

Convenio
Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental,
Facultad de Ingeniería, Universidad de la República
y
Obras Sanitarias del Estado

Estudio de salinidad en las aguas del Río de la Plata en la
zona de Arazatí – Bocas del Cufré

Actividad 3 – Modelación numérica
Informe Final

Documento: Fecha de envío:	Arazati_Modelacion_InformeFinal_v2_Vfinal 13 de Junio de 2025
Preparado por:	Dr. Ing. Mónica Fossati (IMFIA, Facultad de Ingeniería) Msc. Ing. Michelle Jackson (IMFIA, Facultad de Ingeniería)
Contraparte:	Ing. Margarita Pintos (OSE)

Contenido

Contenido.....	2
1 Resumen Ejecutivo	4
2 Introducción	11
3 Metodología General	12
4 Dinámica global del Río de la Plata y del campo salino	13
5 Información disponible	16
5.1 Descripción general.....	16
5.2 Batimetría	17
5.3 Datos de salinidad	18
5.3.1 Mediciones en Arazatí	18
5.3.2 Mediciones en Punta Tigre	18
5.3.3 Mediciones Gas Sayago	19
5.4 Datos para forzar el modelo.....	19
6 Antecedentes: configuración <i>RPtide</i>	21
6.1 Características principales.....	21
6.2 Evaluación <i>RPtide</i> con datos recientes.....	22
7 Implementación configuración <i>RPsal</i>	27
7.1 Generalidades	27
7.2 Caracterización del período simulado 2016-2022	29
7.2.1 Caudales fluviales	29
7.2.2 Marea	30
7.2.3 Vientos.....	30
7.3 Sensibilidad a los forzantes	34
7.4 Sensibilidad a la resolución espacial horizontal del modelo	39
7.5 Sensibilidad a la resolución espacial vertical del modelo	43
7.6 Sensibilidad al origen del forzante atmosférico.	47
7.7 Sensibilidad a la tensión superficial del viento.....	49
7.8 Sensibilidad a la difusión turbulenta horizontal	53
7.9 Síntesis	56
7.10 Configuración <i>RPsal</i>	56
8 Calibración y validación modelo <i>RPsal</i>	57
8.1 Calibración	57
8.1.1 Metodología	57
8.1.2 Resultados obtenidos	60
8.1.3 Discusión.....	70
8.2 Validación	71
8.2.1 Metodología	71
8.2.2 Resultados obtenidos	72
8.2.3 Discusión.....	81
8.3 Síntesis	81
9 Hindcast de salinidad en Arazatí	82

9.1	Metodología.....	82
9.1.1	Período de tiempo	82
9.1.2	Implementación numérica	82
9.1.3	Análisis de los resultados	83
9.2	Resultados obtenidos.....	84
9.2.1	Serie temporal de salinidad en Arazatí	84
9.2.2	Análisis de eventos de salinidad	90
9.3	Discusión.....	92
10	Conclusiones	94
11	Referencias.....	97
12	Anexos.....	99
12.1	Anexo 1: calibración del modelo Rpsal	99
12.1.1	Niveles en Montevideo.....	99
12.1.2	Niveles en Punta Tigre	102
12.1.3	Niveles en Arazatí	104
12.1.4	Niveles en Colonia	107
12.1.5	Corrientes en Arazatí.....	110
12.1.6	Corrientes en Punta Tigre.....	112

1 Resumen Ejecutivo

Este informe corresponde al informe final de la Actividad 3 de modelación numérica del convenio específico entre IMFIA-FING y OSE, cuyo objetivo general es aportar a la caracterización espacio-temporal de la salinidad del Río de la Plata frente a la zona que se extiende desde el Balneario Arazatí y hacia el oeste de la desembocadura del Arroyo Cufré. Para esto se implementa y calibra un modelo numérico que simula la salinidad en la zona de interés y que permite la generación de series históricas extensas y confiables de salinidad.

Para alcanzar el objetivo se implementó y calibró el modelo numérico MOHID en la costa del balneario Arazatí y alrededores haciendo énfasis en la correcta representación de la dinámica del campo salino en Arazatí y la costa uruguaya. Se parte de una implementación antecedente del MOHID en la zona del Río de la Plata y su Frente Marítimo denominado *RPtide* y se genera lo que se denomina el hindcast *RPsal*.

La metodología utilizada en el estudio se divide en 5 componentes:

- 1) Procesamiento y análisis de datos disponibles para el modelo numérico.
- 2) Implementación inicial del modelo *RPsal* en base al antecedente *RPtide* y evaluación de resultados con datos recientes de salinidad.
- 3) Análisis de sensibilidad de los resultados del modelo *RPsal* a los principales forzantes y parámetros.
- 4) Calibración y validación del modelo *RPsal* definiendo las métricas de evaluación de los resultados del modelo.
- 5) Generación de simulaciones retrospectivas de varios años (hindcast) de salinidad para la zona de Arazatí y análisis de resultados con el modelo *RPsal*.

Como información disponible se cuenta con mediciones de salinidad, corrientes y nivel de mar en diversos puntos de la zona de interés: Gas Sayago (GS), Punta del Tigre (PT), Arazatí (AZ), Colonia (COL) y Montevideo (MVD), las cuales se muestran en la Figura A. En particular se cuenta con datos de salinidad en Gas Sayago (2015 y 2016); Punta Tigre (2015 al 2021) y Arazatí (2021 y 2022). Las mediciones son utilizadas para calibrar y validar el modelo. Para la implementación se utilizan a su vez datos de batimetría, caudales fluviales, vientos y presión atmosférica, y corrientes y nivel en los bordes oceánicos del modelo. La batimetría se obtiene de modelos globales y se actualiza con información extraída de la carta 50 del SOHMA para la zona intermedia del estuario. Se utilizan los caudales fluviales que ingresan al Río de la Plata por los ríos Paraná y Uruguay; mientras que la información del río Paraná es suministrada por el Instituto Nacional del Agua de Argentina, el caudal del río Uruguay se obtiene de datos suministrados por Salto Grande. En relación al forzante atmosférico, vientos y presiones en superficie del mar, se utilizan campos espaciales provenientes de reanálisis del European Centre for Medium-Range Weather Forecast; también se cuenta con datos medidos in-situ en estaciones meteorológicas ubicadas cercanas a la zona de estudio. En cuanto a mareas en la frontera oceánica, para forzar el modelo se cuenta con datos del modelo regional implementado y calibrado en el IMFIA *Astide*.

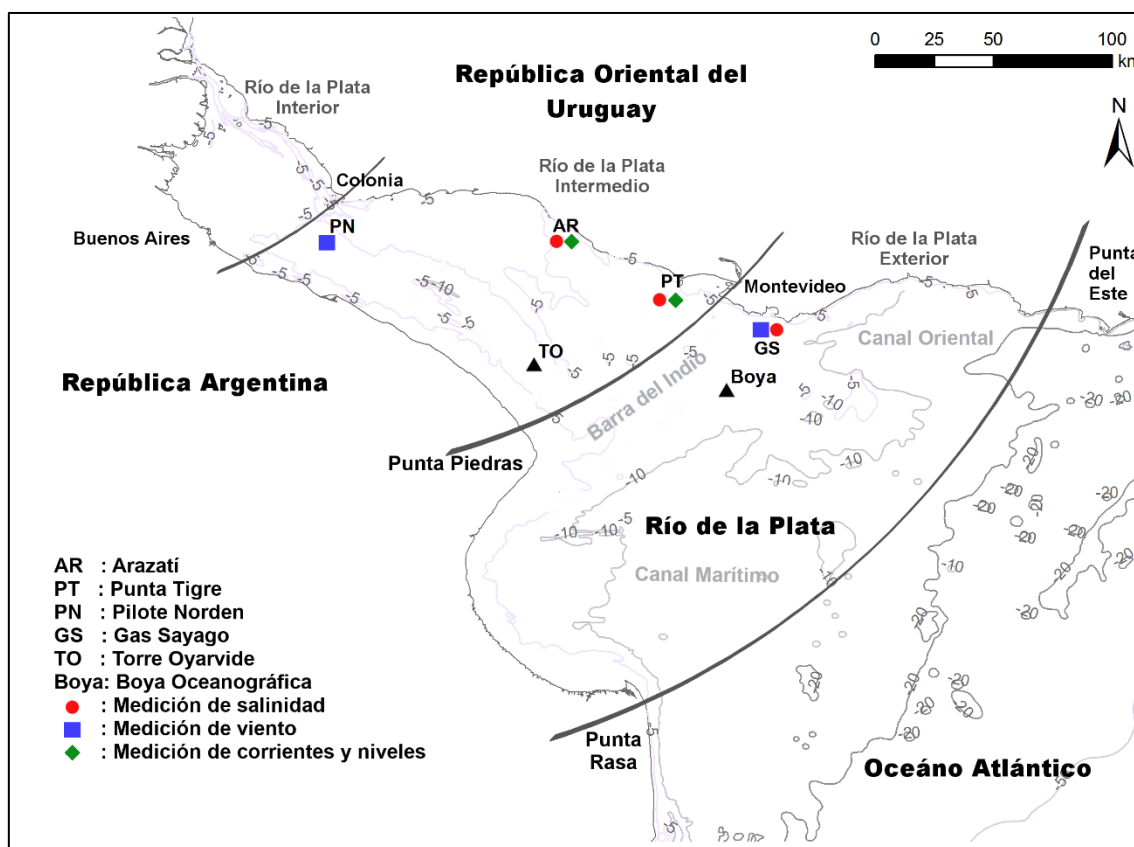


Figura A: El Río de la Plata; la zonificación en función de la hidrodinámica y ubicación de las estaciones de medición disponible y utilizada en el estudio, diferenciándolas según la variable de medición.

El modelo *RPsal* implementado es un modelo 3D baroclínico que resuelve el flujo y el campo salino en la zona intermedia del Río todo el Río de la Plata y el Frente Marítimo, desde la desembocadura de los ríos Uruguay y Paraná hasta el área limitada por Mar del Plata (Argentina) hasta Río Grande (Brasil), extendiéndose 170 km offshore hasta aproximadamente los 200 m de profundidad en la plataforma continental (ver Figura B). El mismo es forzado en la frontera oceánica por el nivel de mar y las corrientes provenientes del modelo regional *AS tide* (Martínez et al., 2015), que es una implementación barotrópica 2D del modelo numérico MOHID para el Océano Atlántico Sur con una resolución de grilla horizontal de $0,1^\circ$ en longitud (aproximadamente 9 km) y latitud (aproximadamente 11 km) (ver dominio en Figura B). El modelo *RPsal* trabaja con dos dominios encajados para incrementar la resolución en la zona intermedia del Río de la Plata donde se sitúa Arazatí, pasando de una grilla de $0,02^\circ$ de resolución horizontal en longitud (aproximadamente 1,8 km) y latitud (aproximadamente 2,2 km) a una grilla de mayor resolución en el nivel de detalle N2, de $0,01^\circ$ de resolución horizontal en longitud (aproximadamente 900 m) y latitud (aproximadamente 1100 m) (ver Figura B). La resolución vertical del modelo *RPsal* en ambos niveles de resolución es de 18 capas tipo sigma con mayor resolución cerca de la superficie libre y cerca del fondo.

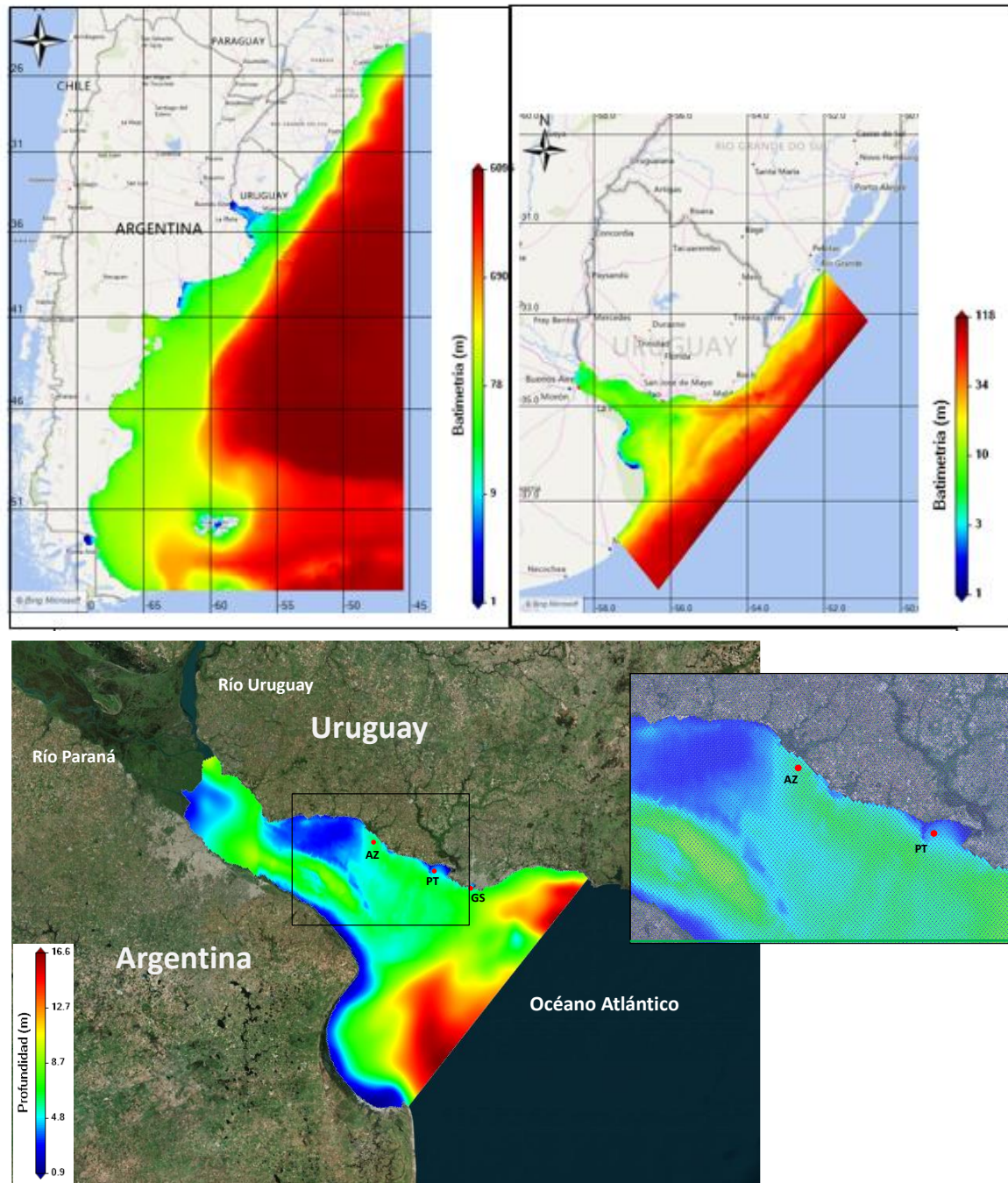


Figura B: Panel superior izquierdo: dominio y batimetría del modelo *ASTide*. Panel superior derecho: dominio y batimetría del modelo *RPsal*. Panel inferior: dominio y batimetría del nivel de detalle N2 del modelo *RPsal* y ubicación de los puntos de control AR (Arazatí), PT (Punta Tigre) y GS (Gas Sayago); en el recuadro se presenta la malla de cálculo y batimetría en la zona de Arazatí.

Durante el proceso de calibración del modelo numérico de salinidad *RPsal* se fueron definiendo una serie de simulaciones cambiando los dos parámetros de calibración obtenidos de la etapa de análisis de sensibilidad, la parametrización de la tensión superficial del viento y el coeficiente de difusión horizontal de salinidad del modelo. Para la calibración del modelo se utiliza el año 2021 para el cual se cuenta con datos de salinidad medida en Arazatí y en Punta Tigre. Se implementaron 13 simulaciones de calibración considerando la combinación de parámetros de tensión superficial de viento y difusión horizontal que se muestran en la Tabla A. Para evaluar el modelo y seleccionar la configuración que mejor representa la dinámica del campo salino en el

Río de la Plata y zona de Arazatí, se realiza por un lado un análisis cualitativo comparando gráficamente la salinidad medida y modelada, y por otra parte un análisis cuantitativo a partir de dos parámetros. Por un lado, se trabaja con el error medio cuadrático entre la salinidad medida y obtenida con el modelo en los puntos de medición AR y PT, y por otro lado se evalúa cómo el modelo representa eventos de salinidad que superan un determinado umbral. En particular, se busca que el modelo represente el mayor porcentaje de eventos que superan un umbral (%SupUMBReal) pero sin generar falsos eventos de alta salinidad (bajos valores de %SupUMBFalse). Para esto se compara para cada instante la superación o no del umbral por las medidas y el modelo.

Tabla A: Características de las 13 simulaciones realizadas para la calibración del modelo *RPSal*: nombre y parámetros (tensión superficial del viento y difusión horizontal).

Simulaciones		Difusión horizontal (N° Sch)			
		0,2	0,4	0,6	1
Tensión superficial viento	variable	SimCal1			
	0,002	SimCal2	SimCal5		SimCal10
	0,004	SimCal3	SimCal6	SimCal8	SimCal11
	0,005		SimCal7	SimCal9	
	0,006	SimCal4			SimCal12
	0,01				SimCal13

En la Figura C se muestra la comparación de las series de salinidad medidas y modeladas en Arazatí para cada simulación de calibración (para la capa del modelo coincidente con la profundidad del CTD). A su vez, en la Tabla B se muestra el error medio cuadrático obtenido para la salinidad en cada caso. Complementando el análisis de los resultados de la calibración se selecciona un umbral de 0,5 psu y se analiza el porcentaje de falsos positivos y falsos negativos obtenidos para cada simulación de calibración durante el año 2021. De la Figura D se desprende principalmente que, SimCal2, SimCal6 y SimCal9, no alcanzan el 100% de representación de picos sobre el umbral pero sí valores altos mayores a 88% y a su vez valores bajos (menores al 25%) de falsos eventos de salinidad.

Tabla B: Error medio cuadrático RMSE (psu) obtenido para la salinidad en Arazatí para las 13 simulaciones de calibración realizadas.

RMSE Salinidad AR (psu)		Difusión horizontal (N° Sch)			
		0,2	0,4	0,6	1
Tensión superficial viento	variable	1,88			
	0,002	1,57	1,80		1,87
	0,004	3,16	1,54	1,92	1,96
	0,005		1,69	1,65	
	0,006	4,33			1,69
	0,01				3,00

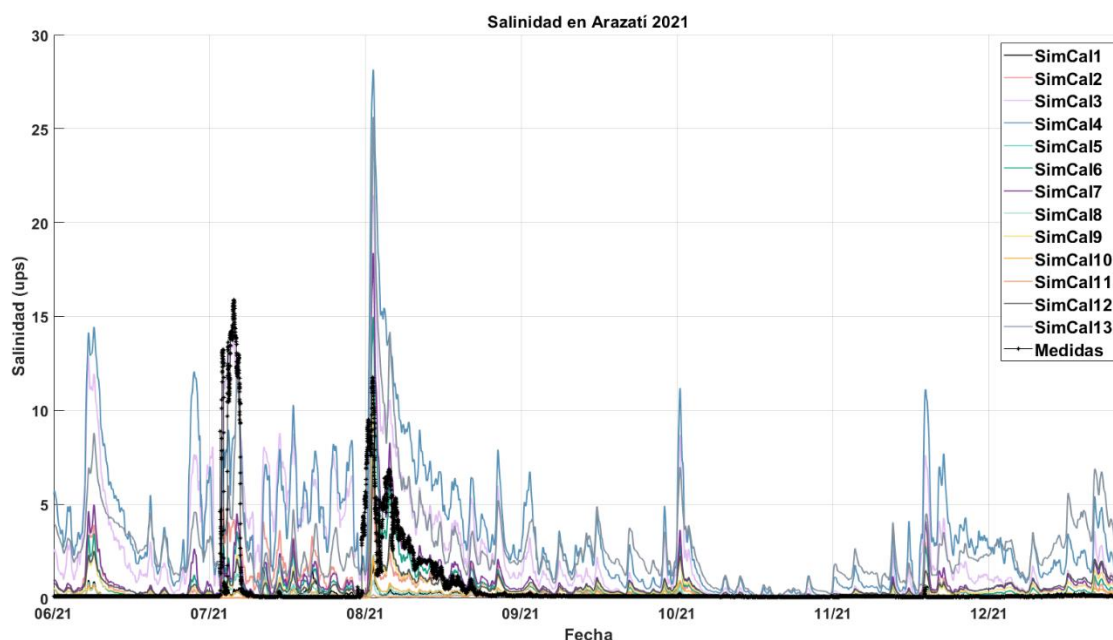


Figura C: Series temporales de salinidad obtenidas con el modelo para todas las simulaciones de calibración y su comparación con los datos medidos en Arazatí para el período de calibración 2021.

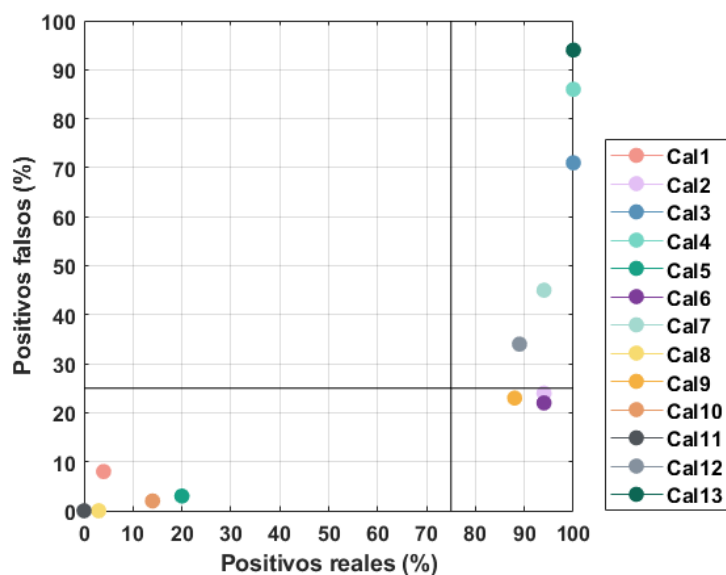


Figura D: Porcentajes sobre umbral %SupUMBReal y %SupUMBFalso obtenidos para las 13 simulaciones de calibración para Arazatí considerando un umbral de 0,5 psu.

En el proceso de calibración se obtiene que al utilizar bajos coeficientes de tensión de corte de viento el modelo no logra reproducir la salinidad en Arazatí a la vez que subestima notoriamente la misma en Punta Tigre, indicando que no se representa correctamente el ingreso del frente salino a la zona intermedia del Río de la Plata. De esta forma, se define considerar mayores valores de tensión de corte del viento aunque estos incrementen un poco el error en los niveles, y se selecciona la parametrización de la SimCal6. El modelo se valida considerando el nivel de detalle N2 de mayor resolución y se simulan 3 años distintos al utilizado en la calibración; el año 2022 para el que se cuenta con datos de salinidad medidos en Arazatí, el año 2016 para el cual se cuenta con datos medidos de salinidad en Gas Sayago y Punta Tigre, y el año 2017 para el que

se cuenta con datos de salinidad medidos en Punta Tigre. Los resultados obtenidos en la validación muestran una buena representación de los eventos de salinidad en las 3 estaciones, principalmente del gran evento de salinidad ocurrido en Arazatí en 2022.

El modelo *RPSal* calibrado y validado para la zona de Arazatí se utiliza para generar un hindcast de la salinidad en la zona para los 35 años comprendidos entre 1988 y 2022. Para esto, se mantienen los parámetros y características principales de la implementación del modelo, pero se modifican las condiciones de borde según los forzantes correspondientes a cada año en base a datos históricos. Estos forzantes son los caudales fluviales (ríos Paraná y Uruguay), campos de vientos y presiones atmosféricas (de la reanálisis del ECWMF) y mareas provenientes del Atlántico Sur (modelo regional *AS tide* forzado por vientos y presiones de reanálisis ERA-5 y ERA-INTERIM). De esta manera se simula un período de tiempo extenso que incluye diversas condiciones de los forzantes que determinan la salinidad en la zona de estudio, los caudales fluviales, los vientos y las mareas.

Como resultado del hindcast se obtienen valores horarios de salinidad en las 18 capas verticales del modelo en todas las celdas del dominio del modelo de detalle N2 y del modelo global del Río de la Plata. También se obtienen la elevación de la superficie libre y las corrientes en cada celda de cálculo del modelo. Para este estudio se extraen y analizan las series de salinidad obtenidas en el punto de control AR del modelo correspondiente a la ubicación del equipo CTD fondeado en el marco del convenio, y cercano a la obra de toma proyectada para la nueva planta de tratamiento. Los resultados obtenidos se analizan de diversas maneras. En primer lugar, se presentan gráficamente los resultados de salinidad obtenidos con el modelo para los 35 años simulados y se analiza la serie temporal obtenida año a año. En segundo lugar, se realiza una estadística de las características de los eventos de salinidad que superan el umbral 0,45 psu y considerándolos independientes si están separados por más de 26 horas de salinidad por debajo del umbral. En tercer lugar, se realiza un análisis en detalle de los años para los cuales se observan eventos importantes de salinidad.

La serie total de salinidad obtenida con el hindcast en Arazatí para los 35 años entre 1988 y 2022 se presenta en la Figura E. Los resultados obtenidos muestran una gran variabilidad de la salinidad en la zona, con años en los cuales prácticamente la salinidad es nula (1998, 2007, 2010, 2013, 2014, 2016 y 2017), años en los cuales hay algunos pocos eventos esporádicos de salinidad (1990, 1992, 1994, 1999, 2005, 2011, 2015 y 2019), años en los cuales hay varios eventos cortos de incremento de salinidad distribuidos en el año (1988, 1989, 1991, 1995, 1996, 1997, 2000, 2001, 2002, 2003, 2006, 2008, 2012, 2018) y años con eventos muy frecuentes ó de larga duración de alta salinidad (2004, 2008, 2009, 2020, 2021, 2022).

