (ACUMAR). Estas tensiones de corte sobre el lecho se comparan con las que se producen naturalmente bajo las condiciones hidrodinámicas analizadas en este estudio, permitiendo una evaluación acerca de los efectos que produciría la navegación respecto a los que habitualmente se presentan en este tramo de río.

1.1 Tramo de estudio

La zona de interés del estudio corresponde a la desembocadura del Riachuelo en el Río de la Plata. Constituye un tramo con una longitud aproximada de 4 km y se localiza entre Cuatro Bocas y el Viejo Puente Pueyrredón (Figura 1.1). En esta sección del río conviven distintas actividades, entre las que se destacan las que se dan en el entorno al acceso al Puerto de Dock Sud como el paseo turístico de la zona de Vuelta de Rocha. Además, se ubican una serie de puentes que lo cruzan: Autopista Buenos Aires – La Plata, Nicolás Avellaneda, Barraca Peña, Pueyrredón y Pueyrredón Viejo.

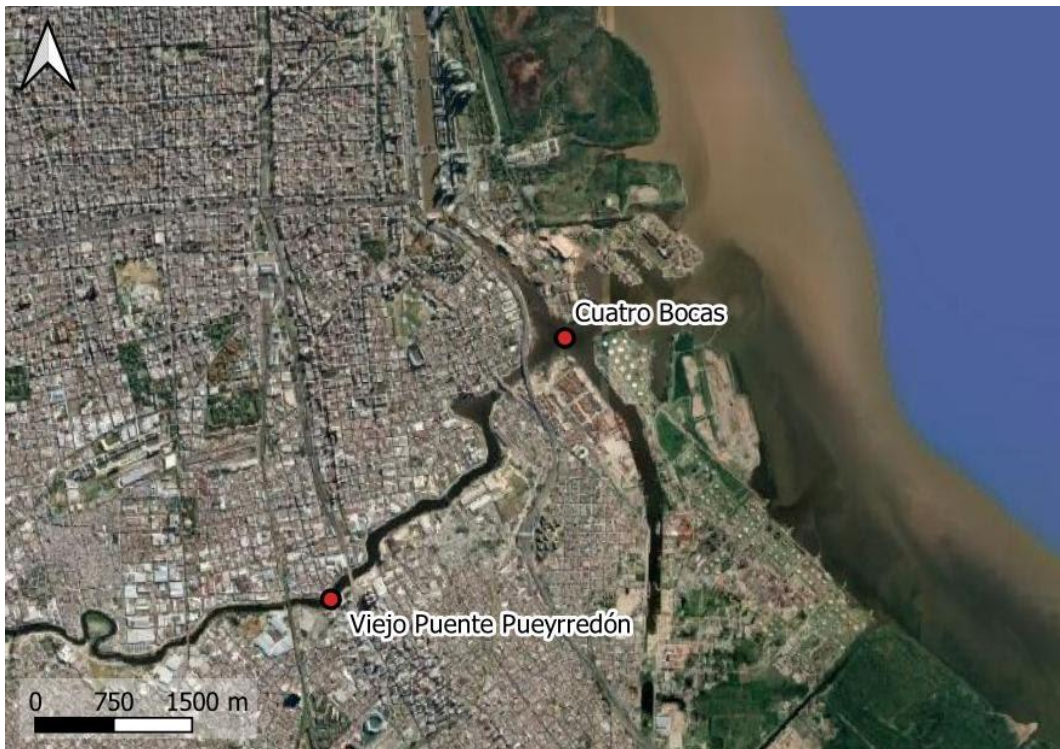


Figura 1.1. Tramo de estudio.

1.2 Contenido del informe

En este informe se presentan las instancias de implementación y calibración/validación del modelo numérico de detalle que permite describir la hidrodinámica y las tensiones de corte del cuerpo de agua en el tramo de análisis (Capítulos 2 y 3). También, se plantea la metodología de evaluación de las tensiones de corte inducidas por la navegación de dos embarcaciones tipo determinadas por ACUMAR (Capítulo 4). Finalmente se realiza una comparación de las tensiones de corte generadas por la propia dinámica del sistema, para los escenarios seleccionados, y las que resultan producto de la navegación en el tramo (Capítulo 5).

2 Modelación Numérica

En este capítulo se presenta el abordaje de modelación numérica aplicado en este trabajo consistente en la implementación, calibración y validación de un sistema de modelos anidados para resolver con buen detalle la hidrodinámica de la zona de estudio.

2.1 Software

Se implementó un modelo hidrodinámico del Río de la Plata y del tramo inferior del río Matanza-Riachuelo, que permite contar con la distribución espacio-temporal de niveles y velocidades de corriente en todo su dominio de cálculo. Para ello se utilizó el software Delft3D¹, desarrollado por *Deltares Systems* (Países Bajos), que consiste en una suite de códigos aplicables en problemas de hidrodinámica, transporte de sedimentos y estudios ambientales de ríos, estuarios y zonas costeras. El Delft3D incorpora los efectos de las mareas, los vientos, la presión atmosférica, las diferencias de densidad (debido a la salinidad y temperatura), las olas y la turbulencia, y permite la simulación del flujo en dos (2D) y tres (3D) dimensiones espaciales con o sin transporte de sedimentos, teniendo en cuenta una morfología variable o fija.

El modelo hidrodinámico (Módulo FLOW) resuelve las ecuaciones de Navier-Stokes sobre una malla curvilínea, asumiendo las hipótesis de Boussinesq (Deltares, 2021). 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 (de coordenadas rectangulares o curvilíneas) utilizando el método RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*). Además de simular 3D, el modelo también funciona en modo 2D-horizontal, es decir, con las versiones de las ecuaciones integradas en la dirección vertical. El abordaje bidimensional resulta válido para este caso en el que las escalas espaciales horizontales son mucho mayores que la escala vertical.

2.2 Estrategia de modelación

2.2.1 Modelo Regional

El Modelo Regional incluye en su dominio a la totalidad del Río de la Plata (Figura 2.1), desde las desembocaduras de los ríos Uruguay y Paraná hasta la línea imaginaria San Clemente del Tuyú

¹ <https://oss.deltares.nl/web/delft3d>

(Argentina) – Punta del Este (Uruguay), sobre una extensión longitudinal del orden de los 280 km, y lateral (entre ambas costas, argentina y uruguaya) del orden de los 50 a 220 km desde aguas arriba hacia aguas abajo. La línea costera fue digitalizada a partir de imágenes satelitales georreferenciadas. Se utilizó una malla regular de elementos cuadrados, densa, y con lados de 100 m de longitud.

Este dominio permite representar con buena precisión el impacto de ondas de tormenta, tanto positivas como negativas, en la franja costera de la Región Metropolitana de Buenos Aires.

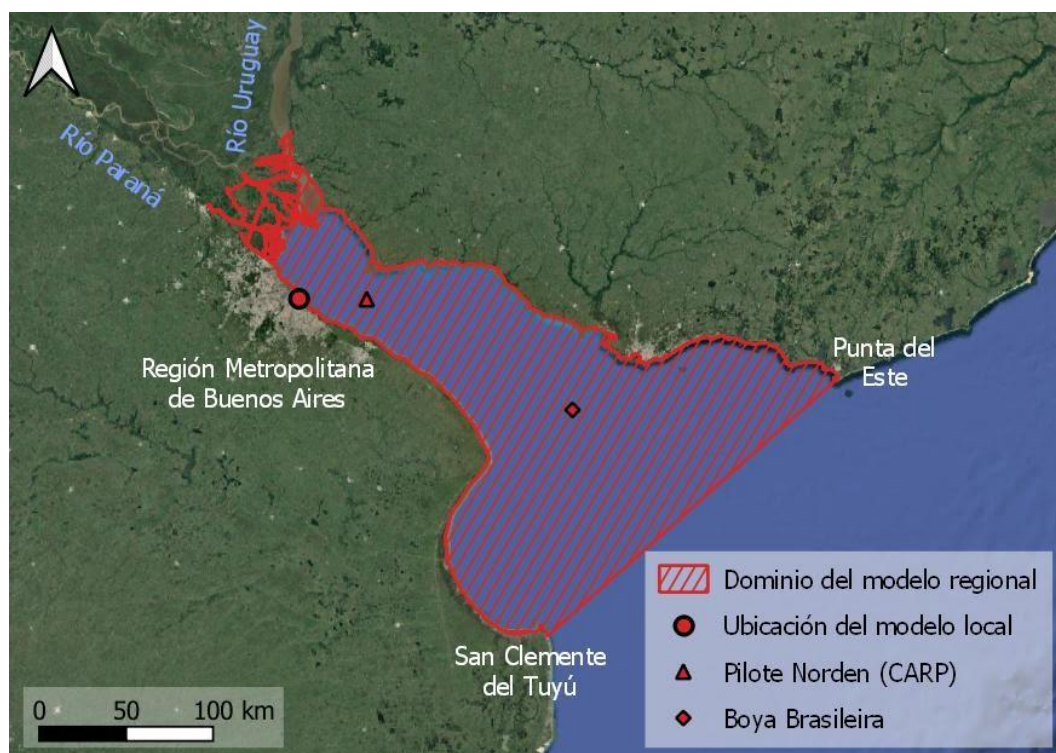


Figura 2.1. Dominio del modelo regional.

2.2.2 Modelo Local

El dominio del Modelo Local (Figura 2.2) abarca el tramo inferior del Riachuelo, iniciado unos 200 m aguas arriba del Puente Victorino de la Plaza y extendiéndose hasta su desembocadura en el Río de la Plata. La grilla adoptada es del tipo regular curvilínea y presenta dos bordes abiertos. El borde abierto Oeste (rectilíneo) permite representar el caudal erogado por el Riachuelo, mientras que el borde abierto Este (curvilíneo) se encarga de representar la variación de niveles y velocidades de corriente debido a la marea astronómica y la meteorológica.

Para definir la discretización espacial fueron considerados dos criterios. En primer lugar, sobre el borde abierto del dominio en donde el Modelo Local se acopla al Modelo Regional (borde abierto Este), se respetó una relación mínima entre los lados de las celdas de uno y otro modelo

de 1:3 para evitar un cambio brusco en el refinamiento del dominio. En segundo lugar, se garantizó que en las secciones más estrechas el ancho de celda sea lo suficientemente acotado para poder representar adecuadamente la geometría del curso (Figura 2.3). Para ello, se adoptó un ancho de celda de 2,5 m entre el borde abierto Oeste (ingreso del caudal del Riachuelo) y las desembocaduras de la Dársena Sur y el Dock Sud. Entre ambas regiones las dimensiones de celda varían linealmente para generar una transición suave entre ambos tamaños.

Dado el carácter regular de la grilla adoptada y sumado a las imposiciones en los tamaños de celda enunciados en el párrafo anterior, resulta indispensable que el borde abierto Este sea curvilíneo (Figura 2.2) puesto que permite que, de Oeste a Este, los bordes laterales de cada celda se extiendan progresivamente, aumentando en ancho, pero sin necesidad de modificarse en largo. De optar por una configuración distinta, la variación en las dimensiones de celdas de mayor tamaño afectaría a celdas de otras partes del dominio (ubicadas en la misma fila de la matriz de la resolución numérica) cuyas dimensiones, en función de lo expresado anteriormente, requieren ser menores.

Por último, corresponde mencionar la representación del conjunto de dársenas y canales presentes en el dominio, producto de la presencia de numerosas tomas de agua y descargas de agua para refrigeración que generan modificaciones en la hidrodinámica local (este punto se desarrolla con mayor detalle en el apartado 2.3.5).

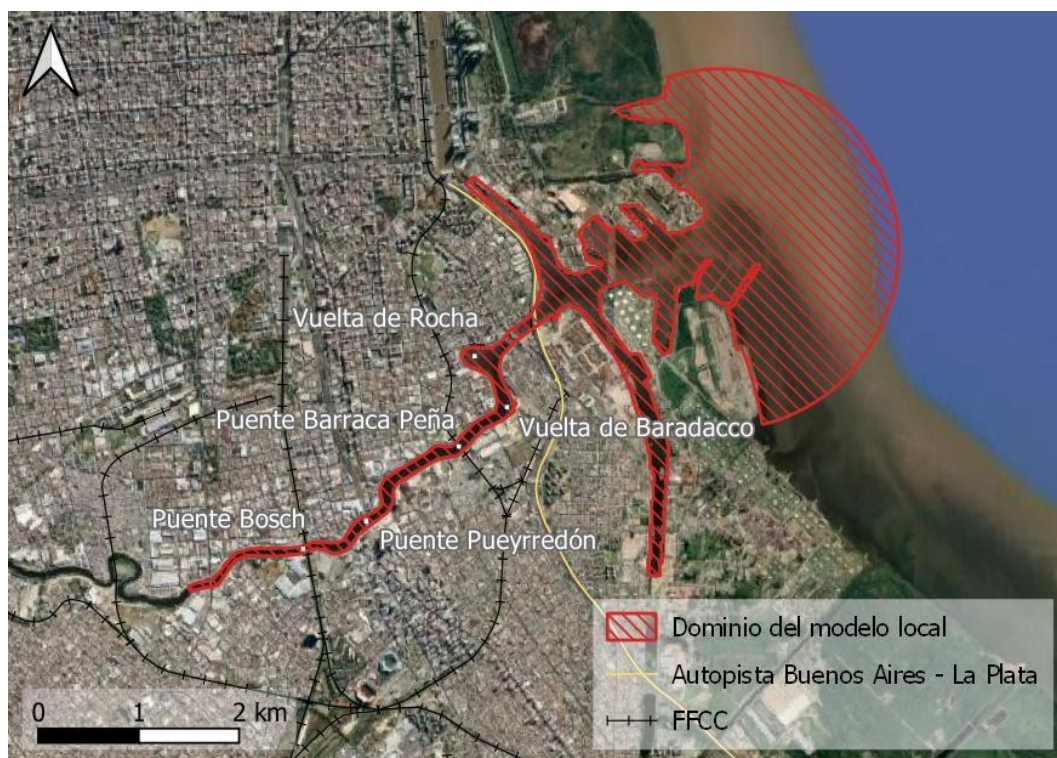


Figura 2.2. Dominio del modelo local.



Figura 2.3. Detalle de la malla del dominio del modelo local.

2.3 Condiciones de borde

2.3.1 Ventanas de análisis

Las ventanas temporales de análisis se corresponden a tres situaciones diferentes del Río de la Plata durante las cuales se dispuso de niveles observados simultáneos en las estaciones Buenos Aires del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) en el Río de la Plata (Puerto de Buenos Aires / Palermo) y en el Club Regatas de Avellaneda (ACUMAR) en el Riachuelo (Figura 2.4). Las tres condiciones incluyen situaciones dinámicas regidas por la marea astronómica (condiciones normales) y la marea meteorológica (condiciones de bajante y sudestada).

Las fechas de las ventanas temporales de análisis son las siguientes:

- Condiciones normales: 14 de febrero de 2019 - 21 de febrero de 2019
- Condición de bajante: 24 de enero de 2019 - 31 de enero de 2019
- Condición de sudestada: 08 de febrero de 2019 - 15 de febrero de 2019

En la Figura 2.5 se muestran los niveles observados en el Club Regatas de Avellaneda durante el período 23/1/2019-22/2/2019, presentando cada una de las tres ventanas temporales planteadas.

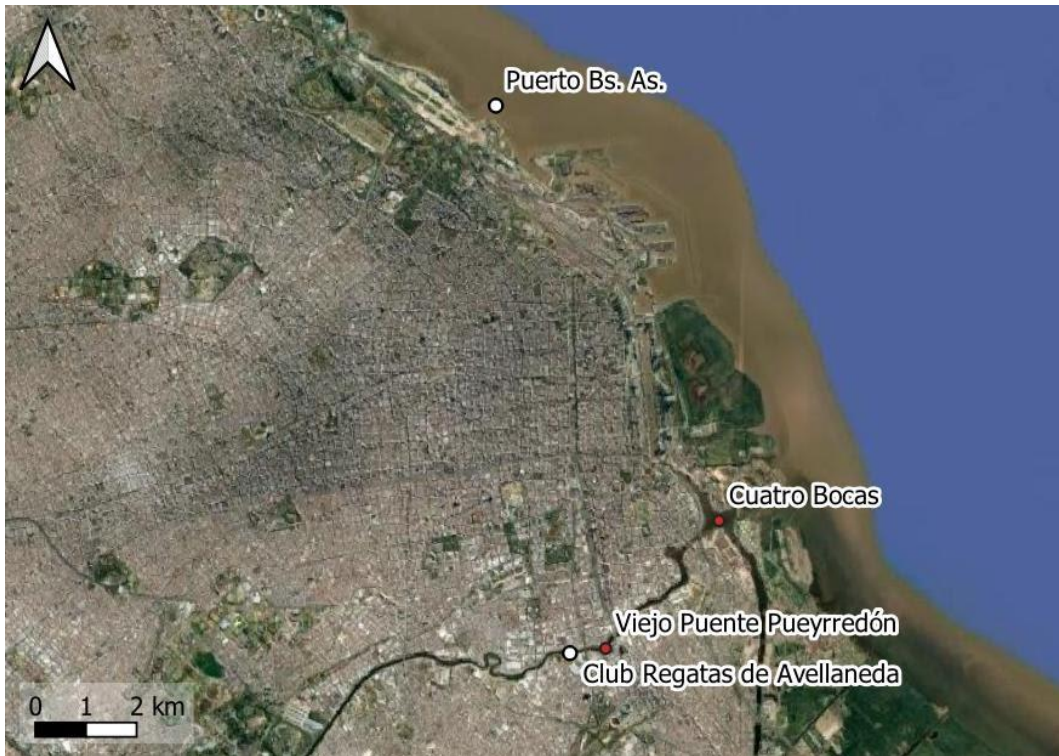


Figura 2.4. Estaciones de niveles observados.

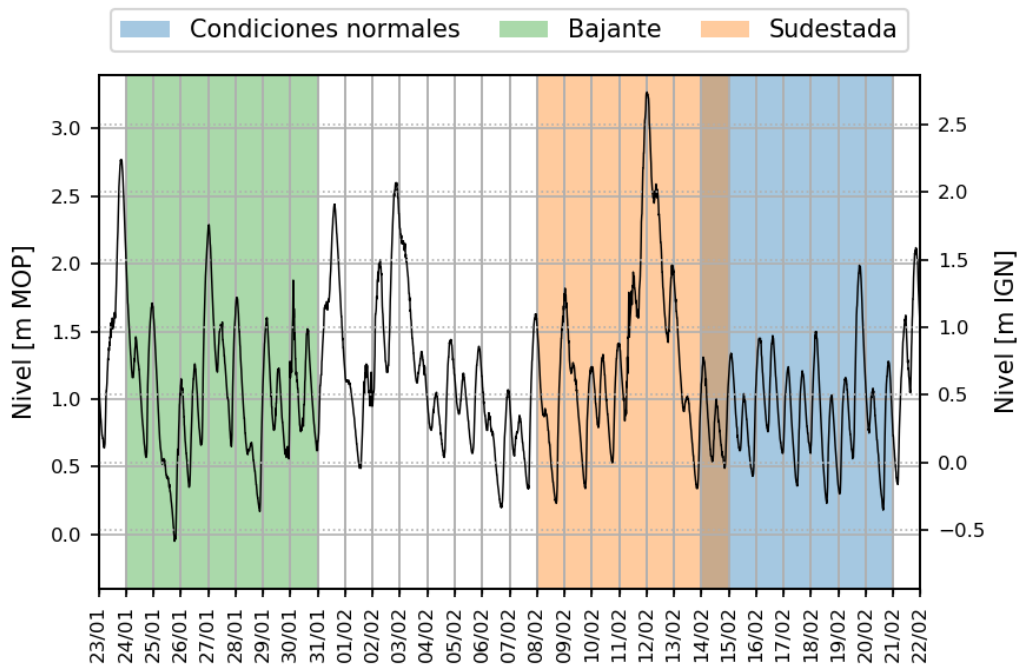


Figura 2.5. Niveles observados en Regatas de Avellaneda (ACUMAR) y ventanas de análisis.

2.3.2 Marea astronómica

Se considera una situación de marea astronómica a una ventana temporal en la que la acción del viento no perturba considerablemente los niveles del Río de la Plata (la componente astronómica resulta predominante por sobre la meteorológica). La Figura 2.6 muestra la serie de niveles observados en el Riachuelo en Regatas de Avellaneda (ACUMAR) durante la ventana de condiciones normales y su nivel medio.

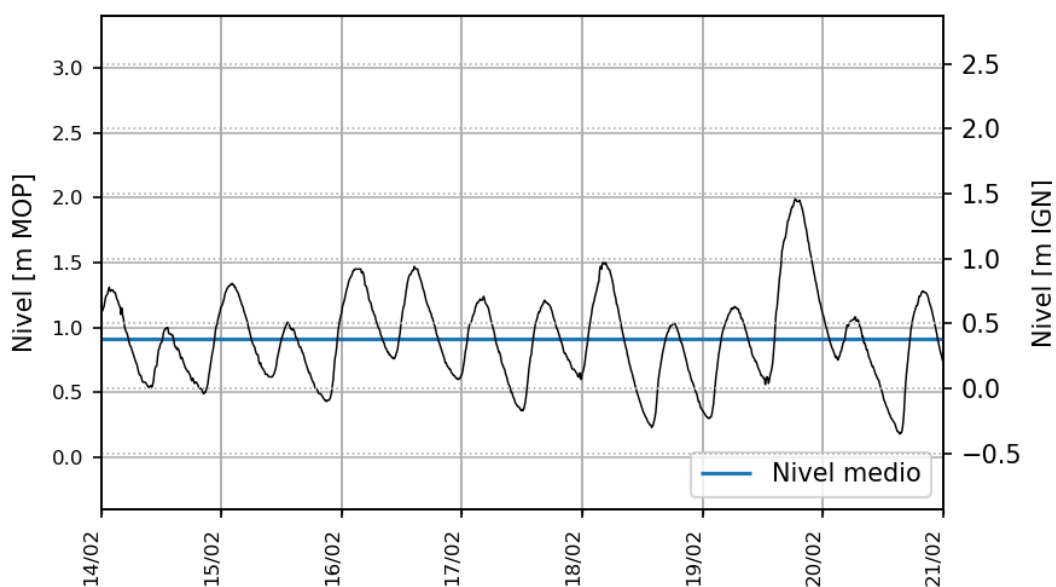


Figura 2.6. Niveles observados en Regatas de Avellaneda (ACUMAR) durante la ventana de condiciones normales.

2.3.3 Marea meteorológica

Se considera una situación de marea meteorológica a una ventana temporal en la que la acción del viento perturba considerablemente los niveles del Río de la Plata (la componente meteorológica resulta predominante por sobre la astronómica). Este es el caso de las ondas de tormenta, tanto positivas (sudestada) como negativas (bajante).

2.3.3.1 Sudestada

Durante la ventana correspondiente a la condición de sudestada los niveles máximos registrados en el Riachuelo (estación Regatas de Avellaneda) y en el Río de la Plata (estación Buenos Aires del SHN) fueron 3,27 y 3,21 m MOP respectivamente (o 2,74 y 2,68 m IGN). En la Figura 2.7 se presenta la serie de niveles observados en el Riachuelo durante esta ventana temporal.

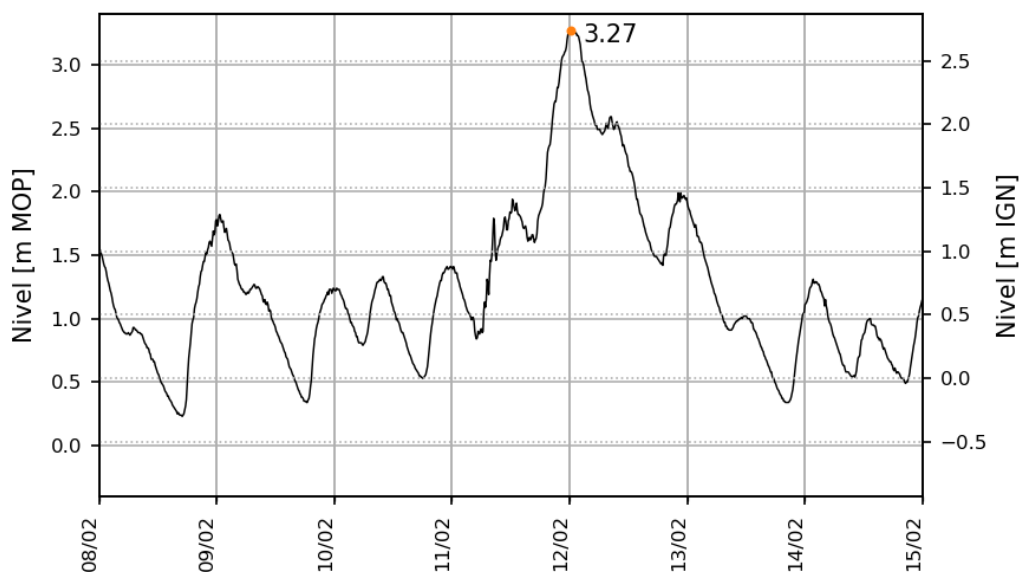


Figura 2.7. Niveles observados en Regatas de Avellaneda (ACUMAR) durante la ventana de condición de Sudestada

2.3.3.2 Bajante

En la Figura 2.8 se presentan los niveles registrados en la estación Regatas de Avellaneda durante la ventana de condición bajante. En esa estación el valor mínimo registrado fue -0.05 m MOP (-0,58 m IGN), mientras que en la estación del Río de la Plata (Puerto Buenos Aires / Palermo) fue 0.11 m MOP (-0,42 m IGN).