Respecto al análisis de eventos, se identifican durante los 35 años del hindcast 247 eventos en total, de los cuales 224 son eventos cortos de duración menor a 5 días, 20 eventos tienen una duración entre 5 días y 1 mes, y 3 eventos superan el mes de duración. El evento de mayor duración identificado es de 54 días obtenido para el 2022. Los años con más cantidad de días en los cuales la salinidad supera un umbral de 0,45 psu son (en orden decreciente de días) el 2020, 2021, 2022, 2004, 2009 y 2008. En el año 2020 se contabilizan un total de 96 días con salinidad por encima del umbral. A su vez, si se considera el período marzo 2020 a marzo 2022 (inclusive)

se cuantifican 242 días con salinidad por encima del umbral, es decir, una relación de casi 1:3 entre días con salinidad por encima del umbral y días con salinidad por debajo del umbral.

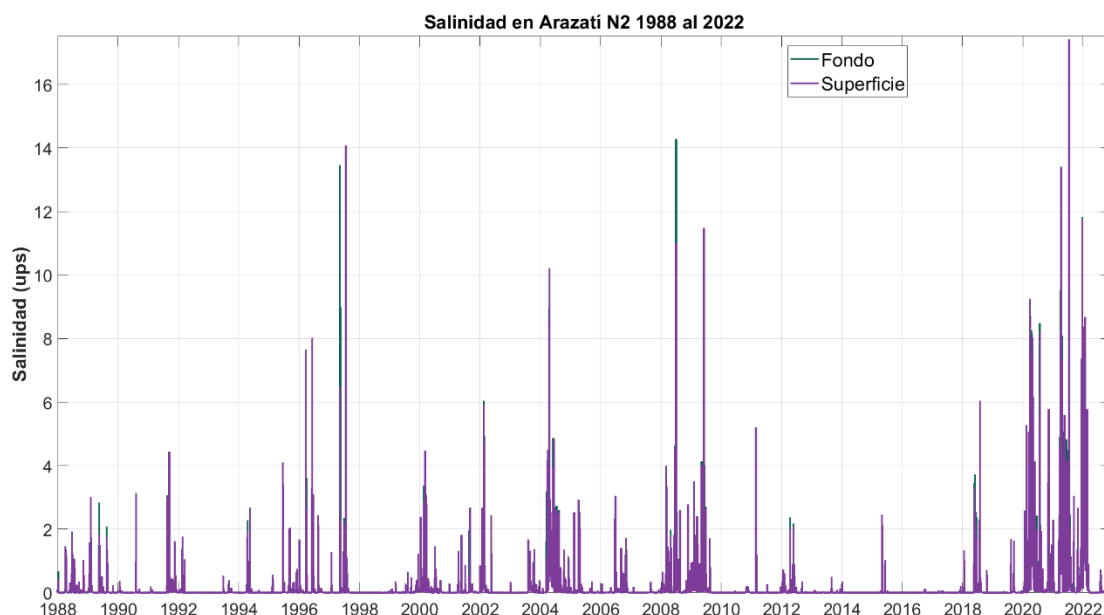


Figura E: Salinidad en Arazatí obtenida en el hindcast con el modelo RPsal para el período 1988 a 2022.

Estos resultados del hindcast de salinidad del modelo numérico complementan los resultados obtenidos a partir del análisis de la posición del frente de turbidez y su correlación con la salinidad en Arazatí (IMFIA, 2024). Durante el período en común entre ambos análisis (2002 a 2022) se observan algunas diferencias en los resultados que resaltan la incertidumbre que existe en la determinación de la ubicación del frente de salinidad con umbrales tan bajos como 0,45 psu, en un ambiente con la complejidad del Río de la Plata. Sin embargo, en la mayoría de los eventos de retracción hacia el oeste del frente de turbidez identificados en el análisis de imágenes satelitales, el modelo numérico también reproduce valores de salinidad por encima del umbral 0,45 psu. Esto incluye los eventos de los años 2004, 2009, 2011, 2012, 2015, 2018, 2020, 2021 y 2022.

Es importante recordar que los resultados del modelo numérico son una aproximación de la hidrodinámica y dinámica de salinidad de la zona y que, aunque se reproducen correctamente sus principales características, hay limitación en los resultados obtenidos, fundamentalmente por limitaciones de la información de base que el modelo utiliza. Entre ellas se destaca la batimetría local. En el modelo se incluyó la información de la carta de la zona intermedia del Río de la Plata, la carta N° 50 del SOHMA que, a pesar de ser la carta de mayor detalle para la zona, presenta datos escasos. Por tanto, si a futuro se desea mejorar las capacidades predictivas del modelo sería de gran interés realizar un relevamiento batimétrico moderno de la zona intermedia del Río de la Plata entre Montevideo y Colonia.

2 Introducción

Este informe corresponde al informe final de la Actividad 3 de modelación numérica del convenio específico entre IMFIA-FING y OSE, cuyo objetivo general es aportar a la caracterización espacio-temporal de la salinidad del Río de la Plata frente a la zona que se extiende desde el Balneario Arazatí y hacia el oeste de la desembocadura del Arroyo Cufré. El objetivo principal de la Actividad 3 es implementar y calibrar un modelo numérico que simule la salinidad en la zona de interés y que permita generar series históricas confiables de salinidad.

El informe se estructura de la siguiente manera. En la sección 2 se describe la metodología general definida para el estudio. En la sección 3 se describen características básicas de la dinámica de la salinidad en el Río de la Plata. En la sección 4 se presentan los datos disponibles utilizados en el estudio. En la sección 5 se presenta la configuración de partida del modelo *RPtide* y la evaluación con mediciones recientes. En la sección 6 se describen los principales detalles de la implementación del modelo *RPsal*, de los análisis de sensibilidad y los resultados obtenidos. En la sección 7 se presentan las principales características y resultados obtenidos durante la calibración y validación del modelo numérico *RPsal*. En la sección 8 se presenta la metodología y resultados obtenidos en la generación de las series históricas (hindcast) de salinidad en la zona de Arazatí a partir del modelo numérico *RPsal*. Por último, en la sección 9 se presentan las principales conclusiones del estudio.

El informe fue realizado por la Msc. Ing. Michelle Jackson y la Dra. Ing. Mónica Fossati del IMFIA con la colaboración del Bach. Lucas Sellanes y la Bach. Ianla del Puerto en las primeras etapas.

3 Metodología General

Para alcanzar el objetivo principal de esta actividad se implementa y calibra el modelo numérico MOHID (Mateus and Neves, 2013), desarrollado en Portugal, para la zona de interés del convenio, es decir, la costa del Balneario Arazatí y alrededores. El MOHID ha sido utilizado previamente en el IMFIA (Fossati et al., 2013a, Jackson et al., 2021) y es un modelo numérico tridimensional baroclínico, que resuelve las ecuaciones gobernantes de flujo y transporte de sustancias.

Se parte de la implementación antecedente del MOHID de todo el Río de la Plata, Frente Marítimo y zona costera uruguaya, denominada *RPtide* (Jackson et al., 2021), y se genera lo que se denomina la configuración *RPsal*, que pone énfasis en la correcta representación de la dinámica del campo salino, especialmente en la zona de Arazatí y costa uruguaya. El modelo hidrodinámico *RPtide* se desarrolló entre los años 2012 y 2013, y se calibró con la información disponible en ese momento, mayormente series temporales de nivel de mar, algunos perfiles de corrientes y series continuas de medición de salinidad obtenidas durante un año en el marco del Proyecto FREPLATA-IFREMER (Simionato et al, 2011) en dos ubicaciones del Río de la Plata (Boya Oceanográfica zona exterior, y Torre Oyarvide zona intermedia sobre costa argentina, ver ubicación en la Figura 1).

En particular, aunque el foco de la implementación del *RPsal* es la salinidad en la zona de Arazatí y hacia el oeste, la variabilidad espacial y temporal del campo salino, la variación del frente de salinidad y la disponibilidad de datos medidos recientes e históricos, genera que sea necesario representar la variabilidad espacial y temporal de la salinidad en toda la zona intermedia y exterior del Río de la Plata.

La metodología utilizada en el estudio se divide en 5 componentes:

- 1) Procesamiento y análisis de datos disponibles para el modelo numérico.
- 2) Implementación inicial del modelo *RPsal* en base al antecedente *RPtide* y evaluación del mismo utilizando datos recientes de salinidad.
- 3) Análisis de sensibilidad de los resultados del modelo *RPsal* a los principales forzantes y parámetros.
- 4) Calibración y validación del modelo *RPsal* definiendo las métricas de evaluación de los resultados del modelo.
- 5) Generación de simulaciones retrospectivas de varios años (hindcast) de salinidad para la zona de Arazatí y análisis de resultados.

En este informe se describen y presentan los resultados de todas las etapas del estudio.

4 Dinámica global del Río de la Plata y del campo salino

El Río de la Plata es un cuerpo de agua estuarino que se extiende desde la desembocadura de los ríos Paraná y Uruguay y descarga en el Océano Atlántico Sur (Figura 1). El mismo presenta una dinámica muy compleja que viene dada por la interacción entre sus características geomorfológicas y los forzantes del sistema. El ancho varía considerablemente desde aproximadamente 32 km entre la línea Colonia-Buenos Aires aumentando aproximadamente a 100 km en la sección Montevideo-Punta Piedras hasta aproximadamente 220 km en el límite Punta del Este-Punta Rasa. Por otra parte, el estuario es mayormente somero, presentando profundidades que no superan los 10 m hasta la sección Montevideo-Punta Piedras, y superando los 20 m de profundidad hacia el Océano. En cuanto a la dinámica, hacia el interior de Montevideo-Punta Piedras, la misma se caracteriza por una dinámica fluvial cuasi-bidimensional con influencia de mareas, mientras que hacia el exterior existe una dinámica con flujo de características tridimensionales y gran influencia del campo salino en la hidrodinámica (Fossati et al., 2014; Jackson et al., 2021).

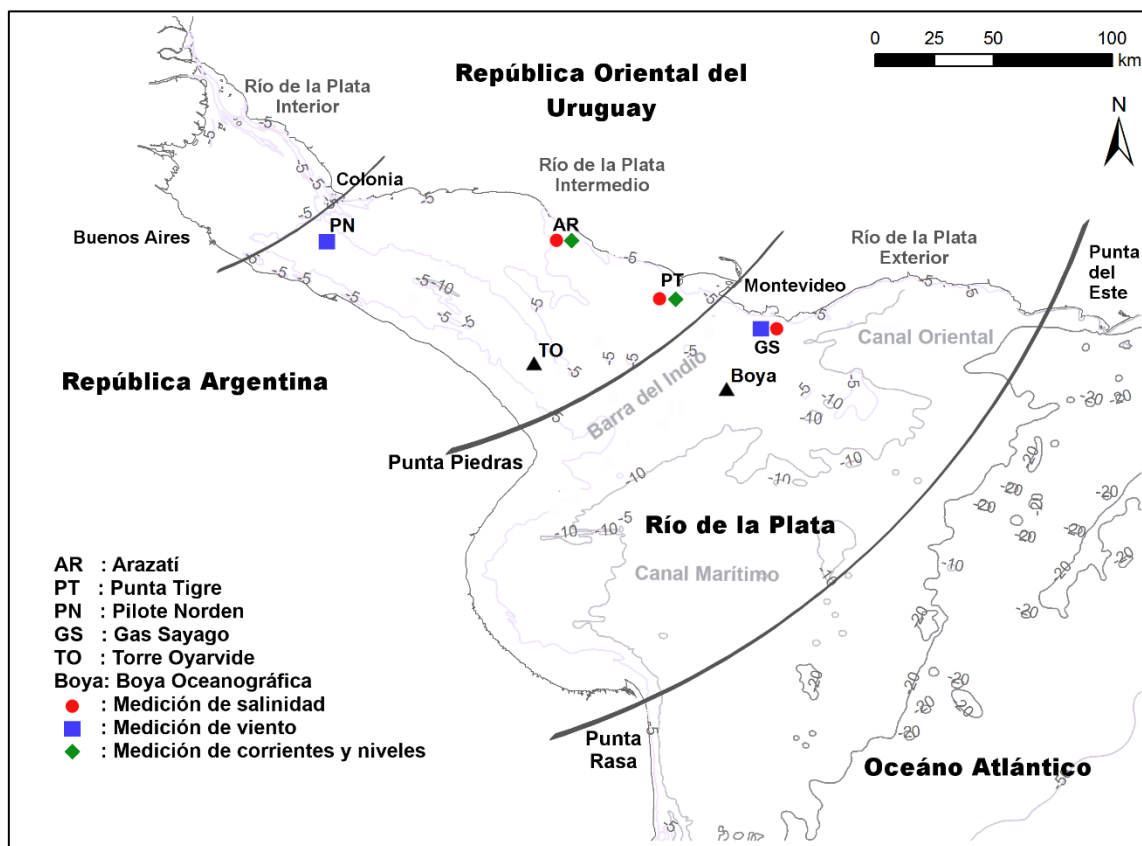


Figura 1: El Río de la Plata; la zonificación en función de la hidrodinámica y ubicación de las estaciones de medición disponibles y utilizadas en el estudio, diferenciándolas según la variable de medición.

Los forzantes principales del sistema son los caudales erogados por los ríos Uruguay y Paraná; que recogen las aguas de la segunda cuenca más grande de América del Sur; con un caudal medio anual de $25.000 \text{ m}^3/\text{s}$, los vientos y presiones sobre la superficie y la onda de marea astronómica y meteorológica proveniente del océano abierto. En particular, la marea astronómica en el estuario tiene características micromareales y se encuentra dominada por la componente semi-diurna M2 y las diurnas K1 y O1 (Fernández, 2011). A su vez, la marea

meteorológica en el estuario también presenta pequeñas amplitudes, presentando la marea astronómica y meteorológica una relevancia equivalente. Estudios previos muestran que la relevancia de la marea meteorológica es mayor en la costa uruguaya que sobre la costa argentina y a su vez esta relevancia disminuye desde la zona interior del estuario hacia el exterior (Fossati et al., 2014; Santoro et al., 2013). Por otra parte, la dinámica de propagación de los niveles en el Río de la Plata se caracteriza por el ingreso de la onda desde la plataforma argentina, la cual se detecta en Mar del Plata y luego se transforma a medida que se propaga tanto hacia el interior del estuario como hacia la costa norte (Santoro et al., 2013). La amplitud de los niveles de marea es decreciente desde la costa argentina hacia la costa uruguaya y creciente desde el exterior hacia el interior, observándose las mayores amplitudes en Buenos Aires (costa sur) y en Colonia (costa norte).

Ocorre una importante variabilidad espacial y temporal de la hidrodinámica y salinidad en el Río de la Plata. Hay una clara diferencia en el comportamiento observado entre la zona interior-intermedia y la zona exterior (Fossati et al., 2014). En términos generales, el frente de salinidad ingresa hacia el interior del estuario por las zonas profundas (por ejemplo, Canal Marítimo y Canal Oriental) donde la estratificación salina es más pronunciada. Así, las corrientes residuales en la zona intermedia son fundamentalmente bidimensionales, típicas de una zona fluvial (con transporte neto saliente al estuario). Por otra parte, la zona externa presenta patrones más complejos de características tridimensionales, con velocidades residuales con flujo que ingresa hacia el continente en las zonas más profundas, y un flujo de descarga por las zonas de menor profundidad. Por último, en la zona de Barra del Indio las velocidades residuales son casi nulas. Además de las diferencias espaciales, las condiciones meteorológicas y su variación (especialmente entre condiciones de calma y tormenta), generan una gran influencia en la dinámica del campo salino.

Aunque escasas, hay algunas mediciones de perfiles de salinidad en el Río de la Plata que muestran que en la zona de Barra del Indio y en la zona exterior hay un amplio rango de condiciones de mezcla vertical y estratificación, pasando de condiciones bien mezcladas a condiciones de estratificación débil y fuerte (Simionato et al., 2011). En base a estudios de modelación numérica, como los realizados en Jackson et al. (2021), es posible extender la información obtenida de mediciones a un amplio rango de condiciones climáticas y de los forzantes del sistema. Analizando la influencia de los caudales fluviales del Paraná y del Uruguay sobre la dinámica del campo salino los resultados muestran que a medida que el caudal fluvial medio es mayor, la estratificación salina observada es mayor y más extendida. La salinidad media en el fondo muestra menos variabilidad según el caudal fluvial que la salinidad superficial, lo que genera la variación en la estratificación. Los resultados que se obtuvieron claramente muestran que altos caudales fluviales incrementan la extensión de la zona con agua dulce y genera mayores gradientes longitudinales de salinidad, arrastrando el frente hacia el océano. En cuanto a las tormentas, también en base al modelo numérico en Jackson et al., (2021), se observó que hay una gran influencia de estas sobre el campo salino, dependiente de la duración, intensidad y dirección del viento de las tormentas. El efecto de una tormenta del Noroeste es similar al de las tormentas del Suroeste, especialmente en la zona central y sur del Río de la Plata, y ambas generan un incremento de la mezcla vertical y disminución de la estratificación, dependiente de la intensidad de la tormenta. El efecto de las tormentas del Sur y Sureste es también incrementar la mezcla vertical y reducir la estratificación vertical. Fuerte tormentas del

Oeste generan un flujo por la costa uruguaya hacia el océano, movilizando el campo salino superficial en concordancia con el campo salino de fondo. Fuertes vientos que provienen del Este al Noreste generan un ingreso de salinidad por la costa uruguaya, y un flujo bajo saliente por el Canal Marítimo, que se opone al campo salino más estable de fondo, incrementando el área estratificada.

5 Información disponible

5.1 Descripción general

En este capítulo se describe la información disponible y utilizada en el estudio tanto para la implementación del modelo como para su calibración. Para la implementación del modelo se utiliza en primer lugar información batimétrica y luego, para forzar el modelo, series de datos medidos y series de datos obtenidas de modelos globales. Para calibrar y validar el modelo se utilizan datos de salinidad, nivel de mar y corrientes medidos en la zona de interés. Estos datos deben ser analizados para comprender las principales características de la dinámica del Río de la Plata en la zona de Arazatí y alrededores, para luego poder reproducirlas con el modelo.

De esta forma, en este estudio se utiliza la mayor cantidad posible de datos recientes de salinidad medidos en la zona de Arazatí, así como también en todo el Río de la Plata, Frente Marítimo y costa uruguaya, ya que la dinámica de la zona de interés está influenciada por la dinámica de todo el estuario. Por otra parte, aunque el estudio se enfoca en la salinidad, las otras variables hidrodinámicas, como las corrientes y los niveles, están acopladas a la salinidad por la densidad, y por tanto es necesario comparar los resultados del modelo con datos de nivel y de corrientes para obtener una herramienta confiable y realista.

En la Figura 1 presentada anteriormente se ubican en la zona de estudio las distintas estaciones de medición (fuentes de información) utilizadas en el estudio, diferenciando según la variable disponible en cada estación. En las Tablas 1 y 2 se describen los aspectos principales de cada fuente de datos, los períodos de tiempo de las mediciones, presentando a su vez el porcentaje de datos disponibles por año.

Tabla 1: Descripción de las características principales de los datos disponibles de series temporales de salinidad utilizados en el estudio.

Estación:	GS	PT	AR
Equipo:	CTD en boya	CTD fondeado	CTD fondeado
Profundidad:	A 0,7m superficie	A 0,5 m fondo	A 0,5 m fondo
Frecuencia:	1 hora	30 minutos	15 minutos
Ubicación:	Lat 34° 55' 46.56" S Lon 56° 16' 26.04" W	Lat 34°45'45.64"S Lon 56°32'16.51"W	Lat 34°35'10,65"S Lon 56°59'19,53"W
Periodo de tiempo (% datos disponibles por año):	2015 (99,6%) 2016 (48,8%)	2015 (88,6%) 2016 (100%) 2017 (99,9) 2018 (99,9%) 2019 (99,7%) 2020 (83,5%) 2021 (38%)	2021 (56,4%) 2022 (99,9%) 2023 (98,7%)
Referencia:	IMFIA (2018)	IMFIA (2021)	IMFIA (2023)

Tabla 2: Descripción de las características principales de los datos disponibles de series temporales de niveles y perfiles de corrientes.

Estación:	PT	AR	COL	MVD
Dato disponible	Perfil Corriente Nivel de mar	Perfil Corriente Nivel de mar	Nivel de Mar	Nivel de Mar
Equipo:	ADCP fondeado	ADCP fondeado	Mareografo Puerto	Mareografo Puerto
Registros ADCP:	Desde 0,85 m del lecho cada 0,3m	Desde 0,84 m del lecho cada 0,3m		
Frecuencia:	Horario	Horario	Horario	Horario
Ubicación:	Lat 34°45'45.64"S Lon 56°32'16.51"W	Lat 34°35'10,65"S Lon 56°59'19,53"W	Lat 34°28' 32" S Lon 57°50' 33.4" W	Lat 34°54' 16.58" S Lon 56°12' 47.29" W
Periodo de tiempo (% datos disponibles por año):	2015 (83,6%) 2016 (99,8%) 2017 (99,9%) 2018 (96,9%) 2019 (91,2%) 2020 (42,3%) 2021 (68,3%)	2021 (56,4%) 2022 (88,1%) 2023 (98,2%)	2016 (85%) 2017 (55,5%) 2018 (78%) 2019 (49,5%) 2020 (78,6%) 2021 (78,1%) 2022 (81,3%)	2016 (100%) 2017 (100%) 2018 (99,9%) 2019 (99,9%) 2020 (99,9%) 2021 (96,9%) 2022 (92,1%)
Referencia:	IMFIA (2021)	IMFIA (2023)	ANP	ANP

5.2 Batimetría

La zona de estudio está incluida en lo que se denomina la zona intermedia del Río de la Plata. En estudios previos se utilizó en el modelo numérico información batimétrica global del Río de la Plata. Por tanto, para mejorar la representación del modelo en la zona de interés se actualiza la información batimétrica en el área de estudio. En dicha zona la información batimétrica disponible es de baja densidad y se trata de la carta 50 del SOHMA (Figura 2). Esta información fue digitalizada e incorporada al modelo numérico en la actualización a la configuración *RPSal*.

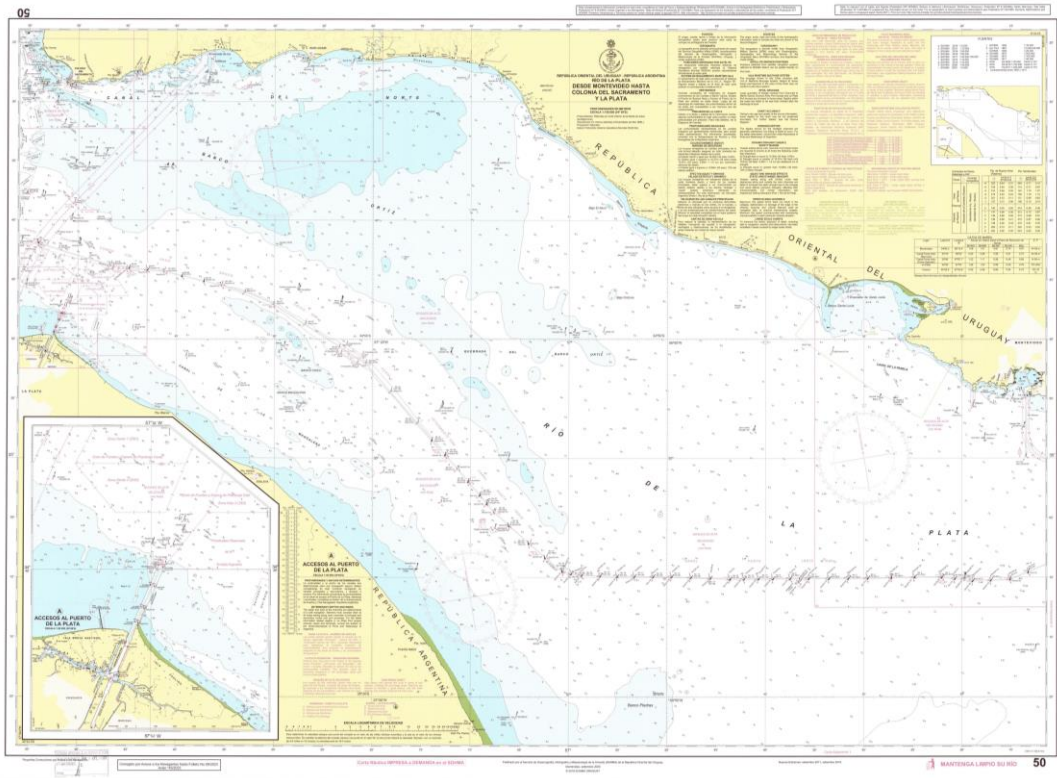


Figura 2: Carta náutica con la información batimétrica disponible para la zona de interés e ingresada a la configuración del modelo numérico *RPSal*.

5.3 Datos de salinidad

5.3.1 Mediciones en Arazatí

La variación temporal de los datos de salinidad medidos en Arazatí a partir de junio del 2021 se presenta en la Figura 3. Estos datos muestran una dinámica de salinidad en la zona caracterizada por valores en general casi nulos (agua dulce) con eventos de diversa duración de salinidad relativamente alta, alcanzando en algunos períodos valores mayores a 15 ppt.

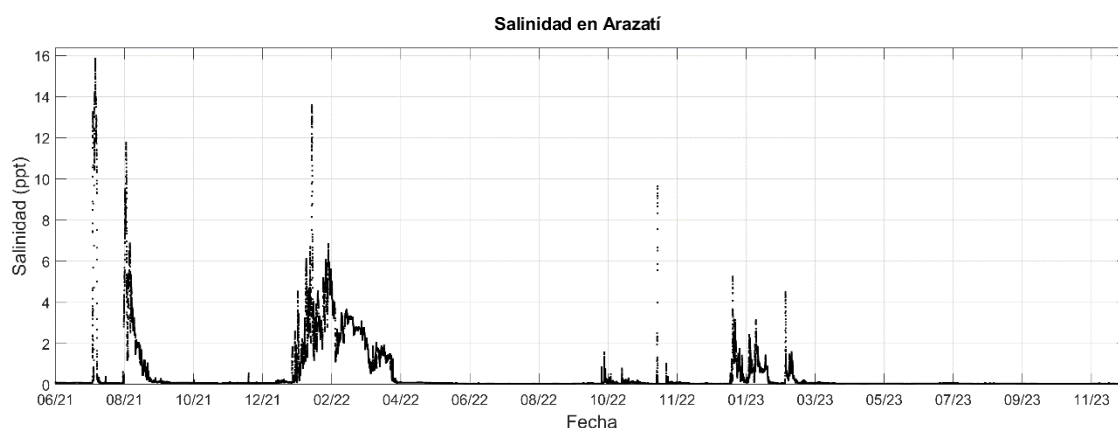


Figura 3: Serie temporal de salinidad medida en Arazatí entre junio 2021 y diciembre 2023.

5.3.2 Mediciones en Punta Tigre

La serie de medidas de salinidad en Punta Tigre registrada durante varios años (2015 a 2021) se presenta en la Figura 4. Los datos muestran una gran variabilidad de la salinidad en la zona, con períodos largos de varios meses donde la salinidad es muy baja o casi nula con algunos eventos de corta duración de salinidad relativamente alta y otros períodos con salinidad importante durante varios meses. Los datos muestran que hay eventos de salinidad alta frecuentes que superan los 25 ppt.

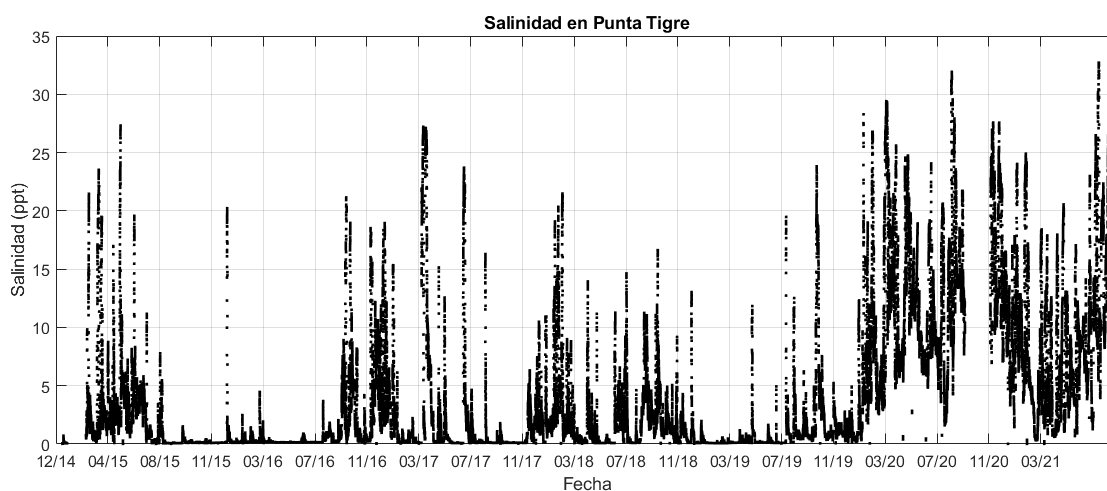


Figura 4: Serie temporal de salinidad medida en Punta Tigre entre diciembre 2014 y mayo 2021.

5.3.3 Mediciones Gas Sayago

Los registros de salinidad medidos en la costa de Montevideo (Gas Sayago) se presentan en la Figura 5 (2015 y 2016). Se observa que en general la salinidad registrada es no nula y presenta una alta variabilidad caracterizada por eventos de grandes incrementos y descensos de la salinidad.

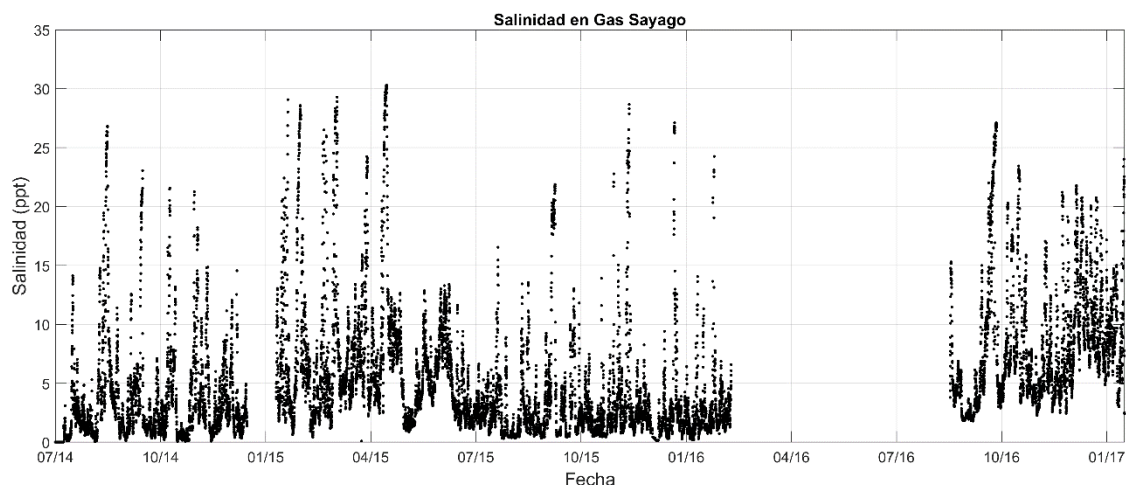


Figura 5: Serie temporal de salinidad medida en Gas Sayago entre julio 2014 y enero 2017.

5.4 Datos para forzar el modelo

En la etapa de implementación y calibración del modelo *RPsal* se trabaja con el período reciente de varios años (2015 a 2022) en los cuales se cuenta con información medida para ajustar el modelo. A continuación, se describe el origen de los datos utilizados en la implementación del modelo y en la sección 6 se presentan en detalle las características de los mismos para el período de simulación utilizado en los análisis de sensibilidad.

Uno de los forzantes principales del modelo numérico es el caudal fluvial que ingresa al Río de la Plata por los ríos Paraná y Uruguay. Se trabaja con valores medios diarios medidos en cada uno de los ríos. La información del río Paraná es suministrada por el Instituto Nacional del Agua (INA) de Argentina a partir de curvas de aforo del Paraná. El caudal del río Uruguay se obtiene de datos suministrados por Salto Grande correspondientes a caudal erogado y vertido por la represa de Salto Grande, combinado con el caudal del río Negro registrado en la represa de Palmar por UTE.

En relación al forzante atmosférico (vientos y presión atmosférica) se cuenta, por un lado, con datos espaciales provenientes de reanálisis de modelos globales (como el ERA-INTERIM y ERA-5 del European Centre for Medium-Range Weather Forecast) y, por otro lado, con datos medidos in-situ en estaciones meteorológicas ubicadas cercanas a la zona de estudio, mayormente en tierra, por diversas instituciones (CARP, SOHMA, INUMET). En particular, son de interés las mediciones de viento realizadas sobre el mar, destacándose los datos registrados en la Boya de Gas Sayago durante algunos años y los datos que se registran en el Pilote Norden actualmente. La ubicación de ambas estaciones se presentó en la Figura 1.

En cuanto a las mareas, para forzar el modelo se cuenta con datos de un modelo regional implementado y calibrado en el IMFIA para representar correctamente la marea que ingresa desde el Océano Atlántico al Río de la Plata. Las características de dicho modelo se describen más adelante en este informe.

6 Antecedentes: configuración *RPtide*

6.1 Características principales

Se trabaja con el modelo numérico MOHID (Mateus and Neves, 2013), que resuelve las ecuaciones tridimensionales de flujo a superficie libre de Navier Stokes con las aproximaciones de Boussinesq e hidrostática en base a volúmenes finitos, desarrollado por el Instituto Técnico MARETEC (Marine and Environmental Technology Research Center - Instituto Superior Técnico) de la Universidad de Lisboa. El MOHID está generado con una filosofía de modelación integral que incluye tanto los procesos (físicos y biogeoquímicos), así como también diferentes escalas (permitiendo el uso de modelos encajados) y sistemas (estuarios y cuencas).

Este modelo ya ha sido utilizado en estudios anteriores de flujo realizados en el IMFIA para estudiar la hidrodinámica (Fossati et al., 2013a), la dinámica del campo salino (Jackson et al., 2021), y transporte de sustancias (Fossati et al., 2013b). En los desarrollos más recientes se generó el modelo *RPtide*, el cual será utilizado como punto de partida para la implementación de este estudio. El *RPtide* es un modelo 3D baroclínico de 0,02° de resolución horizontal en longitud (aproximadamente 1,8 km) y latitud (aproximadamente 2,2 km), y 10 capas en la vertical, que resuelve el flujo y el campo salino en todo el Río de la Plata y el Frente Marítimo, desde la desembocadura de los ríos Uruguay y Paraná hasta el área limitada por Mar del Plata (Argentina) hasta Rio Grande (Brasil), extendiéndose 170 km offshore hasta aproximadamente los 200 m de profundidad en la plataforma continental (ver Figura 6). La coordenada vertical es tipo sigma que significa que en todo el dominio se definen 10 capas de igual espesor independiente de la profundidad.

El modelo *RPtide* es forzado en la frontera oceánica por el nivel de mar y las corrientes provenientes del modelo regional *AStide* (Martínez et al., 2015). El modelo *AStide* es una implementación barotrópica 2D del modelo numérico MOHID para el Océano Atlántico Sur con una resolución de grilla horizontal de 0,1° en longitud (aproximadamente 9 km) y latitud (aproximadamente 11 km) (ver dominio en Figura 6). Es forzado por los vientos de reanálisis de NCEP (Saha et al., 2010) y el modelo de marea astronómico FES2004 (Lyard et al., 2006). El modelo *AStide* ha sido calibrado y validado utilizando mediciones de nivel de mar en Mar del Plata y La Paloma (Martínez et al., 2015). El modelo *RPtide* es forzado por los datos horarios de elevación de nivel de mar y corrientes horarias barotrópicas en la frontera oceánica provenientes del *AStide*. Además, en la frontera oceánica del *RPtide* se impone un valor de salinidad de 38 psu fijo.

En la superficie libre el modelo *RPtide* es forzado por vientos y presiones provenientes del reanálisis atmosférico del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) (Dee et al., 2011) de 0,25° de resolución espacial y 6 horas de resolución temporal. El modelo *RPtide* también es forzado por los caudales fluviales diarios de los ríos Paraná y Uruguay correspondiente a agua dulce (salinidad nula). Este modelo ha sido calibrado y validado en estudios previos utilizando mediciones de niveles en varias estaciones del Río de la Plata y Frente Marítimo, y algunas mediciones de perfiles de velocidad y salinidad escasas disponibles en la zona exterior del Río de la Plata (Alonso et al., 2017; Jackson et al., 2021). Así, el modelo *RPtide* es un modelo que representa la dinámica global del Río de la Plata, Frente Marítimo y zona costera uruguaya.

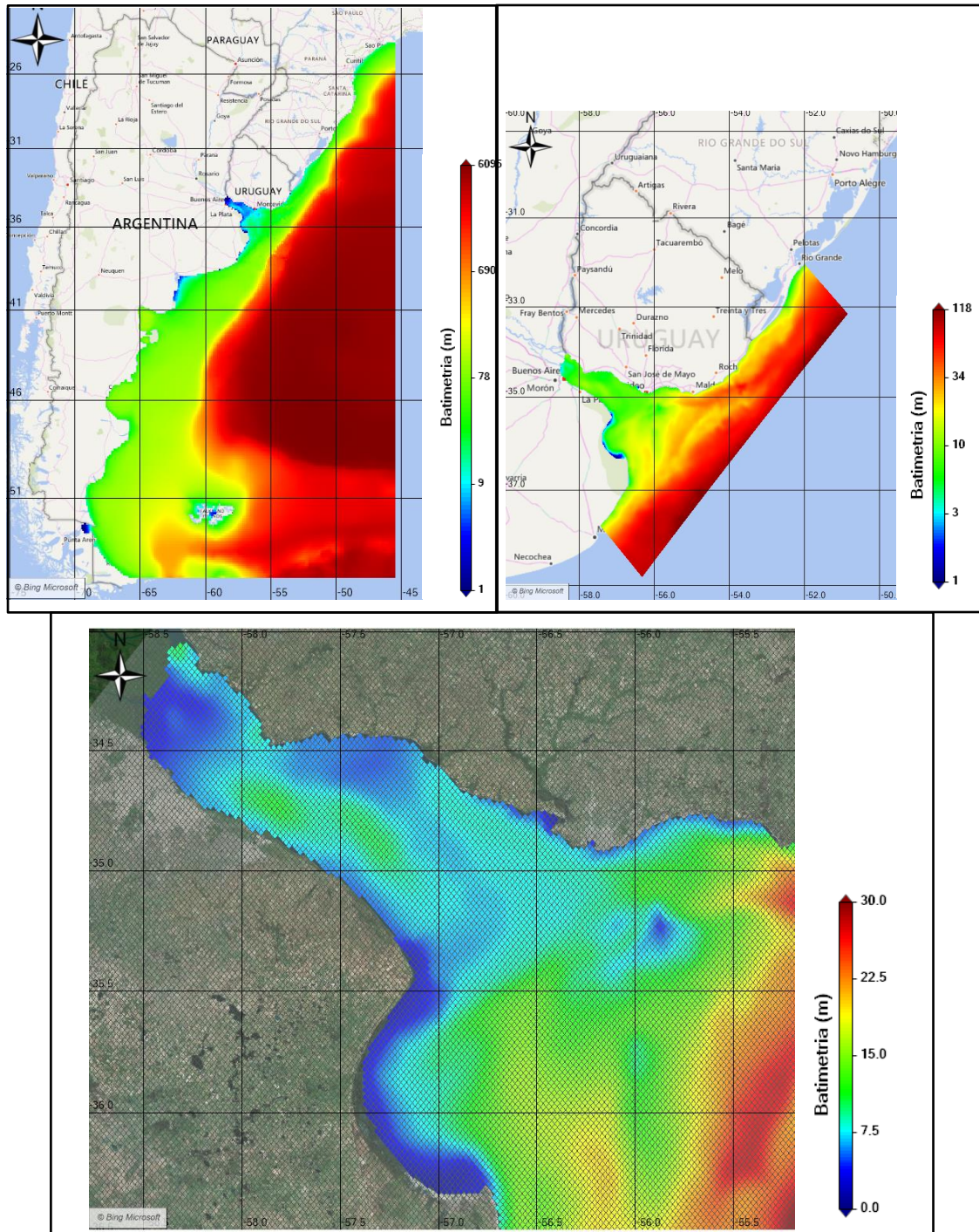


Figura 6: Panel superior izquierdo: dominio y batimetría del modelo ASTide. Panel superior derecho: dominio y batimetría del modelo RPtide. Panel inferior: detalle de la batimetría y de la grilla del modelo RPtide en la zona de interés.

6.2 Evaluación RPtide con datos recientes

Como punto de partida se evalúa cómo la configuración *RPtide* representa los datos medidos de salinidad los últimos años en Arazatí, Punta Tigre y Gas Sayago. Para esto, se simulan con el modelo los años 2015 a 2022, utilizando los forzantes correspondientes a dicho período de tiempo. Los resultados se evalúan mediante comparación gráfica y calculando un valor de RMSE anual promedio entre el valor de RMSE obtenido en cada capa vertical. Este valor de RMSE se

calcula para cada capa del modelo en base a la ecuación 1, siendo x_i el dato medido e y_i el dato obtenido con el modelo para el mismo instante.

$$\text{Ecuación 1: } RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - y_i)^2}$$

Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 7, 8 y 9, donde se grafica la salinidad por año medida y obtenida con el modelo en las 10 capas verticales para las 3 estaciones evaluadas. En la Tabla 3 se presentan los errores medios cuadráticos para cada estación calculados anualmente como el promedio de los errores obtenidos comparando las mediciones con la salinidad de cada capa del modelo.

En términos globales los resultados muestran que el *RPtide* representa las principales variaciones temporales de la salinidad en las 3 zonas (GS, PT y AR). Analizando en detalle la zona exterior, donde se ubica la estación GS, los datos muestran variaciones temporales rápidas y grandes de la salinidad que el modelo en general logra representar, pero con menor variabilidad. En PT, a lo largo del período extenso de medición, hay eventos de incremento de salinidad que el modelo logra representar y varios eventos que el modelo subestima, en el sentido que no alcanza a representar los valores altos de salinidad que se observan en la zona. Por último, analizando la comparación del modelo con los datos en AR, se observa en el año 2021 que el modelo subestima la salinidad medida y no representa la variabilidad temporal, y para el año 2022, en cambio, el modelo reproduce correctamente el evento de alta salinidad registrado, aunque con mayor extensión temporal que la registrada en las medidas.

Tabla 3: Error medio cuadrático (RMSE en ppt) obtenido con la configuración de partida *RPtide* para la salinidad medida en las estaciones GS, PT y AR para los años entre 2015 y 2022.

AÑO	RMSE (ppt)		
	GS	PT	AR
2015	4,88	3,30	
2016	5,09	2,68	
2017		3,88	
2018		2,94	
2019		2,47	
2020		5,67	
2021		5,28	1,95
2022			0,95

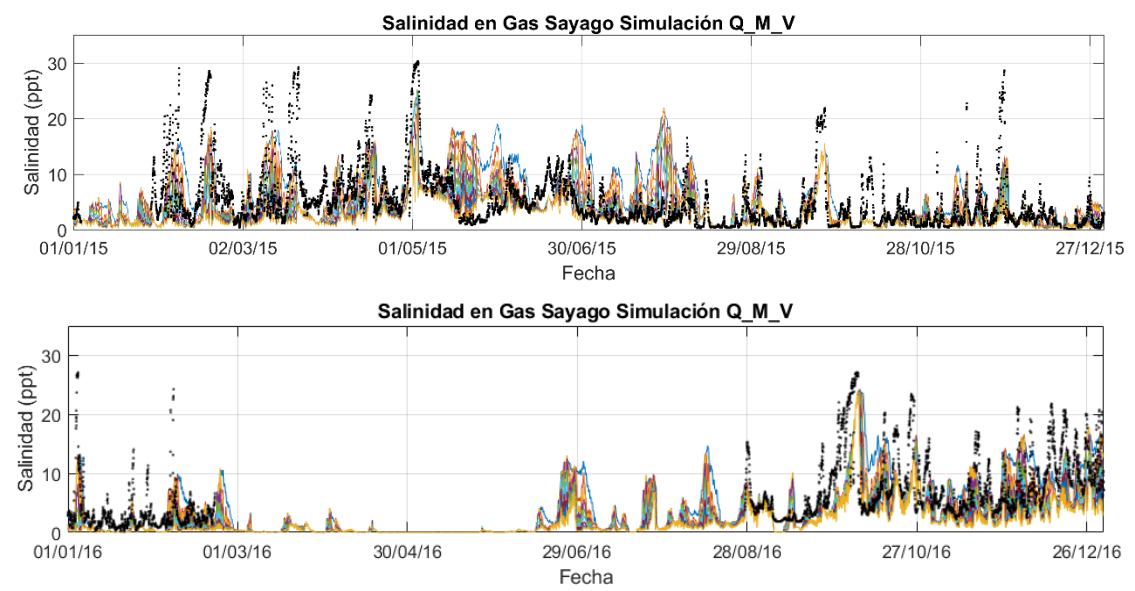


Figura 7: Comparación de la salinidad obtenida con el modelo de base RPtide en las 10 capas verticales con la salinidad medida en GS para los años 2015 y 2016.

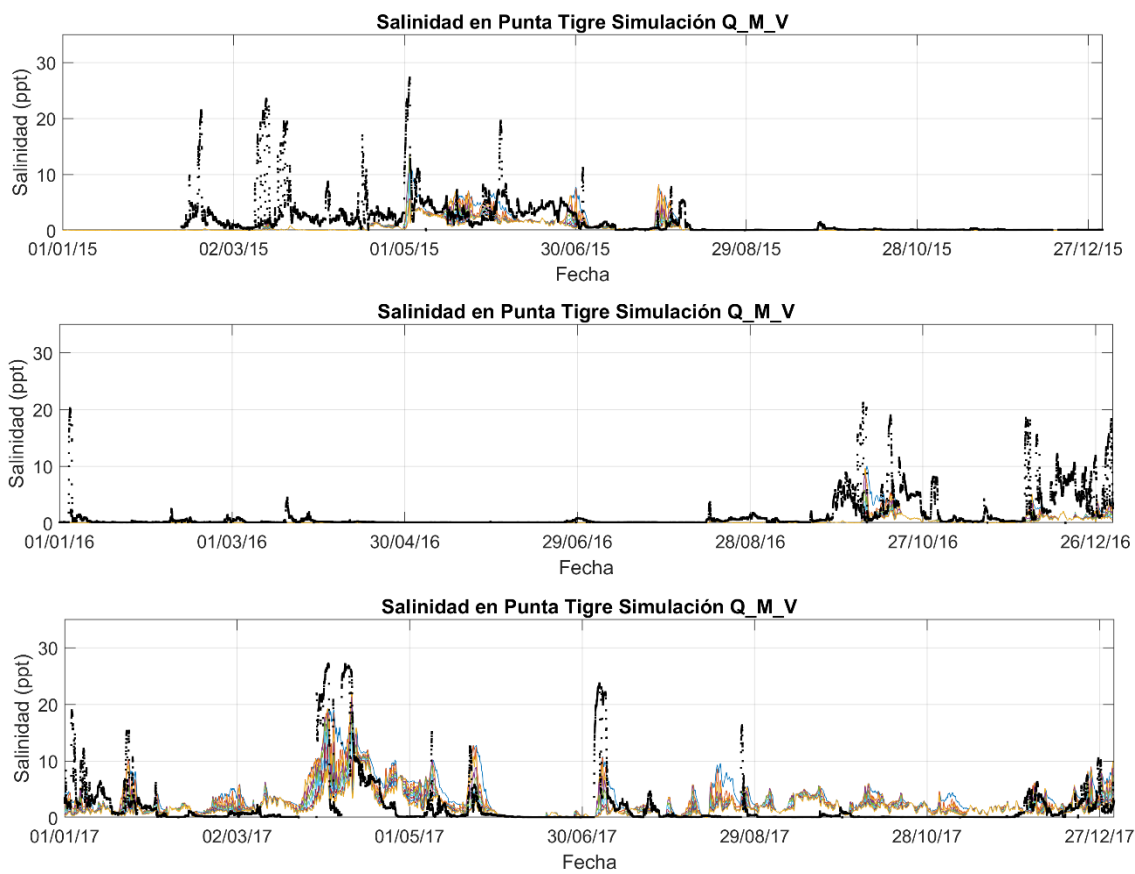


Figura 8: Comparación de la salinidad obtenida con el modelo de base RPtide en las 10 capas verticales con la salinidad medida en PT para los años 2015 a 2021.

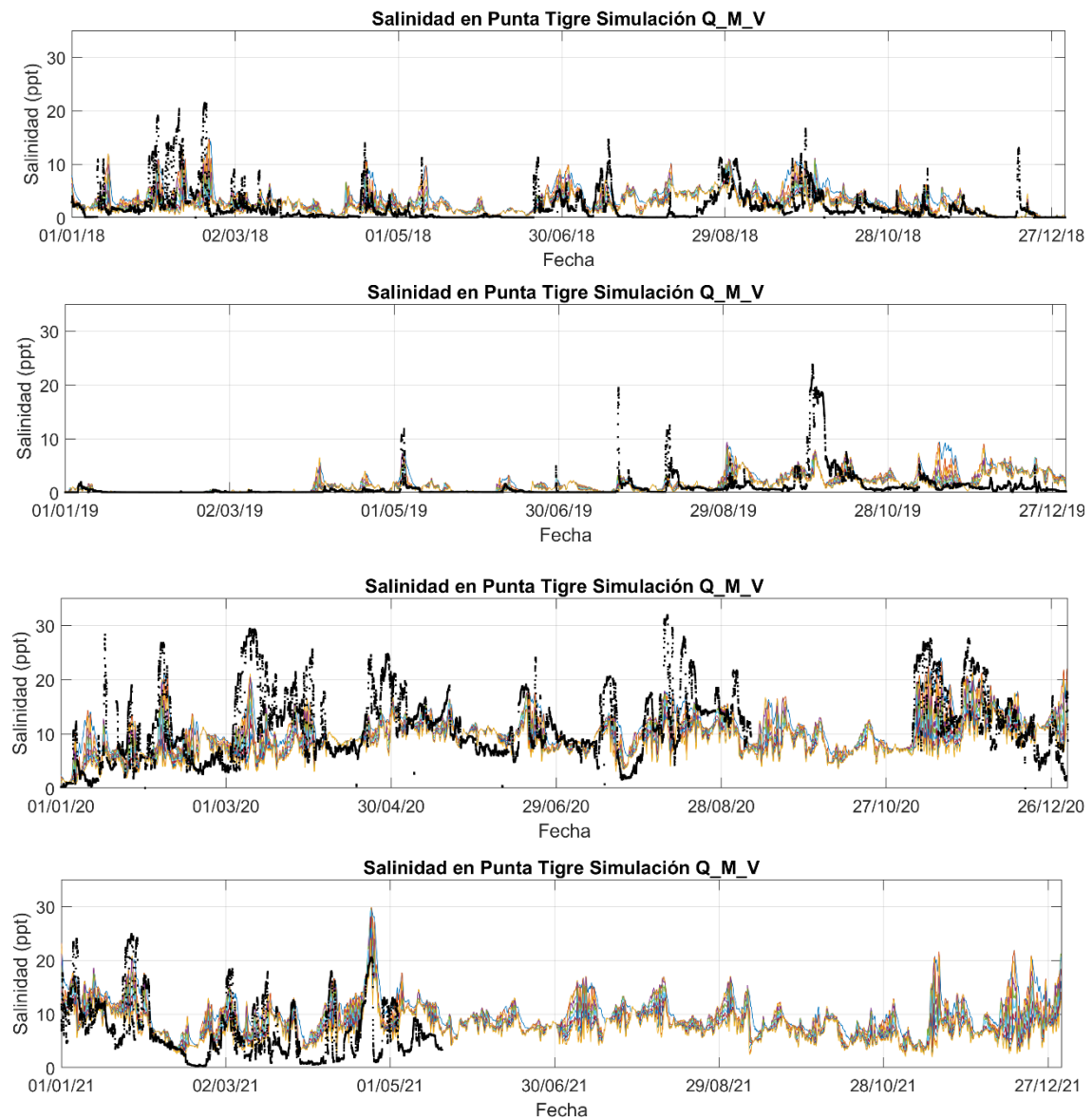


Figura 8 (cont): Comparación de la salinidad obtenida con el modelo de base RPtide en las 10 capas verticales con la salinidad medida en PT para los años 2015 a 2021.