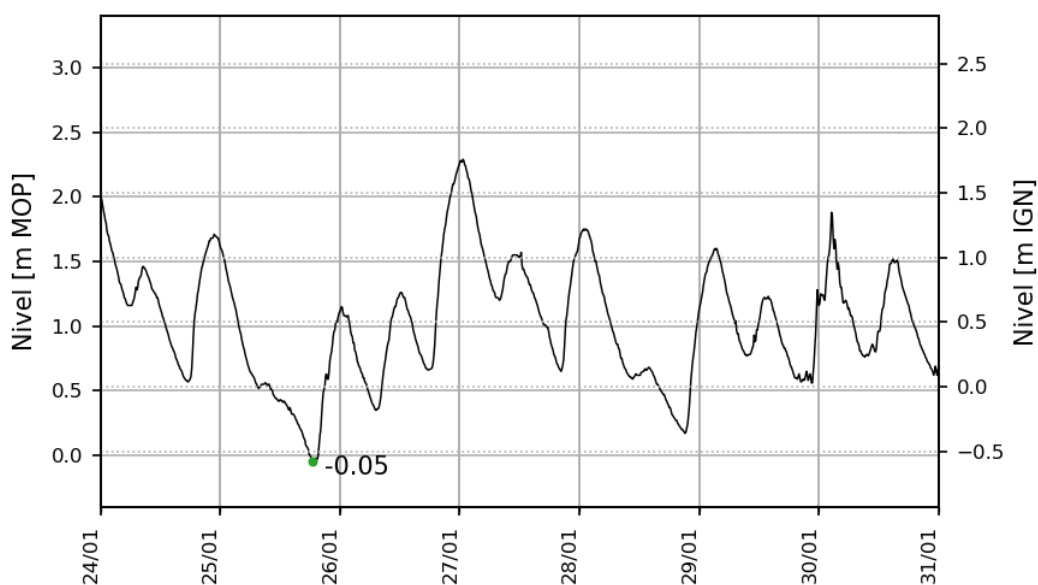


Figura 2.8. Niveles observados en Regatas de Avellaneda (ACUMAR) durante la ventana de condición de bajante.

2.3.4 Condiciones de borde del modelo regional

2.3.4.1 Caudales

Para cada ventana de modelación los aportes del río Paraná se fijaron a partir del promedio de los caudales medios diarios registrados en la estación Timbúes. Esta información se obtuvo del Sistema Nacional de Información Hídrica (SNIH). Para el río Paraná se adoptaron porcentajes fijos de repartición de caudales entre los distintos brazos que ingresan al modelo, a saber: un brazo representando los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Miní (representa un 25,8% del caudal del río Paraná), otro para los ríos Paraná Guazú y Barca Grande (31,8% del río Paraná) y por último, un tercer brazo incorporando los ríos Paraná Bravo y Sauce (al cual se le asignó un 42,4% del caudal total del río Paraná) (Bombardelli et al., 1995).

2.3.4.2 Niveles

Se trabajó con series de nivel hidrométrico registradas por los mareógrafos ubicados en San Clemente del Tuyú (SHN, Argentina) y Punta del Este (Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada - SOHMA, Uruguay), disponibles para las ventanas temporales seleccionadas.

2.3.4.3 Vientos

Para la ventana de condición de bajante se trabajó con vientos provenientes del modelo global de información Reanalysis ERA5 (*European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*²), empleando resolución espacial de 0,25° x 0,25° y resolución temporal horaria. La validación para dicho escenario resultó satisfactoria, no siendo así para las ventanas de condiciones medias y de sudestada. Para estas últimas simulaciones se decidió representar el forzante a partir de mediciones realizadas por la Comisión Administradora del Río de la Plata (CARP) en la estación hidrometeorológica de Pilote Norden (Figura 2.1), obteniendo mejores resultados.

2.3.5 Condiciones de borde del modelo local

2.3.5.1 Caudales

Tanto el caudal de ingreso al tramo inferior del Riachuelo, como las tomas y descargas de las centrales térmicas Costanera y Dock Sud, fueron impuestos como caudales constantes en cada ventana de simulación. En el caso de los ingresos y egresos de caudales al sistema a través de centrales térmicas (Figura 2.9), se adoptaron valores ofrecidos por los operadores que se detallan en la Tabla 2.1 (Re y García, 2015; Re et al., 2016).

² <https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5>

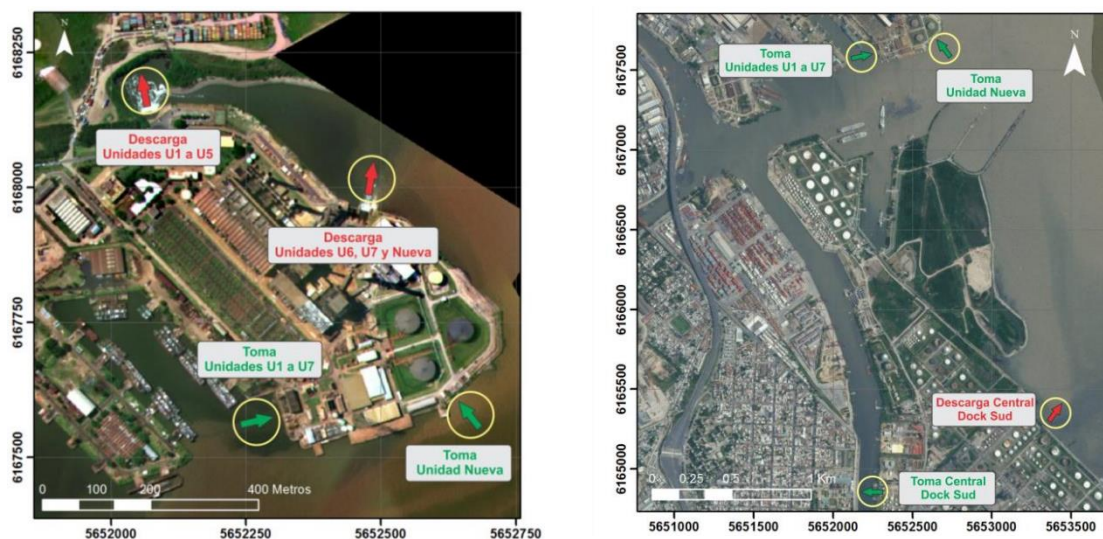


Figura 2.9. Esquema de descargas y tomas de agua en Central Costanera y Central Dock Sud.

Tabla 2.1. Descargas y Tomas en Central Costanera y Dock Sud.

Tipo	Nombre	Caudal [m^3/s]
Toma de agua	Central Dock Sud	9,6
Toma de agua	Central Costanera (U1 a U5)	24,0
Toma de agua	Central Costanera (U6)	14,0
Toma de agua	Central Costanera (U7)	14,0
Toma de agua	Central Costanera (CC)	16,0
Descarga	Central Dock Sud	9,6
Descarga	Central Costanera (U1 a U5)	24,0
Descarga	Central Costanera (U1, U7 y CC)	44,0

Dado que no se cuenta con mediciones sistemáticas y continuas del caudal en el Riachuelo, se realizaron simulaciones con un modelo hidrológico-hidráulico del río Matanza-Riachuelo implementado previamente (UTN-FRA/INA, 2018) con el objetivo de realizar un análisis estadístico para caracterizar los caudales de este curso en correspondencia con el borde de aguas arriba del modelo local (Puente Victorino de la Plaza). Las simulaciones efectuadas no consideraron el efecto de la dinámica del Río de la Plata (es decir, se fijó un nivel medio del Río de la Plata).

A partir de las series de caudales simuladas se procedió a realizar un análisis de extremos. Basado en la Teoría General de Extremos (Coles, 2001) se ajustó la Distribución Generalizada de Valor

Extremo Tipo I (GEV Tipo I, Gumbel) a las series de caudales (Figura 2.10). Los caudales asociados a diferentes períodos de retorno se presentan en forma resumida en la Tabla 2.2. Adicionalmente se estableció un caudal medio del Riachuelo en la sección del Puente Victorino de la Plaza de 15 m³/s.

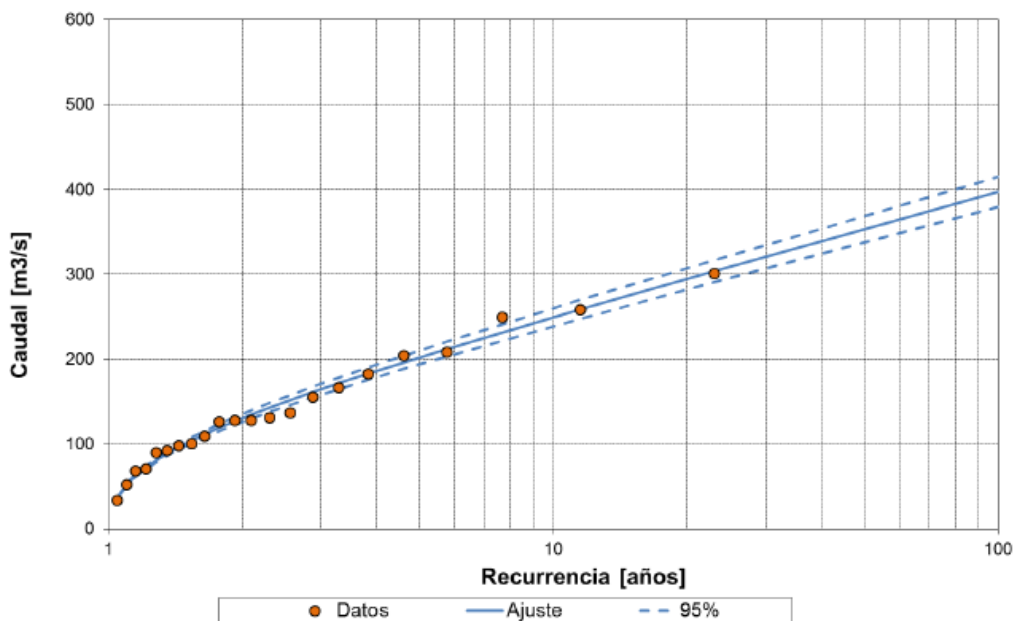


Figura 2.10. Ajuste de las series de caudales máximos anuales.

Tabla 2.2. Recurrencia de caudales máximos anuales

<i>Recurrencia [años]</i>	<i>Caudal [m³/s]</i>
1,5	100
2	131
5	202
10	249
20	295
50	353
100	397

2.3.5.2 Niveles

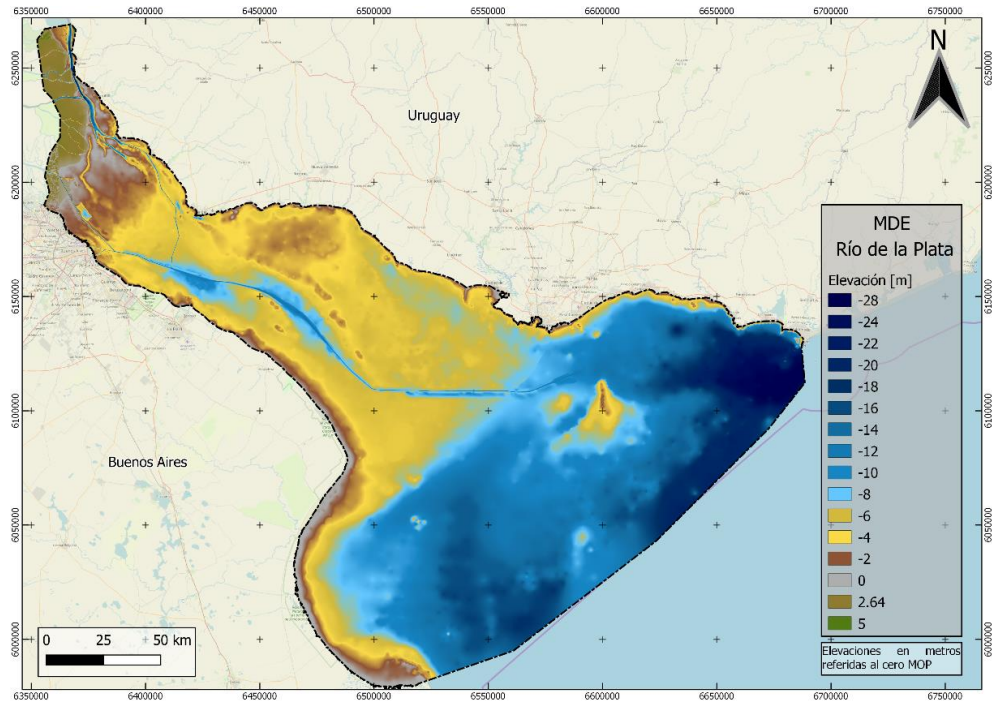
El anidado de modelos se materializa al tomar como condición de borde del Modelo Local los resultados de la simulación del Modelo Regional. En ese sentido se seleccionaron cinco puntos ubicados sobre la frontera del dominio del Modelo Local donde se asignan series de nivel. Dichas series temporales resultan de la interpolación espacial de los resultados obtenidos en el Modelo Regional.

2.3.6 Consideraciones generales

Complementando lo ya detallado para cada uno de los modelos (regional y local), se mencionan características que son comunes en cuanto a la estrategia de modelación:

- 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 el Modelo Regional fue representado 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. Por su parte, en el Modelo Local no se implementó dicha formulación dado su alto costo computacional, sino que se impuso una viscosidad turbulenta constante y uniforme igual a $10 \text{ m}^2/\text{s}$.
- Se adoptó un único valor para el coeficiente de rugosidad n de Manning en cada dominio.
- En esta primera aproximación del análisis de la hidrodinámica de esta región, la densidad del agua fue definida con un valor constante y uniforme.
- No se consideraron condiciones de oleaje propias del cuerpo de agua.

La Figura 2.11 muestra los modelos digitales de elevación (MDE) del Modelo Regional y del Modelo Local. En la Tabla 2.3 se resumen las principales características de cada uno de los modelos implementados.



a) Modelo Regional



b) Modelo Local

Figura 2.11. MDE del fondo. Cotas referidas al cero MOP.

Tabla 2.3. Principales características de los modelos regional y local.

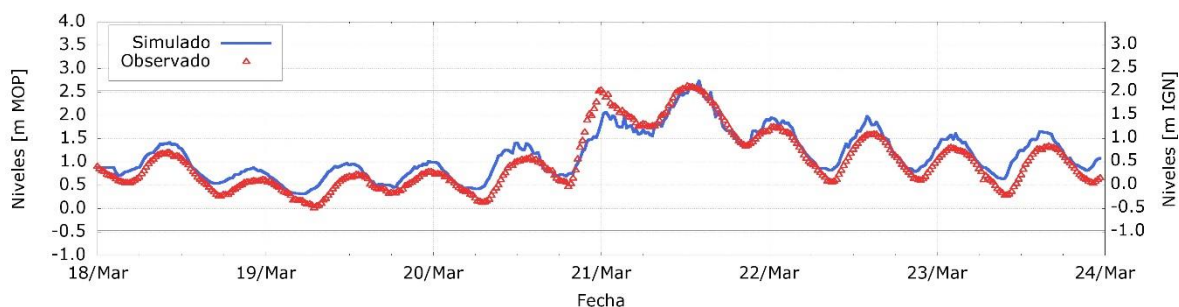
<i>Característica</i>	<i>Modelo Regional</i>	<i>Modelo Local</i>
Batimetría [fuente]	- Cartas náuticas, SHN. - Relevamiento en canales, Subsecretaría de Puertos, Vías Navegables y Marina Mercante.	- Cartas náuticas, SHN. - Relevamiento AGP SHN, 2018. - Relevamiento CRL-INA, 2014.
Rango de profundidades [m MOP]	-24; 28,9	-4,4; 10,6
Discretización temporal [s]	30	15
Discretización espacial (tamaño aproximado de celda) [m]	100 x 100	3 x 10
Cantidad máxima de elementos en dirección M (longitudinal)	2452	880
Cantidad máxima de elementos en dirección N (transversal)	3158	1078
Cantidad total de celdas	3177655	70048

2.4 Calibración y validación

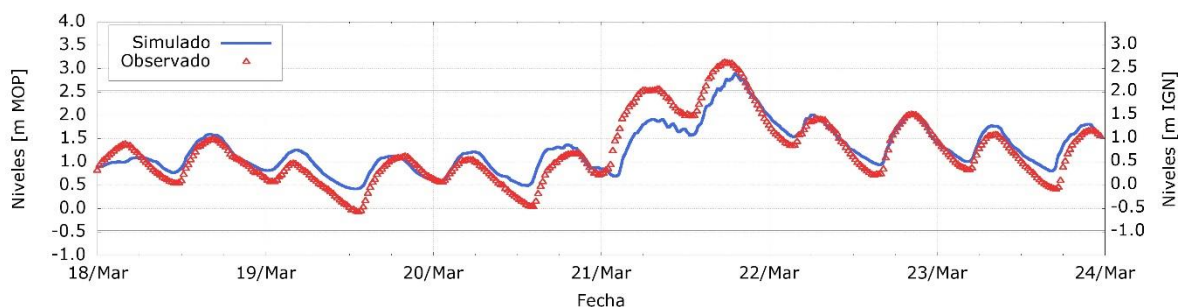
2.4.1 Calibración del Modelo Regional

La calibración del modelo hidrodinámico regional se llevó a cabo mediante la comparación de series de nivel simuladas con observadas. Los principales puntos de monitoreo empleados fueron Buenos Aires y Boya Brasileira con tal de lograr analizar los resultados del modelo a lo largo de todo el estuario.

El parámetro en torno al cual se realizó la calibración fue el coeficiente de Manning, tomado en primera instancia a 0,015 (el cual corresponde con el valor usualmente adoptado para el Río de la Plata; Jaime y Menéndez, 1999). Para la configuración de los coeficientes de arrastre del viento se adoptó el esquema de Bowden. La Figura 2.12 ilustra el ajuste obtenido a los niveles observados para un período de aproximadamente una semana en sendos puntos de monitoreo.



a) Boya Brasileira - 18/03/2015 – 24/03/2015



b) Buenos Aires - 18/03/2015 – 24/03/2015

Figura 2.12. Niveles registrados (puntos rojos) y simulados (línea azul) de niveles

Obtenidos los primeros resultados, se estudió la sensibilidad del modelo al coeficiente de Manning variando el mismo $\pm 25\%$, pero las variaciones promedio de los niveles fueron del orden del centímetro respecto al valor inicial de 0,015, por lo que se adoptó dicho valor sin llevar a cabo otras pruebas por considerar que el principal parámetro de calibración no es una variable significativa al momento de obtener un mejor ajuste que el ya obtenido inicialmente.

2.4.2 Validación del Modelo Regional

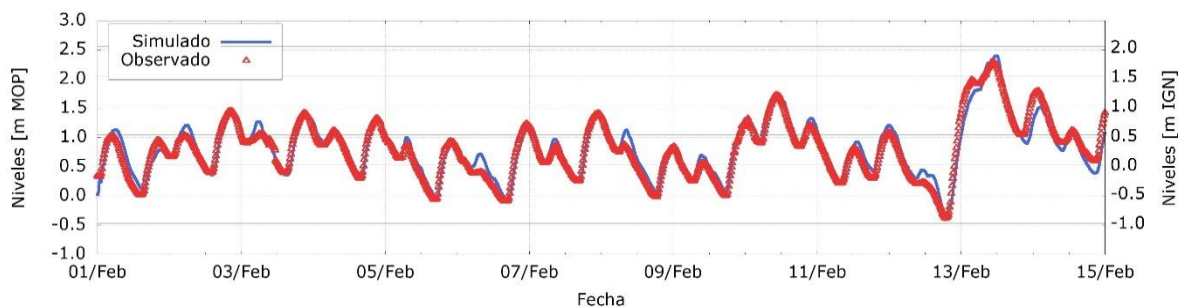
Para validar el modelo hidrodinámico regional se efectuaron comparaciones entre sus resultados y registros de niveles de agua y velocidades de corriente disponibles para algunas ventanas de tiempo. Se contó con mediciones efectuadas por AySA con ADCP en el período del 26 de enero al 26 de mayo del 2015, en las dos ubicaciones indicadas en la Figura 2.13.



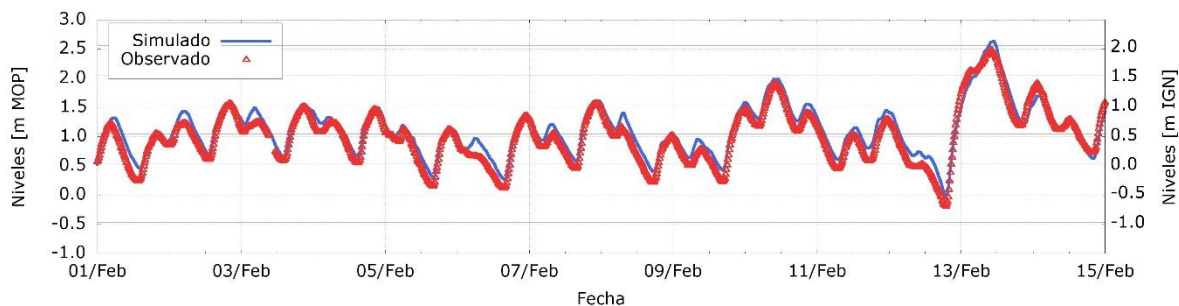
Figura 2.13. Ubicación de los ADCP instalados en la campaña de 2015 efectuada por AySA.

Se verificó que el período de simulación corresponde a condiciones de caudal medio de los tributarios, de modo que para ellos se impusieron caudales constantes, de 18.500 m³/s para el río Paraná, 5.000 m³/s para el río Uruguay, y 190 m³/s para el río Luján (representativo del valor medio registrado en su desembocadura).

La Figura 2.14 presenta la comparación de los valores de niveles registrados y simulados correspondientes a la Toma San Martín y la Toma Bernal. Se observa un acuerdo general muy satisfactorio.



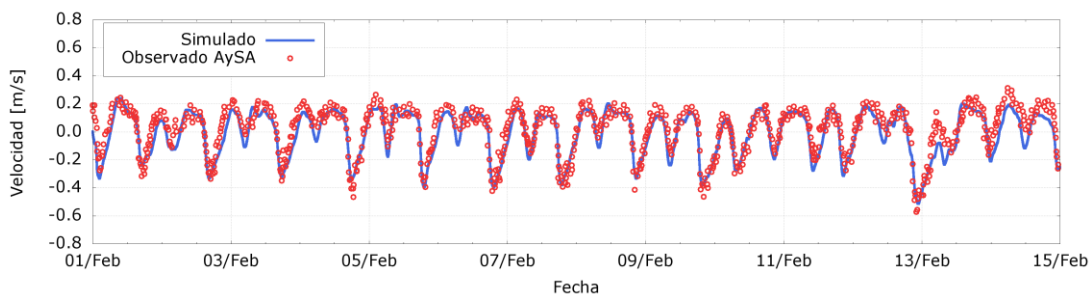
a) Toma San Martín (AySA) – 01/02/2015 – 15/02/2015



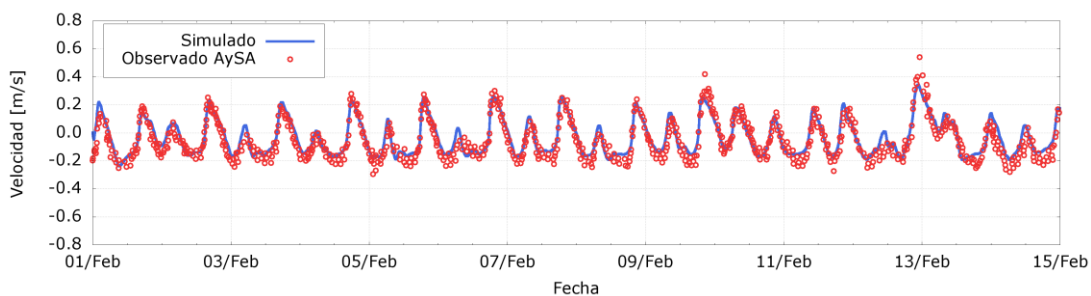
b) Toma Bernal (AySA) – 01/02/2015 – 15/02/2015

Figura 2.14. Niveles registrados (puntos rojos) y simulados (línea azul) de niveles

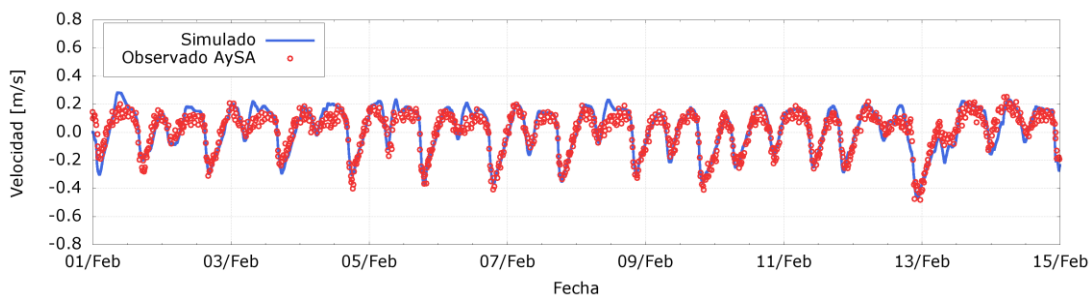
La Figura 2.15 muestra la comparación entre las componentes Este y Norte de las velocidades registradas y las simuladas para el periodo de análisis correspondientes a ambas estaciones. Se observa un acuerdo general satisfactorio en modulación y amplitud.