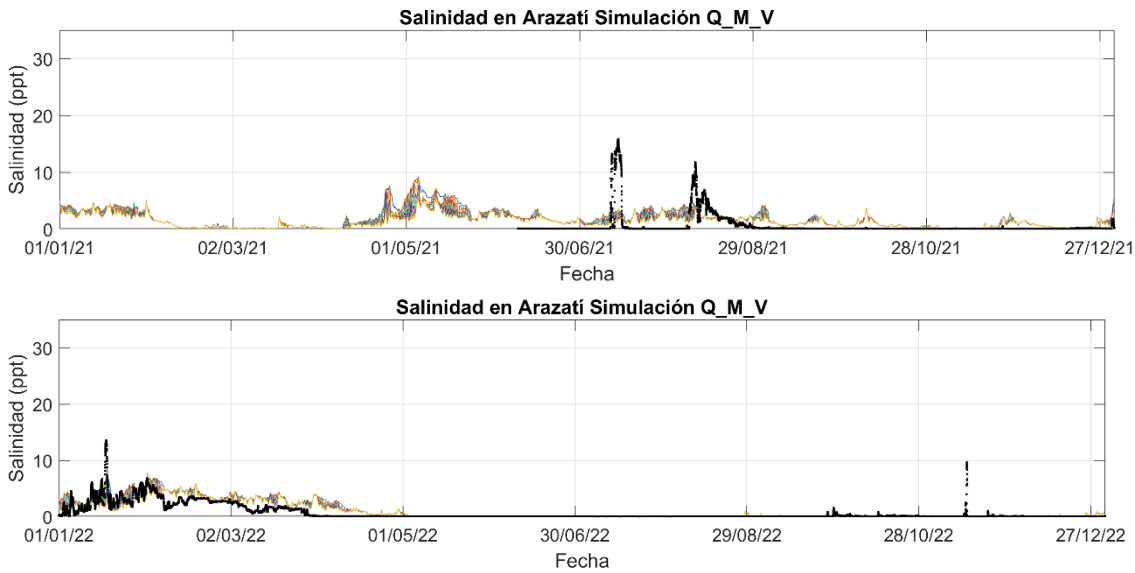


Figura 9: Comparación de la salinidad obtenida con el modelo de base RPtide en las 10 capas verticales con la salinidad medida en AR para los años 2021 y 2022.

7 Implementación configuración *RPsal*

7.1 Generalidades

A partir de la configuración *RPtide* se realiza la mejora de la implementación del modelo MOHID para representar correctamente la salinidad en Arazatí y alrededores, denominada *RPsal*. La implementación del modelo refiere a resolución espacial (horizontal y vertical), información de base (como batimetría) y las condiciones de borde (forzantes y datos correspondientes). Durante la etapa de implementación se realizan una serie de análisis de sensibilidad de los resultados del modelo a distintos parámetros y forzantes, de manera de determinar la influencia de estos y así definir diversos aspectos de la implementación del modelo y los parámetros que serán ajustados en la etapa de calibración del modelo. Además, los análisis de sensibilidad nos permiten comprender los principales factores y procesos que determinan la variabilidad espacial y temporal de la salinidad en la zona de interés.

Los análisis de sensibilidad realizados en este estudio son:

- 1- Sensibilidad a los forzantes.
- 2- Sensibilidad a la resolución horizontal.
- 3- Sensibilidad a la resolución vertical.
- 4- Sensibilidad a la fuente de datos del forzante atmosférico.
- 5- Sensibilidad a la parametrización de la tensión superficial del viento.
- 6- Sensibilidad a la difusión horizontal y vertical de la salinidad.

Los detalles de las simulaciones realizadas para los análisis de sensibilidad se presentan en la Tabla 4. Es importante aclarar que para los análisis de sensibilidad 1 a 4 se utiliza en el modelo la batimetría disponible antes de este estudio utilizada en el modelo *RPtide*, mientras que en los análisis 5 y 6 se incorporó en el modelo la batimetría específica de la zona intermedia descrita anteriormente mencionada como batimetría actualizada en la descripción.

Los análisis de sensibilidad se realizan en base a simulaciones de un año de duración y hay algunos análisis en los que se simulan varios años. Esto implica muchas horas de tiempo de cálculo utilizando el Centro Nacional de Supercomputación (ClusterUY). Por ejemplo, la configuración de base *RPtide* descrita anteriormente demora 3 días en calcular 1 año simulado. Configuraciones con mallas de cálculo de mayor resolución incrementan los tiempos de cálculo considerablemente.

Los resultados se analizan comparando por un lado las series anuales de salinidad obtenidas con el modelo en los puntos de control AR, PT y GS. Por otro lado, se calculan y presentan campos medios anuales de salinidad en la capa de fondo y en la capa de superficie, y en algunos casos de estratificación vertical, calculada como la diferencia entre la salinidad de fondo y la salinidad de superficie. Estos campos medios anuales se calculan como el promedio anual de la salinidad (ó estratificación según el caso) en cada celda de cálculo.

Tabla 4: Definición y descripción de los análisis de sensibilidad realizados al modelo numérico.

ANALISIS SENSIBILIDAD	NOMBRE	DESCRIPCION	PERIODO
Forzantes	Q	Forzantes: caudal fluvial	2016-2022
	Q_M	Forzantes: caudal fluvial y marea oceánica	2016-2022
	Q_M_V	Forzantes: caudal fluvial, marea oceánica y vientos reanálisis	2016-2022
Resolución horizontal	Q_M_V	Dominio RPtide - resolución horizontal 0,02°x0,02°	2016-2017
	N2_Q_M_V	Dominio N2 - resolución horizontal 0,01°x0,01°	2016-2017
Resolución vertical	Q_M_V	Dominio RPtide - resolución horizontal 0,02°x0,02° - 10 capas sigma vertical	2021
	Q_M_V_18sg	Dominio RPtide - resolución horizontal 0,02°x0,02° - 18 capas sigma vertical	2021
	Q_M_V_30sg	Dominio RPtide - resolución horizontal 0,02°x0,02° - 30 capas sigma vertical	2021
	N2_Q_M_V_18sg	Dominio N2 - resolución horizontal 0,01°x0,01° - 18 capas sigma vertical	2021
	N2_Q_M_V_30sg	Dominio N2 - resolución horizontal 0,01°x0,01° - 30 capas sigma vertical	2021
Origen forzante meteorológico	N2_Q_M_V	Todos los forzantes con vientos de reanálisis ECWMF	2016
	N2_PN	Todos los forzantes pero vientos medidos en PN	2016
	N2_GS	Todos los forzantes pero vientos medidos en GS	2016
Tensión superficial viento	Bat_18sg_W0	Batimetría actualizada - 18 capas sigma - Tensión viento variable	2021
	Bat_18sg_W1	Batimetría actualizada - 18 capas sigma - Tensión viento coeficiente 0,002	2021
	Bat_18sg_W2	Batimetría actualizada - 18 capas sigma - Tensión viento coeficiente 0,006	2021
Difusión horizontal	Bat_18sg_D1	Batimetría actualizada - 18 capas sigma - N° Sch = 0,2	2021
	Bat_18sg_D2	Batimetría actualizada - 18 capas sigma - N° Sch = 1	2021

7.2 Caracterización del período simulado 2016-2022

Los análisis de sensibilidad realizados se basan en simulaciones de algún/os año/s dentro del período de tiempo 2015 a 2022, pues es el período con disponibilidad de datos en algunas de las 3 estaciones de monitoreo continuo disponibles en el área. En este punto se describen las principales características de este período de tiempo según los principales forzantes del modelo: caudal fluvial, mareas y vientos.

7.2.1 Caudales fluviales

De manera de caracterizar la variabilidad temporal del caudal fluvial durante los años simulados con el modelo, en la Figura 10 se presenta la variación temporal del caudal fluvial del río Paraná, del río Uruguay y del caudal total que ingresa al Río de la Plata, calculado como la suma de ambos. Por otra parte, en la Figura 11 se presentan los caudales medio anuales (río Paraná, Uruguay y total) calculados para los años desde 2015 a 2022. Se observa que los años recientes corresponden a valores de caudales fluviales extremadamente bajos, lo que condiciona la variabilidad de la salinidad en la zona de Arazatí.

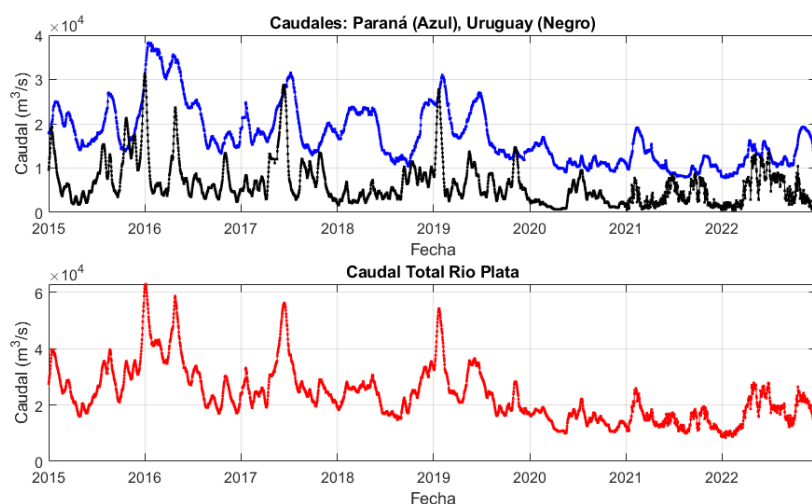


Figura 10: Caudal fluvial del río Paraná, del río Uruguay y total de ingreso al Río de la Plata para los años 2015 a 2022.

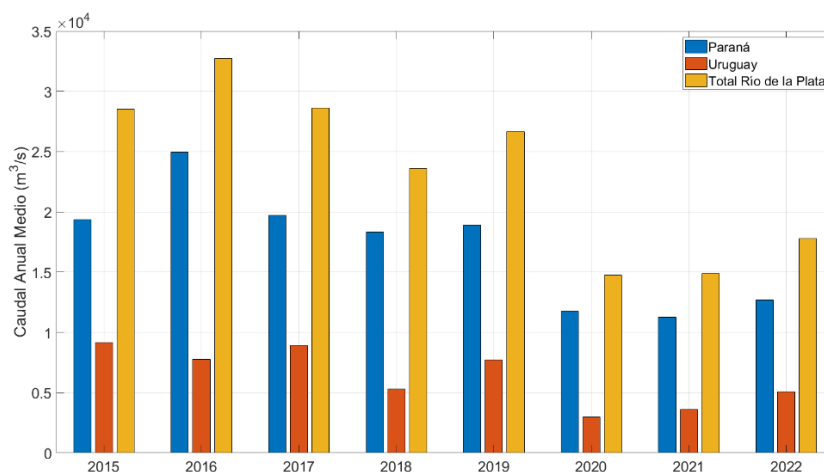


Figura 11: Caudal medio anual del río Paraná, del río Uruguay y total de ingreso al Río de la Plata para los años 2015 a 2022.

7.2.2 Marea

Para caracterizar la variación temporal de la marea durante el período de tiempo simulado en el análisis de sensibilidad, se utilizan los datos medidos de nivel de mar en el puerto de Montevideo por la Administración Nacional de Puertos (ANP) (Figura 12). En los datos se observa la variabilidad temporal esperada de la marea en el Río de la Plata, caracterizada por una componente de marea astronómica diurna con desigualdades semidiurnas y una componente de marea meteorológica caracterizada por eventos de altos y bajos niveles de mar.

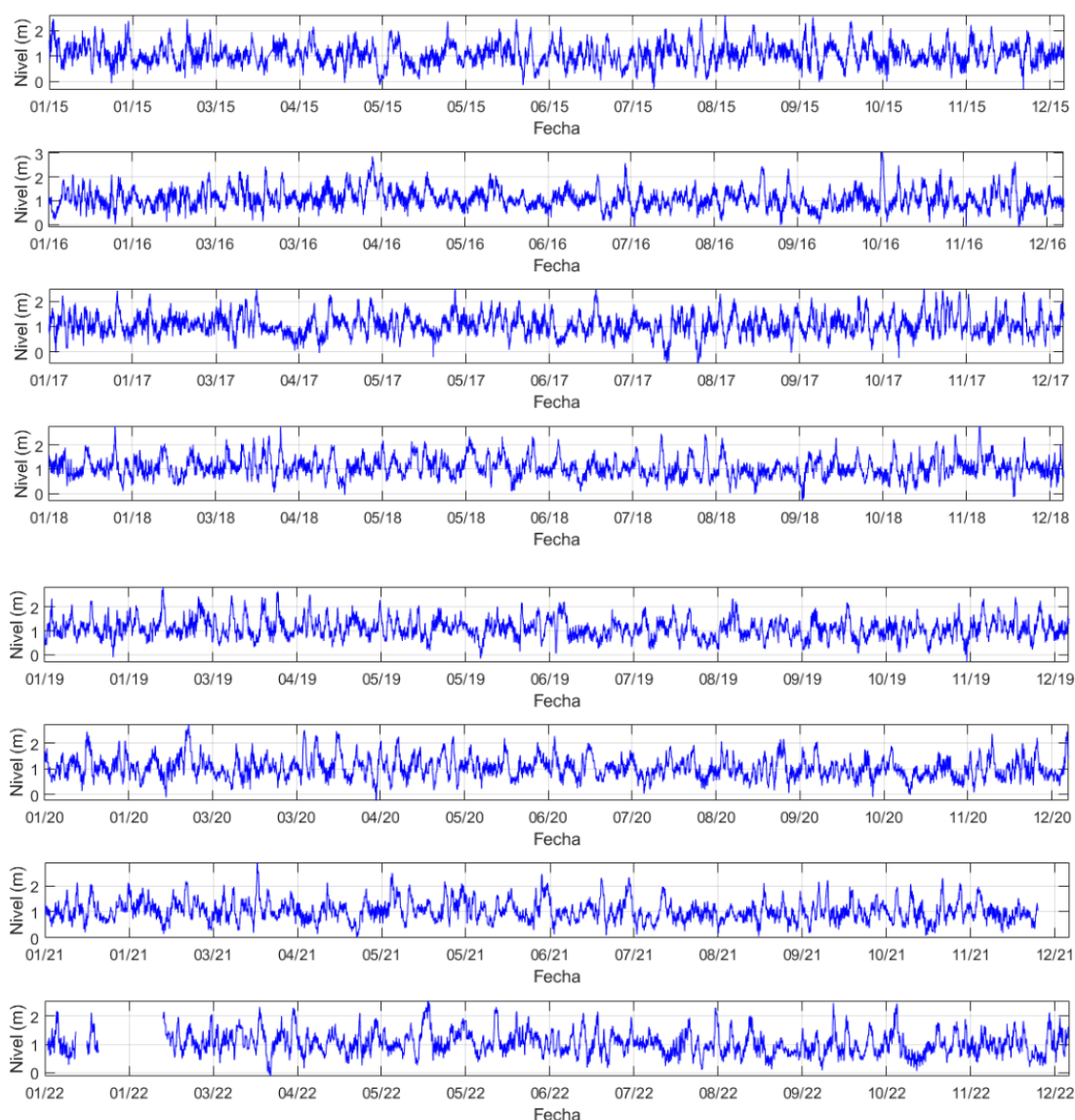


Figura 12: Nivel de mar medido en el Puerto de Montevideo por ANP durante los años 2015 a 2022.

7.2.3 Vientos

Para caracterizar los vientos durante el período simulado, se presenta la información obtenida del reanálisis del ECWMF para las ubicaciones donde se cuenta con información medida en mar (PN entre 2015 y 2022, y GS para 2015 y 2016). En la Figura 13 y en la Figura 14 se presenta la serie de vientos del reanálisis ERA (utilizado para forzar el modelo) extraída para PN y GS, para los años del período de tiempo simulado en los análisis de sensibilidad y que se cuenta con datos

en estas estaciones. De las comparaciones presentadas, se observa que el reanálisis ERA en grandes rasgos aproxima el comportamiento de las mediciones de Gas Sayago. Además, se observa que, a pesar de que en Pilote Norden se registra una faltante de datos para los módulos menores a 5 m/s para todas las direcciones, los vientos son representados correctamente por el reanálisis, subestimando levemente los vientos más intensos.

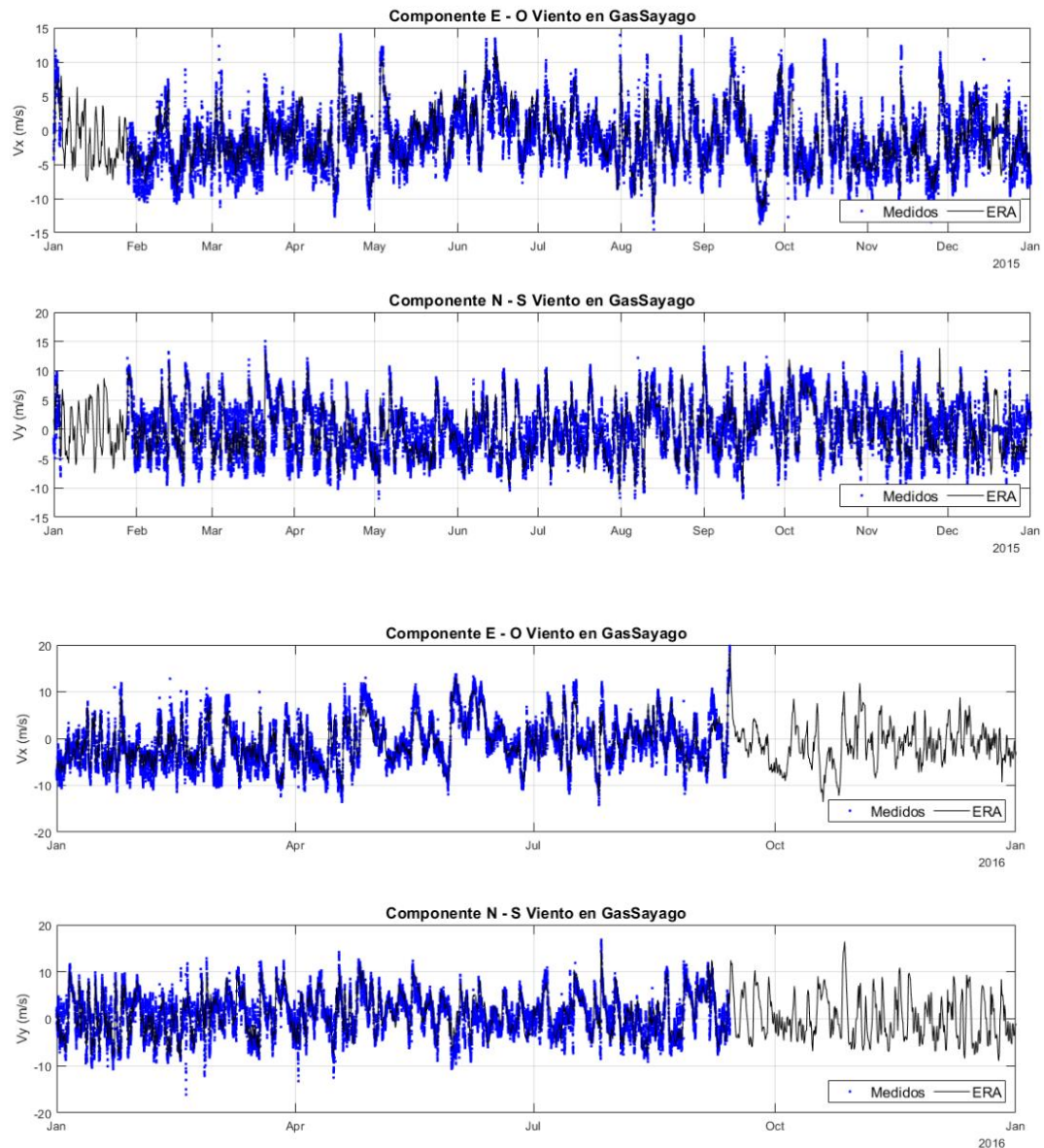


Figura 13: Viento obtenido del reanálisis ERA-INTERIM y medido en la boya de Gas Sayago durante los años 2015 y 2016.

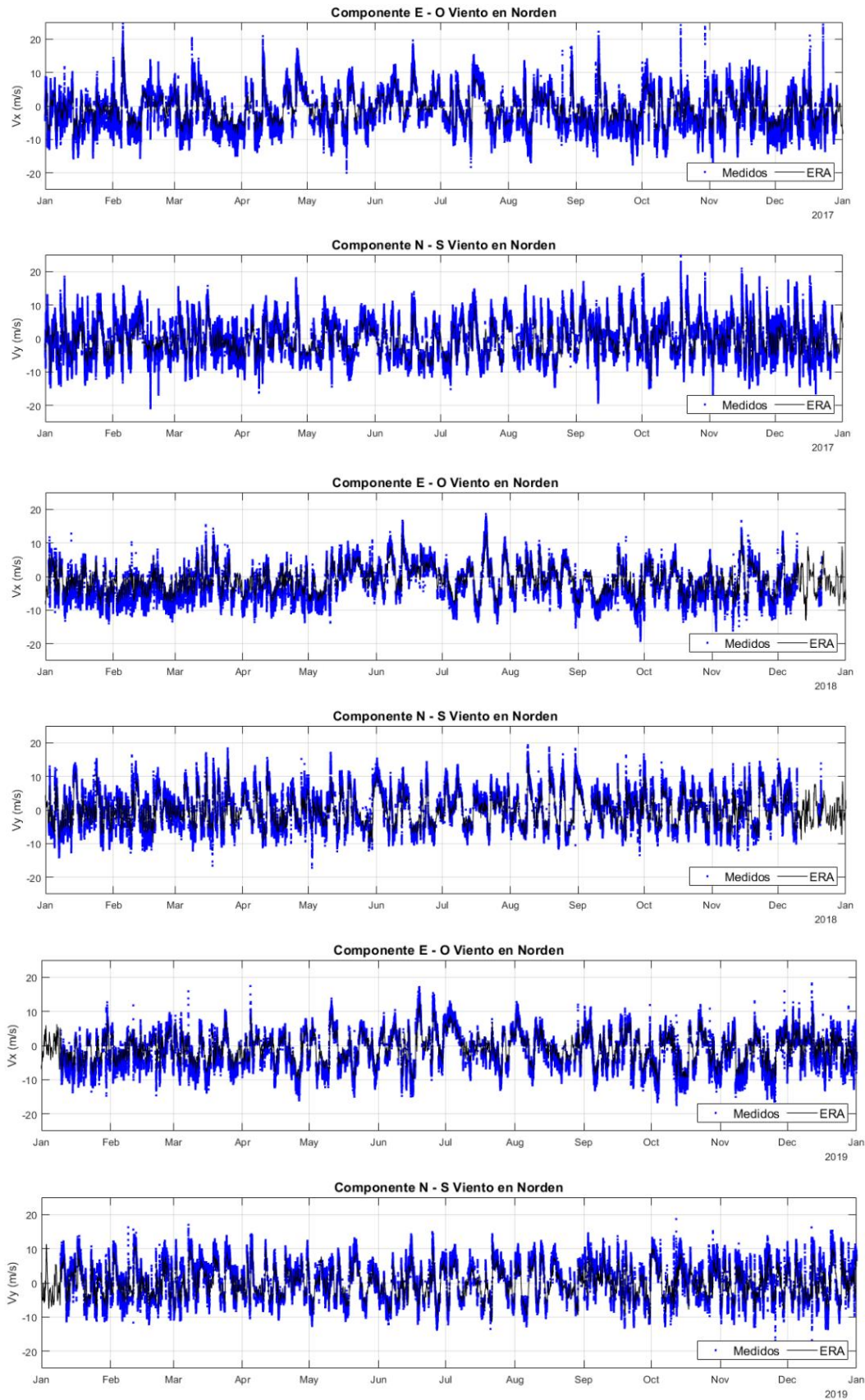


Figura 14: Viento obtenido del reanálisis ERA-INTERIM y medido en la boya de Gas Sayago durante los años 2017 a 2022.

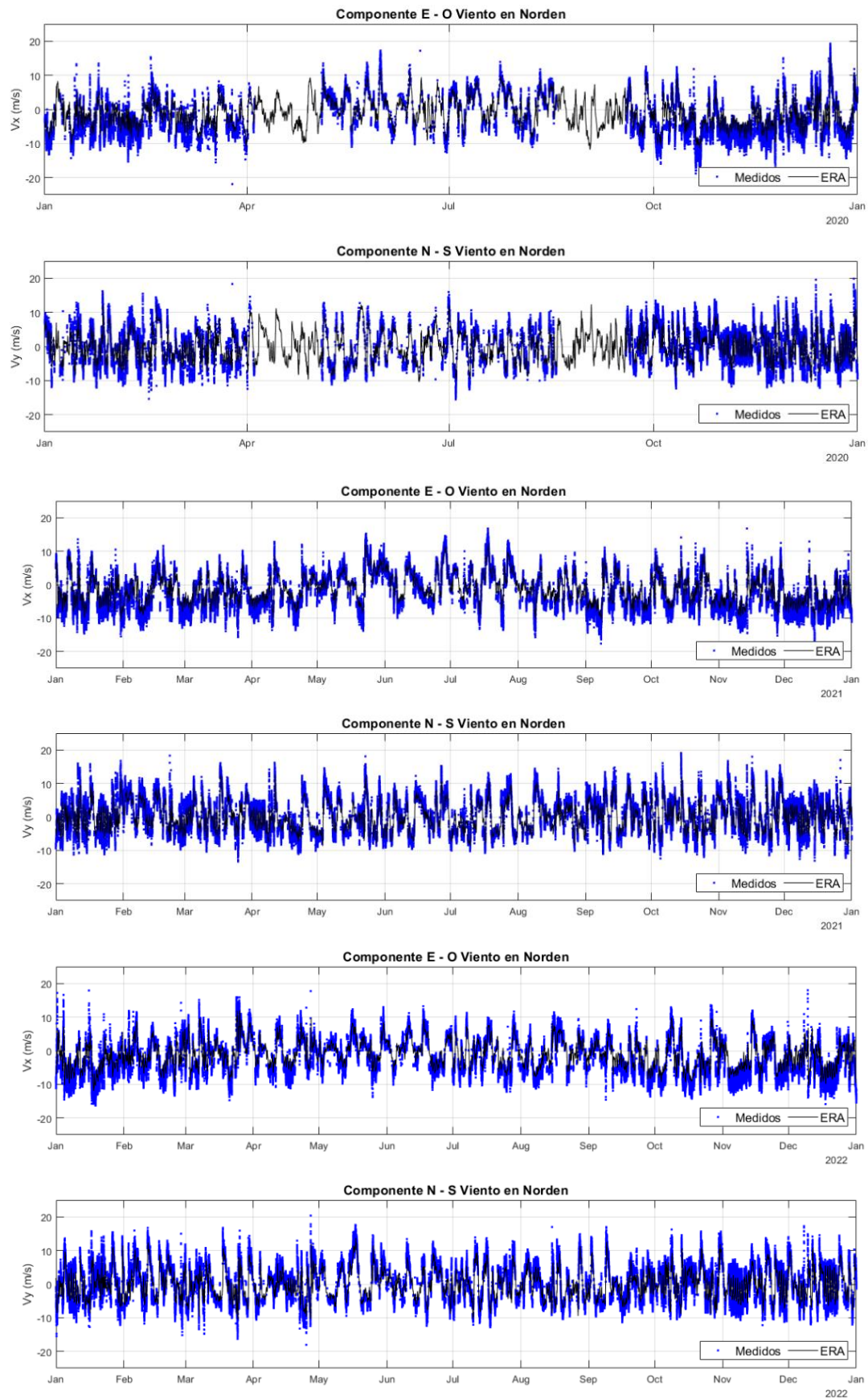


Figura 14 (cont): Viento obtenido del reanálisis ERA-INTERIM y medido en la boya de Gas Sayago durante los años 2017 a 2022.

7.3 Sensibilidad a los forzantes

En primer lugar, se realiza un análisis de sensibilidad de la salinidad a los principales forzantes de la hidrodinámica del Río de la Plata: a) el caudal fluvial de los tributarios río Uruguay y río Paraná, b) las mareas que provienen desde el Océano Atlántico, y c) el efecto de los vientos que generan una tensión sobre la superficie libre. Para esto se consideran tres simulaciones, una simulación considerando sólo el caudal fluvial como forzante (denominada **Q**), otra simulación en la cual se incorpora el efecto de la marea (denominada **Q_M**), y una tercera simulación en la cual se incorpora el efecto del viento (denominada **Q_M_V**). Comparando los resultados obtenidos en las tres simulaciones es posible comprender el efecto de cada uno de los forzantes sobre la salinidad en la zona; el resto de los parámetros del modelo permanecen invariantes entre las 3 simulaciones.

A modo de ejemplo, en las Figuras 15 a 20 se presentan alguno de los resultados obtenidos para los años 2016, 2018 y 2021, los cuales se diferencian considerablemente en el valor medio anual de caudal fluvial según lo presentado anteriormente en la Figura 11. Se presentan, por un lado, las series temporales obtenidas con el modelo en las 10 capas verticales y, a modo de referencia, las series medidas en las estaciones que se cuenta con datos. Por otro lado, se presentan los campos medios anuales de salinidad en superficie y fondo para los 3 años.

Los resultados muestran una gran dependencia de la dinámica de la salinidad con todos los forzantes considerados. La simulación ficticia que considera cómo único forzante el caudal fluvial representa una dinámica de estuario dominada completamente por la descarga continental, con una escala temporal asociada a las variaciones temporales estacionales e interanuales del mismo. En estos casos el frente salino se ubica en la zona intermedia del Río de la Plata y varía mucho año a año en función del caudal medio. Esto se observa al comparar los resultados para los años 2016 (caudal medio alto) y 2021 (caudal medio bajo). A su vez, cuando el único forzante es el caudal fluvial predominantemente se observa una elevada estratificación vertical de salinidad que varía levemente según el caudal fluvial diario (a mayor caudal mayor mezcla vertical y por tanto disminuye la estratificación).

Al incorporar el efecto de la marea astronómica y meteorológica que ingresa por la plataforma oceánica se observa que la dinámica del campo salino cambia radicalmente. Este caso representa la dinámica principal de un estuario dada por el balance entre el forzante continental y el forzante oceánico. Las corrientes de marea de escala temporal horaria con ciclos diarios generan mezclas importantes del campo salino y en el balance anual el frente salino se desplaza hacia la zona exterior respecto a la ubicación obtenida solamente considerando caudal fluvial. Así se observa que la señal de altos valores de salinidad en AR para las simulaciones **Q** prácticamente pasa a una señal de bajos valores de salinidad para las simulaciones **Q_M**. En cuanto a la variabilidad diaria, la salinidad ahora muestra variaciones horarias y diarias producto de la marea, pero superpuesta a la variabilidad estacional producto del caudal.

Por último, al incorporar el efecto del viento (simulaciones **Q_M_V**) se obtiene una variabilidad espacial y temporal de la salinidad producto de los principales forzantes y se observan diferencias en los resultados respecto a la simulación **Q_M** que indican también una gran influencia del forzante atmosférico en el campo salino. El efecto del viento incrementa las corrientes y genera procesos de mezcla que se traducen en una disminución de estratificación

vertical en ciertos eventos y en una disminución de los gradientes horizontales en el campo medio anual. Por otra parte, en las series temporales de AR y PT se observa claramente cómo el efecto del viento incrementa las variaciones de salinidad en la escala de eventos respecto a las variaciones generadas por la marea. Por último, en los campos medios se observa el frente salino desplazado hacia el interior respecto a la simulación **Q_M** producto del efecto del viento.

En síntesis, el análisis de sensibilidad de los resultados del modelo a los forzantes muestra que hay una señal de base de variabilidad temporal de la salinidad influenciada por el caudal fluvial y su variabilidad estacional e interanual, que se superpone a una señal de variabilidad horaria y diaria producto de las mareas y de los vientos, siendo el efecto de este último el incremento de las variaciones de salinidad generadas por las mareas y por tanto el forzante que genera mayores gradientes temporales.

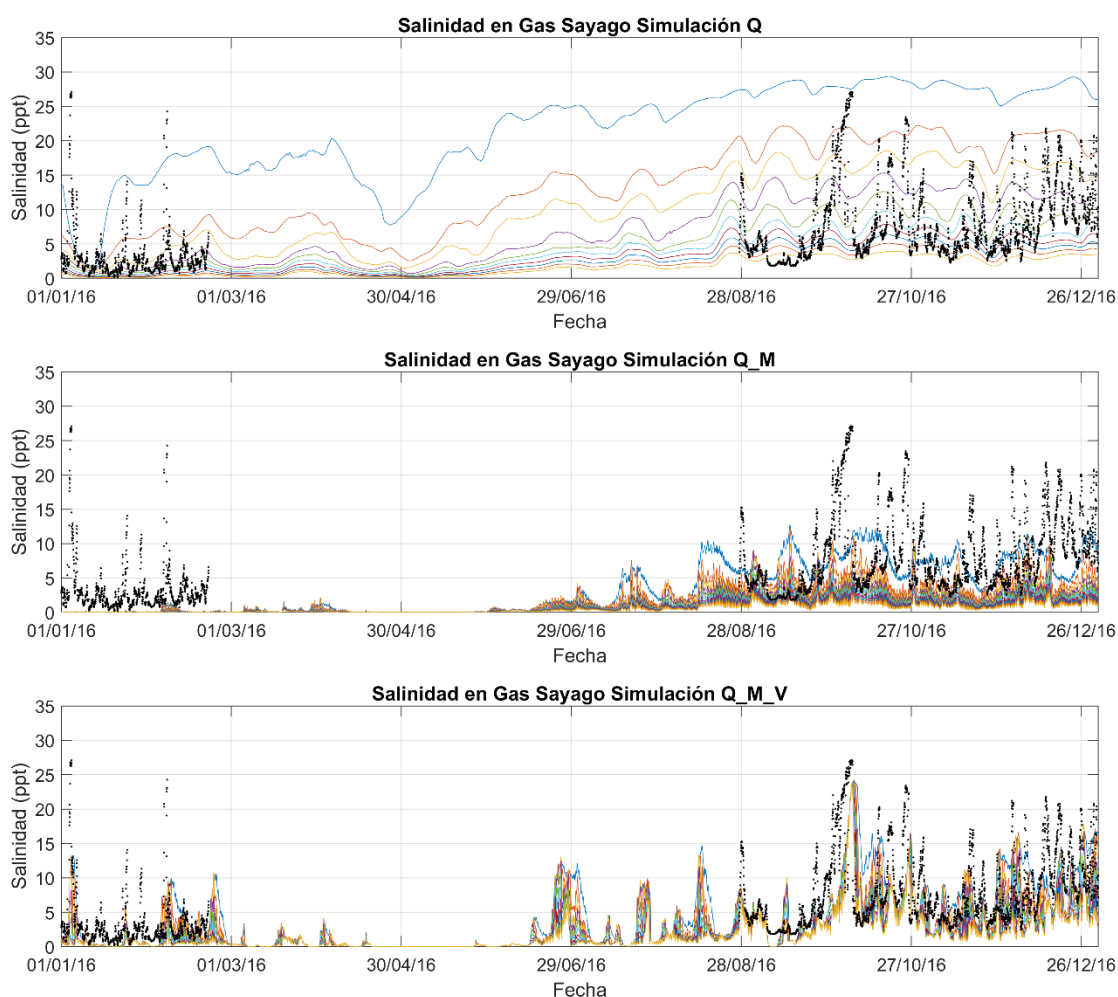


Figura 15: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a los forzantes principales (caudal fluvial, marea y vientos): series temporales para el año 2016 en GS.

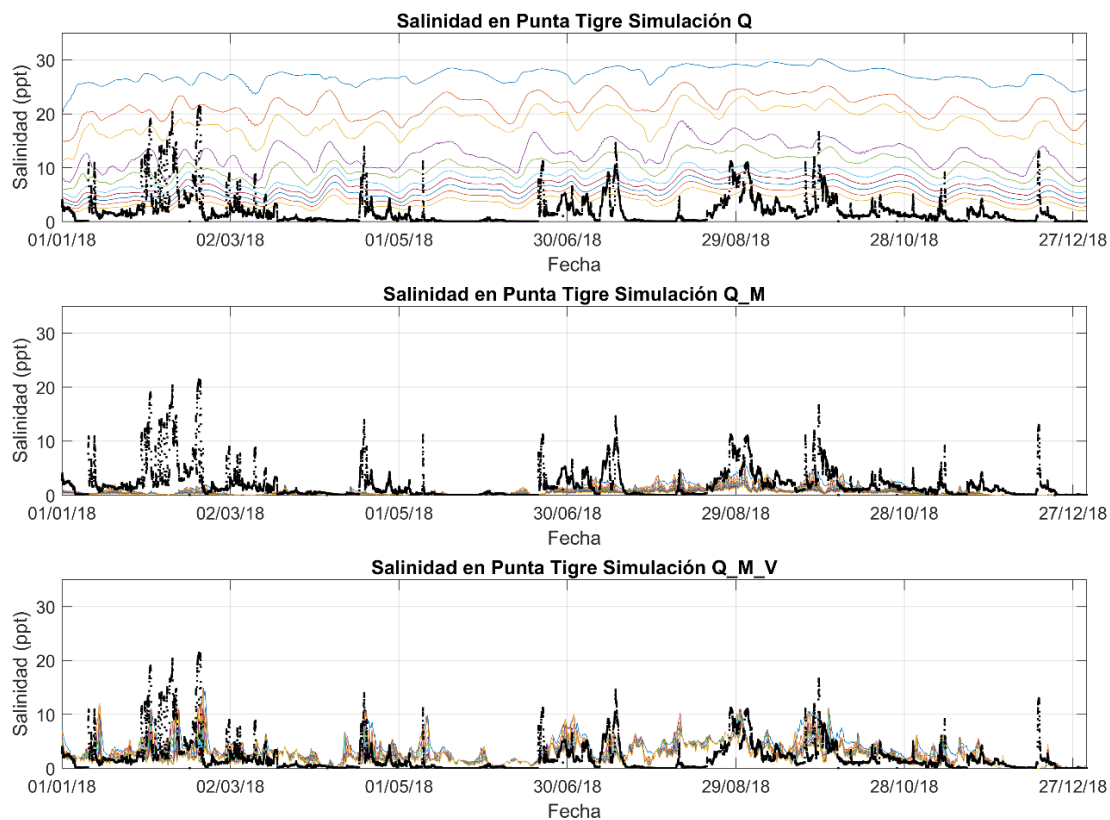


Figura 16: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a los forzantes principales (caudal fluvial, marea y vientos): series temporales para el año 2018 en PT.

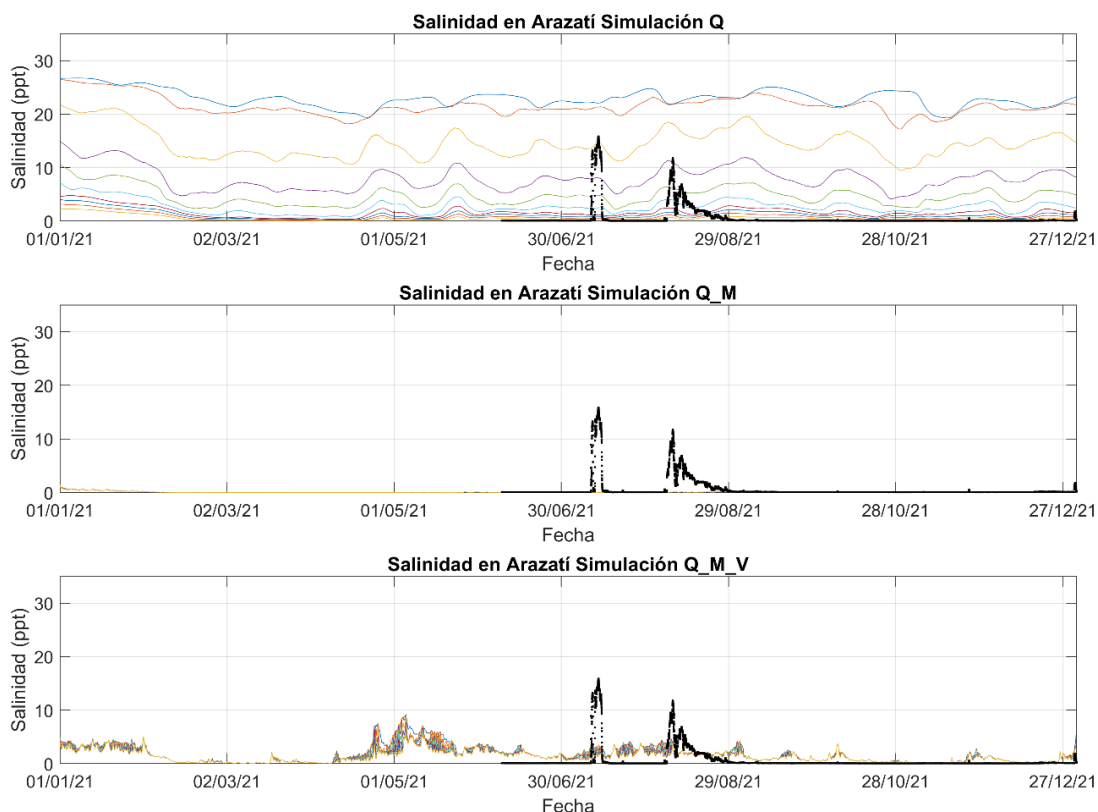


Figura 17: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a los forzantes principales (caudal fluvial, marea y vientos): series temporales para el año 2021 en AR.

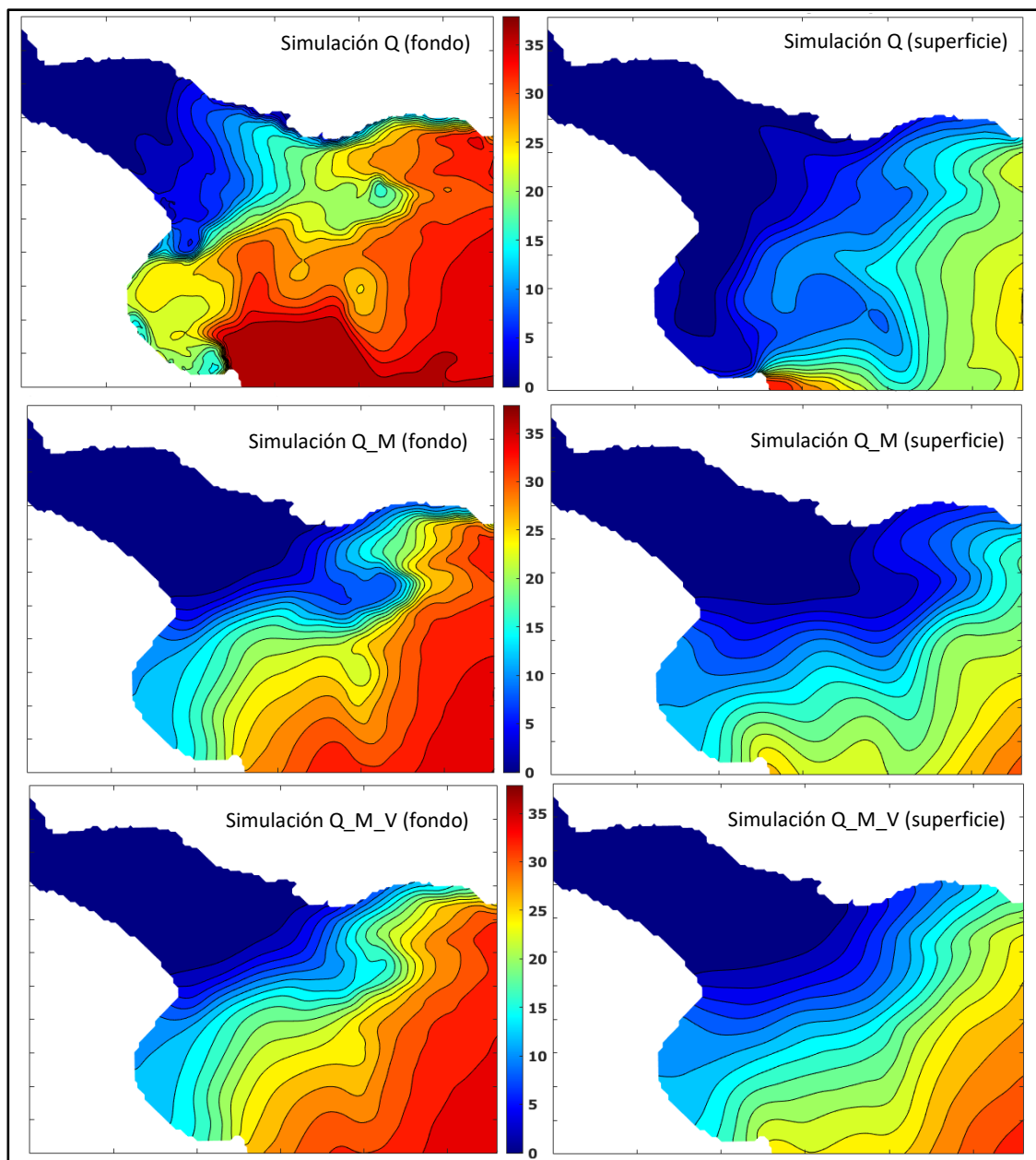


Figura 18: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a los forzantes principales (caudal fluvial, marea y vientos): campos medios espaciales (ppt) en fondo (paneles izquierdos) y superficie (paneles derechos) para la simulación solo con caudal fluvial (panel superior), con caudal fluvial y marea (panel intermedio) y con caudal fluvial, marea y vientos (panel inferior), para el año 2016.

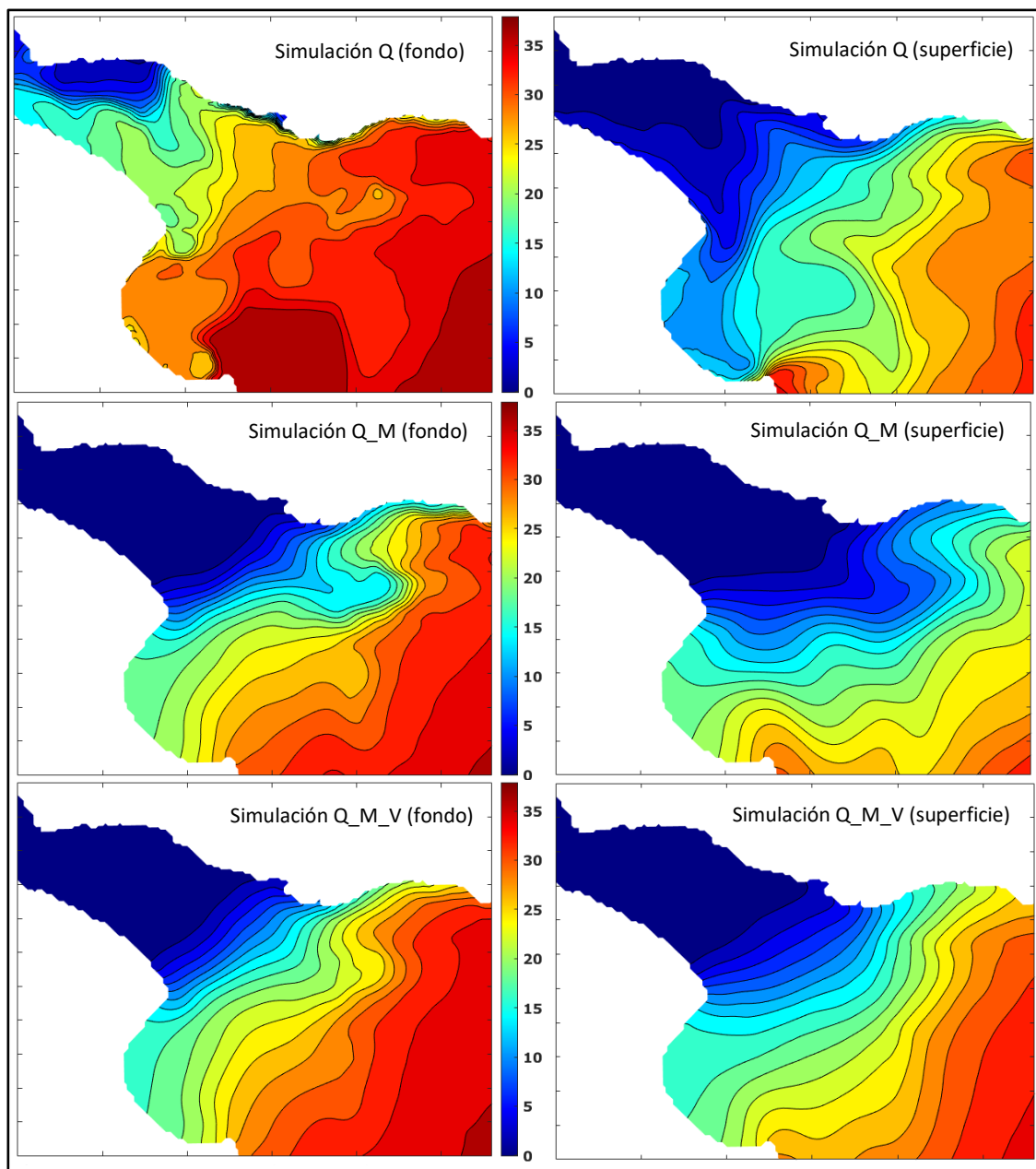


Figura 19: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a los forzantes principales (caudal fluvial, marea y vientos): campos medios espaciales (ppt) en fondo (paneles izquierdos) y superficie (paneles derechos) para la simulación solo con caudal fluvial (panel superior), con caudal fluvial y marea (panel intermedio) y con caudal fluvial, marea y vientos (panel inferior), para el año 2018.