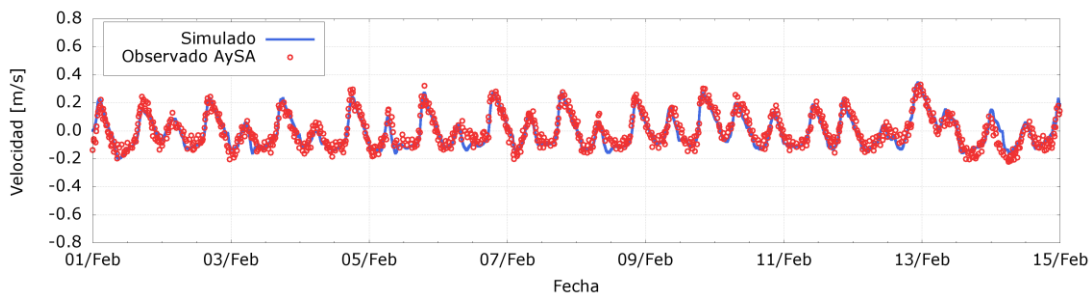
a) Componente Este ADCP 01



b) Componente Norte ADCP 01



c) Componente Este ADCP 02



d) Componente Norte ADCP 02

Figura 2.15. Velocidades en los ADCP de la campaña 2015 de acuerdo a AySA. Registrados (puntos rojos) y simulados (línea azul)

2.4.3 Validación del Modelo Local

La validación del modelo hidrodinámico local se llevó a cabo comparando los niveles simulados y observados en la estación Regatas de Avellaneda. A continuación se presentan los resultados para las tres ventanas de trabajo (Figura 2.16, Figura 2.17 y Figura 2.18). Para evaluar la performance de este modelo se utilizó el indicador raíz cuadrada del error cuadrático medio (RECM) arrojando estos resultados: 0,34 m (condición de marea astronómica), ii) 0,25 m (condición de sudestada), y iii) 0,28 m (condición de bajante).

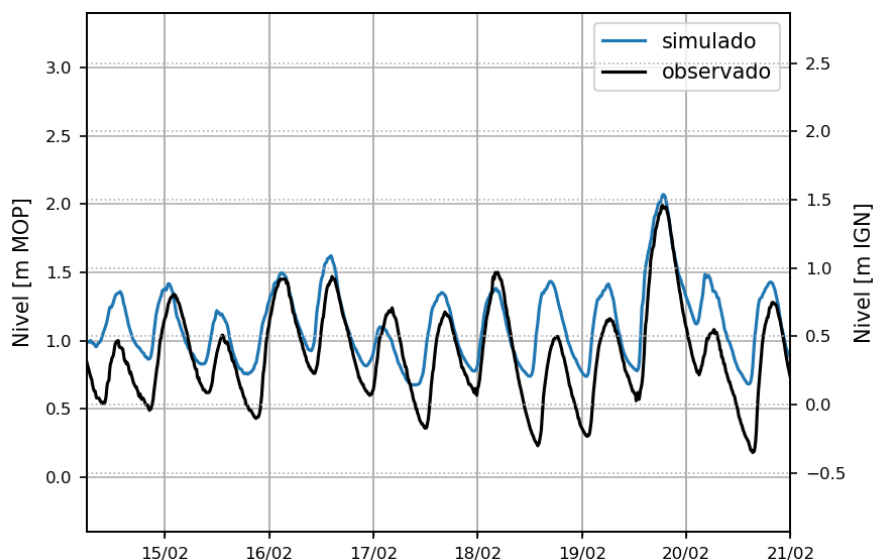


Figura 2.16. Series de nivel simulada y observada para la ventana de condiciones normales en Club Regatas de Avellaneda.

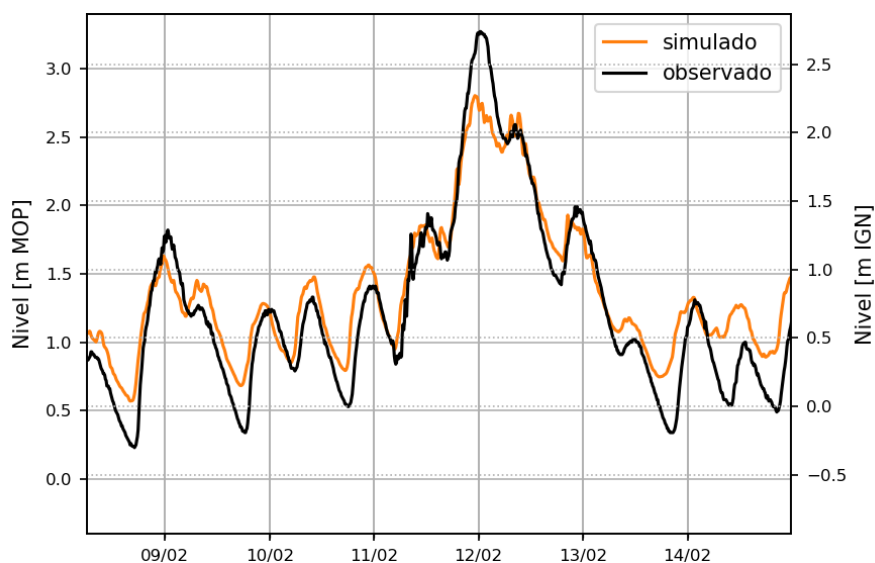


Figura 2.17. Series de nivel simulada y observada para la ventana de condición de sudestada en Club Regatas de Avellaneda.

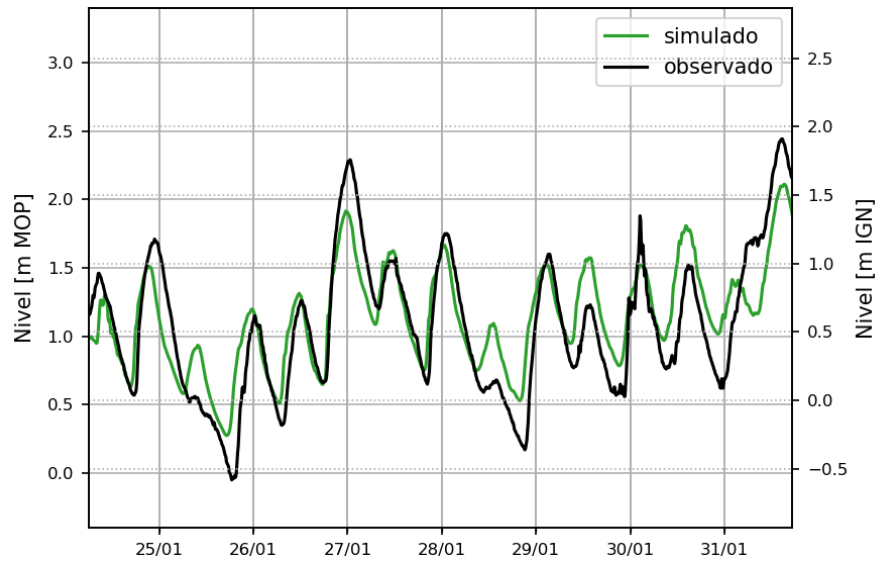


Figura 2.18. Series de nivel simulada y observada para la ventana de condición de bajante en Club Regatas de Avellaneda.

3 Tensiones de corte del cuerpo de agua

3.1 Análisis hidrodinámico

3.1.1 Escenarios hidrodinámicos

Con el objetivo de evaluar las tensiones de corte del propio cuerpo de agua se plantearon seis escenarios representativos. Cada uno de estos escenarios fue seleccionado de acuerdo a la factibilidad de ocurrencia y a la dinámica que imponen sobre el tramo de estudio, de interés para el alcance de este trabajo.

La caracterización de los escenarios se realiza a partir de la dinámica de los forzantes principales del sistema: caudal ingresante al tramo desde la cuenca Matanza-Riachuelo (aguas arriba) y dinámica del Río de la Plata (aguas abajo).

Considerando que uno de los principales forzantes de la dinámica de este tramo del Riachuelo es la condición de niveles de agua que se da en el Río de la Plata, se plantea una condición de niveles medios (situación de marea astronómica, sin vientos determinantes) y dos condiciones de niveles extremos ordinarios (ondas de tormenta), una bajante y una sudestada (creciente).

Además de los escenarios del Río de la Plata, se consideran situaciones hidrológicas diferentes en la cuenca Matanza-Riachuelo. Para esto se establece una condición de caudal base de $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$ (correspondiente al caudal medio del Riachuelo a la altura del borde Oeste del modelo), dos crecidas ordinarias de $Q=131 \text{ m}^3/\text{s}$ (recurrencia de 2 años) y $Q=202 \text{ m}^3/\text{s}$ (recurrencia de 5 años), y una situación de caudal base pero con el colector de Margen Izquierda en funcionamiento por lo que el caudal se reduce a $Q=11,1 \text{ m}^3/\text{s}$ (el colector de Margen Izquierda intercepta en estiaje las descargas del arroyo Cildañez, su aliviador y otros pluviales, sumando en total un caudal medio de $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$) (UTN-FRA/INA, 2018).

El criterio de elección de escenarios hidrodinámicos se basa en la posibilidad de evaluar situaciones ordinarias para la comparación de las tensiones de corte que se generan en el propio cuerpo de agua respecto de aquellas inducidas por la navegación. En este marco, no se consideran eventos extremos compuestos (niveles del Río de la Plata y caudal de la cuenca Matanza-Riachuelo). A continuación se especifican los seis escenarios seleccionados:

- Escenario 1. Condiciones medias.
 - Caudal Riachuelo medio - $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Condición de marea astronómica en el Río de la Plata.
 - Período: 14/02/19 - 21/02/19.

- Escenario 2. Bajante.
 - Caudal Riachuelo medio - $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Niveles en el Río de la Plata asociados a una bajante ordinaria.
 - Período: 24/01/19 - 31/01/19.

- Escenario 3. Sudestada.
 - Caudal Riachuelo medio - $Q=15 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Niveles en el Río de la Plata asociados a una sudestada ordinaria.
 - Período: 08/02/19 - 15/02/19.

- Escenario 4. Crecida ordinaria #1 (recurrencia 2 años).
 - Caudal Riachuelo - $Q=131 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Condición de marea astronómica en el Río de la Plata.
 - Período: 14/02/19 - 21/02/19.

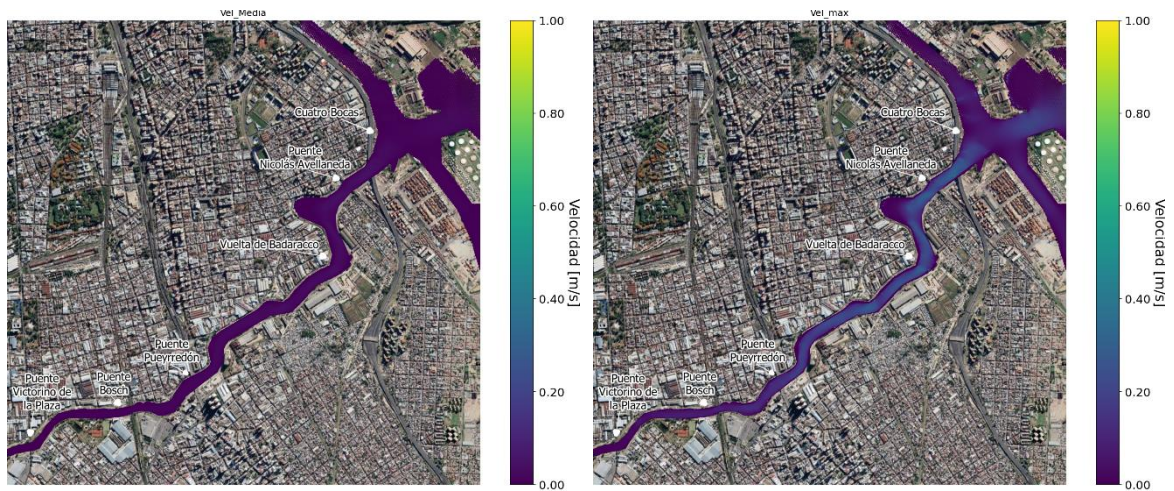
- Escenario 5. Crecida ordinaria #2 (recurrencia 5 años).
 - Caudal Riachuelo - $Q=202 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Condición de marea astronómica en el Río de la Plata.
 - Período: 14/02/19 - 21/02/19.

- Escenario 6. Condiciones medias + Colector de Margen Izquierda
 - Caudal Riachuelo - $Q=11,1 \text{ m}^3/\text{s}$.
 - Condición de marea astronómica en el Río de la Plata.
 - Período: 14/02/19 - 21/02/19.

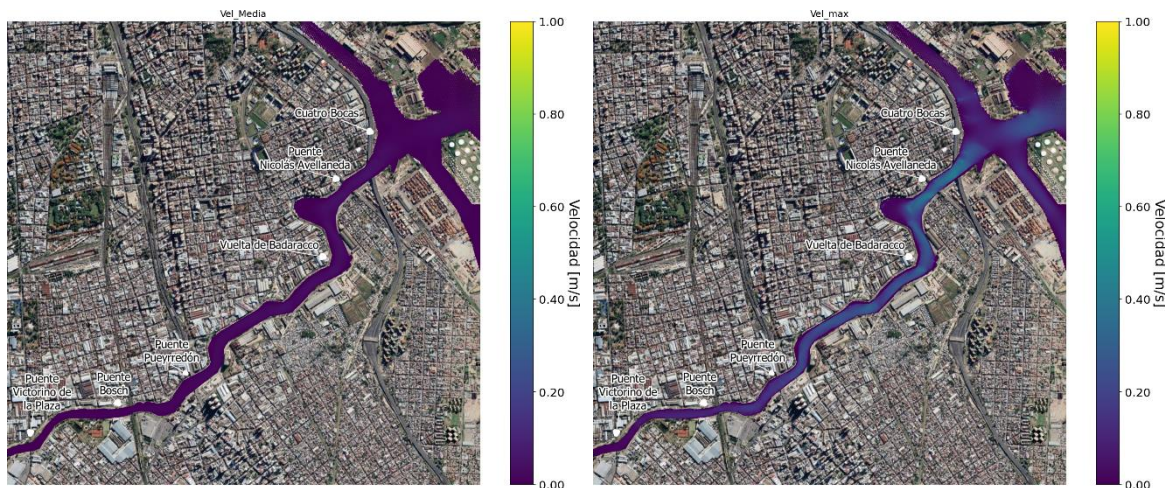
3.1.2 Análisis de escenarios

Como primera aproximación a la comprensión de la hidrodinámica general de cada uno de los escenarios simulados, se realizó una evaluación del comportamiento de las velocidades y los niveles de agua en el tramo de estudio.

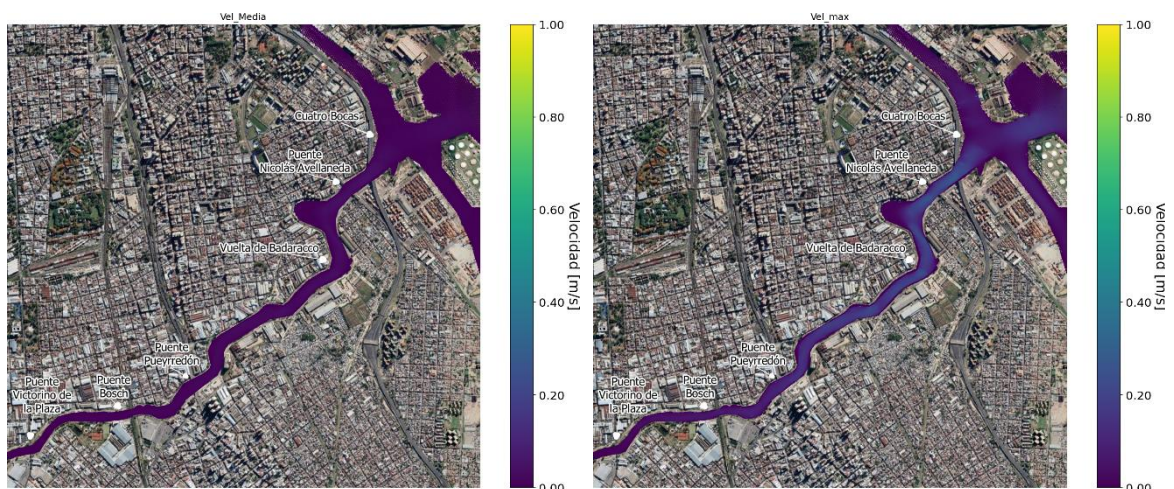
En la Figura 3.1 se presentan los campos de velocidades medias y velocidades máximas de cada escenario. En general, se observa que cuando el forzante dominante es el nivel del Río de la Plata (condiciones medias, bajante y sudestada) los máximos de velocidad se dan en el tramo entre los puentes Nicolás Avellaneda y Pueyrredón. En cambio, cuando domina la descarga desde el río Matanza (crecida ordinaria) en todo el tramo del Riachuelo hasta Cuatro Bocas se presentan condiciones de velocidades mayores.



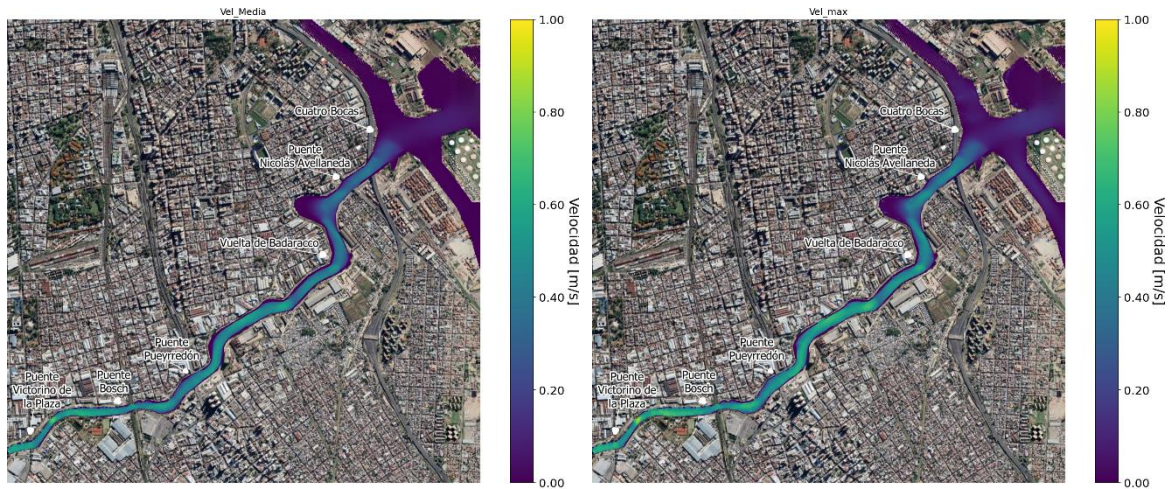
a) Escenario 1 (Condiciones medias)



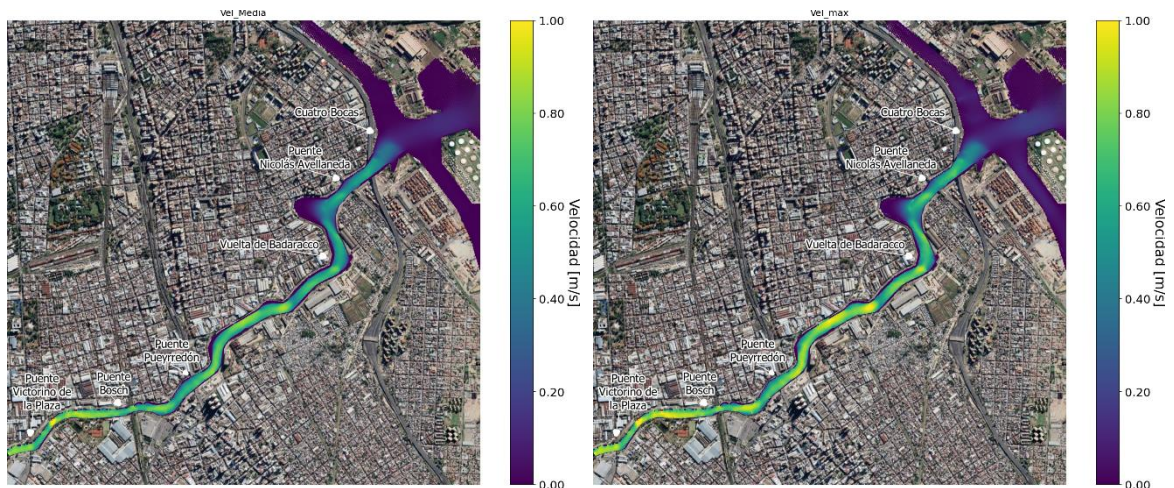
b) Escenario 2 (Bajante)



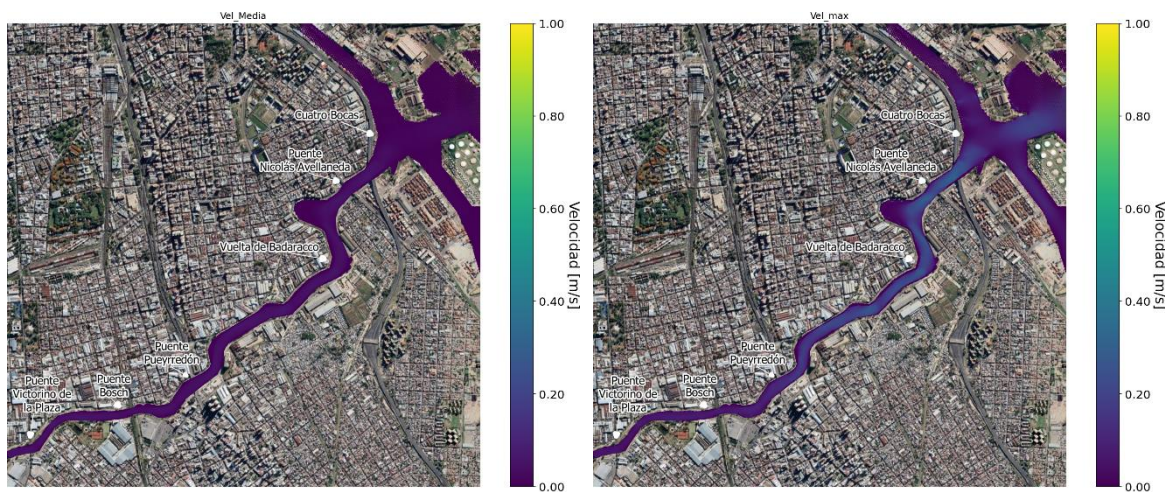
c) Escenario 3 (Sudestada)



d) Escenario 4 (Crecida ordinaria #1 - recurrencia 2 años)



e) Escenario 5 (Crecida ordinaria #2 - recurrencia 5 años)



e) Escenario 6 (Condiciones medias + Colector Margen Izquierda)

Figura 3.1. Velocidades medias (izq) y máximas (der) según escenario hidrodinámico.