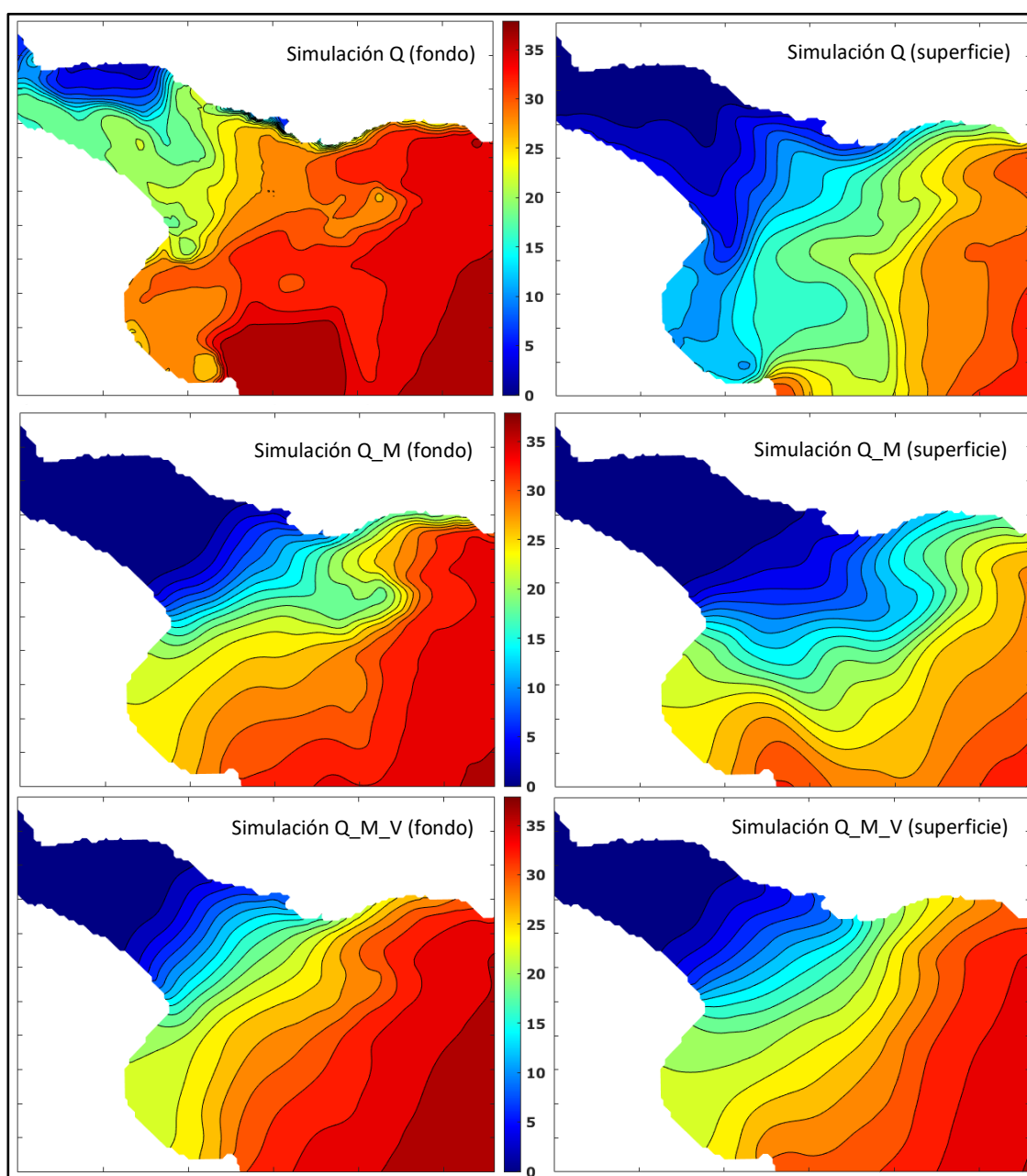


Figura 20: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a los forzantes principales (caudal fluvial, marea y vientos): campos medios espaciales (ppt) en fondo (paneles izquierdos) y superficie (paneles derechos) para la simulación solo con caudal fluvial (panel superior), con caudal fluvial y marea (panel intermedio) y con caudal fluvial, marea y vientos (panel inferior), para el año 2021.

7.4 Sensibilidad a la resolución espacial horizontal del modelo

Se realiza un análisis de sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial horizontal de la malla de cálculo del modelo numérico. Se parte de la resolución de $0,02^\circ \times 0,02^\circ$ del modelo *RPtide* y se define un modelo de detalle como segundo nivel de modelo anidado del *RPtide* denominado N2. Esta malla de cálculo de detalle N2 cuadruplica la resolución horizontal de la malla global, siendo de $0,01^\circ \times 0,01^\circ$ de resolución. La batimetría que utiliza la malla de detalle N2 es la misma que la del *RPtide* y por tanto el cambio solamente se debe a una

mayor resolución. El dominio de cálculo y la malla del nivel de detalle N2 se presenta en la Figura 21.

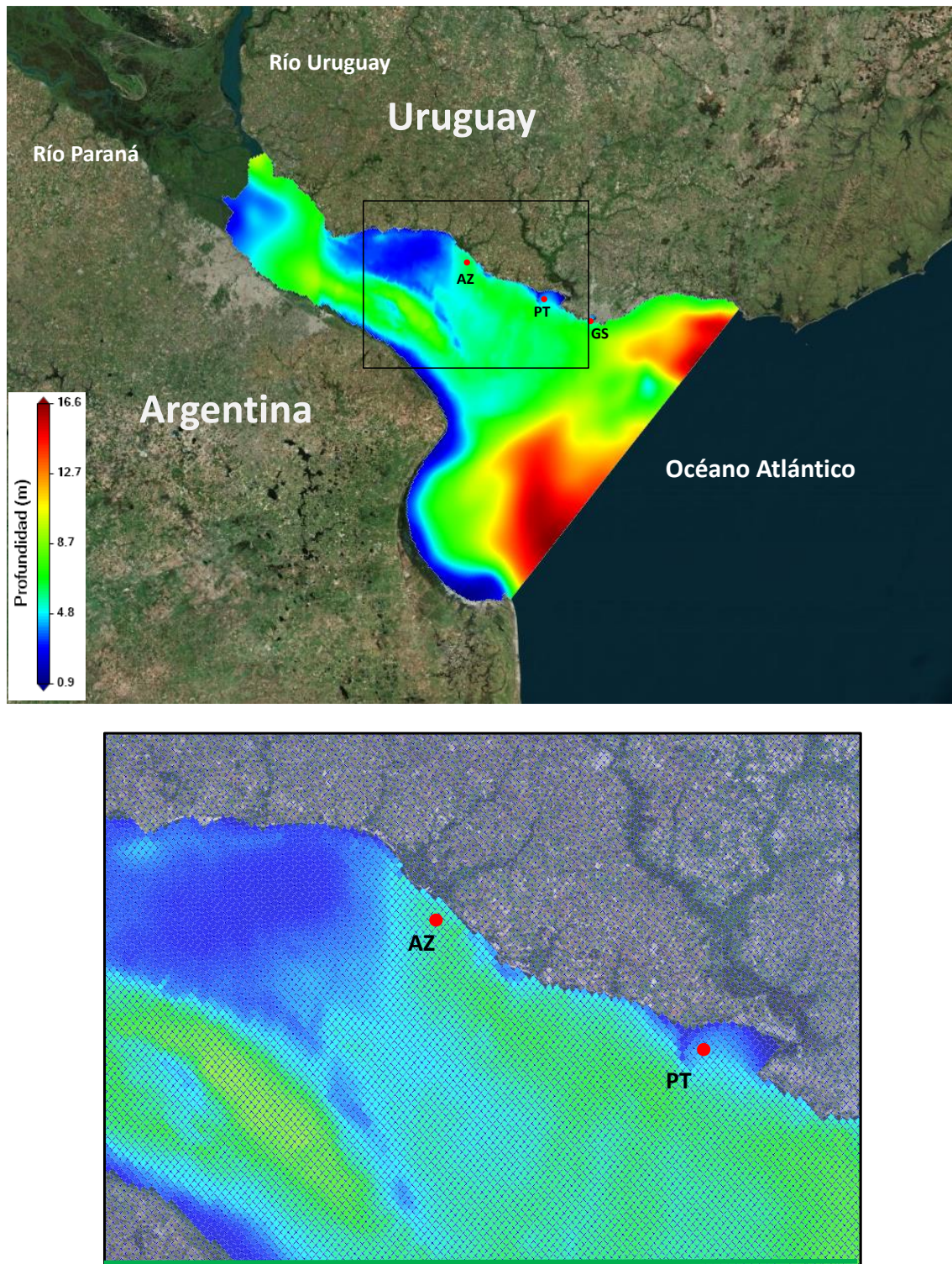


Figura 21: Dominio y batimetría (panel superior), y detalle de la malla de cálculo en la zona cercana a Arazatí (panel inferior) del nivel N2 de mayor resolución. Se muestra las estaciones de control AR, PT y GS.

Para analizar el efecto del incremento de resolución espacial horizontal del modelo, se realiza una simulación con la malla N2 como modelo anidado del *Rptide* con todos los forzantes

(denominada **N2_Q_M_V**) y se compara con los resultados obtenidos con la simulación **Q_M_V** del dominio *RPtide* en la zona del dominio N2. Se simulan los años 2016 y 2017. La comparación de las series temporales de salinidad obtenidas en GS para el año 2016 y en PT para el año 2017 obtenidas con ambas mallas de cálculo se presenta en las Figuras 22 y 23. El campo medio de salinidad para las dos resoluciones se presenta en la Figura 24 y la comparación de la estratificación media en la Figura 25.

Se observa que la salinidad del modelo es levemente sensible al incremento en la resolución horizontal, mostrando valores mayores de salinidad en los picos de mayor salinidad en la configuración N2. Esto tiene como consecuencia un mayor gradiente de salinidad entre las capas y por tanto un leve incremento en la estratificación. Esta sensibilidad se debe al incremento en la difusión por el incremento de la resolución, generando que aumente el transporte de la salinidad, aunque los forzantes sean los mismos.

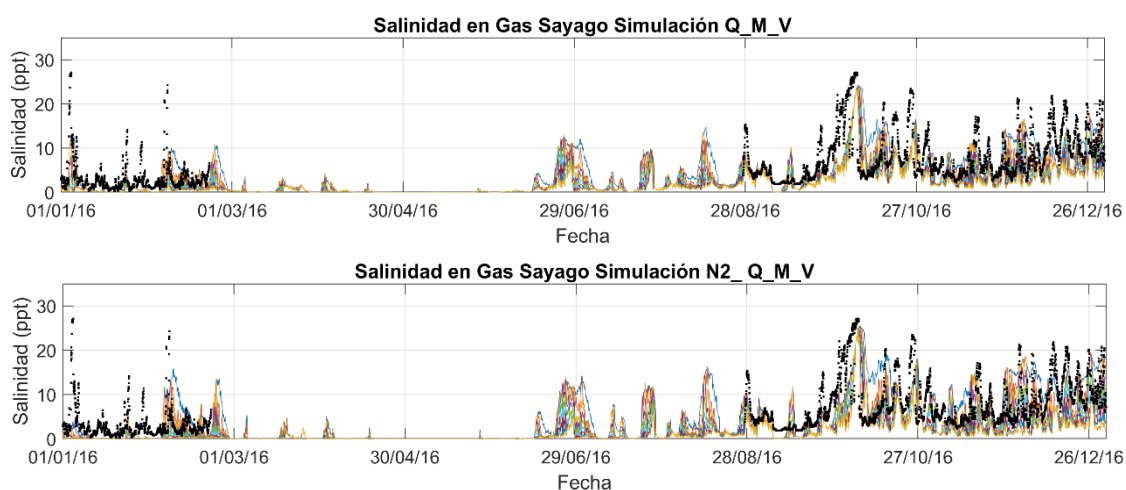


Figura 22: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial horizontal (resolución *RPtide* y resolución cuadruplicada en nivel N2): series temporales para el año 2016 en GS.

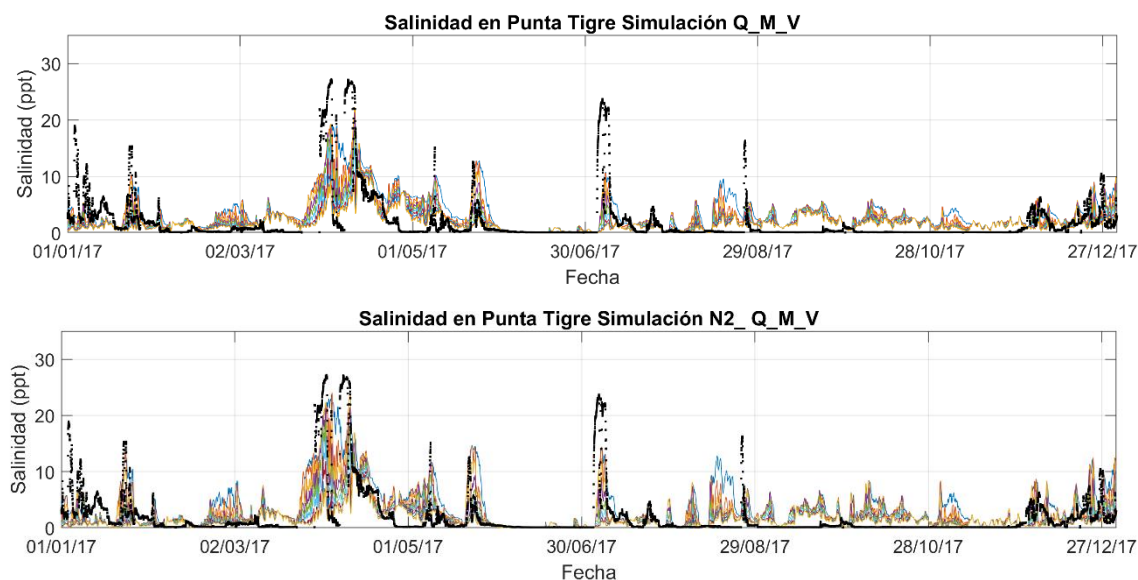


Figura 23: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial horizontal (resolución *RPtide* y resolución cuadruplicada en nivel N2): series temporales para el año 2017 en PT.

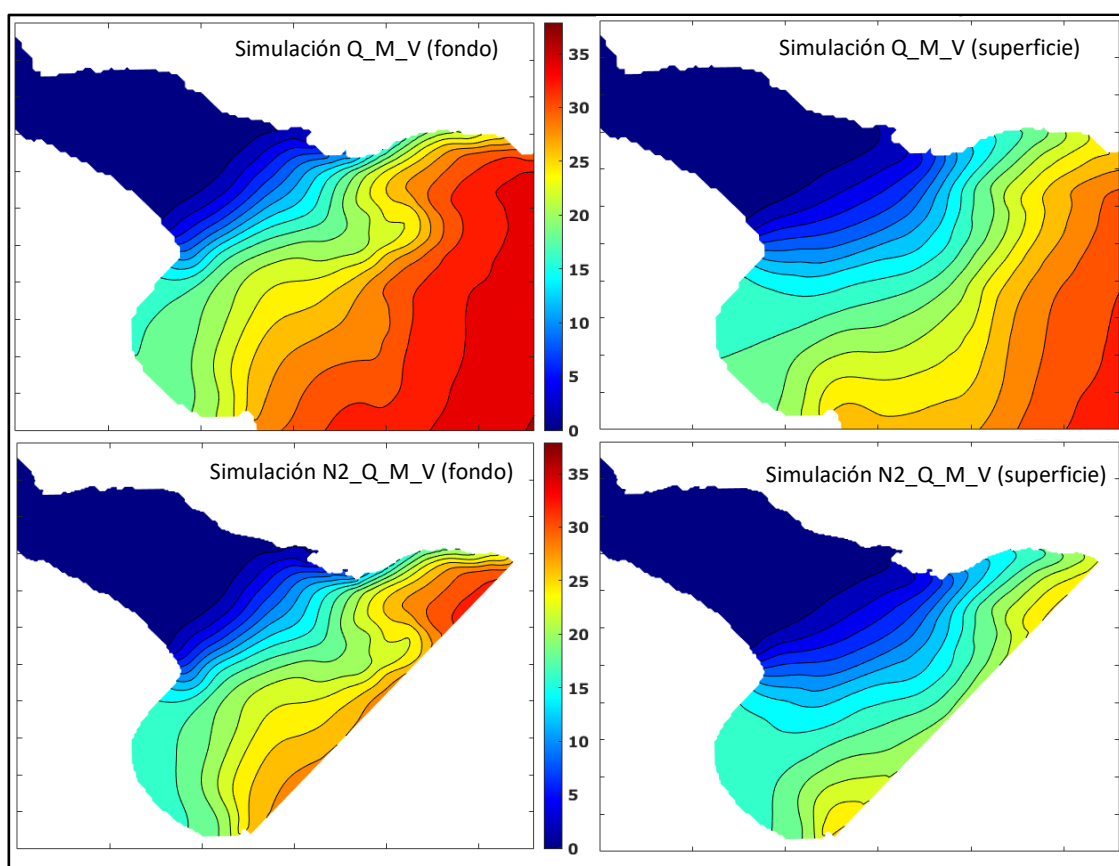


Figura 24: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial horizontal (resolución *RPtide* y resolución cuadruplicada en nivel N2): campos medios espaciales (ppt) en fondo (paneles izquierdos) y superficie (paneles derechos) para la simulación en el modelo global del Río de la Plata (panel superior) y en el modelo de detalle local N2 (panel inferior), para el año 2017.

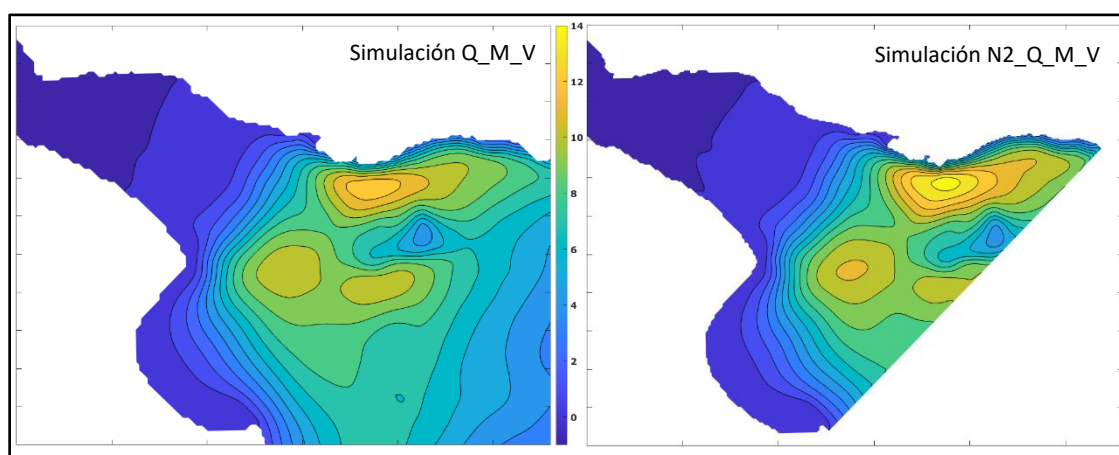


Figura 25: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial horizontal (resolución *RPtide* y resolución cuadruplicada en nivel N2): campo medio espacial de estratificación vertical (ppt) para la simulación en el modelo global del Río de la Plata (panel izquierdo) y en el modelo de detalle local N2 (panel derecho), para el año 2017.

7.5 Sensibilidad a la resolución espacial vertical del modelo

Se realiza un análisis de sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial vertical de la malla de cálculo del modelo numérico. Para esto, se parte de la configuración del *RPtide* de 10 capas (**Q_M_V**) verticales tipo sigma y se define una configuración de 18 capas sigma (**Q_M_V_18sg**) y una de 30 capas sigma (**Q_M_V_30sg**). La configuración de 10 capas tiene todas las capas equidistribuidas y por tanto el espesor de estas es 0,1 (la coordenada tipo sigma se define entre 0 y 1). Las configuraciones de 18 y 30 capas están definidas con mayor detalle en las zonas cercanas a las interfases con la atmósfera y con el fondo de manera simétrica. El espesor de cada capa en la configuración con 18 capas sigma es: 0,02 - 0,02 - 0,03 - 0,03 - 0,05 - 0,05 - 0,1 - 0,1 - 0,1 - 0,1 - 0,1 - 0,1 - 0,05 - 0,05 - 0,03 - 0,03 - 0,02 - 0,02. El espesor de cada capa en la configuración con 30 capas sigma es: 0,01 - 0,01 - 0,01 - 0,02 - 0,02 - 0,03 - 0,03 - 0,03 - 0,03 - 0,04 - 0,05 - 0,05 - 0,05 - 0,05 - 0,05 - 0,05 - 0,05 - 0,05 - 0,05 - 0,05 - 0,05 - 0,04 - 0,03 - 0,03 - 0,03 - 0,02 - 0,02 - 0,01 - 0,01 - 0,01. Por otra parte, se generan las configuraciones con 18 y 30 capas sigma para el nivel de detalle N2 (**N2_Q_M_V_18sg** y **N2_Q_M_V_30sg**). En la Figura 26 se presenta la resolución vertical de las 3 configuraciones definidas para analizar la sensibilidad de los resultados del modelo a la resolución vertical (10, 18 y 30 capas sigma).

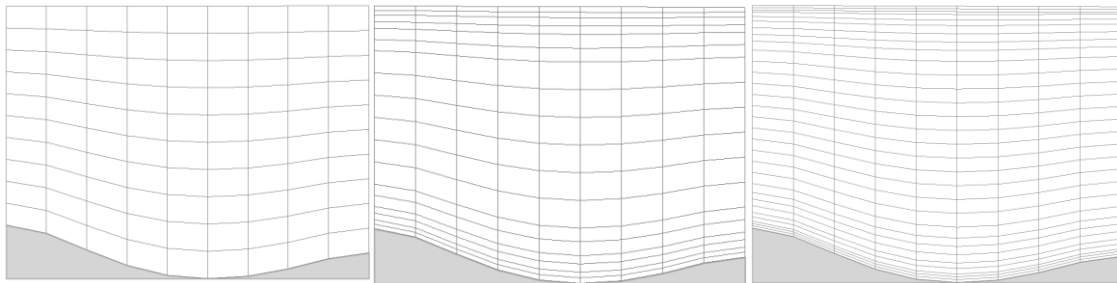


Figura 26: Malla vertical para las configuraciones definidas para el análisis de sensibilidad: 10 capas sigma (panel izquierdo), 18 capas sigma (panel intermedio) y 30 capas sigma (panel derecho).

Este análisis de sensibilidad se realiza simulando el año 2021. Los resultados se analizan comparando las series temporales obtenidas en AR y PT y los campos espaciales medios en el nivel *RPtide* para las 3 configuraciones y en el nivel N2 para las configuraciones con 18 y 30 sigma. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 27 a 32. Los resultados muestran que la salinidad obtenida con el modelo es relativamente sensible a la discretización vertical (en este caso en coordenadas tipo sigma), mostrando variaciones mayores al pasar de 10 capas a 18 capas, que al pasar de 18 a 30 capas. Esto podría deberse tanto al incremento en el número de capas como al mayor detalle en las zonas cercanas a las interfases. Analizando los eventos de incremento de salinidad en AR, nuevamente se observan mayores picos de salinidad a medida que se incrementa la resolución, lo que significa que el modelo reproduce mayor transporte de salinidad al incrementar la resolución. Esto es razonable si consideramos el efecto del transporte diferencial entre las capas de fondo y superficie, producto de la circulación gravitacional estuarina y del efecto del viento. No obstante, el efecto de incrementar el número de capas tiene un impacto importante en los tiempos de cálculo del modelo. Por otra parte, al incrementar la resolución vertical, la salinidad obtenida con el modelo muestra mayores gradientes de salinidad en los perfiles verticales de salinidad en condiciones de estratificación (Figura 28).

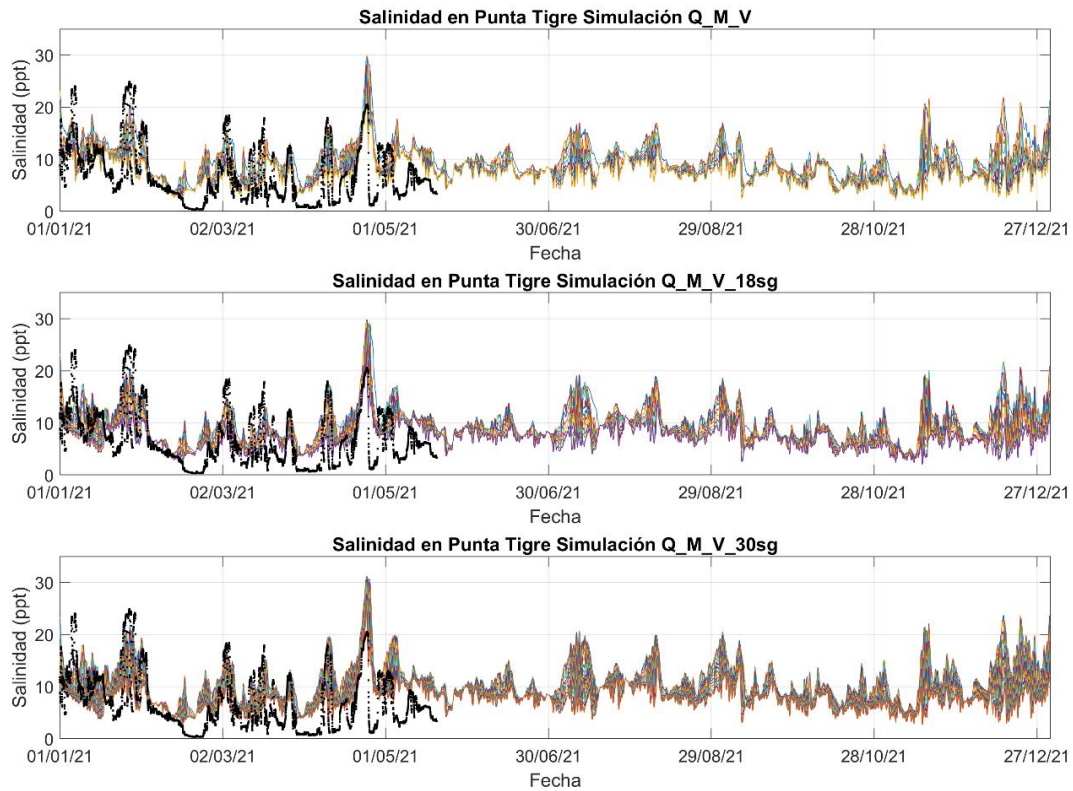


Figura 27: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial vertical (dominio RPtide 10, 18 y 30 capas tipo sigma): series temporales para el año 2021 en PT.

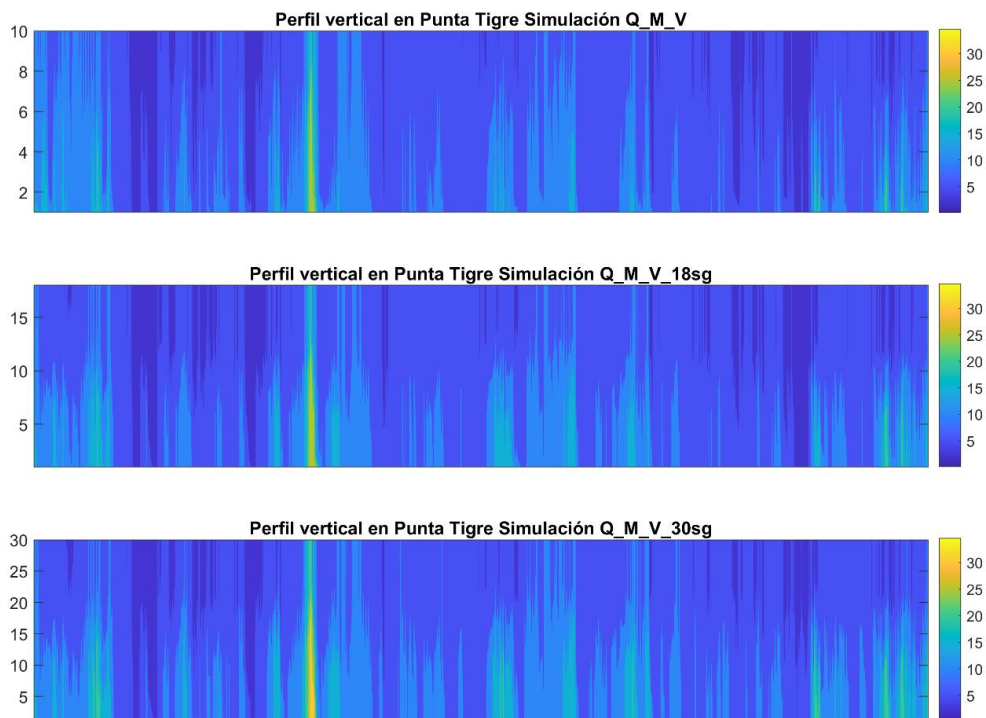


Figura 28: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial vertical (dominio RPtide 10, 18 y 30 capas tipo sigma): perfiles verticales para el año 2021 en PT.

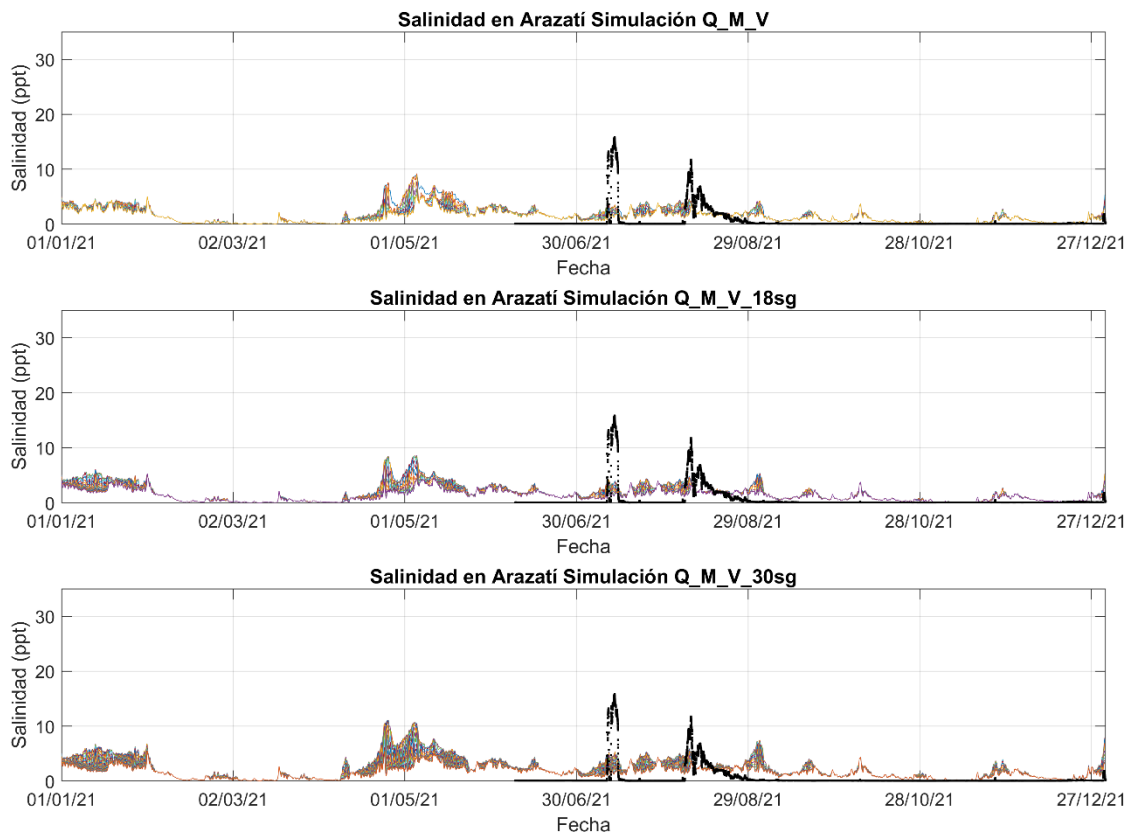


Figura 29: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial vertical (dominio RPtide 10, 18 y 30 capas tipo sigma): series temporales para el año 2021 en AR.

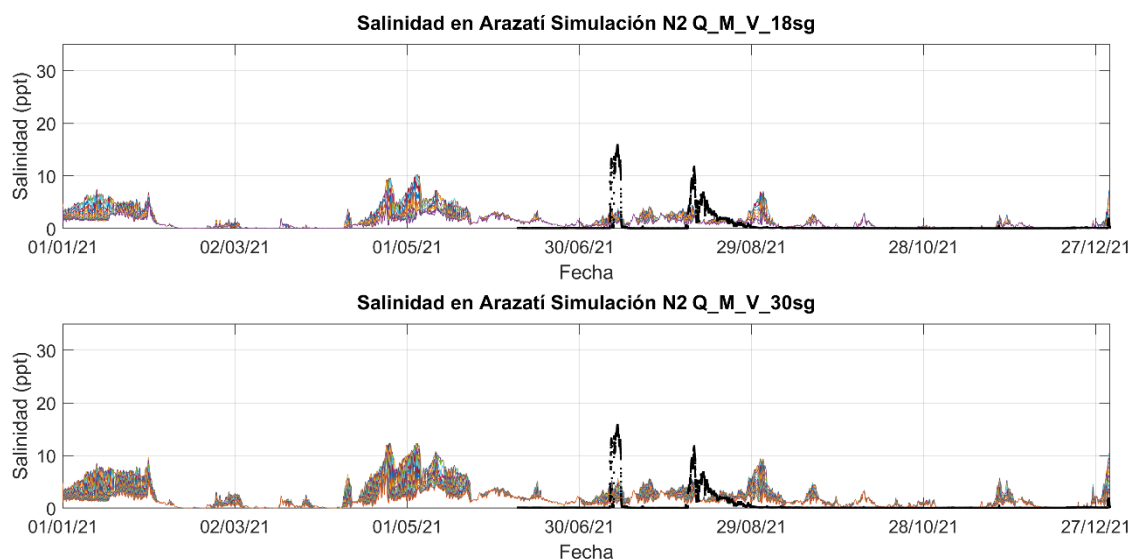


Figura 30: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial vertical (dominio N2 18 y 30 capas tipo sigma): series temporales para el año 2021 en AR.

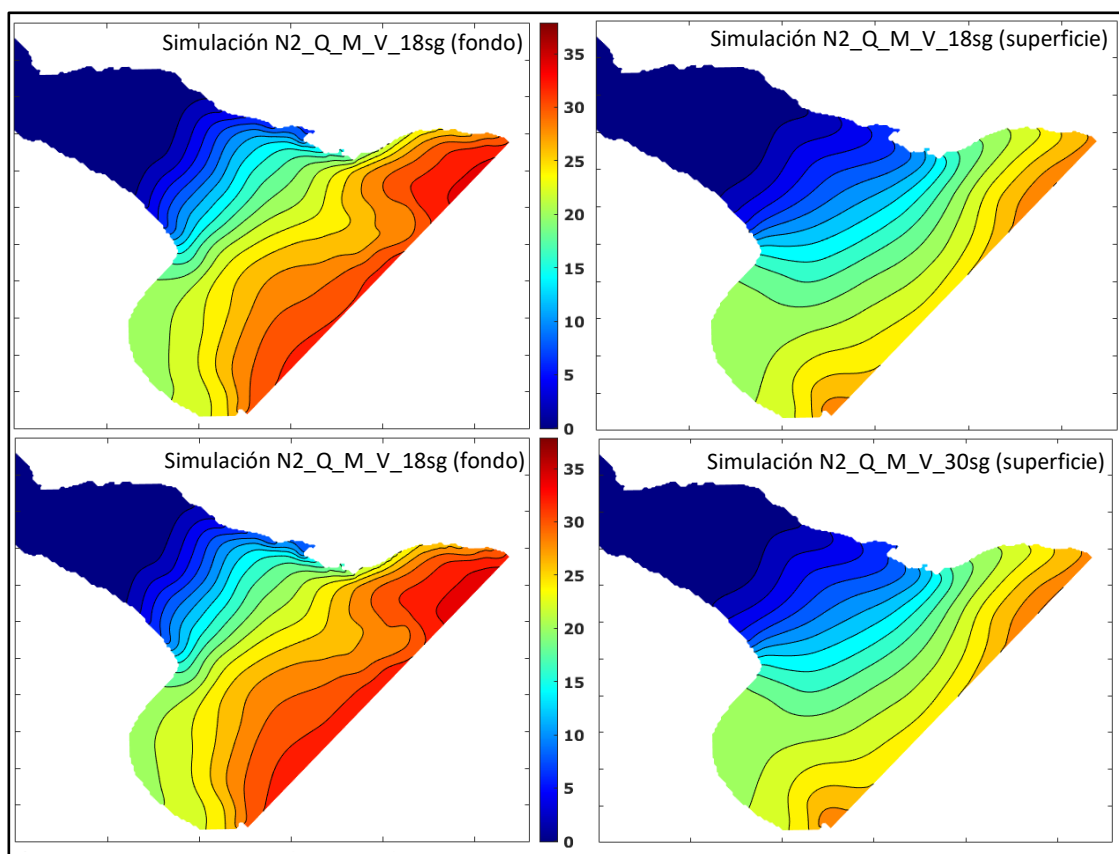


Figura 31: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial vertical (dominio N2 18 y 30 capas tipo sigma): campos medios espaciales en fondo (paneles izquierdos) y superficie (paneles derechos) para la simulación con 18 capas verticales sigma (paneles superiores) y con 30 capas verticales sigma (paneles inferiores), para el año 2021.

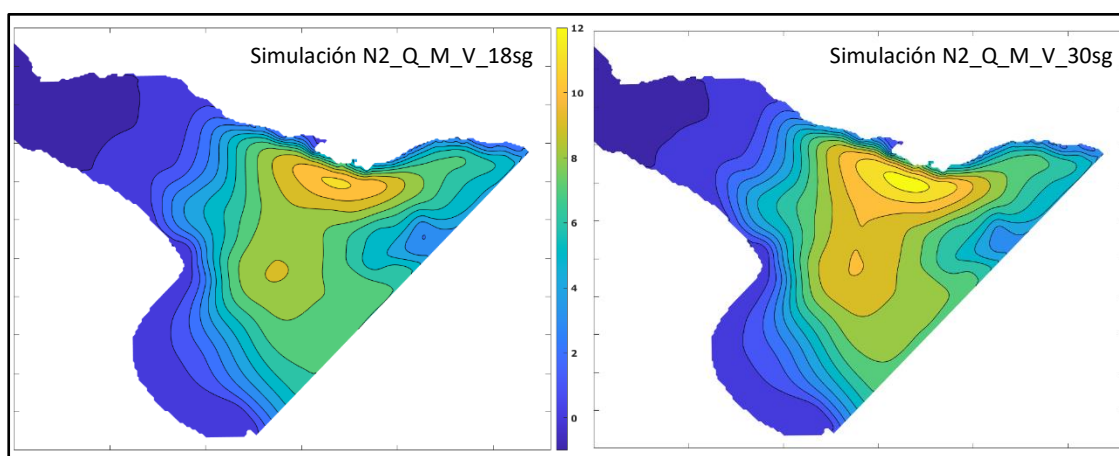


Figura 32: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la resolución espacial vertical (dominio N2 18 y 30 capas tipo sigma): campo medio espacial de estratificación vertical para la simulación con 18 capas verticales sigma (panel izquierdo) y con 30 capas verticales sigma (panel derecho), para el año 2021.

7.6 Sensibilidad al origen del forzante atmosférico.

Se realiza un análisis de sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo al origen de los datos utilizados para el forzante atmosférico. Como se mencionó anteriormente, para forzar el modelo se utilizan datos de reanálisis del ERA5 del ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) (Dee et al., 2011) de 0,25° de resolución espacial y 1 hora de resolución temporal. La calidad de los datos de vientos del reanálisis para representar los vientos medidos en el área de interés se evalúa comparando con datos medidos en PN y GS, como se presentó al inicio de esta sección. En términos globales, el reanálisis ERA5 representa correctamente la variabilidad temporal y espacial de los vientos en el Río de la Plata y Frente Marítimo, subestimando en algunos casos los eventos extremos.

Por otra parte, el modelo puede ser forzado con datos medidos. Para esto se cuenta con información medida en el Río de la Plata en dos estaciones no costeras, la boya de Gas Sayago que estuvo fondeada unos años (2014 a 2016) y las mediciones en Pilote Norden que realiza la CARP y que están disponibles actualmente. Estas dos series de datos de vientos se encuentran relativamente cerca al sitio de interés (ver ubicación en la Figura 1), pudiendo ser utilizadas como información representativa del área y por tanto para forzar el modelo hidrodinámico en el nivel de detalle N2.

Se definen así la simulación **N2_VGS** cuyo forzante es el viento medido en la boya de Gas Sayago en el dominio N2, y la simulación **N2_VPN** cuyo forzante es el viento medido en el Pilote Norden en el dominio N2. Ambas simulaciones se realizan para el año 2016 aunque en el caso de N2_VGS solo hasta setiembre, que es hasta cuando se cuenta con datos medidos. Comparando los resultados del nivel N2 de dichas simulaciones entre ellas y con la simulación **Q_M_V** es posible analizar el efecto del dato de viento sobre la salinidad en la zona de interés (Figuras 33 a 34).

Los resultados obtenidos muestran una leve sensibilidad de la salinidad modelada según el origen del dato de viento. Las series temporales obtenidas con el modelo en GS y en PT muestran resultados similares entre las 3 simulaciones, en general reproduciendo los mismos eventos de incremento y descenso de salinidad en los 3 casos. Estos resultados muestran que, aunque en ciertos eventos subestima los vientos medidos el reanálisis ERA5, los resultados de salinidad del modelo son muy similares al utilizar tanto datos medidos como los del reanálisis. Esto ratifica el uso del reanálisis ERA5 como forzante del modelo numérico en el nivel de detalle N2, con la ventaja además de la disponibilidad temporal de datos y la consideración de la variabilidad espacial de los vientos.

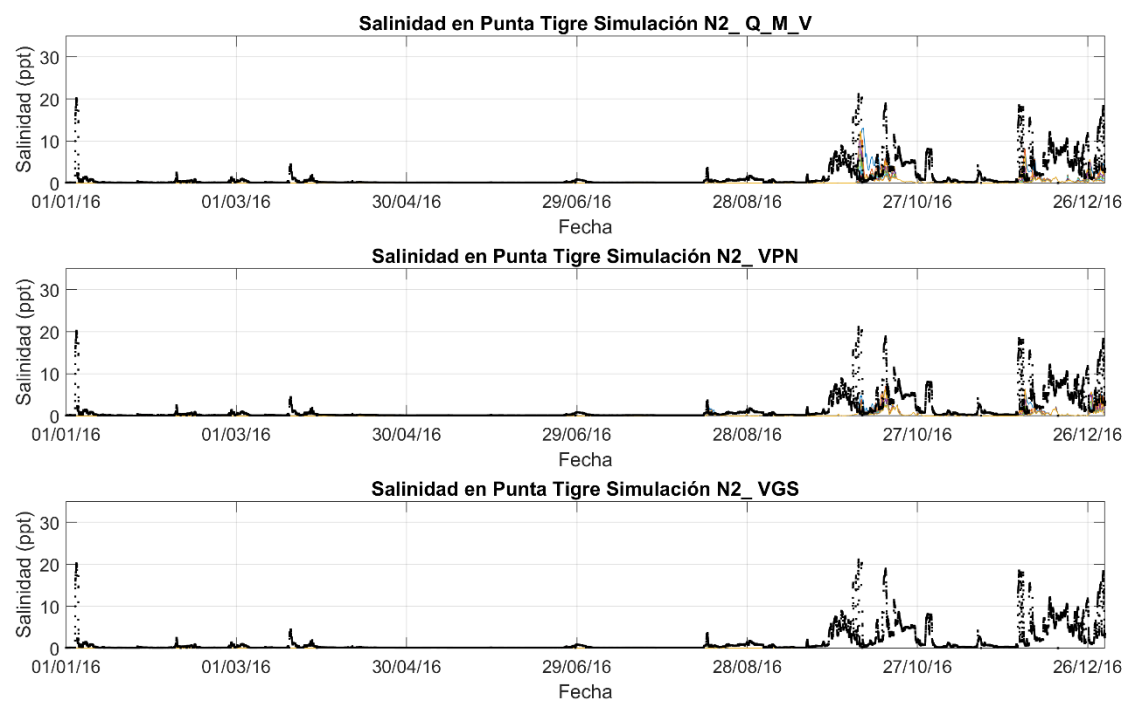


Figura 33: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo al origen del forzante viento (reanálisis ERA5, vientos medidos en Pilote Norden y viento medido en GS): series temporales para el año 2016 en PT.

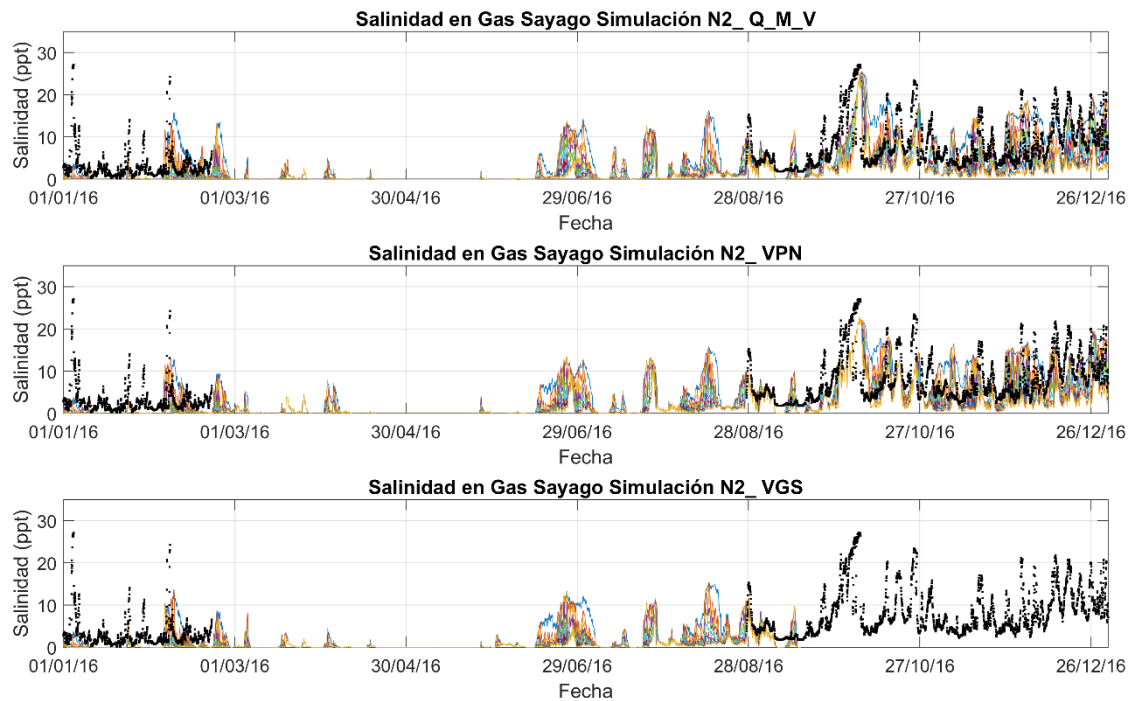


Figura 34: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo al origen del forzante viento (reanálisis ERA5, vientos medidos en Pilote Norden y viento medido en GS): series temporales para el año 2016 en GS.

7.7 Sensibilidad a la tensión superficial del viento

Se realiza un análisis de sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la parametrización utilizada por el modelo para representar la tensión de corte generada por el viento en la superficie libre. Este análisis se realiza con la versión del modelo que incluye información batimétrica actualizada para el área de interés y considerando 18 capas tipo sigma en la vertical. En general la parametrización de la tensión de corte superficial del viento es un parámetro de calibración de los modelos hidrodinámicos y por tanto es de esperar una alta sensibilidad de los resultados del modelo a la misma.

En el modelo numérico MOHID, y en modelos similares, se trabaja con dos opciones para parametrizar el efecto del viento, una formulación que trabaja con un coeficiente de arrastre que depende de un parámetro C_d , y una formulación donde el coeficiente varía según la intensidad del viento. Para este último caso el MOHID considera la formulación de Large and Pond (Large and Pond, 1981) que es la parametrización seleccionada para el modelo *RPtide*. Para el análisis de sensibilidad se realiza una simulación con la parametrización dependiente de la intensidad del viento actualmente (con la nueva batimetría y resolución vertical) denominada **Bat_Q_M_V_18sg_W0**, y dos simulaciones considerando el coeficiente constante C_d con dos valores distintos: $C_d=0,02$ (denominada **Bat_Q_M_V_18sg_W1**) y $C_d=0,06$ (denominada **Bat_Q_M_V_18sg_W2**). Se simula el año 2021.

En las Figuras 35 a 39 se presentan los resultados obtenidos; las series temporales en PT y en AR en 2021 y los campos promedio anuales para el año 2021. Como es de esperar, se observa una alta sensibilidad de los valores de salinidad modelados con la tensión de corte superficial del viento. Al comparar la parametrización según la intensidad del viento con la parametrización constante (**Bat_Q_M_V_18sg_W0** con **Bat_Q_M_V_18sg_W1**) se observa un incremento de los picos de salinidad en los eventos con condiciones de estratificación similares entre una y otra simulación. Sin embargo, al analizar solamente el efecto del incremento en el parámetro de tensión C_d se observa un incremento en los picos de salinidad y mayor variabilidad, pero también mayor mezcla vertical y por tanto disminuye la estratificación vertical. La tensión de corte superficial del viento y la parametrización tiene un gran impacto en la variabilidad temporal y espacial del campo salino, y por tanto debe ser un parámetro de calibración.

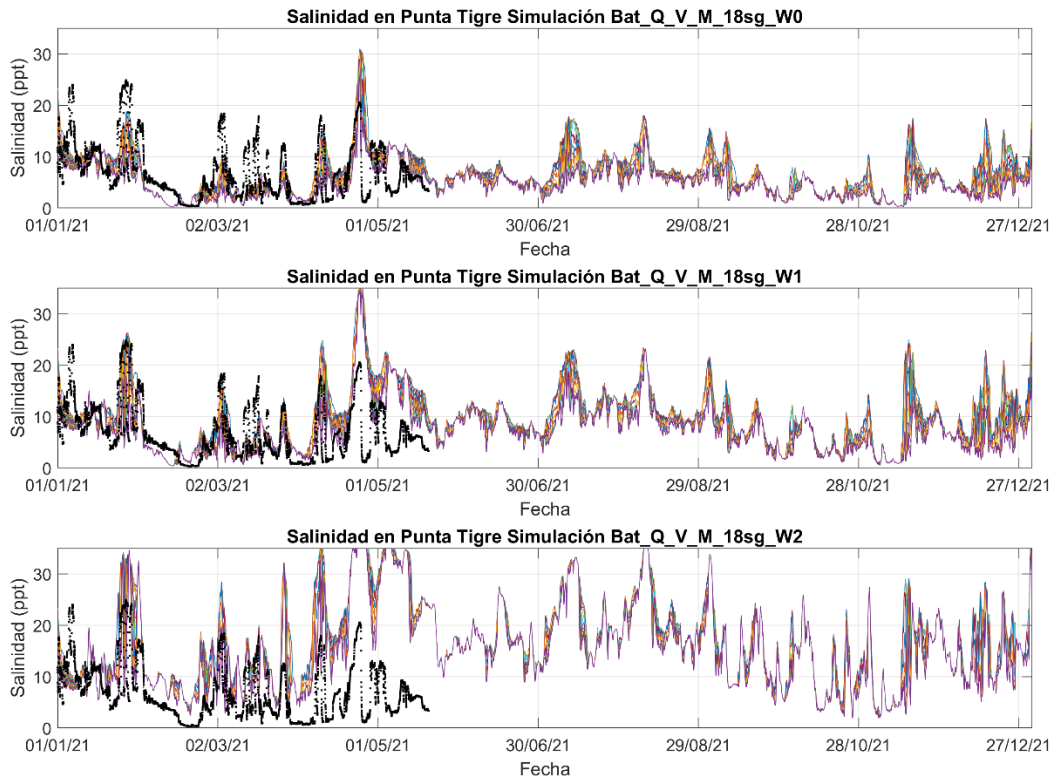


Figura 35: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la parametrización de la tensión superficial del viento (dependiente de la intensidad del viento, constante con $C_d=0,02$ y constante con $C_d=0,06$): series temporales para el año 2021 en PT.