Por su parte, al analizar las series de niveles simulados en distintos puntos característicos no se observan variaciones importantes en el comportamiento dentro del tramo de estudio. En la Figura 3.2 se presentan los niveles simulados en la estación de Cuatro Bocas y en el Club Regatas de Avellaneda. Las diferencias entre estaciones en niveles de pleamar y bajamar están en el orden de los 5 cm, siendo mayores para las bajamares que para las pleamares. En el caso de un escenario de sudestada las diferencias se atenúan un poco. El tiempo de retardo de la onda se encuentra en el orden de los 10 minutos

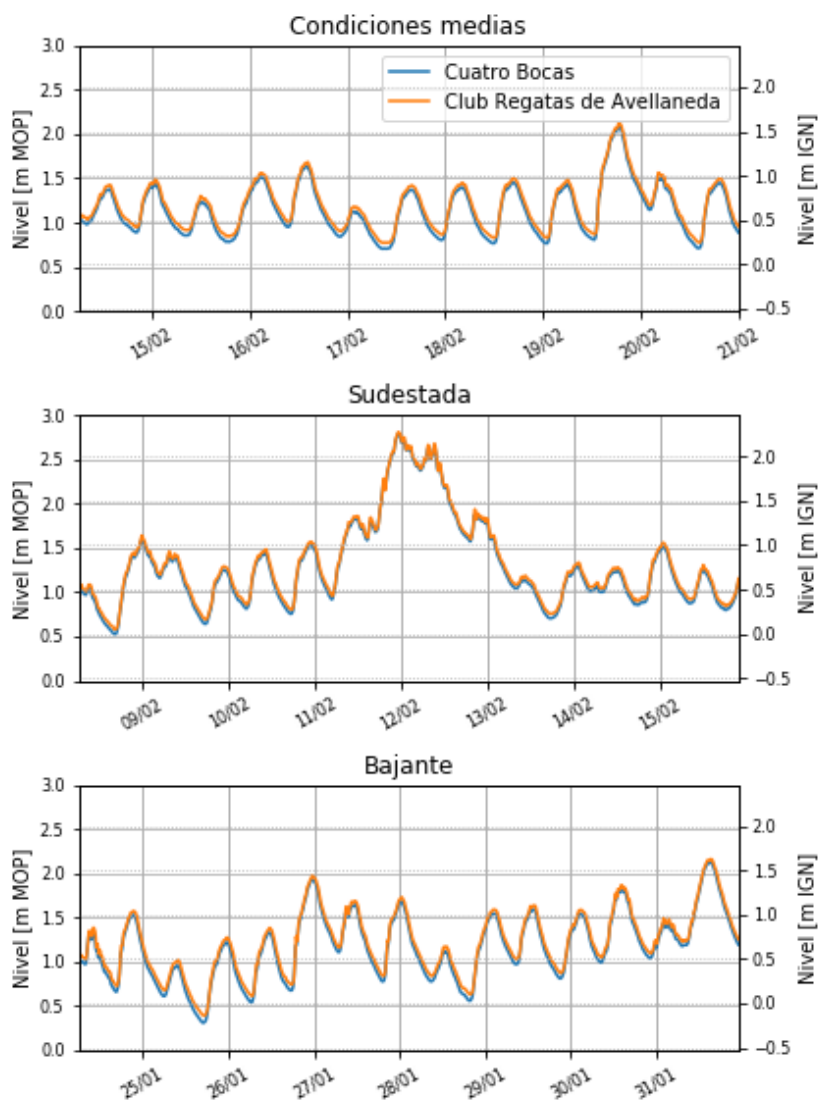


Figura 3.2. Niveles simulados en Cuatro Bocas y Regatas de Avellaneda para tres escenarios diferentes.

3.2 Análisis de niveles históricos

Para determinar zonas de operación limitadas por la permanencia de profundidades aceptables se analizaron los niveles observados en las estaciones de medición de la región. En la Figura 3.3 se presenta una comparación entre las observaciones del Puerto de Buenos Aires (o estación Palermo) realizadas por el SHN y las del club Regatas de Avellaneda realizadas por ACUMAR durante una ventana de tiempo coincidente con la de los escenarios hidrodinámicos analizados en este trabajo.

A partir de estos resultados se concluye que las mediciones en Regatas de Avellaneda (serie corta y con varios vacíos de información) son consistentes con lo observado en el Puerto de Buenos Aires (con diferencias en los niveles de pleamar y bajamar en promedio en el periodo considerado de aproximadamente 3 cm). Por lo tanto, para considerar una estadística de permanencia de niveles, en primera aproximación, resulta apropiado considerar la serie larga de niveles horarios observados en el Puerto de Buenos Aires (período 1990-2019).

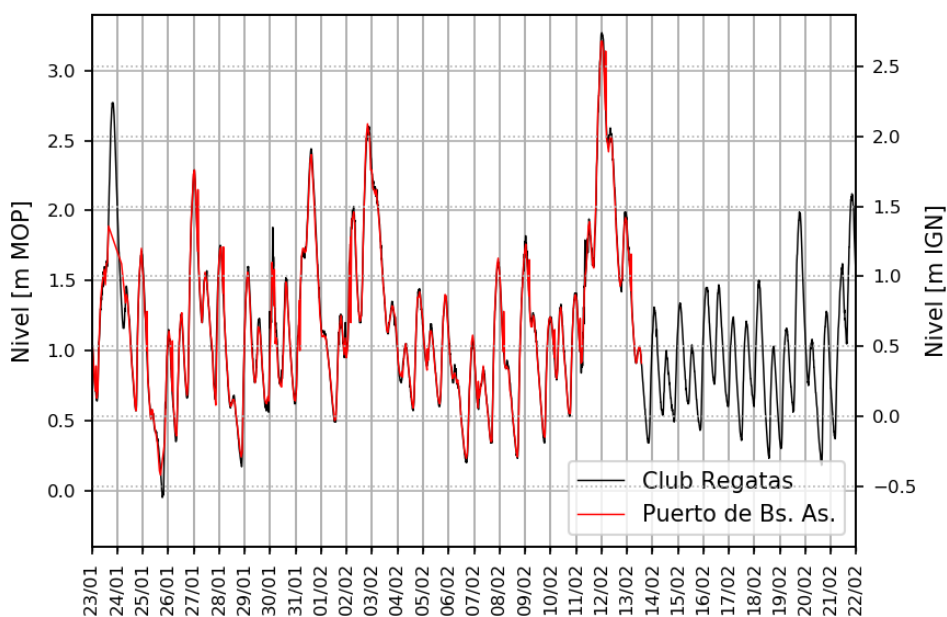


Figura 3.3. Comparación de niveles observados en el Puerto de Buenos Aires (SHN) y Regatas de Avellaneda (ACUMAR).

En la Figura 3.4 se presenta la curva de permanencia de niveles en el Puerto de Buenos Aires, representativa del tramo del Riachuelo analizado en este trabajo. En la Tabla 3.1 se muestran algunos valores característicos de la curva.

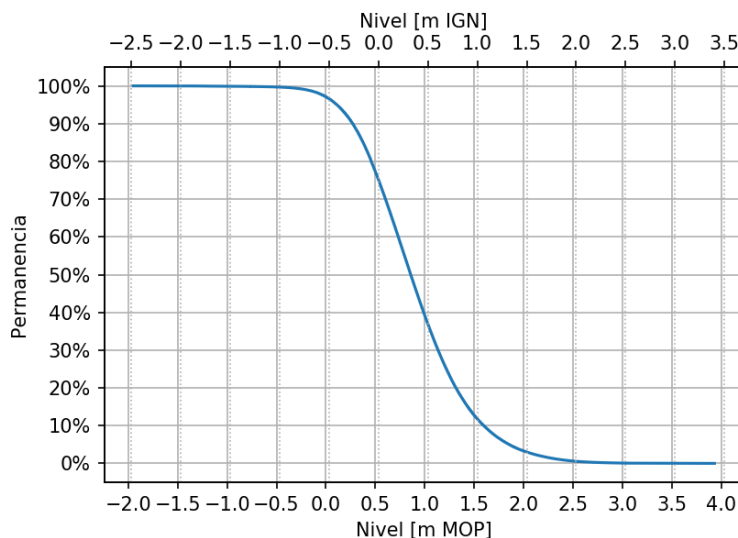


Figura 3.4. Curva de permanencia de niveles del Río de la Plata en el Puerto de Buenos Aires (SHN) (estadística realizada sobre la serie horaria de 1990-2019).

Tabla 3.1. Tabla permanencia de niveles del Río de la Plata en el Puerto de Buenos Aires.

Permanencia [%]	Nivel [m MOP]	Nivel [m IGN]	Permanencia [%]	Nivel [m MOP]	Nivel [m IGN]
99	-0,21	-0,74	25	1,22	0,69
97,5	-0,03	-0,56	10	1,60	1,07
95	0,11	-0,42	5	1,85	1,32
90	0,27	-0,26	2,5	2,09	1,56
75	0,53	-0,00	1	2,37	1,84
50	0,86	0,33			

Los niveles máximos de la sudestada (febrero 2019) y la bajante (enero 2019) simuladas, de acuerdo a esta estadística, corresponden respectivamente a permanencias de 0,02 y 97,76%.

3.3 Análisis de tensiones de corte del cuerpo de agua

La implementación de un modelo hidrodinámico bidimensional de detalle de la zona de estudio permite analizar y caracterizar las tensiones de corte del propio cuerpo de agua ante diferentes escenarios. Esta caracterización puede realizarse en planta sobre cada celda de todo el dominio del tramo de estudio, que aproximadamente cuenta con dimensiones del orden de 3 x 10 m.

En la Figura 3.5 se presentan las tensiones máximas simuladas para cada escenario hidrodinámico. Se demuestra que el impacto de los escenarios de condiciones medias y los de ondas de tormenta, con los niveles en el Río de la Plata como forzante principal del sistema, aproximadamente son observables hasta el Puente Pueyrredón y toman valores del orden de $0,1 \text{ N/m}^2$. En cambio, en el escenario donde el forzante principal del sistema es el caudal ingresante por el río Matanza producto de una crecida ordinaria, las máximas tensiones de corte resultan importantes prácticamente en todo el tramo de estudio (salvo en el sector de Cuatro Bocas) y alcanzan valores del orden de $0,5 \text{ N/m}^2$.

La envolvente de tensiones de corte, generada con las máximas tensiones de los seis escenarios hidrodinámicos analizados, se presenta en la Figura 3.6. Este mapa está conformado por los valores máximos de tensiones de corte que se dan en el cuerpo de agua de forma habitual.

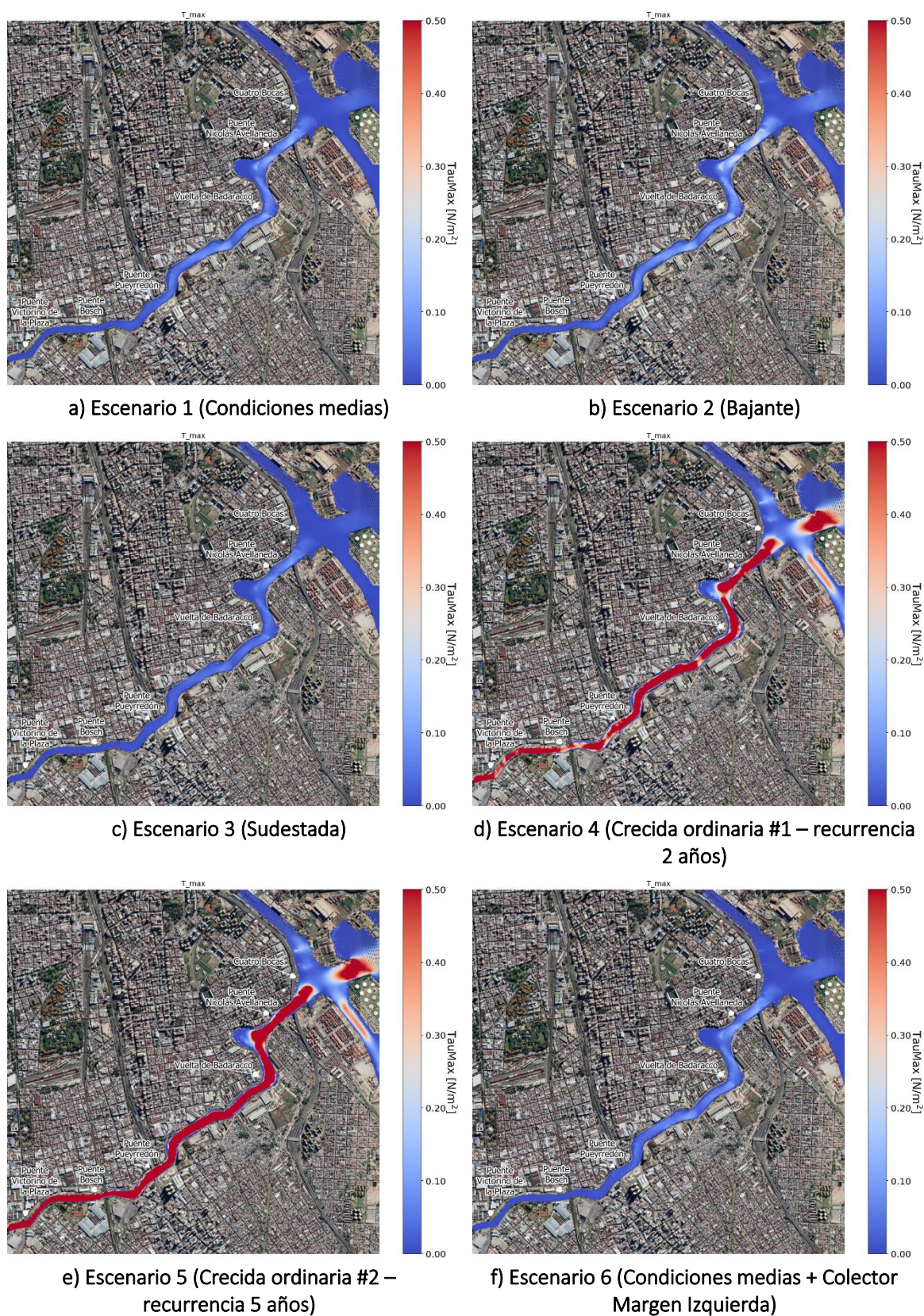


Figura 3.5. Tensiones de corte máximas según escenario hidrodinámico.

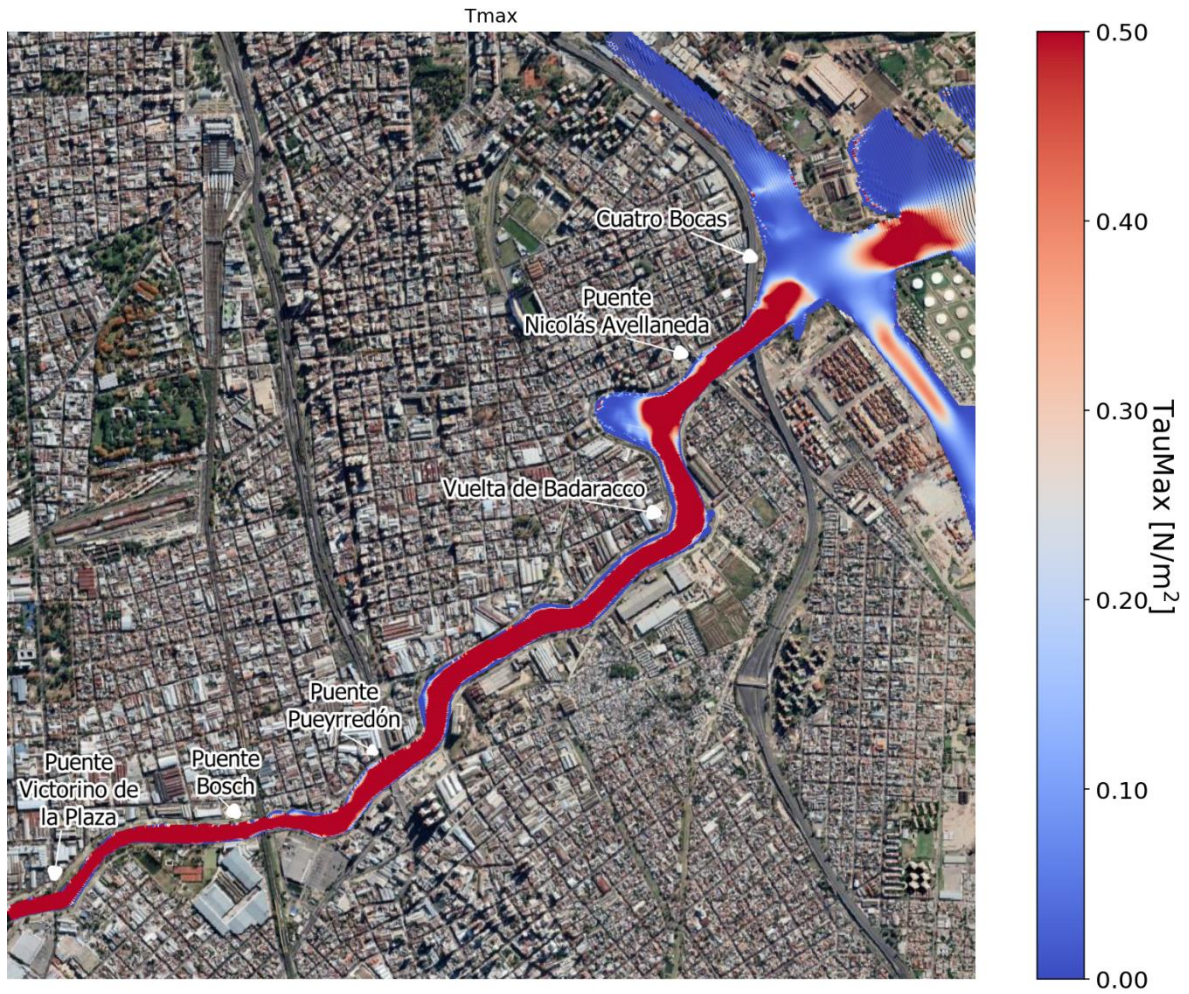


Figura 3.6. Envolvente de tensiones de corte máximas considerando los seis escenarios hidrodinámicos.

4 Tensiones de corte debidas a embarcaciones

En este apartado se presentan las características de la intervención sobre un cuerpo de agua que implica el pasaje de una embarcación, las formas de cuantificar ese impacto y su aplicación respecto de dos embarcaciones tipo en la zona de estudio.

4.1 Estructura del flujo generada por el paso de una embarcación

Existen dos tipos de fenómenos físicos de interés que se producen a partir del pasaje de una embarcación a propulsión en un cuerpo de agua. El primero corresponde a la perturbación en la masa de agua que genera el movimiento de una o más hélices, y el segundo, al oleaje que provoca la embarcación debido al desplazamiento de ésta (Figura 4.1). Es decir, que las embarcaciones inducen tensiones de corte en el fondo tanto por el movimiento de la proa como por el funcionamiento de los propulsores.



Figura 4.1. Estructuras de flujo generadas por oleaje (por delante) y propulsión (por detrás)

Las tensiones de corte frente al pasaje de embarcaciones son función de las corrientes provocadas por propulsores y oleaje, cuyo efecto puede evaluarse por separado, ya que no existe una relación directa entre ambos fenómenos.

Hammack et al. (2008) evaluaron mediante modelación numérica que el mayor incremento de tensión de corte de fondo es debido a la influencia del sistema de propulsión y no al movimiento de la embarcación (entorno de la proa), tal como se aprecia en la Figura 4.2, donde también se nota que no hay superposición de efectos.

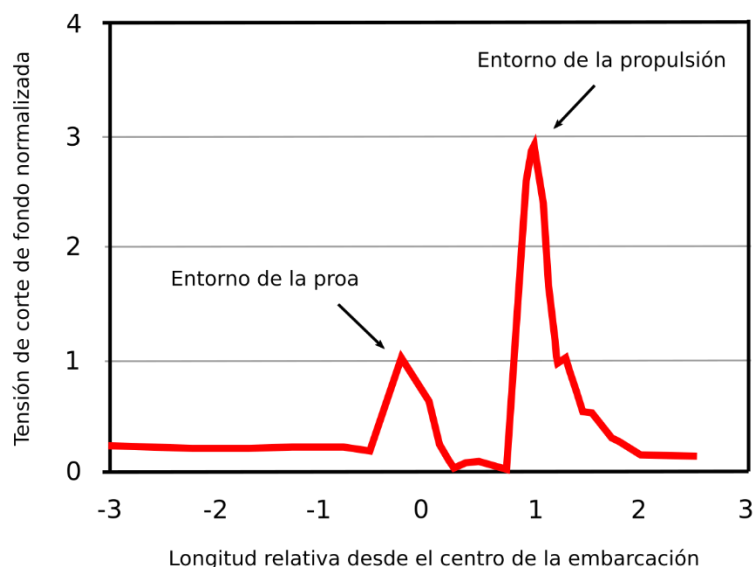


Figura 4.2. Tensiones de corte en el entorno de la embarcación a lo largo de la línea de navegación (adaptado de Hammack et al., 2008).

4.2 Formulaciones de las tensiones de corte

El presente estudio se enfoca en analizar y comparar las tensiones de corte que se provocan a partir de la propia dinámica del flujo del tramo del Riachuelo analizado, respecto de las generadas por el paso de las embarcaciones. Para obtener las tensiones de corte de fondo generadas por efecto del paso de una embarcación, se utiliza la siguiente formulación, en donde se evidencia que la variable principal para su obtención es la velocidad del flujo:

$$\tau_{Corte} = \frac{1}{2} \rho C_{fric} V^2$$

donde:

ρ = Densidad del agua

C_{fric} = Coeficiente de fricción

V = Velocidad del flujo

4.3 Sistema de propulsión

En este ítem se plantean las formulaciones para la evaluación de las tensiones de corte debidas al sistema de propulsión (hélices de las embarcaciones).

4.3.1 Estructura del flujo generada por la propulsión de una embarcación

En la propagación generada por el movimiento de las hélices, cuando el flujo no está confinado por obras de atraque u otros obstáculos, pueden distinguirse tres zonas en la estructura del flujo (Figura 4.3):

- Zona inicial: situada detrás de la propulsión. Puede considerarse hasta una distancia de un semidiámetro de ésta. Se caracteriza por la no expansión lateral de la corriente y por la uniformidad en la distribución de velocidades.
- Zona de establecimiento de flujo: alejada del propulsor, donde aparece una fuerte difusión en donde se mezcla el chorro inicial con el fluido que lo rodea. Esta zona alcanza una longitud de dos a tres veces el diámetro de la hélice.
- Zona de flujo estabilizado: apartada del propulsor, donde se desarrolla una zona estabilizada o de plena expansión y la corriente se mezcla en su totalidad con el fluido circundante.

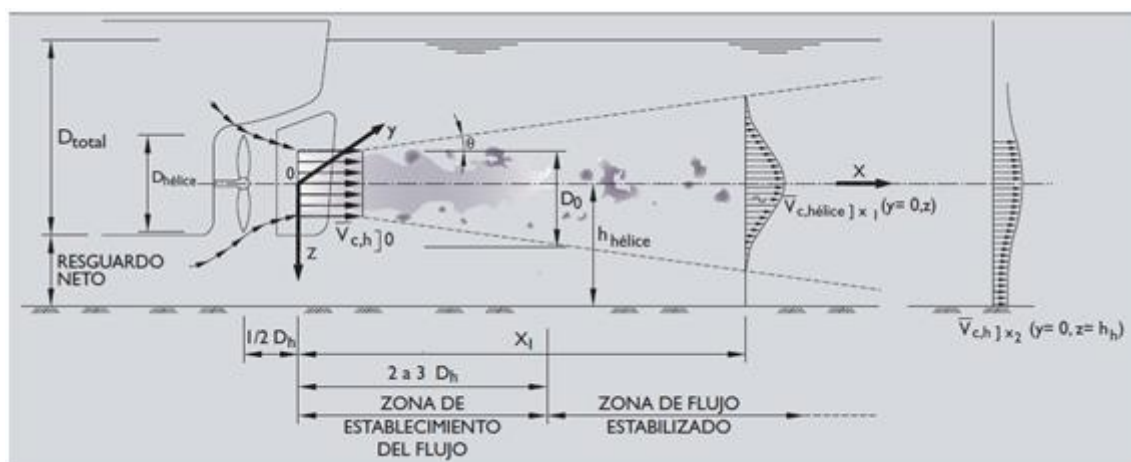


Figura 4.3. Determinación de longitudes características de flujo debido al movimiento de la hélice (PIANC, 2015).

Una vez definidas las diferentes zonas por las que atraviesa el flujo y comprendido el fenómeno que existe a partir del movimiento de las hélices, es posible estimar la velocidad máxima en el lecho a partir de las formulaciones adoptadas en el punto siguiente.

4.3.2 Cálculo de velocidades

Posterior a un análisis exhaustivo de formulaciones y criterios para la estimación de velocidades, tanto iniciales como en el lecho, y considerando recomendaciones de diversos manuales como el ROM (Recomendaciones para Obras Marítimas; Puertos del Estado, 2012), Recommendations of the committee for Waterfront Structures Harbours and Waterways (EAU 1996), y Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships (PIANC, 2015), entre otros, se seleccionaron las siguientes fórmulas, de acuerdo a la recomendación de este último. La vasta utilización práctica a nivel mundial en las últimas décadas de los manuales del PIANC en el marco de diseño portuario y de las vías navegables, justifica el empleo de los criterios allí indicados para ser volcados en el presente estudio.

4.3.2.1 Velocidad inicial

Corresponde al valor de velocidad que entrega el sistema de propulsión en el eje de este (Indicada como V_0 en la Figura 4.4). Se utilizó la formulación empírica desarrollada por Blaauw y van de Kaa (1978), la cual depende de la potencia de cada motor.

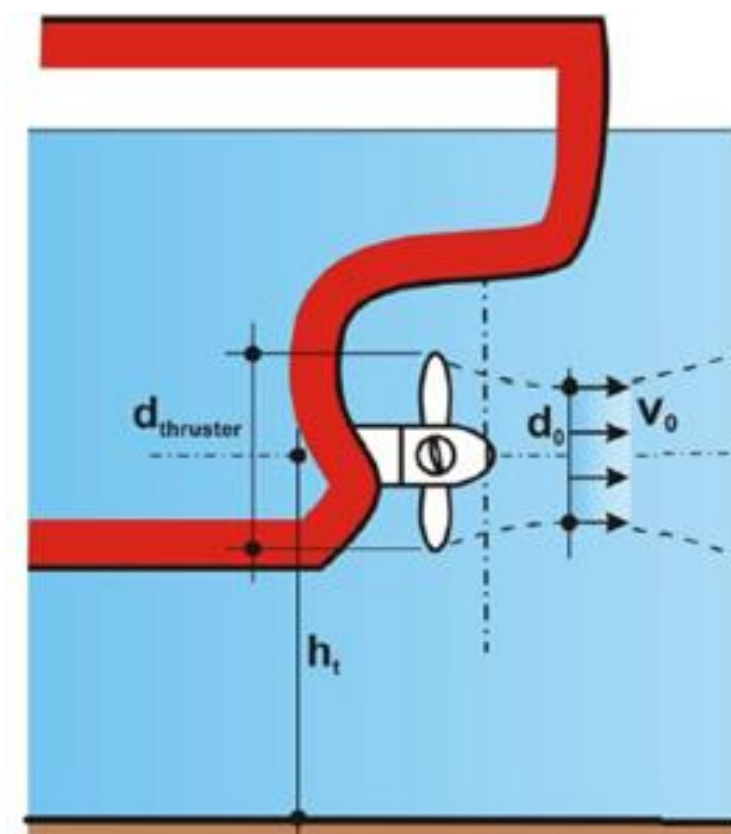


Figura 4.4. Esquemización de velocidad inicial debida a los propulsores (adaptado de PIANC 2015).

La formulación de la velocidad inicial se presenta en PIANC (2015) y se detalla a continuación:

$$V_0 = C_3 * \left(\frac{f_p P_d}{D_p^2 \rho_w} \right)^{0.33}$$

donde:

$$C_3 = 1,17 \text{ Hélices con Toberas}$$

$$C_3 = 1,48 \text{ Hélices Libres}$$

$$D_p = D_{thruster} = \text{Diámetro del Propulsor} - \text{Hélice}$$

$$f_p = \text{Porcentaje de potencia a utilizar}$$

$$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$$

En este caso de estudio se considera que el sistema de propulsión funciona con hélices libres.

4.3.2.2 Velocidad máxima en el lecho

La velocidad máxima en el lecho ($V_{prop,s}$) se determina a partir del Método Holandés (*Dutch Method*; PIANC, 2015), el cual ha sido corroborado satisfactoriamente a partir de su uso en el Puerto de Rotterdam, y cuya fórmula es la siguiente:

$$V_{prop,s} = (0,2 \text{ a } 0,3) * V_0 * \frac{D_p}{h_t}$$

donde:

$$D_p = \text{Diámetro de la hélice} - \text{Diámetro del propulsor}$$

$$h_p = \text{Distancia entre el eje de hélice y el lecho del río}$$

$$0,216 = \text{Hélices libres}$$

$$0,306 = \text{Hélices con toberas}$$

Esta velocidad máxima suele tomarse para el uso de una embarcación navegando con un propulsor en forma individual. El PIANC evalúa el uso de motores en paralelo a partir de la siguiente expresión, asumiendo superposición cuadrática de velocidades de flujo individuales:

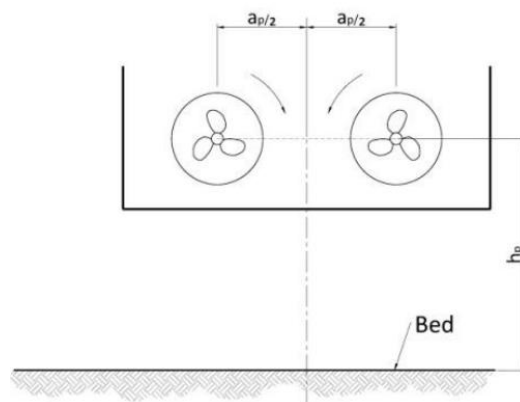
$$V_{b,max} = V_{prop,s} * \sqrt{2} \quad \text{para} \quad \frac{h_p}{y_p} > 1$$

donde (ver Figura 4.5):

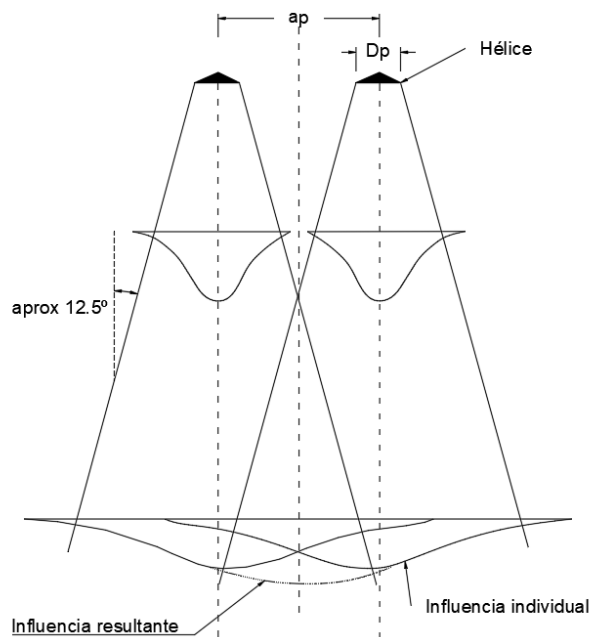
$h_p =$ Distancia entre el eje de hélice y el lecho del río

$y_p = \frac{a_p}{2} =$ Distancia entre el eje de hélice y eje de la embarcación

Debido a las características de la zona evaluada y de las embarcaciones, se asume que la relación h_p/y_p es siempre mayor a 1.



a) Esquema en corte de una embarcación con 2 hélices



b) Esquema en planta de la distribución de velocidades de una embarcación con 2 hélices

Figura 4.5. Esquematización de velocidad máxima en el lecho debida a dos propulsores (PIANC 2015).

4.3.3 Cálculo de tensiones de corte de fondo

La formulación para el cálculo de tensiones se corresponde a la expresada anteriormente, pero empleando como velocidad de cálculo, el valor de la velocidad de propulsión incrementada con el criterio de Hammack (Hammack et al. 2008):

$$\tau_{Prop} = \frac{1}{2} \rho C_{fric} V_{shear}^2$$

$$C_{fric} (\text{Coeficiente de fricción}) = 0.01 * \frac{Dp}{Ht}$$

$$V_{shear} = |V_{b,max}| + \left| \frac{1}{2} V_{wake} \right|$$

$$V_{wake} = -0.78 V_g \left(\frac{Tirante}{Calado} \right)^{-1.81}$$

donde:

$$V_g = \text{Velocidad de la embarcación}$$

$$Tirante = \text{Profundidad en el punto analizado}$$

$$Calado = \text{valor que corresponde al hundimiento del casco de la embarcación en la masa de agua}$$

Como se observa, si bien la velocidad de corte (V_{shear}) depende del movimiento de la embarcación (V_{wake}), es función en mayor medida de la velocidad de las corrientes debidas al sistema de propulsión. La velocidad de estela (V_{wake}) es función de la velocidad de la embarcación adoptada, el tirante y el calado, en el punto de análisis.

A su vez se aprecia que la variación de calado, y por ende distancia entre el lecho y el eje de la hélice, modifican los resultados de las velocidades encontradas en el fondo. A menor calado, la distancia eje-lecho será mayor y en consecuencia las velocidades en las proximidades del fondo del cauce serán menores.

4.4 Olas producto del paso de embarcaciones

4.4.1 Estructura del flujo generada por el oleaje

El movimiento de una embarcación en la masa de agua provoca una perturbación, generando ondas de distintos tipos. En canales y ríos navegables, en donde el viento no posee una longitud

de actuación suficiente, es esperable que el oleaje predominante sea el debido al pasaje de una embarcación.

Una embarcación genera dos tipos de olas a medida que se desplaza por la masa de agua: ondas transversales (denominadas ondas de popa) y ondas divergentes (denominadas ondas de proa). La Figura 4.6 presenta un esquema que muestra ambos tipos de ondas, que en forma conjunta forman el patrón característico de onda Kelvin.

Las alturas de olas relacionadas a las ondas transversales suelen ser mucho menores a las de las ondas divergentes. En caso de estudios relacionados con estas, suele desestimarse el análisis de las primeras, ya que poseerán una magnitud inferior. Las ondas divergentes son función de las características de la embarcación (espacio libre bajo la quilla, calado y forma del casco), la profundidad del agua, la velocidad de la embarcación, entre otras. Generalmente, el efecto de estos parámetros es incrementar la altura de ola siempre que:

- la velocidad de la embarcación aumenta
- la profundidad del agua disminuye
- la forma del casco se vuelve menos aerodinámica
- se reduce el área de la sección transversal de la vía fluvial

El fenómeno correspondiente al oleaje generado por una embarcación no fue parte de este estudio, debido a la menor influencia sobre las tensiones de corte en el lecho (Hammack et al., 2008).

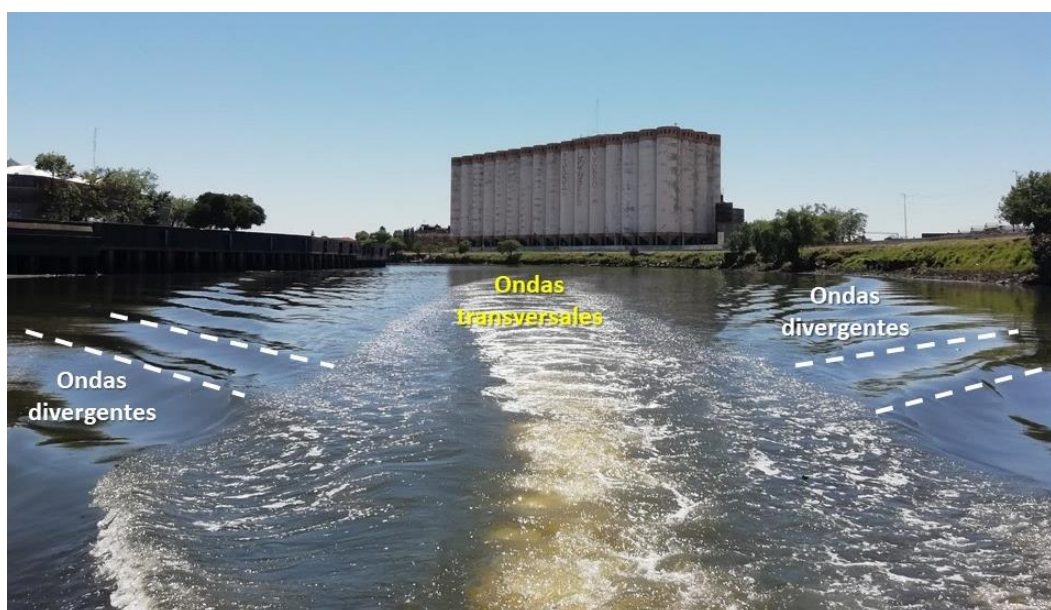


Figura 4.6. Patrón de estela de la embarcación

4.5 Tipos de embarcaciones

Se contemplan en este trabajo dos tipos de embarcaciones que se denominarán de Tipo 1 y Tipo 2. Las principales diferencias en la caracterización de cada una de ellas radican en la cantidad de pasajeros que pueden transportar, la potencia instalada y la diferencia de tamaño. La Tipo 1 se referencia en embarcaciones de catálogo como la Red Star o la SilverStar, que son utilizadas para el transporte de pasajeros en otros cuerpos de agua de la Región Metropolitana de Buenos Aires.

4.5.1 Características Embarcación Tipo 1

- Eslora 17,00 m
- Manga: 3,75
- Puntal: 2,00 m
- Calado: 1,5 m
- Distancia superficie libre - Eje Hélice: 1.3 m
- Capacidad: 57 pasajeros
- 2 motores de potencia instalada de 350 HP
- 2 hélices libres de 0,60 m de diámetro

4.5.2 Embarcación Tipo 2

- Eslora 13,40 m
- Manga: 3,75
- Puntal: 1,40 m
- Calado máximo: menor a 1 m – Considerando el sistema de propulsión
- Distancia superficie libre - Eje Hélice: 0.8 m
- Capacidad: 22 pasajeros
- 2 motores de potencia instalada menor a 100 HP
- 2 hélices libres de 0,40 m de diámetro

4.6 Condiciones de navegación

Las condiciones de navegación de las embarcaciones, como se ha visto en los puntos anteriores, tienen una importante relación con las velocidades a contemplar en proximidades del lecho del río, las cuales están íntimamente ligadas a las tensiones de corte generadas en el dominio a analizar.

Las principales variables asociadas a las condiciones de navegación de las embarcaciones analizadas en el presente estudio son:

- Potencia a utilizar
- Velocidad de navegación

4.6.1 Potencia a utilizar

La potencia del motor aplicada no es constante en el tiempo, y el efecto de los propulsores depende de la etapa de la maniobra que se esté considerando. En los primeros momentos de una maniobra se utilizará más potencia.

El principal parámetro a definir para estimar la velocidad inicial es la potencia utilizada por la embarcación a la hora de realizar maniobras y operaciones. Es de destacar que la potencia entregada al eje en motores a combustión corresponde al 50% de la potencia instalada en la embarcación (Tosco, 2021). Las recomendaciones plasmadas en PIANC (2015) varían en función del tipo de embarcación, como a su vez del tipo de maniobra a realizar. La Tabla 4.1 expresa algunas de las recomendaciones ligadas a la elección de este porcentaje.

Tabla 4.1. Recomendaciones de potencias en el eje a utilizar para distintos tipos de maniobras. Adaptado de PIANC (2015).

<i>Maniobra</i>	<i>EAU (2004)</i>	<i>PIANC (1997)</i>	<i>Nuevas recomendaciones del PIANC (2011)</i>
	<i>Potencia en el eje [%]</i>	<i>Potencia en el eje [%]</i>	<i>Potencia promedio en el eje [%]</i>
Máxima potencia instalada		100	100
<i>Full ahead</i> - velocidad de servicio	100	51 a 73	
<i>Full ahead</i> - maniobra		18 a 25	28
<i>Half ahead</i>	55 a 65	8 a 11	15
<i>Slow ahead</i>	6 a 12	2 a 3	7
<i>Dead slow ahead</i>	3 a 4.3	0.3 a 0.4	3
Recomendación para maniobra	42	10	5 a 15

Del cuadro superior podríamos tomar como valor recomendable en caso de maniobras, porcentajes del 15% y del 7% (Half Ahead y Slow Ahead) de la potencia entregada al eje de la hélice.

A su vez en PIANC (2015) se recomienda para zonas de atraque en navegación interior, considerando ésta como ríos y arroyos, la utilización del 100% de la potencia entregada para

embarcaciones pequeñas y del 50% para embarcaciones de mayor tamaño, aunque en estos casos las velocidades de la embarcación son muy bajas.

En función de estas recomendaciones se consideran como potencias de interés los valores de 7%, 15%, 50% y 100% de la potencia entregada en la hélice. El valor del 100% se considera conservador a la hora de estimar velocidades debidas al funcionamiento de las hélices.

4.6.2 Velocidad de navegación

Consiste en la velocidad a la cual navega la embarcación en el sector en estudio. Al considerarse un sector de navegación interior, donde el ancho del área navegable es acotado, la velocidad es un parámetro a evaluar, ya que influirá tanto en la movilidad del material del lecho, como en la interacción con otras embarcaciones.

Este parámetro tiene influencia en la determinación de la velocidad de estela (*wake*) a la hora del cálculo de la velocidad de corte. A partir de ello se definieron dos velocidades de navegación máximas para cada una de las embarcaciones. Estas velocidades se van a combinar con las diferentes potencias en el eje definidas en la Sección 4.6.1 para definir los escenarios de análisis de las tensiones de corte debidas a las embarcaciones (ver Sección 4.7.1). Las velocidades máximas definidas para cada embarcación se detallan a continuación:

- Máximas velocidades analizadas para la Embarcación Tipo 1: 9 y 3 nudos.
- Máximas velocidades analizadas para la Embarcación Tipo 2: 6 y 2 nudos.

4.7 Análisis de tensiones de corte debidas a las embarcaciones

Se analizan en este ítem los resultados correspondientes a las tensiones de corte generadas a partir del paso de las Embarcaciones Tipo estudiadas en el Riachuelo.

4.7.1 Escenarios analizados

Para la evaluación del efecto de las tensiones de corte generadas por el paso de embarcaciones fue necesaria la elección de distintos escenarios. El criterio de adopción de estos responde a lo frecuente de los eventos estudiados y al porcentaje de permanencia de los niveles en el área de estudio. Además, los escenarios analizados incluyen limitaciones tanto a las potencias sobre el eje de las hélices como a las velocidades de navegación.

Se estableció como escenario hidrodinámico de análisis el correspondiente a condiciones medias (caudal forzante de 15 m³/s y marea astronómica), ya que es representativo de una condición hidrodinámica típica del sistema.

A partir de la curva de permanencia de niveles histórica en Puerto Buenos Aires (Figura 3.4), y del análisis realizado para su extrapolación a la estación Regatas que se encuentra dentro del dominio de modelación, se seleccionaron valores característicos de niveles en función de la

permanencia. Se determinaron así los niveles para 90% y 75% de permanencia en el Puerto de Buenos Aires. Con dichos niveles se definieron las condiciones de contorno en el modelo, y a partir de los resultados de la modelación para el escenario de $15 \text{ m}^3/\text{s}$, se obtuvieron los niveles y tirantes en todo el dominio, que se emplearon en los cálculos para establecer las tensiones de corte debidas al funcionamiento de las embarcaciones.

Los niveles correspondientes a las citadas permanencias fueron:

- Niveles con una permanencia del 90% = 0.27 m MOP = - 0.26 m IGN
- Niveles con una permanencia del 75% = 0.53 m MOP = 0 m IGN

Los tirantes resultantes para dichos niveles se muestran en la Figura 4.7.

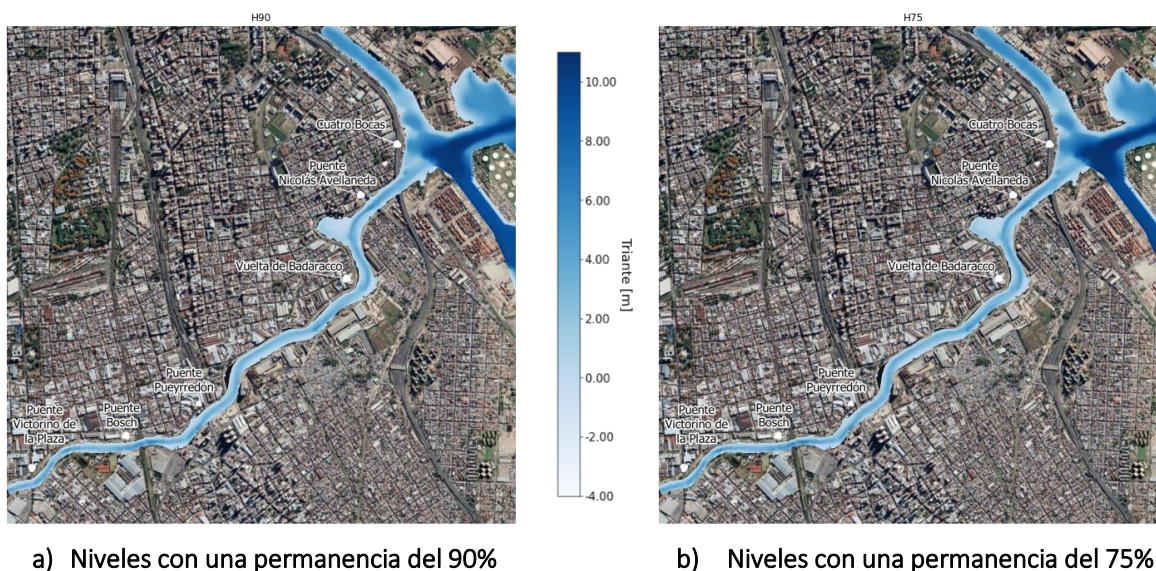


Figura 4.7. Tirantes asociados a los dos niveles de permanencia analizados.

Como resultado de este planteo, en la Tabla 4.2 se presentan los distintos escenarios planteados. Para cada escenario se definen, para los diferentes niveles seleccionados (90% y 75% de permanencia), la máxima potencia en el eje a utilizar en diferentes maniobras y la máxima velocidad de navegación a ser utilizada en la estimación de las tensiones de corte.

Como se indicó anteriormente, en el análisis que se realizó en el proyecto, los valores de la potencia en el eje y de la velocidad de navegación surgen como imitaciones simultáneas para la embarcación. A modo de ejemplo, cuando se definen escenarios que implican potencias de 100, 50 o 15 % y velocidades de 9 nudos, lo que se está expresando es lo siguiente: en ese escenario las embarcaciones pueden navegar con velocidades máximas de 9 nudos y realizar maniobras que utilicen como máximo el 100, 50 y 15 % de la potencia en el eje según el caso.

Tabla 4.2. Escenarios para la evaluación de tensiones debidas a embarcaciones.

<i>Caudal ingresante [m³/s]</i>	<i>Nivel [m MOP] / Permanencia de nivel [%]</i>	<i>Máximo porcentaje de potencia entregada en el eje [%]</i>	<i>Máxima velocidad de navegación [nudos]</i>
15	90	100	E1: 9 nudos E2: 6 nudos
		50	E1: 9 nudos E2: 6 nudos
		15	E1: 9 nudos E2: 6 nudos
		7	E1: 3 nudos E2: 2 nudos
	75	100	E1: 9 nudos E2: 6 nudos
		50	E1: 9 nudos E2: 6 nudos
		15	E1: 9 nudos E2: 6 nudos
		7	E1: 3 nudos E2: 2 nudos

Posteriormente se efectuó la elección de una profundidad operativa de embarcación, donde se tuvo en cuenta su calado con una revancha de 1 metro de resguardo. Siendo:

Embarcación Tipo 1:

- Calado: 1.5 metros
- Revancha: 1 metro
- Profundidad operativa: 2.5 metros

Embarcación Tipo 2:

- Calado: 1 metros
- Revancha: 1 metro
- Profundidad operativa: 2 metros

De acuerdo con estas profundidades operativas, no se analizaron tensiones de corte debidas a las embarcaciones para las profundidades inferiores a este valor. Como resultado se obtuvieron mapas de sectores navegables, para las dos permanencias evaluadas (Figura 4.8).



a) Sector navegable con permanencia del 90%.



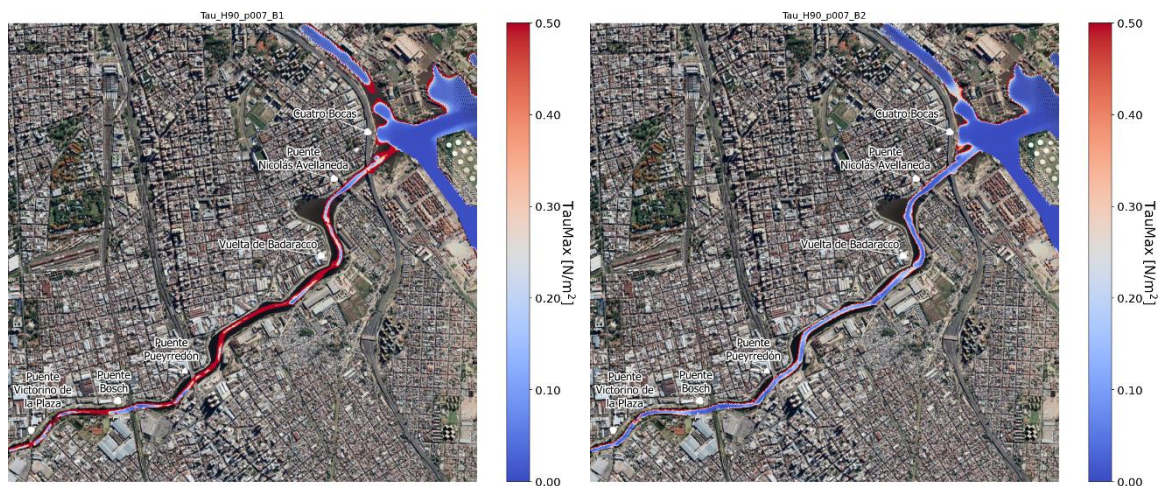
b) Sector navegable con permanencia del 75%

Figura 4.8. Sectores navegables en función de la permanencia y profundidad operativa de la embarcación. Embarcación Tipo 1 (izq) – Embarcación Tipo 2 (der)

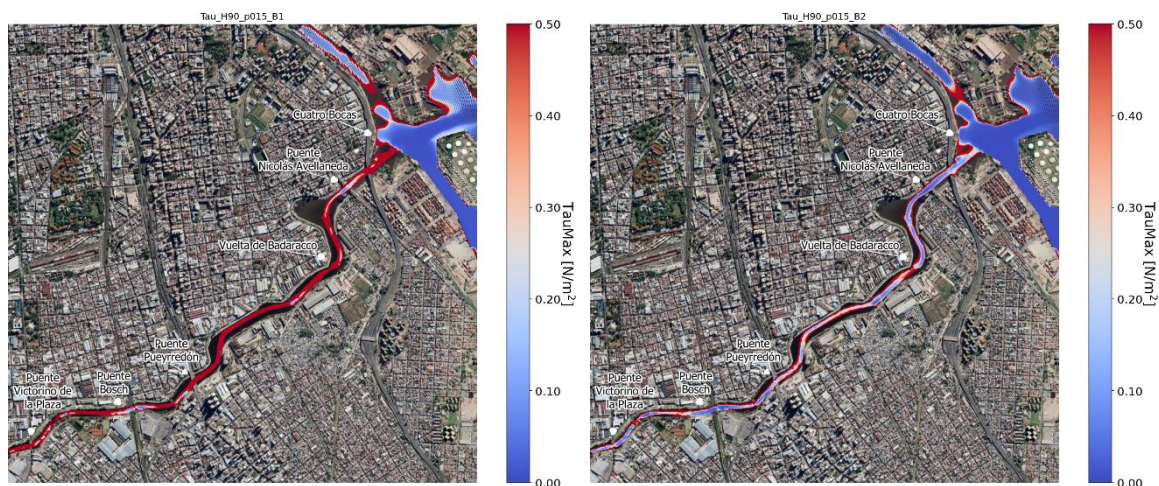
4.7.2 Resultados

Como se mencionó previamente, las máximas tensiones de corte en el lecho debido al paso de una embarcación se generan en función del sistema de propulsión principal de la misma.

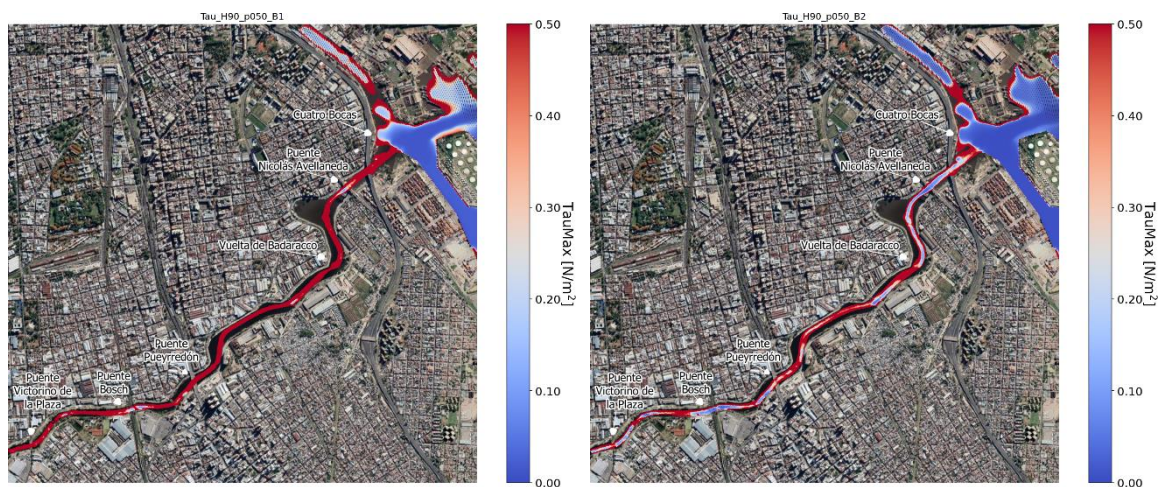
En la Figura 4.9 y en la Figura 4.10 se presentan las tensiones de corte máximas generadas por el paso de embarcaciones Tipo 1 y Tipo 2 para distintos niveles de permanencia (90 y 75%), porcentajes de la potencia entregada en la hélice (7, 15, 50 y 100%) y velocidades operativas. Estas tensiones sólo fueron calculadas en los sectores operativos delimitados por las profundidades aceptables para cada embarcación según lo presentado en la Figura 4.8.



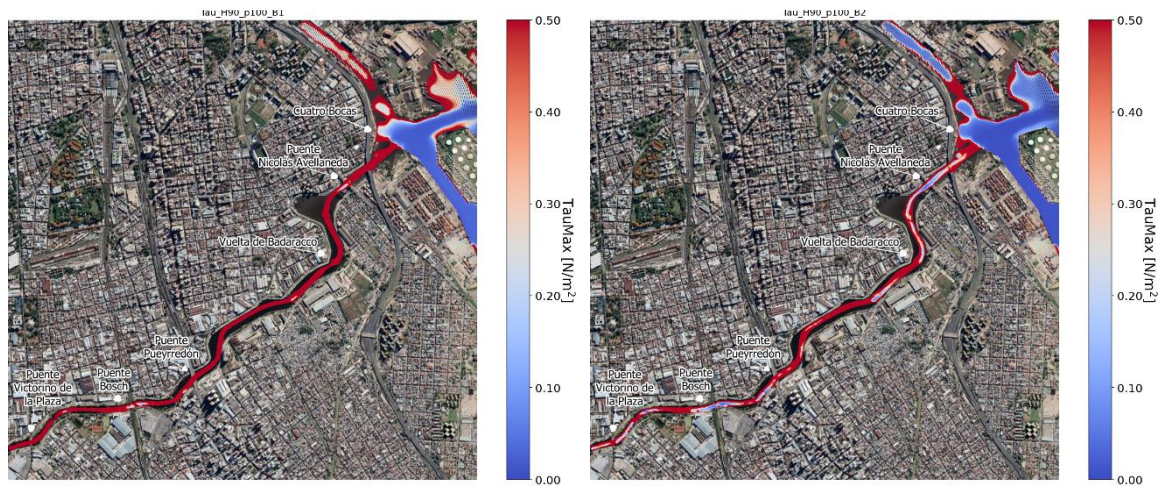
a) Máxima potencia entregada en la hélice: 7%.
 Máxima velocidad de navegación: E1 3 nudos - E2 2 nudos.



b) Máxima potencia entregada en la hélice: 15%.
 Máxima velocidad de navegación: E1 9 nudos - E2 6 nudos.

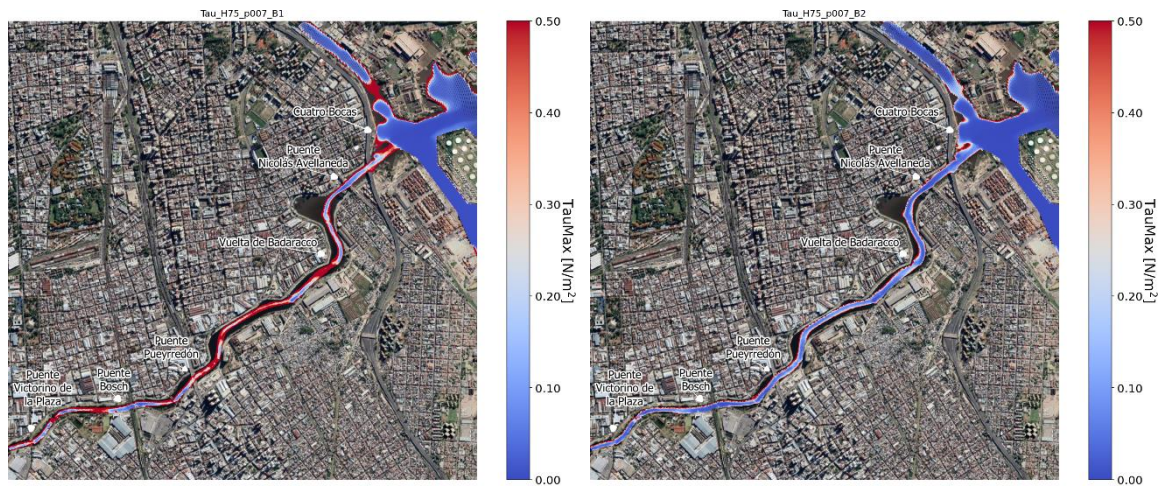


c) Máxima potencia entregada en la hélice: 50%.
 Máxima velocidad de navegación: E1 9 nudos - E2 6 nudos.

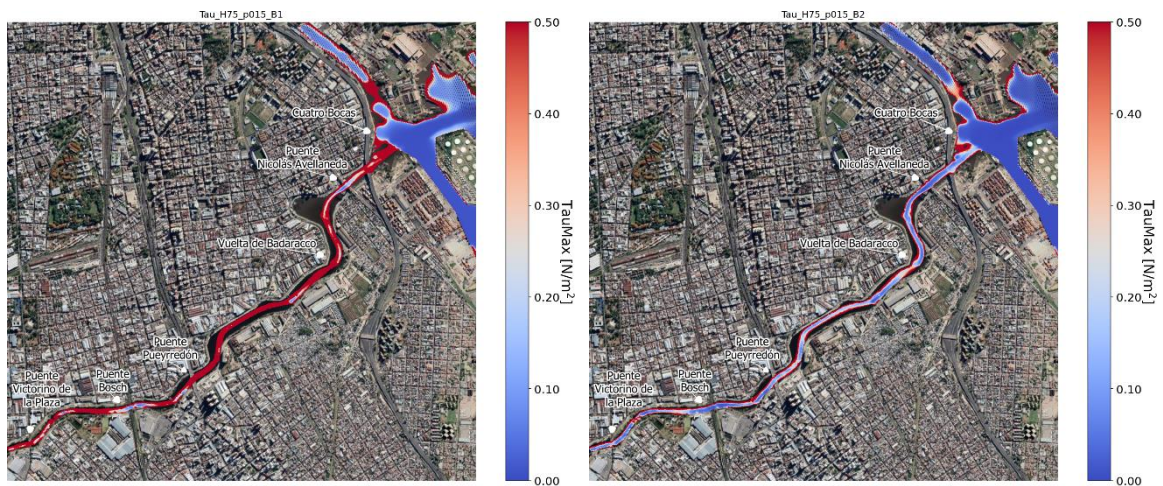


d) Máxima potencia entregada en la hélice: 100%.
Máxima velocidad de navegación: E1 9 nudos - E2 6 nudos.

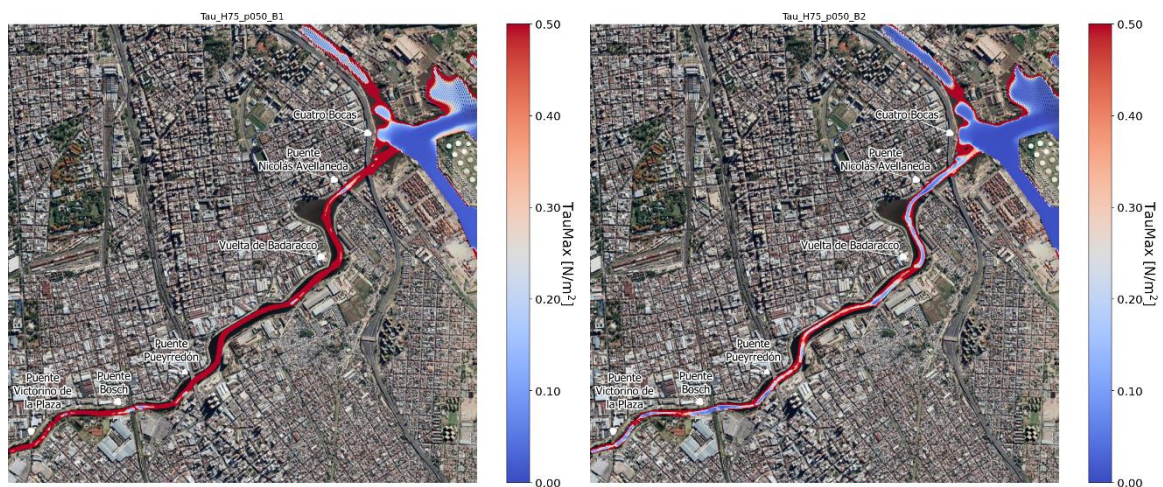
Figura 4.9. Tensiones de corte máximas generadas por las embarcaciones según tipo y potencia y velocidad utilizada para un nivel de 90% de permanencia. Embarcación Tipo 1 (izquierda) - Embarcación Tipo 2 (derecha).



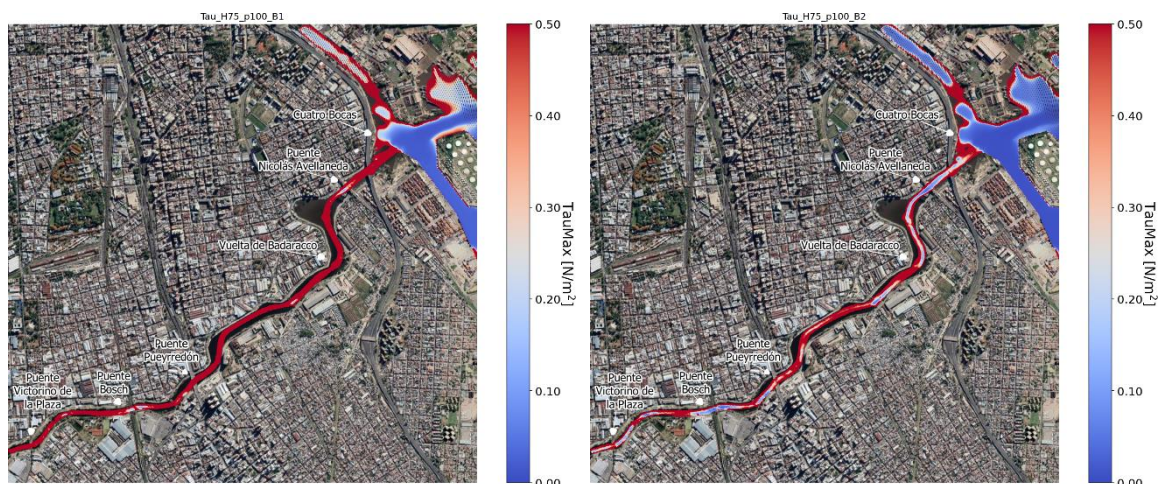
a) Máxima potencia entregada en la hélice 7%.
Máxima velocidad de navegación: E1 3 nudos - E2 2 nudos.



b) Máxima potencia entregada en la hélice 15%.
Máxima velocidad de navegación: E1 9 nudos - E2 6 nudos.



c) Máxima potencia entregada en la hélice 50%.
Máxima velocidad de navegación: E1 9 nudos - E2 6 nudos.



d) Máxima potencia entregada en la hélice 100%.
 Máxima velocidad de navegación: E1 9 nudos - E2 6 nudos.

Figura 4.10. Tensiones de corte máximas generadas por las embarcaciones según tipo y potencia y velocidad utilizada para un nivel de 75% de permanencia. Embarcación Tipo 1 (izquierda) - Embarcación Tipo 2 (derecha).

En función de los distintos mapas de tensiones de corte máximas debidas al pasaje de embarcaciones, se puede apreciar una visible discrepancia respecto al comportamiento de cada una de estas (Tipo 1 o Tipo 2). En ambos casos, se observa que las tensiones son menores en el sector del talweg que es donde se presentan las profundidades mayores.

En el caso de la embarcación Tipo 1, las tensiones de corte máximas alcanzan valores de al menos $0,5 \text{ N/m}^2$ en toda la zona de interés, salvo sectores donde las profundidades son lo suficientemente grandes como para hacerlas disminuir (entorno de Cuatro Bocas). La variación de potencia y velocidad de operación no presenta una sensibilidad considerable respecto a las tensiones de corte máximas, salvo en algunos sectores del tramo Puente Nicolás Avellaneda - Vuelta de Badaracco donde se observan tensiones levemente menores a $0,5 \text{ N/m}^2$. En la comparación respecto de los diferentes niveles de referencia se observa con menor impacto la condición de nivel de permanencia del 75%.

Respecto a la embarcación Tipo 2, las tensiones de corte máximas generadas son inferiores a las de la embarcación Tipo 1. En este caso se observan tensiones máximas del orden de los $0,5 \text{ N/m}^2$ o menores, según condición de operación. La variación del porcentaje de potencia y velocidad utilizado, como a su vez la condición de nivel según permanencia, permite alcanzar valores de tensiones de corte sobre el talweg en el rango $0,10\text{-}0,25 \text{ N/m}^2$ para las situaciones de menor impacto (menor potencia y velocidad y nivel con permanencia 75%).

Para la Embarcación Tipo 2, los aumentos locales en las tensiones de corte observados en las cercanías de la Vuelta de Badaracco y aguas arriba de Cuatro Bocas (ver Figura 4.11) se atribuyen a variaciones batimétricas en dichas zonas, tal como se aprecia en la Figura 4.12.

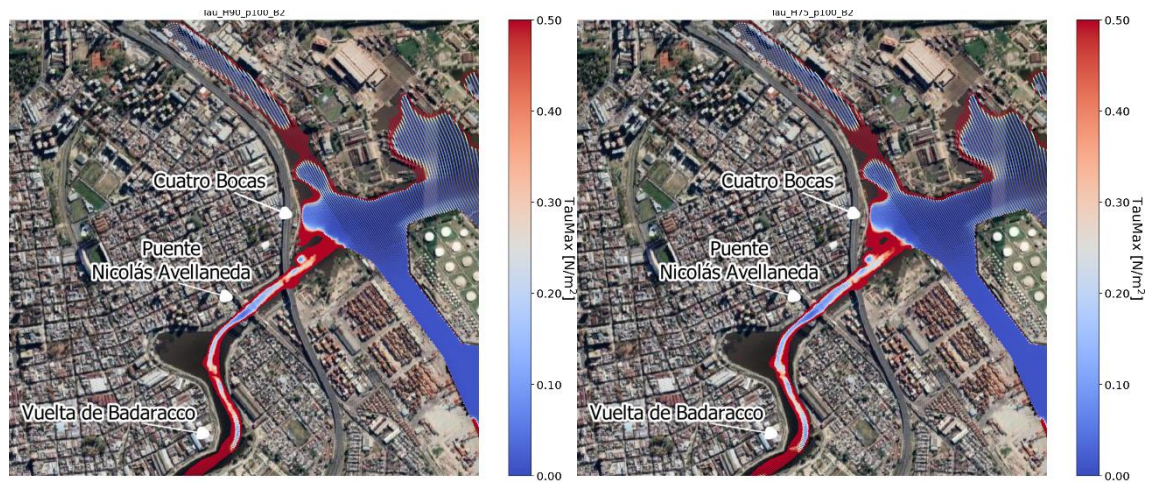


Figura 4.11. Tensiones de corte máximas generadas por la embarcación Tipo 2 entre Cuatro Bocas y Vuelta de Badaracco. Potencia entregada a las hélices 100%. Nivel 90% permanencia (izquierda) – Nivel 75% permanencia (derecha)

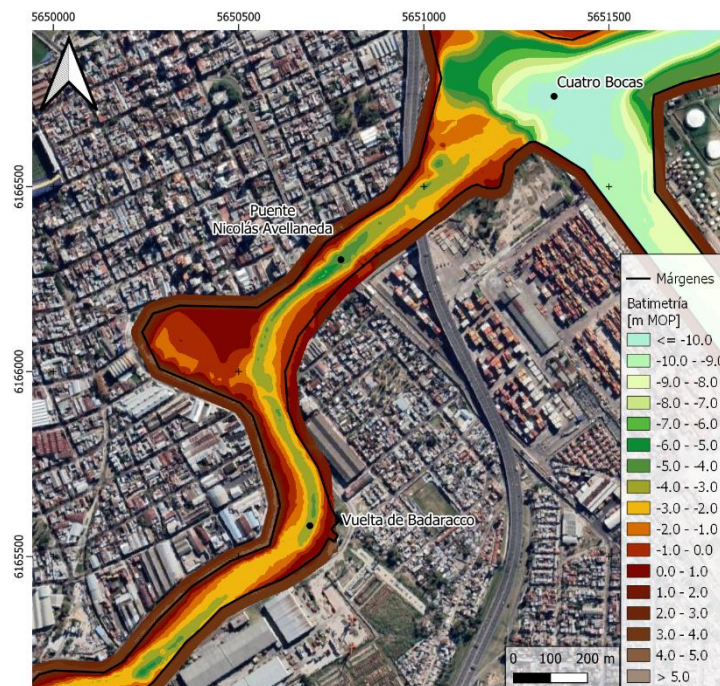


Figura 4.12. Detalle de la batimetría entre Cuatro Bocas y Vuelta de Badaracco.

Los mapas de la Figura 4.11 corresponden a una máxima potencia entregada al eje de la hélice del 100 % y una máxima velocidad de navegación de 6 nudos, presentando los valores más altos de tensiones en el talweg en las zonas antes indicadas (Vuelta de Badaracco y aguas arriba de Cuatro Bocas). En cambio, en la Figura 4.13, para una máxima potencia en el eje de la hélice del 7% y una máxima velocidad de navegación de 2 nudos, se aprecia una continuidad de tensiones

del orden de los 0,10 N/m² en el centro del cauce a lo largo de todo el tramo de Riachuelo estudiado.

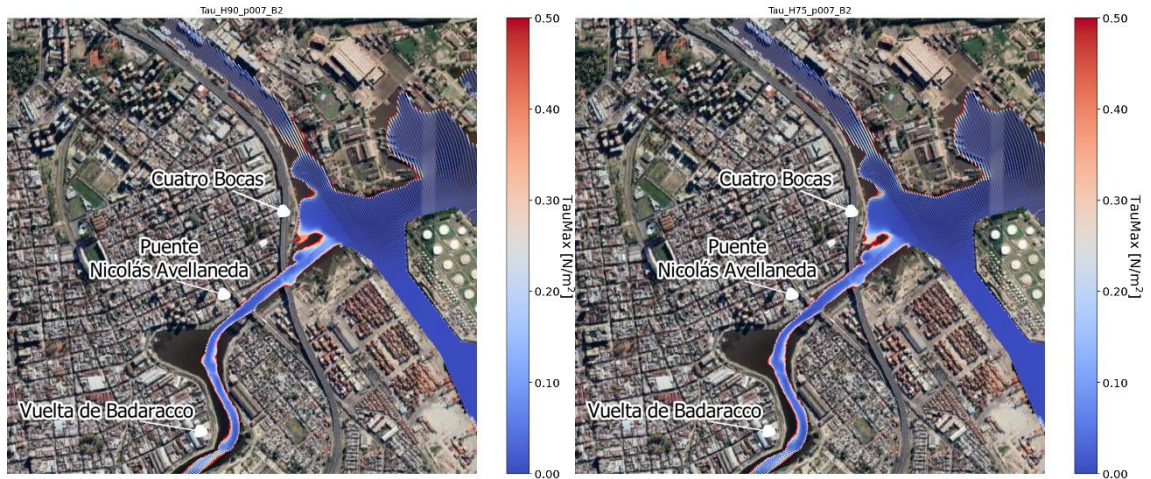


Figura 4.13. Tensiones de corte máximas generadas por la embarcación Tipo 2 entre Cuatro Bocas y Vuelta de Badaracco. Potencia entregada a las hélices 7%. Nivel 90% permanencia (izquierda) – Nivel 75% permanencia (derecha).

5 Análisis comparativo

Con el objetivo de analizar el impacto del pasaje de embarcaciones respecto de las condiciones hidrodinámicas propias del cuerpo de agua en el tramo de estudio, se desarrolló un análisis comparativo de las tensiones de corte en el fondo.

5.1 Diferencia de tensiones máximas

Tras analizar las tensiones del propio cuerpo de agua generadas para un conjunto de eventos ordinarios, con las que se construyó la envolvente de tensiones de corte máximas para los seis escenarios hidrodinámicos evaluados en el presente estudio (Figura 3.6), y habiéndose determinado en forma independiente las tensiones que dos Embarcaciones Tipo inducen sobre el fondo del cauce para diversas condiciones de funcionamiento, a continuación, se procede a su comparación en el área de estudio.

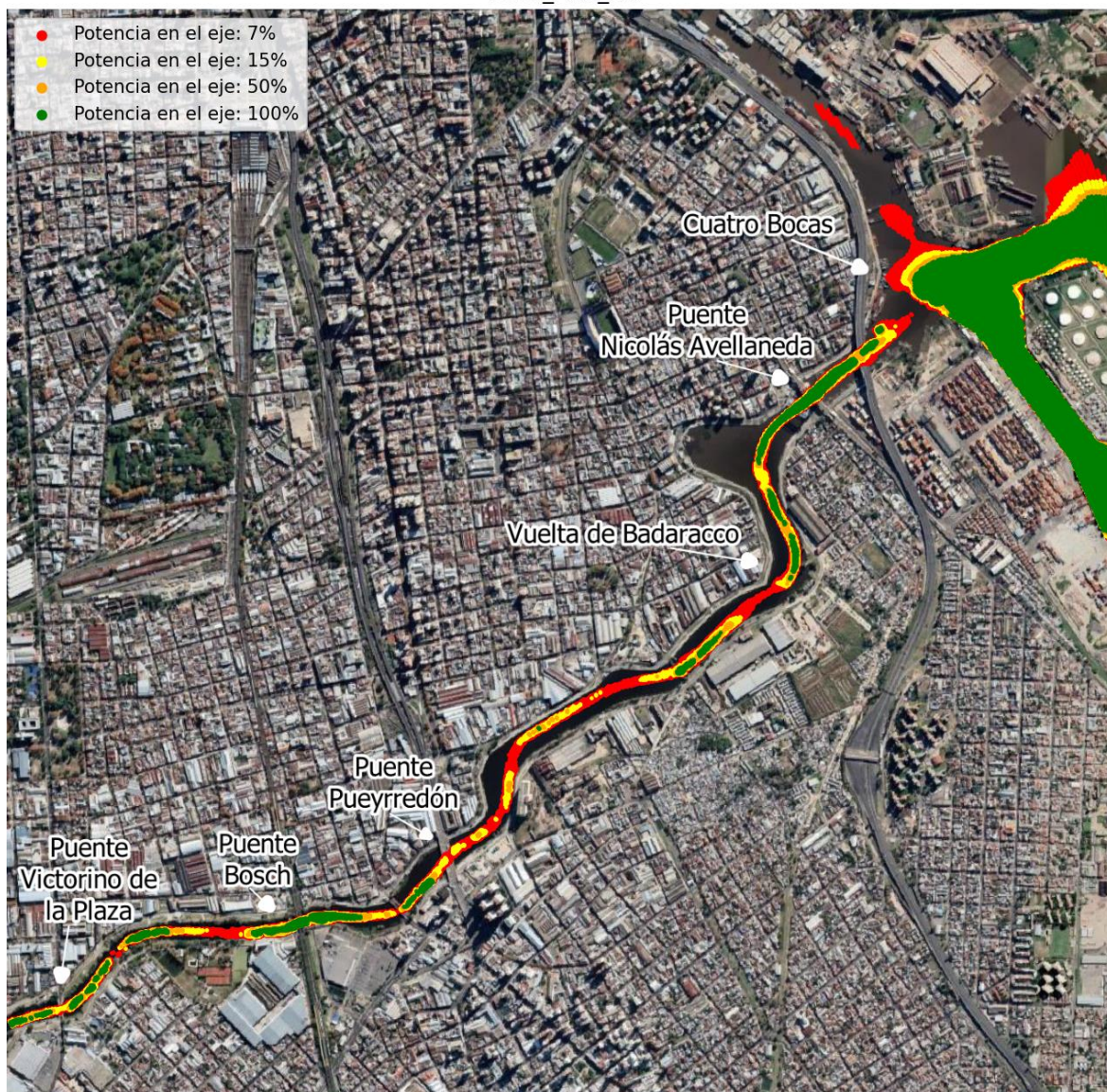
Es oportuno destacar que el objetivo del trabajo no fue analizar el tiempo en que una determinada tensión actúa sobre una porción del lecho, ni si esa tensión es capaz de poner en movimiento al material de fondo, sino determinar, en forma absoluta, los sectores en que las tensiones que las Embarcaciones Tipo inducen en su operación sobre el lecho, son menores a las que naturalmente se producen para eventos frecuentes de crecidas en el Riachuelo y de variaciones de nivel ordinarias en el Río de la Plata.

En las Figura 5.1.a y en la Figura 5.1.b se presentan, para la navegación considerando el nivel con permanencia de 90%, los mapas con las zonas donde la envolvente de tensiones máximas (para los seis escenarios ordinarios simulados), supera a las tensiones generadas por las embarcaciones Tipo 1 y Tipo 2, respectivamente. Los mapas de las Figura 5.2.a y Figura 5.2.b, son semejantes a los anteriores, pero para la permanencia de 75%. En estos mapas se distinguen cuatro sectores con características de operación diferentes (Tabla 5.1).

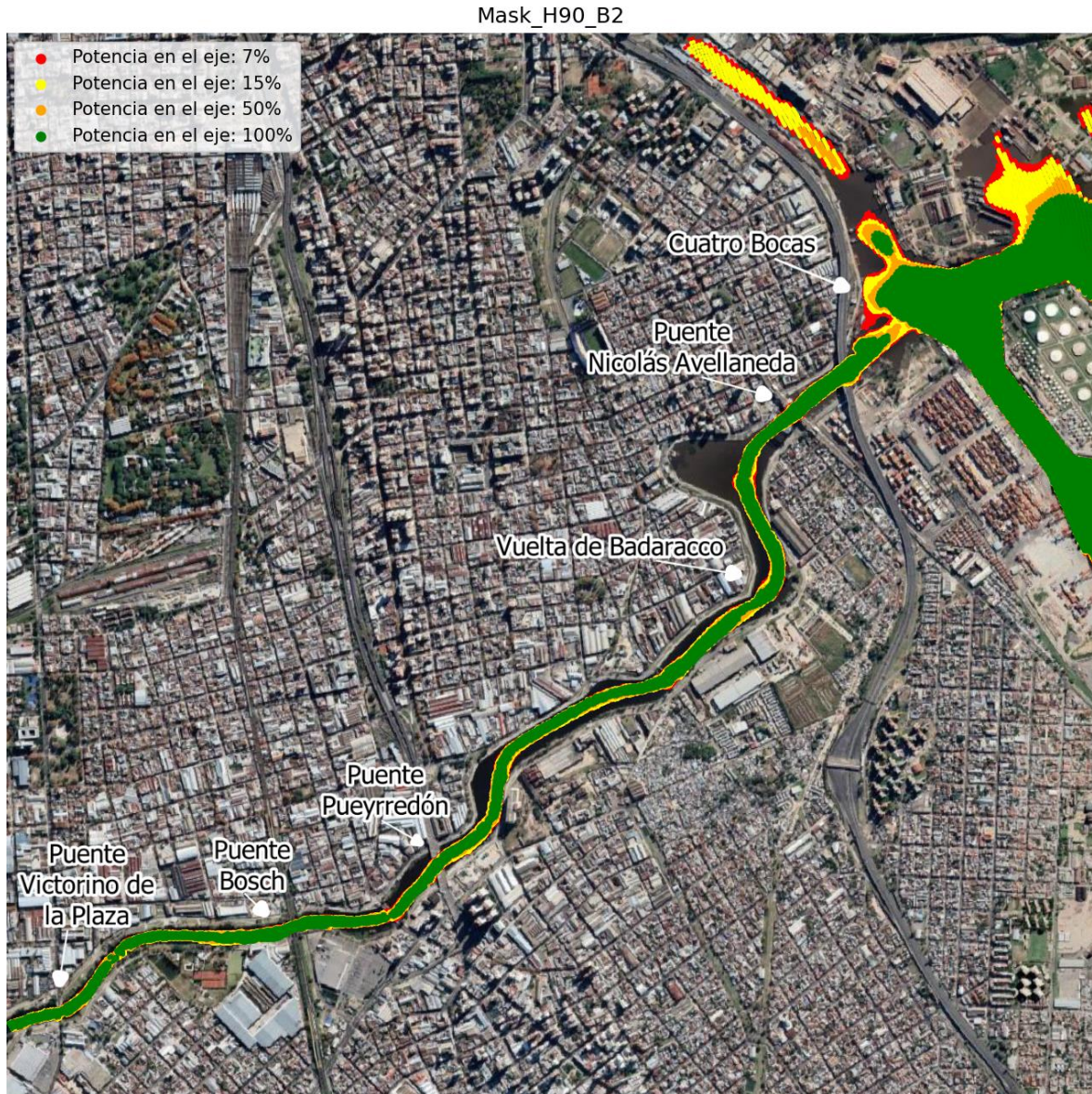
Tabla 5.1. Características de operación según embarcación

Zona	Embarcación Tipo 1		Embarcación Tipo 2	
	Máxima Potencia en el eje [%]	Máxima Velocidad de navegación [nudos]	Máxima Potencia en el eje [%]	Máxima Velocidad de navegación [nudos]
	100	9	100	6
	50	9	50	6
	15	9	15	6
	7	3	7	2

Mask_H90_B1



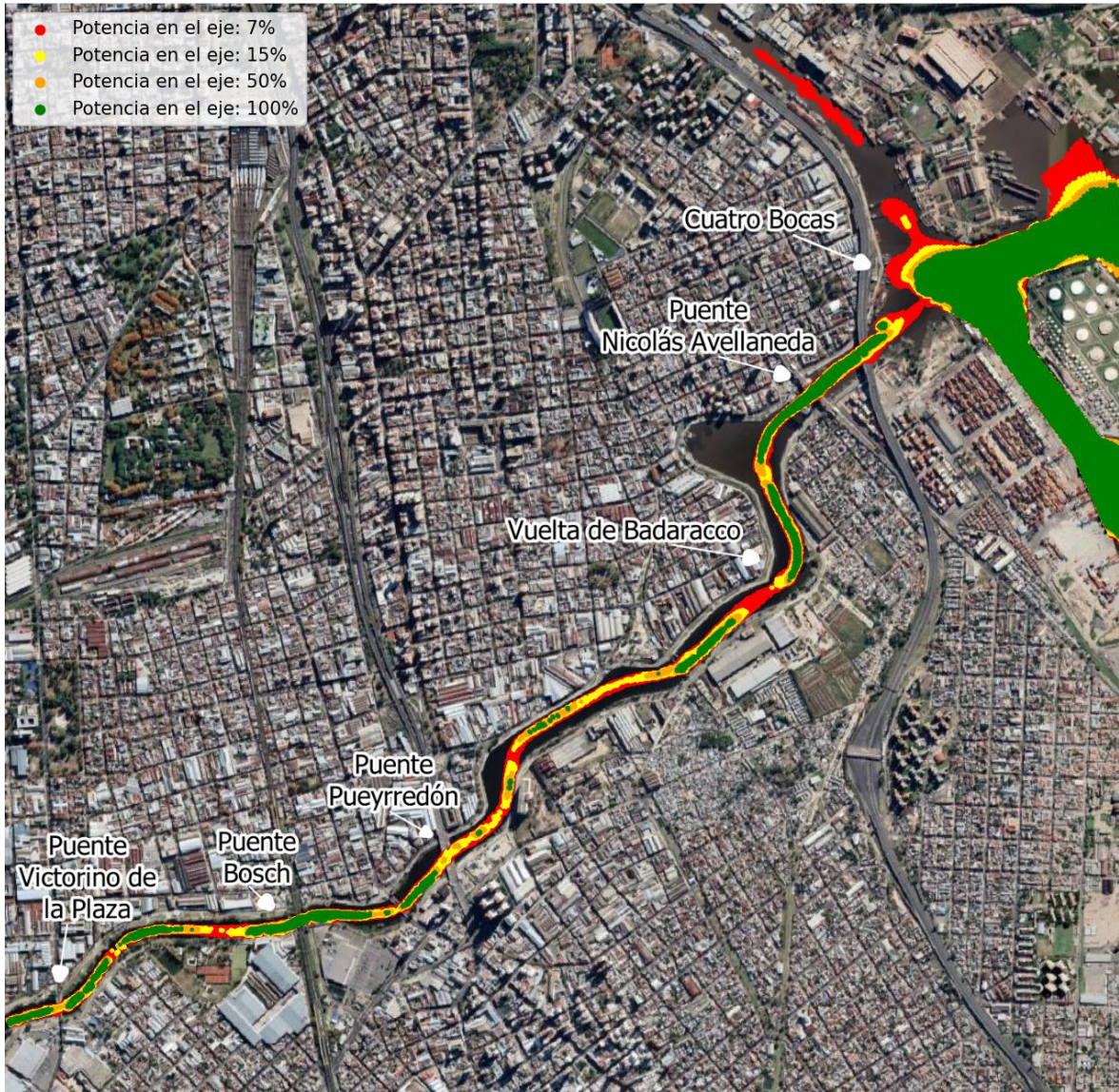
a) Embarcación Tipo 1



b) Embarcación Tipo 2

Figura 5.1. Diferencia de tensiones de corte máximas para embarcación Tipo 1 y Tipo 2 para un nivel con un 90% de permanencia en todo el dominio de modelación.

Mask_H75_B1



a) Embarcación Tipo 1

Mask_H75_B2



b) Embarcación Tipo 2

Figura 5.2. Diferencia de tensiones de corte máximas para Embarcación Tipo 1 y Tipo 2 para un nivel con un 75% de permanencia en todo el dominio de modelación.

Como se aprecia en las figuras anteriores, las embarcaciones Tipo 1 y Tipo 2 presentan una distribución homogénea de sectores en donde las tensiones de corte del cuerpo de agua son mayores a las tensiones generadas por la propulsión. Esto se da en forma general en los dos escenarios de niveles estudiados, con la salvedad del caso de la embarcación Tipo 1, donde en las adyacencias del sector de Cuatro Bocas predominan las tensiones provocadas por el paso de las embarcaciones (ver Figura 5.3). Para la embarcación Tipo 2 se puede observar que las tensiones del propio cuerpo de agua son mayores que las tensiones generadas por la embarcación, aún con esta operando con el 100% de potencia del eje y una velocidad de navegación de 6 nudos, en casi la totalidad del área de estudio.



Figura 5.3. Diferencia de tensiones de corte máximas para la embarcación Tipo 1 entre Cuatro Bocas y Vuelta de Badaracco para permanencias del 90% (izquierda) y 75% (derecha).

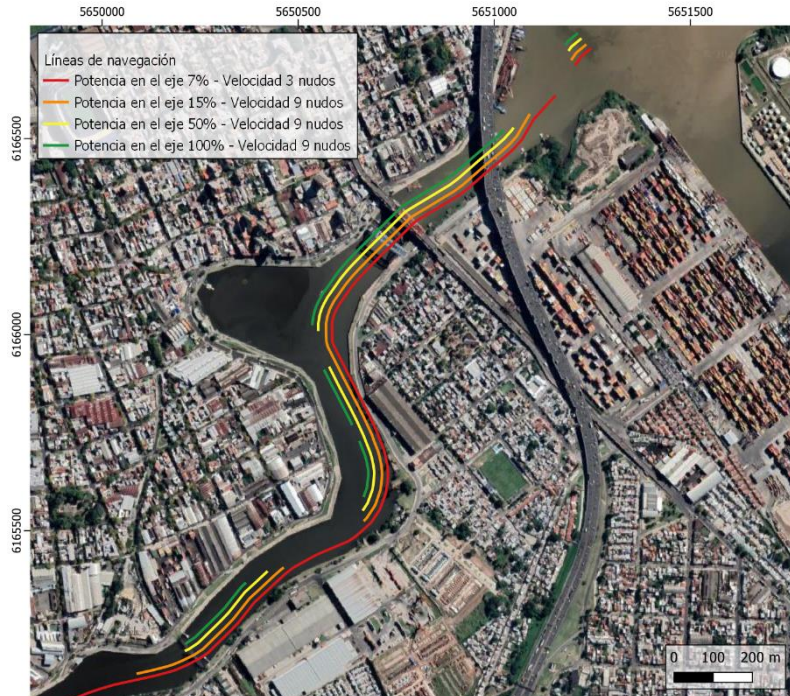
En función de estos resultados, una potencial zona de atraque podría ubicarse en el entorno del sector inmediatamente aguas abajo de la Autopista Buenos Aires - La Plata, sobre margen izquierda. En ese tramo, además de encontrarse la dependencia de Prefectura Naval Argentina, actualmente operan embarcaciones que ofrecen servicios en la zona portuaria de Buenos Aires y Dock Sud. La elección de ese sector como zona de atraque evitaría la navegación por la zona cuyos resultados resultan más exigentes para la operatoria de embarcaciones Tipo 1. Además, las condiciones batimétricas para el acceso al entorno del talweg resultan adecuadas.

5.2 Resumen

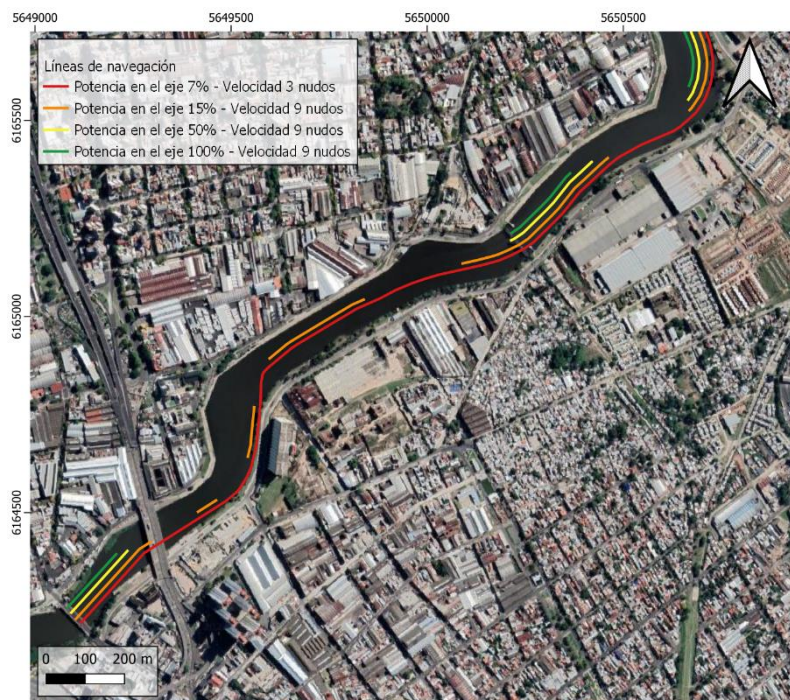
A modo de resumen de los resultados obtenidos, se presentan esquemáticamente los tramos de navegación posibles en el entorno del talweg para la embarcación Tipo 1 (Figura 5.4 y Figura 5.5) y para la embarcación Tipo 2 (Figura 5.6 y Figura 5.7). Se distinguen cuatro tipos de tramos de acuerdo a la potencia y la velocidad de la operación considerando criterio de no superación en los valores de tensiones de corte generadas por las embarcaciones respecto de las del propio cuerpo de agua.

La longitud de los tramos donde resulta posible operar con embarcaciones Tipo 1 depende fuertemente de la permanencia del nivel considerado y de las condiciones de navegación (potencia en el eje y velocidad de la embarcación). La condición de nivel de permanencia 90% resulta mucho más exigente que la de 75%, donde a pesar de que para algunas potencias y velocidades las discontinuidades son mayores, se logran esquemas continuos de navegación. Se observa que para ambas condiciones de niveles se requiere una operación de mínima potencia en el sector comprendido entre Vuelta de Badaracco y el viejo Puente Pueyrredón (con algunos

tramos localizados menos restrictivos en cuanto a condiciones de operación) y en tramo entre Cuatro Bocas y la Autopista Buenos Aires - La Plata.

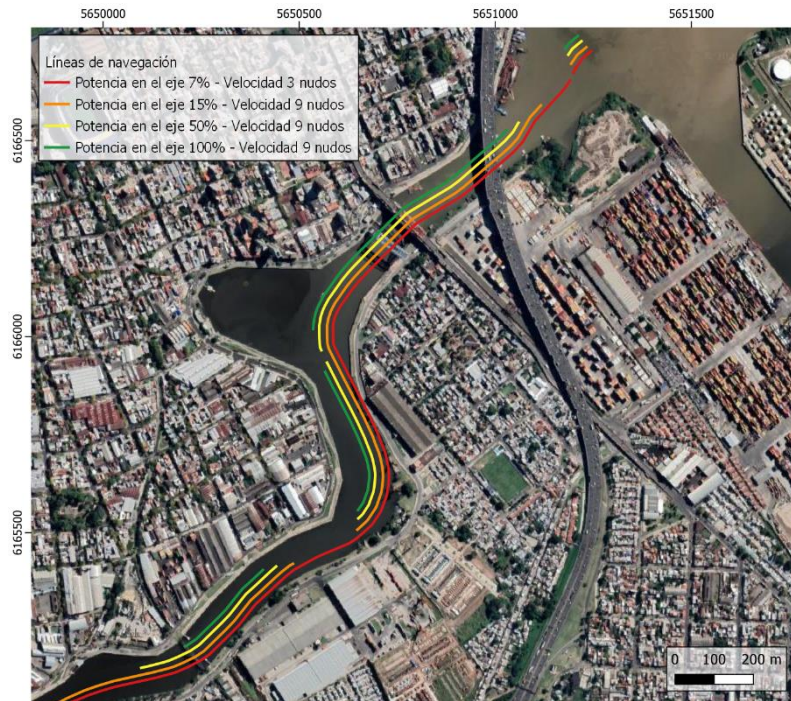


a) Tramo Cuatro Bocas - Puente Barraca Peña

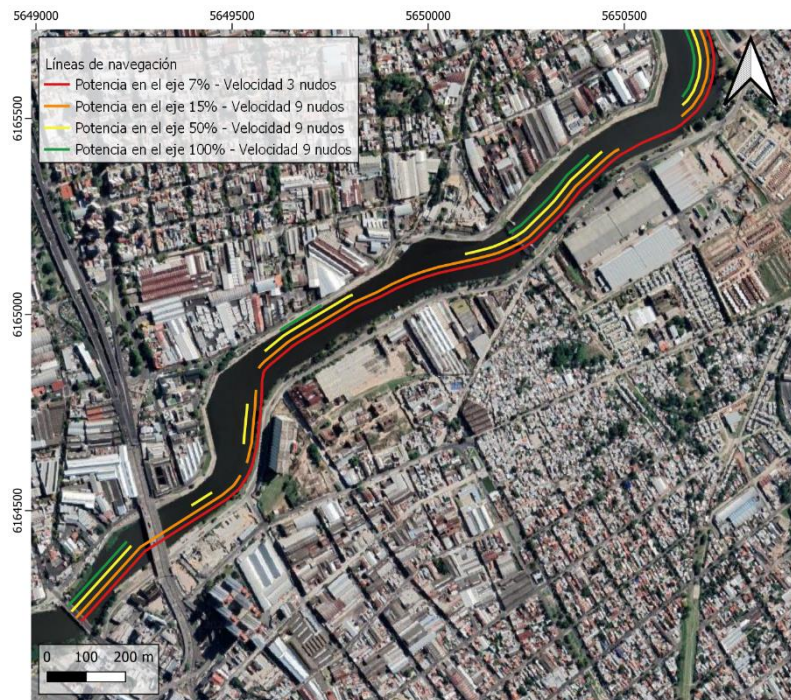


b) Tramo Puente Barraca Peña - Viejo Puente Pueyrredón

Figura 5.4. Esquema de resumen de tramos de navegación de la embarcación Tipo 1 según potencias y velocidades. Nivel de permanencia 90%.

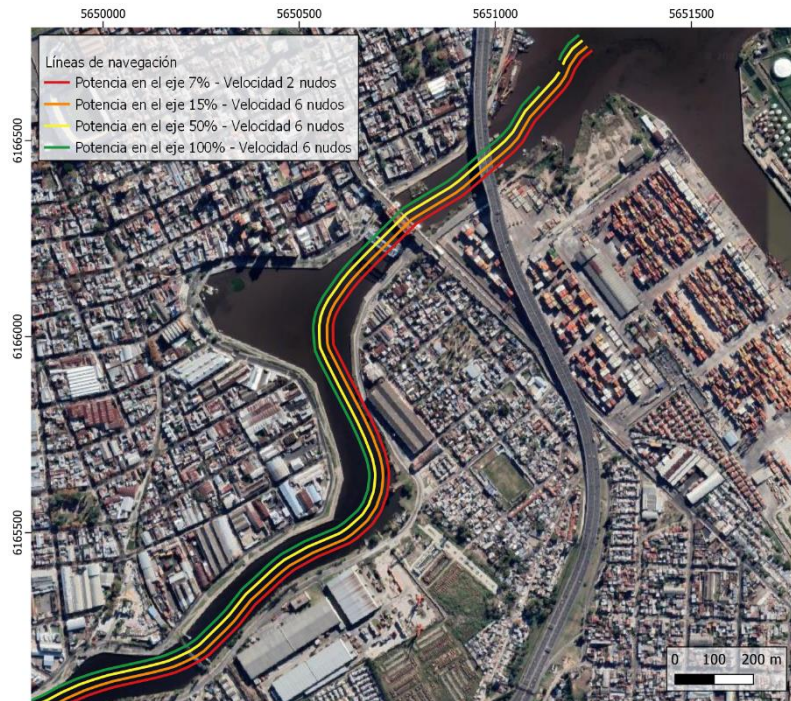


a) Tramo Cuatro Bocas - Puente Barraca Peña

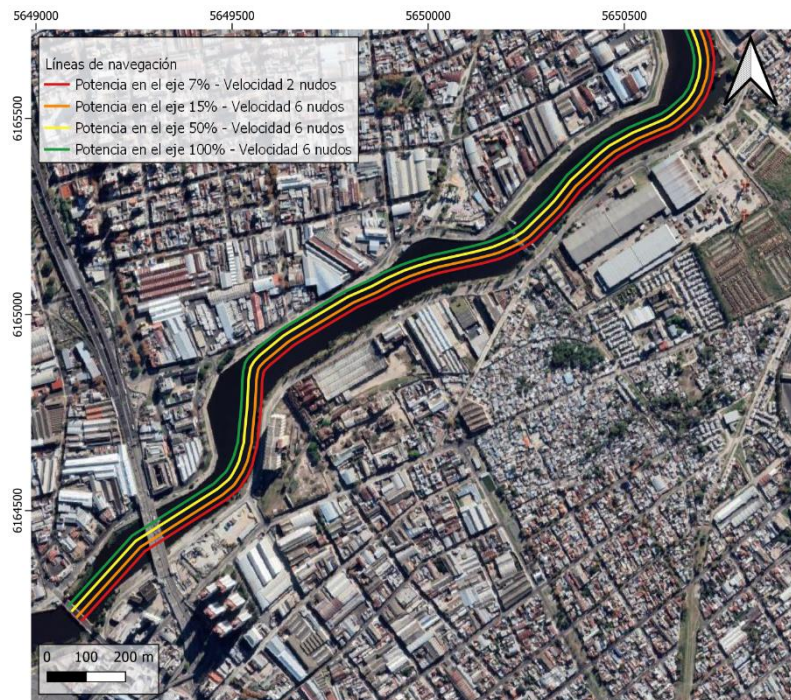


b) Tramo Puente Barraca Peña - Viejo Puente Pueyrredón

Figura 5.5. Esquema de resumen de tramos de navegación de la embarcación Tipo 1 según potencias y velocidades. Nivel de permanencia 75%.

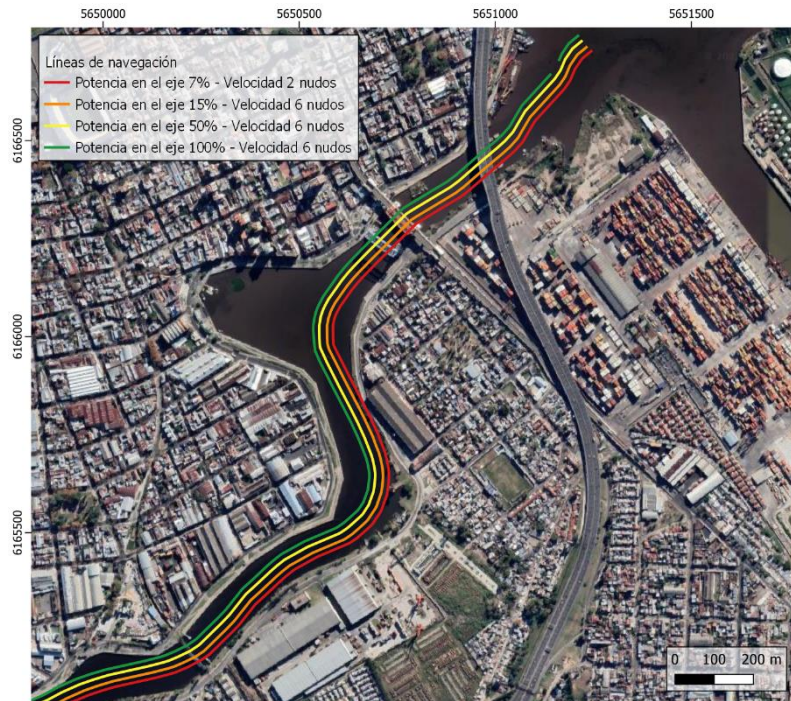


a) Tramo Cuatro Bocas - Puente Barraca Peña

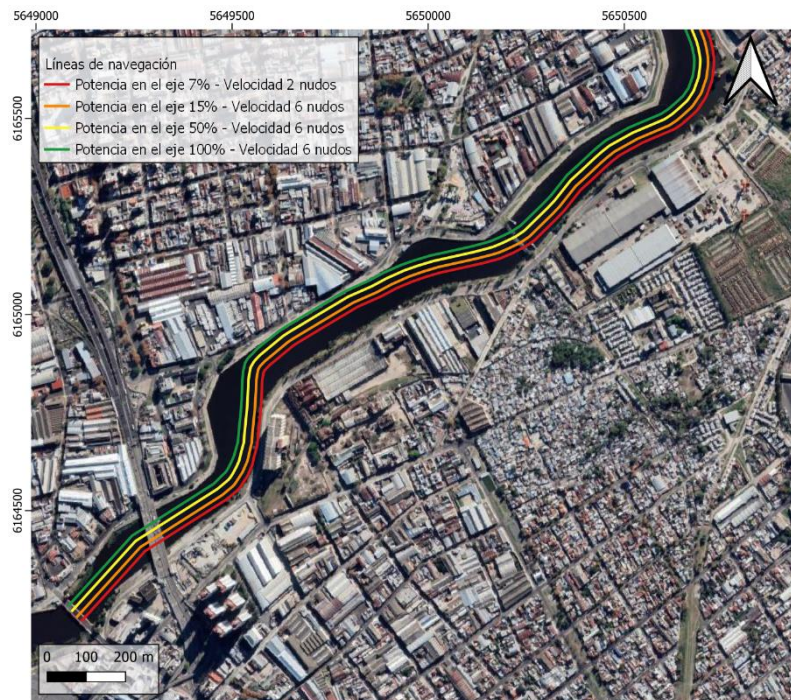


b) Tramo Puente Barraca Peña - Viejo Puente Pueyrredón

Figura 5.6. Esquema de resumen de tramos de navegación de la embarcación Tipo 2 según potencias y velocidades. Nivel de permanencia 90%.



a) Tramo Cuatro Bocas - Puente Barraca Peña



b) Tramo Puente Barraca Peña - Viejo Puente Pueyrredón

Figura 5.7. Esquema de resumen de tramos de navegación de la embarcación Tipo 2 según potencias y velocidades. Nivel de permanencia 75%.

En la Tabla 5.3 (embarcación Tipo 1) y en la Tabla 5.3 (embarcación Tipo 2) se resumen las longitudes de los tramos donde sería posible la navegación en el tramo de estudio Cuatro Bocas - Viejo Puente Pueyrredón. Como se mencionó previamente, puede observarse que para la embarcación Tipo 1 las condiciones de operabilidad dependen fuertemente del nivel que se disponga en el cuerpo de agua y de las condiciones de navegación (potencia en el eje y velocidad de la embarcación).

Adicionalmente, para caracterizar los tramos de posible navegación definidos en las Figura 5.4 a la Figura 5.7 se presenta el detalle de la batimetría en dicha área (Figura 5.8) y las profundidades para los dos niveles analizados (Nivel de permanencia del 90%: Figura 5.9 - Nivel de permanencia del 75%: Figura 5.10).

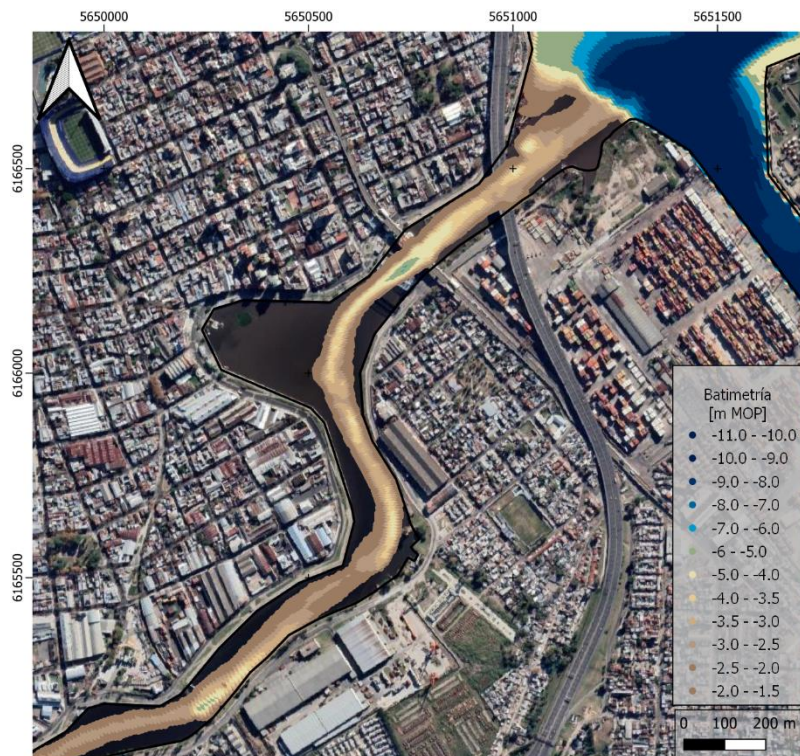
Tabla 5.2. Longitud navegable por la embarcación Tipo 1 en el entorno del thalweg y porcentaje respecto del total del tramo de estudio (Cuatro Bocas - Viejo Puente Pueyrredón)

Zona	Nivel de permanencia [%]	Potencia en el eje [%]	Velocidad [nudos]	Longitud navegable [m]	Porcentaje del tramo de estudio [%]
	75	100	9	1769	48
	75	50	9	2362	64
	75	15	9	3254	88
	75	7	3	3656	99
	90	100	9	1436	39
	90	50	9	1634	44
	90	15	9	2558	70
	90	7	3	3578	97

Tabla 5.3. Longitud navegable por la embarcación Tipo 2 en el entorno del thalweg y porcentaje respecto del total del tramo de estudio (Cuatro Bocas - Viejo Puente Pueyrredón)

Zona	Nivel de permanencia [%]	Potencia en el eje [%]	Velocidad [nudos]	Longitud navegable [m]	Porcentaje del tramo de estudio [%]
	75	100	6	3633	99

	75	50	6	3678	100
	75	15	6	3678	100
	75	7	2	3678	100
	90	100	6	3587	98
	90	50	6	3650	99
	90	15	6	3678	100
	90	7	2	3678	100



a) Tramo Cuatro Bocas - Puente Barraca Peña



b) Tramo Puente Barraca Peña - Viejo Puente Pueyrredón
 Figura 5.8. Detalles de la batimetría en el área de estudio



a) Tramo Cuatro Bocas - Puente Barraca Peña



b) Tramo Puente Barraca Peña - Viejo Puente Pueyrredón

Figura 5.9. Detalles de profundidades en el área de estudio asociadas al nivel de permanencia del 90%.



a) Tramo Cuatro Bocas - Puente Barraca Peña



b) Tramo Puente Barraca Peña - Viejo Puente Pueyrredón

Figura 5.10. Detalles de profundidades en el área de estudio asociadas al nivel de permanencia del 75%.

6 Conclusiones

A continuación, se presentan las principales conclusiones de este estudio:

- El objetivo del trabajo no fue analizar el tiempo en que una determinada tensión actúa sobre una porción del lecho, ni si esa tensión es capaz de poner en movimiento al material de fondo, sino determinar, en forma absoluta, los sectores en que las tensiones que las Embarcaciones Tipo inducen en su operación sobre el lecho son menores a las que naturalmente se producen para eventos frecuentes de crecidas en el Riachuelo y de variaciones de nivel ordinarias en el Río de la Plata.
- De acuerdo al análisis general de la hidrodinámica de la zona de estudio, y en base a los escenarios simulados, la distribución de velocidades y tensiones de corte del cuerpo de agua de mayor impacto pueden caracterizarse según el principal forzante del sistema. Durante la ocurrencia de crecidas, la principal influencia se destaca desde aguas arriba hasta el Puente Nicolás Avellaneda. Mientras que el impacto de ondas de tormenta, positivas y negativas, influye desde la desembocadura del Riachuelo hasta el Puente Pueyrredón.
- El cálculo de las tensiones de corte generadas por la propulsión de las embarcaciones se basa principalmente en la potencia, la velocidad y el tirante, representado por la distancia entre el eje del propulsor y el fondo del lecho, que varía con el cambio de calado en función de la batimetría durante la operación. Esto último implica que las condiciones operativas de los dos tipos de embarcaciones consideraras dependen del nivel presente en el cuerpo de agua.
- Las tensiones de corte generadas por la embarcación Tipo 2 son significativamente inferiores a las obtenidas para la embarcación Tipo 1 debido a las características de los sistemas de propulsión de cada una de ellas.
- Para la embarcación Tipo 1 pueden contemplarse combinaciones de niveles, velocidades y potencias con las cuales las tensiones inducidas por la navegación son inferiores a las debidas a eventos ordinarios, a lo largo de una traza continua en el tramo de Riachuelo estudiado (excepto por un tramo de 100 metros en la zona de Cuatro Bocas). En las Figura 6.1 y Figura 6.2 se presentan esquemáticamente los tramos de navegación posibles en el entorno del talweg (zona de mayor profundidad) para dicha embarcación. Se distinguen cuatro tipos de tramos de acuerdo a la potencia y la velocidad de la operación considerando criterio de no superación en los valores de tensiones de corte generadas por las embarcaciones respecto de las del propio cuerpo de agua.

- Para la embarcación Tipo 2 las tensiones inducidas por la navegación son menores a las debidas a eventos ordinarios a lo largo de una traza continua en el tramo de Riachuelo estudiado. Prácticamente en la totalidad del tramo estudiado esta embarcación podría operar con una potencia en el eje del 100% y una velocidad de navegación de 6 nudos (ver Figura 6.3 y Figura 6.4).

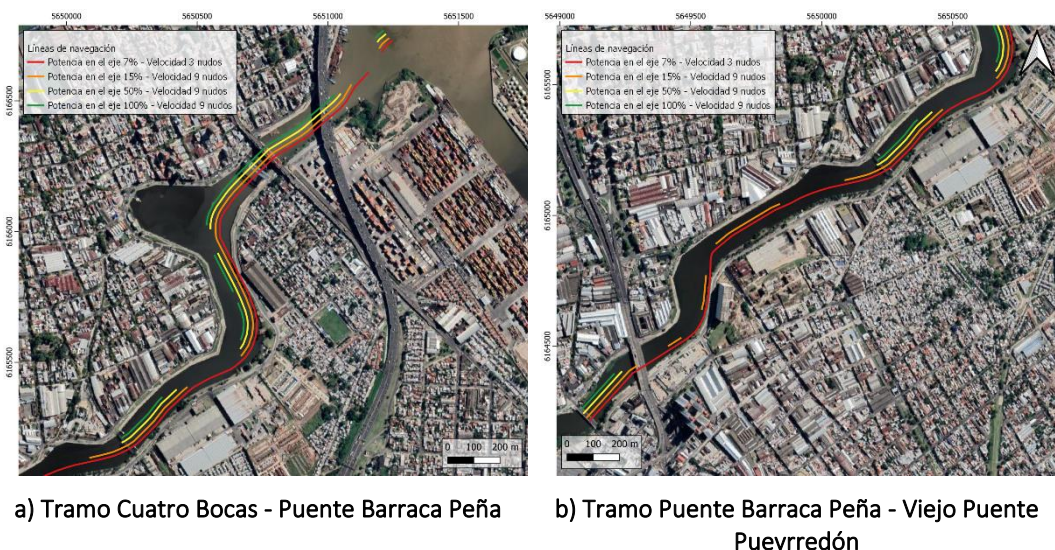


Figura 6.1. Esquema de resumen de tramos de navegación de la embarcación Tipo 1 según potencias y velocidades. Nivel de permanencia 90%.

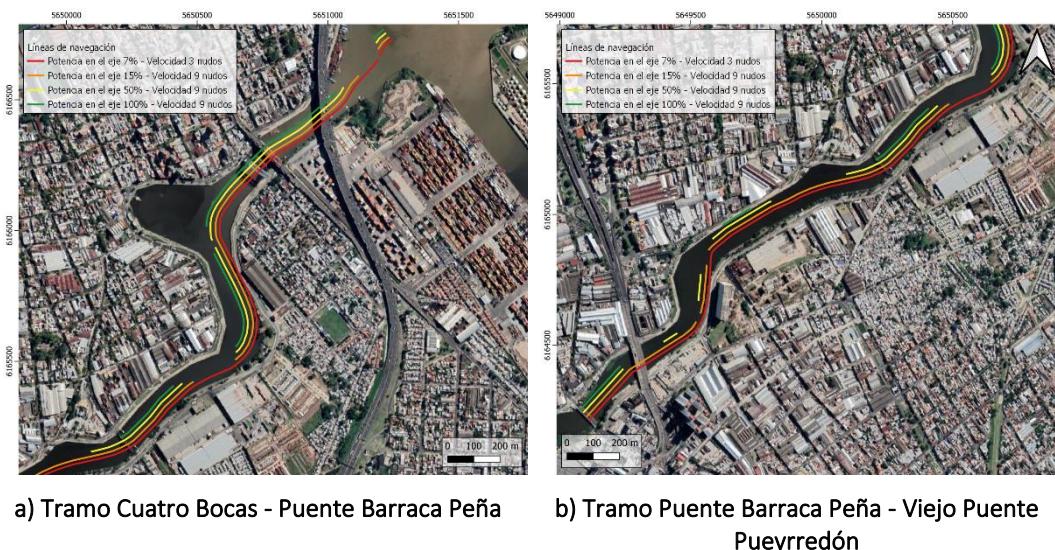


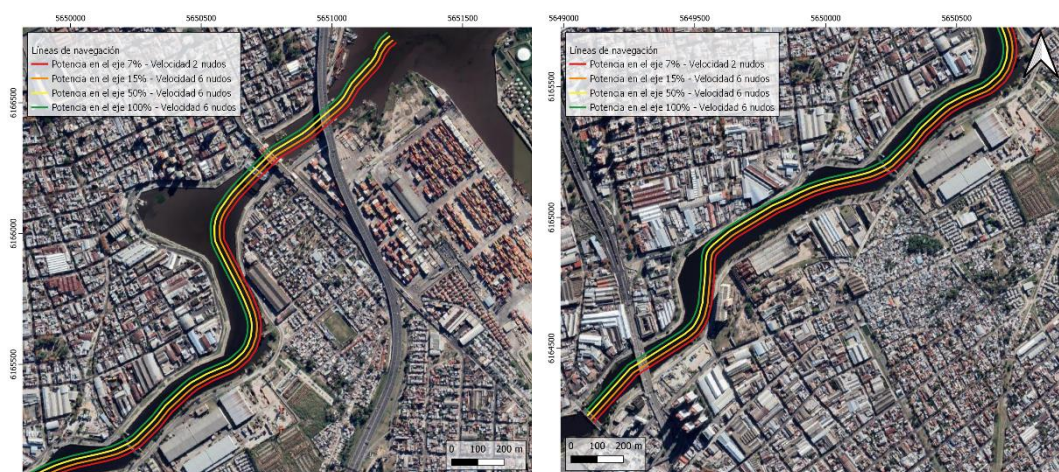
Figura 6.2. Esquema de resumen de tramos de navegación de la embarcación Tipo 1 según potencias y velocidades. Nivel de permanencia 75%.



a) Tramo Cuatro Bocas - Puente Barraca Peña

b) Tramo Puente Barraca Peña - Viejo Puente Pueyrredón

Figura 6.3. Esquema de resumen de tramos de navegación de la embarcación Tipo 2 según potencias y velocidades. Nivel de permanencia 90%.



a) Tramo Cuatro Bocas - Puente Barraca Peña

b) Tramo Puente Barraca Peña - Viejo Puente Pueyrredón

Figura 6.4. Esquema de resumen de tramos de navegación de la embarcación Tipo 2 según potencias y velocidades. Nivel de permanencia 75%.

- En la Tabla 6.1 (embarcación Tipo 1) y en la Tabla 6.2 (embarcación Tipo 2), se presentan las longitudes navegables y condiciones de posible operación en el tramo de estudio, Cuatro Bocas - Viejo Puente Pueyrredón.

Tabla 6.1. Longitud navegable por la embarcación Tipo 1 en el entorno del thalweg y porcentaje respecto del total del tramo de estudio (Cuatro Bocas - Viejo Puente Pueyrredón)

Zona	Nivel de permanencia [%]	Potencia en el eje [%]	Velocidad [nudos]	Longitud navegable [m]	Porcentaje del tramo de estudio [%]
	75	100	9	1769	48
	75	50	9	2362	64
	75	15	9	3254	88
	75	7	3	3656	99
	90	100	9	1436	39
	90	50	9	1634	44
	90	15	9	2558	70
	90	7	3	3578	97

Tabla 6.2. Longitud navegable por la embarcación Tipo 2 en el entorno del thalweg y porcentaje respecto del total del tramo de estudio (Cuatro Bocas - Viejo Puente Pueyrredón)

Zona	Nivel de permanencia [%]	Potencia en el eje [%]	Velocidad [nudos]	Longitud navegable [m]	Porcentaje del tramo de estudio [%]
	75	100	6	3633	99
	75	50	6	3678	100
	75	15	6	3678	100
	75	7	2	3678	100
	90	100	6	3587	98
	90	50	6	3650	99
	90	15	6	3678	100
	90	7	2	3678	100

- Se destacan como zonas de operación con potencias mínimas de la embarcación Tipo 1 al tramo que va de Autopista Buenos Aires - La Plata a Cuatro Bocas y el tramo comprendido entre Vuelta de Badaracco y el Puente Pueyrredón.
- El plan de operaciones de las embarcaciones (en particular de la embarcación Tipo 1) en la zona de estudio se podría basar en el seguimiento de niveles del Puerto de Buenos Aires. También sería deseable utilizar información hidrométrica de Regatas de

Avellaneda, por lo que sería importante poner en valor ese punto de monitoreo además de facilitar el acceso a esa información.

- Como uno de los productos de este estudio se obtuvo un modelo hidrodinámico bidimensional del tramo inferior del Riachuelo, desde aproximadamente el puente Victorino de la Plaza hasta su desembocadura. Este modelo, debidamente calibrado y validado, representa una herramienta robusta para el estudio de problemas hidrodinámicos en esta región y de suma utilidad para futuras aplicaciones.
- Las tramitaciones, autorizaciones a ser solicitadas y normas de navegación fluvial a cumplir por las embarcaciones, vía navegable y navegación inteligente no fueron parte de los objetivos de este proyecto.

Referencias

Blaauw, H.G., van de Kaa, E.J., 1978. Erosion of bottom and sloping banks caused by the screw race of manoeuvring ships. Report 202, Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands.

Bombardelli, F.A, Menéndez, A.N, Brea, J.D., Lapetina, M.R., Uriburu Quirno, M., 1995. Estudio hidrodinámico del Delta del Río Paraná mediante modelación matemática, Informe LHA-INCYTH 137-03-95.

Coles, 2001. An Introduction to Statistical Modeling of Extreme Values. Springer-Verlag London. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-3675-0>

Deltares, 2021. Delft3D-FLOW: Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual. Hydro-Morphodynamics. Versión: 3.15. Septiembre. The Netherlands.

EAU, 1996. Recommendations of the Committee for Waterfront Structures – Harbours and Waterways. 7th edition, 2000. Ernst & Sohn. 628 p.

EAU, 2004. Recommendations of the Committee for Waterfront Structures – Harbours and Waterways. 8th edition, 2006. Wiley. 660 p.

Fuehrer, M., Pohl, H., Romisch, K., 1987. Propeller jet erosion and stability criteria for bottom protection of various constructions. In: Proceedings of PIANC, Bulletin No. 58, 1987.

Hammack, E.A., Smith, D.S., Stockstill, R.L., 2008. Modeling vessel-Generated currents and bed shear stresses. Coastal and Hydraulics Laboratory, Report ERDC/CHL TR-08-7. Navigation Systems Research Program, Engineer Research and Development Center, US Army Corp of Engineers, USA.

Jaime, P.R., Menéndez, A.N., 1999. Modelo hidrodinámico 'Río de la Plata 2000'. Informe INA-LHA 183-01-99, septiembre. Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Argentina.

PIANC, 1997. Guidelines for the design of armoured slopes under open piled quay walls. Supplement to Bulletin 22, Brussels.

PIANC, 2015. Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships. Report 180, Maritime Navigation Commission. ISBN 978-2-87223-223.

Puertos del Estado, 2012. ROM (Recomendaciones para Obras Marítimas). ROM 2.0-11, Recomendaciones para el proyecto y ejecución de obras de atraque y amarre (Tomo 1). España, junio.

Re, M., Menéndez, A.N., 2009. Modelación del impacto de un relleno costero sobre la dinámica del Río de la Plata. Informe de Avance 5. Informe LHA 300-06-09, Instituto Nacional del Agua. Ezeiza.

Re, M., García, P.E., 2015. Estudio de la obra de toma del sistema de refrigeración de la Central Térmica Costanera - Informe 1: Hidrodinámica y transporte de residuos sólidos flotantes. Informe LHA 343-02-15, Instituto Nacional del Agua. Ezeiza.

Re, M., García, P.E., Lecertua, E., Menéndez, A.N, 2016. Transporte y destino de residuos sólidos flotantes en la desembocadura del Río Matanza-Riachuelo. Cuadernos Del CURIHAM, 22, 75–87.

Römisch, K., 1993. Propellerstrahlinduzierte Erosionserscheinungen in Häfen. HANSA Schifffahrt, Schiffbau, Hafen, 130. Jahrgang, nr.8, 1993.

Tosco, H.A., 2021. Comunicación personal (28 de octubre).

UTN-FRA/INA, 2018. Prosección de la modelación de la calidad del agua superficial en la cuenca hídrica Matanza-Riachuelo. Informe Final.

Verhey, H.J., 1983. The stability of bottom and banks subjected to velocities in the propeller jet behind ships. Delft Publication 303, April. Delft Hydraulics Laboratory, The Netherlands.