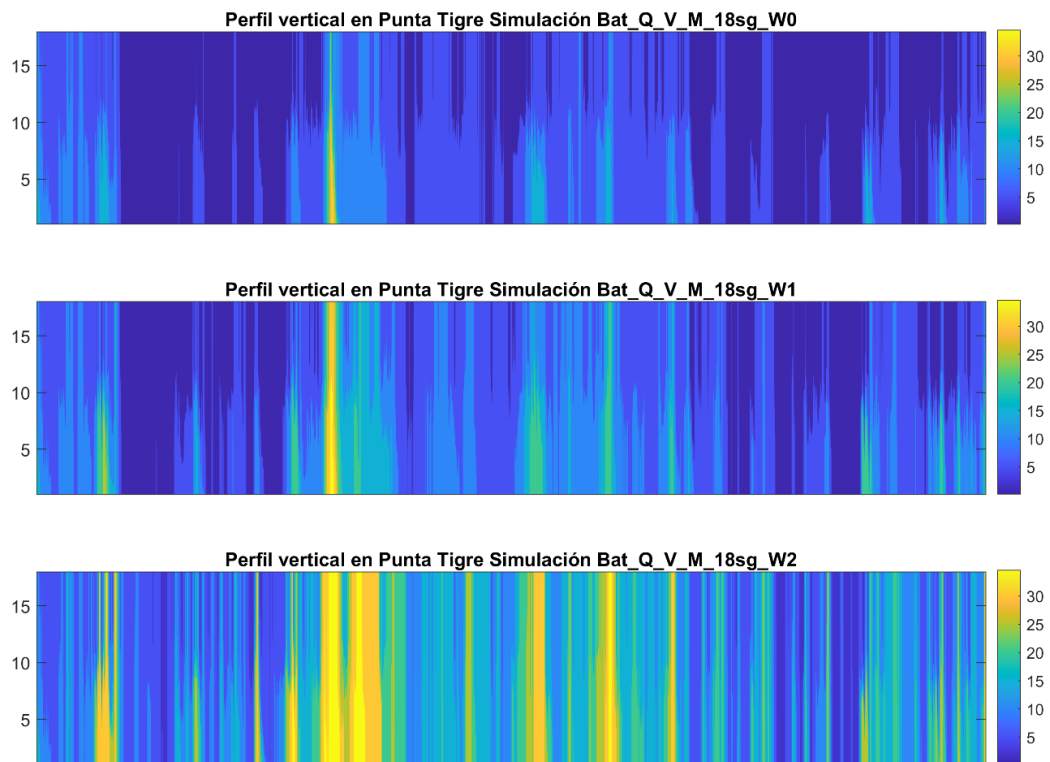


Figura 36: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la parametrización de la tensión superficial del viento (dependiente de la intensidad del viento, constante con $C_d=0,02$ y constante con $C_d=0,06$): perfiles verticales para el año 2021 en PT.

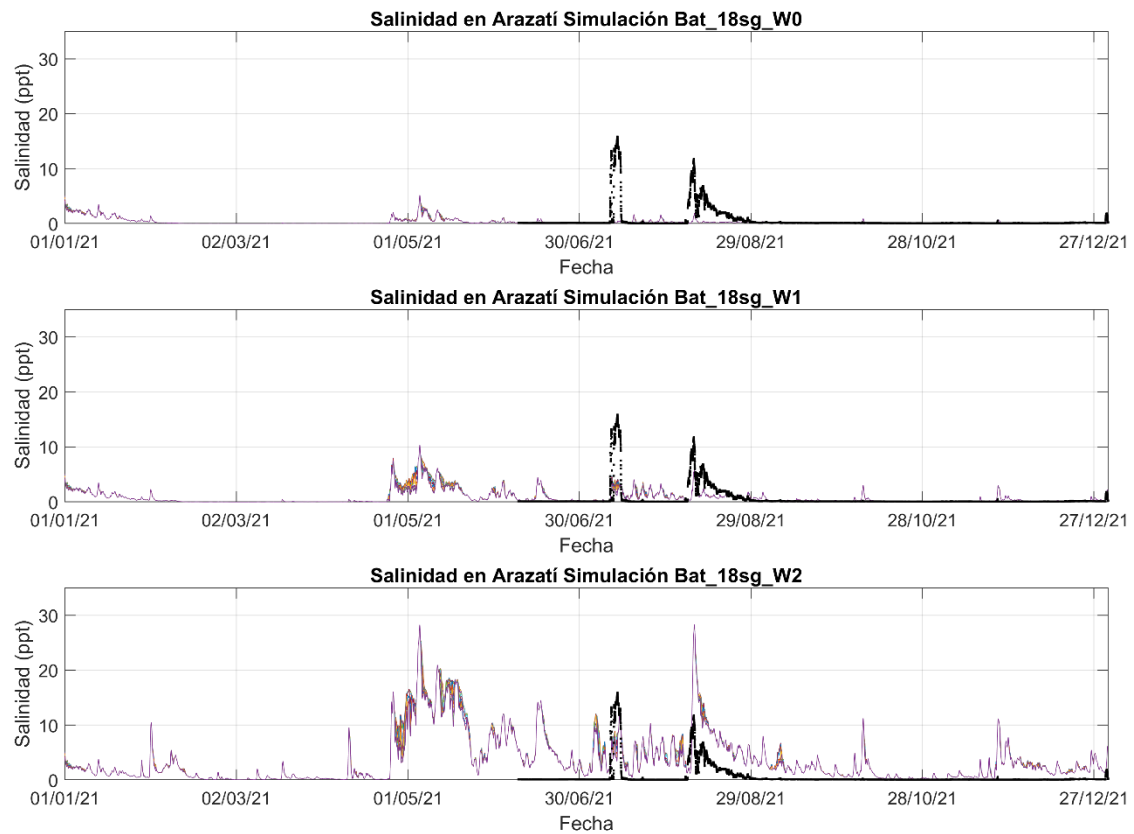


Figura 37: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la parametrización de la tensión superficial del viento (dependiente de la intensidad del viento, constante con $C_d=0,02$ y constante con $C_d=0,06$): series temporales para el año 2021 en AR.

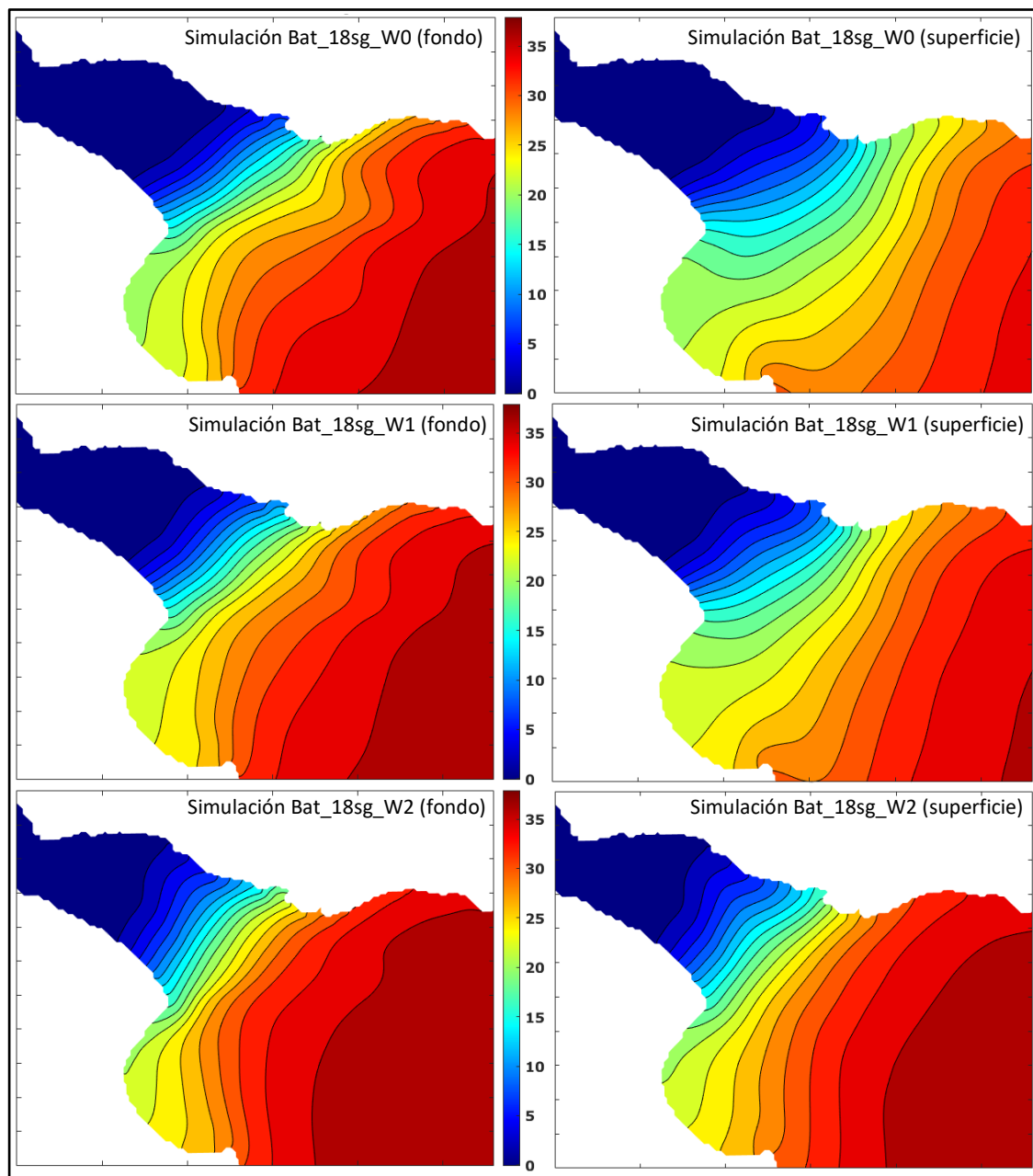


Figura 38: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la parametrización de la tensión superficial del viento (dependiente de la intensidad del viento, constante con $C_d=0,02$ y constante con $C_d=0,06$): campos medios espaciales en fondo (paneles izquierdos) y superficie (paneles derechos) para la simulación Bat_Q_M_V_18sg_W0 (paneles superiores), para la simulación Bat_Q_M_V_18sg_W1 (paneles intermedios) y para la simulación Bat_Q_M_V_18sg_W2 (paneles inferiores); para el año 2021.

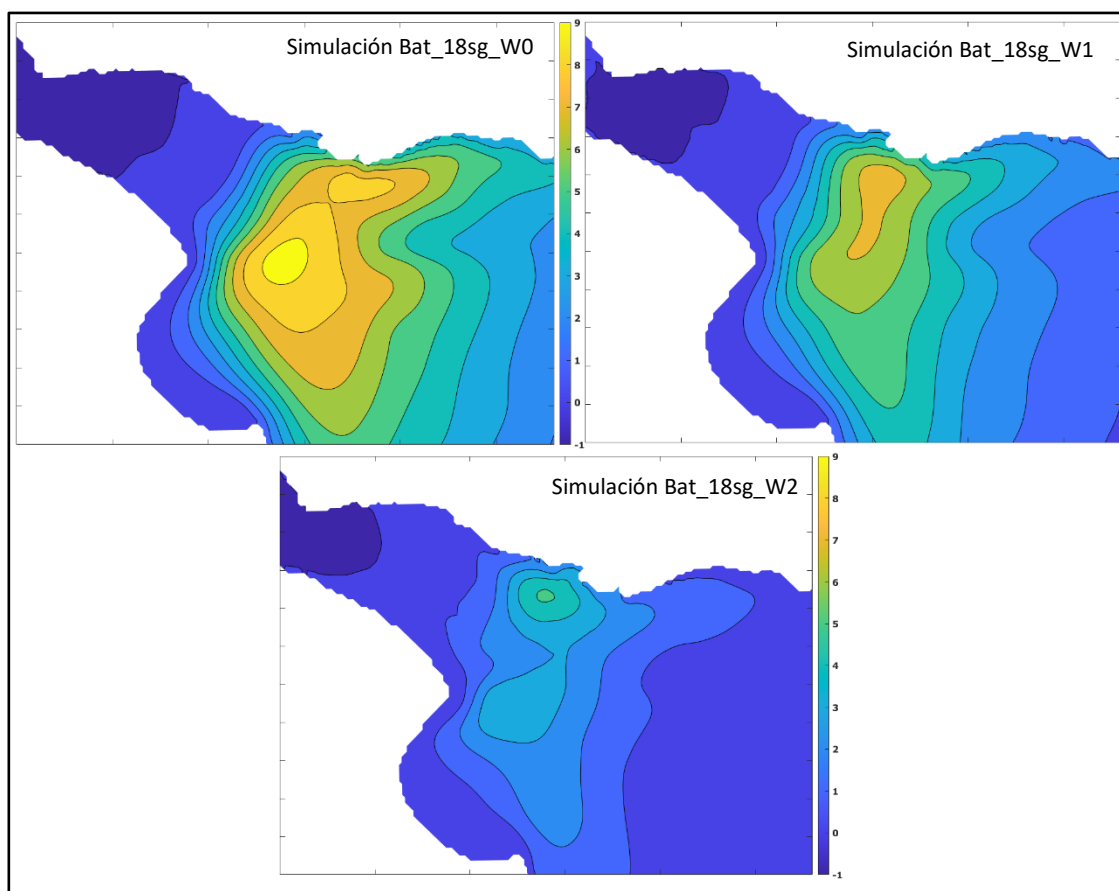


Figura 39: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la parametrización de la tensión superficial del viento (dependiente de la intensidad del viento, constante con $C_d=0,02$ y constante con $C_d=0,06$): campo medio espacial de estratificación vertical para la simulación Bat_Q_M_V_18sg_W0 (panel izquierdo), Bat_Q_M_V_18sg_W1 (panel derecho) y Bat_Q_M_V_18sg_W2 (panel inferior); para el año 2021.

7.8 Sensibilidad a la difusión turbulenta horizontal

Se realiza un análisis de sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la difusión turbulenta horizontal parametrizada según el número de Schmidt, un parámetro adimensional que relaciona la viscosidad turbulenta horizontal con la difusión turbulenta horizontal. Si el mismo es igual a 1 indica que ambos son iguales y por tanto para la salinidad se utiliza igual difusión que para la hidrodinámica calculada según la formulación de Smagorinsky. En trabajos anteriores con el MOHID se ha considerado el número de Schmidt como parámetro de calibración debido a la gran influencia que tiene sobre el proceso de difusión de sustancias y por tanto en la mezcla y transporte de la salinidad.

Se parte de la configuración del *Rptide* que toma un número Schmidt de 0,2 (simulación denominada **Bat_18sg_D1**) y se realiza una sensibilidad al mismo definiendo una simulación con valor igual a 1 propuesto por defecto por el modelo (simulación denominada **Bat_18sg_D2**); se simula el año 2021. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 40 a 44.

Los resultados muestran una gran sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la difusión turbulenta horizontal. Se observa que para mayores valores del N° de Schmidt la difusión disminuye y por tanto el transporte de salinidad disminuye y en las series de PT y AR se

observa una disminución de los valores de salinidad tanto de base como de los picos del evento. En cuanto a la estratificación hay variaciones con la difusión horizontal observándose en general una leve disminución de la estratificación (una mayor mezcla vertical) con mayor valor del N° de Schmidt.

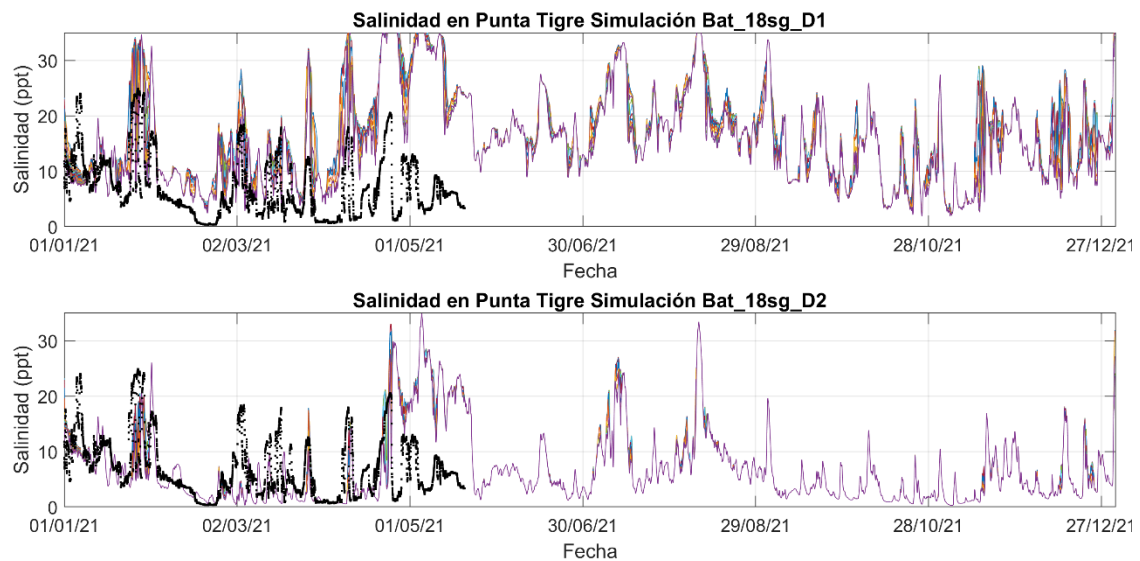


Figura 40: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la difusión turbulenta horizontal (según N° Schmidt tomando 0,2 y 1): series temporales para el año 2021 en PT.

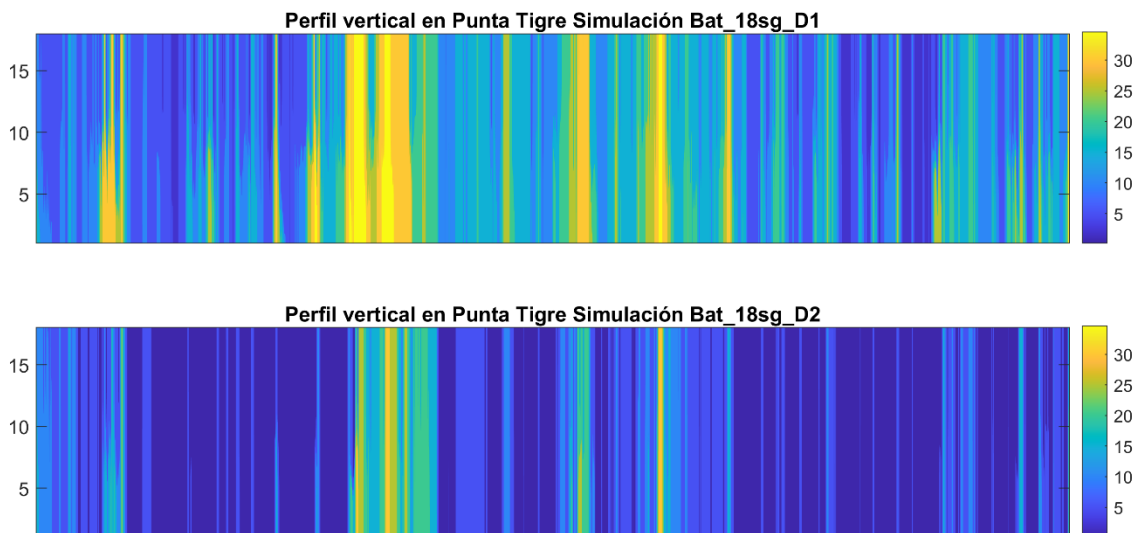


Figura 41: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la difusión turbulenta horizontal (según N° Schmidt tomando 0,2 y 1): perfiles verticales para el año 2021 en PT.

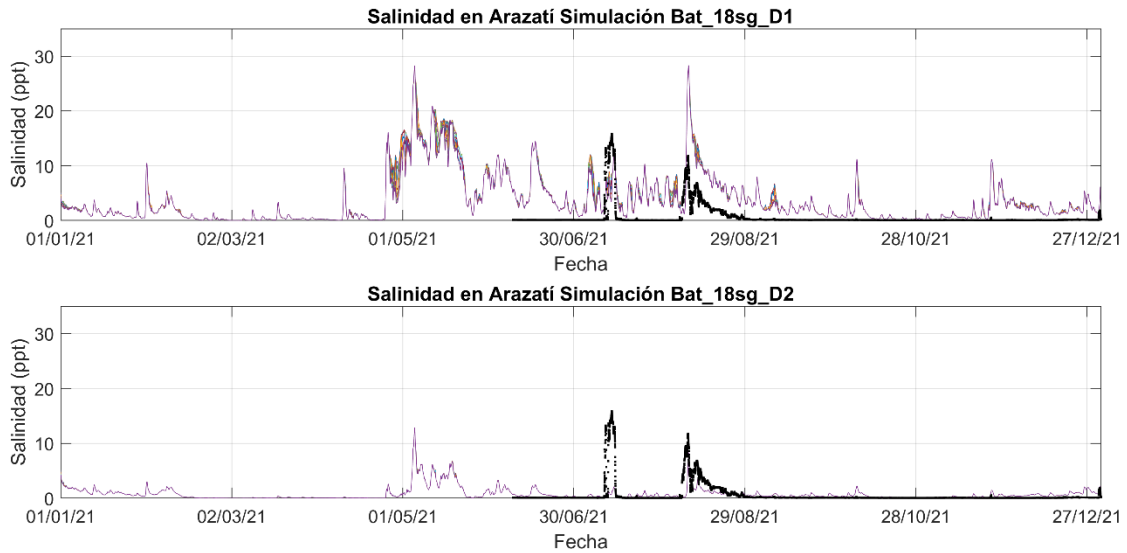


Figura 42: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la difusión turbulenta horizontal (según N° Schmidt tomando 0,2 y 1): series temporales para el año 2021 en AR.

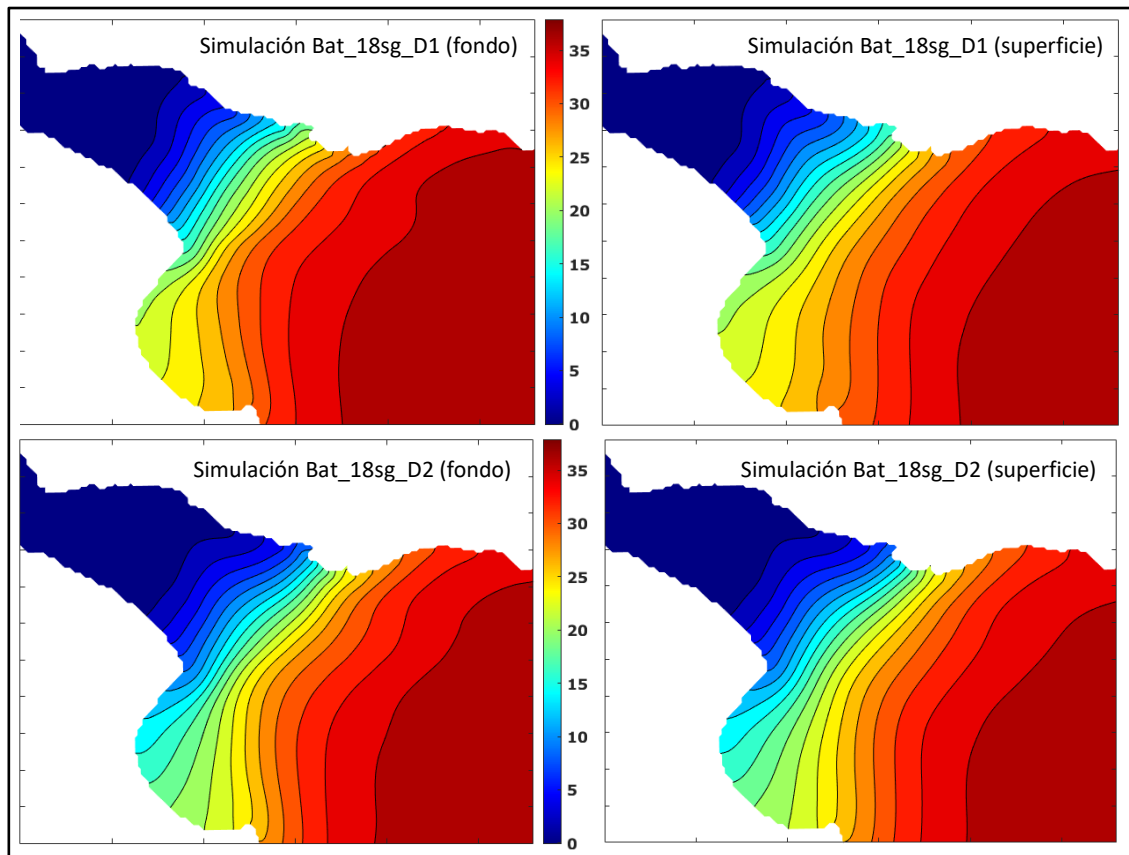


Figura 43: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la difusión turbulenta horizontal (según N° Schmidt tomando 0,2 y 1): campos medios espaciales en fondo (paneles izquierdos) y superficie (paneles derechos) para la simulación Bat_18sg_D1 (paneles superiores) y para la simulación Bat_18sg_D2 (paneles inferiores); para el año 2021.

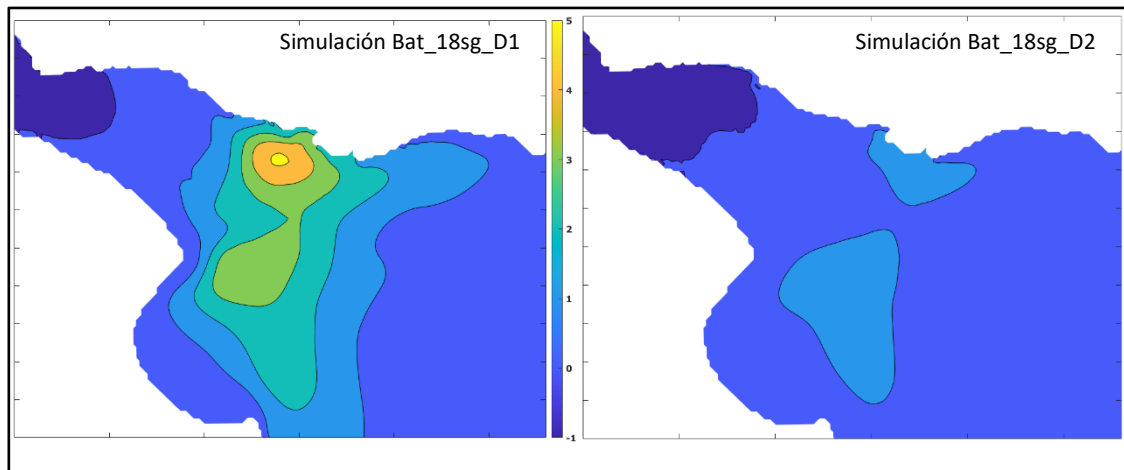


Figura 44: Sensibilidad de la salinidad obtenida con el modelo a la difusión turbulenta horizontal (según N° Schmidt tomando 0,2 y 1): campo medio espacial de estratificación vertical para la simulación Bat_18sg_D1 (panel izquierdo) y para la simulación Bat_18sg_D2 (panel derecho); para el año 2021.

7.9 Síntesis

Durante la etapa de implementación de la configuración *RPSal* del modelo MOHID, que tiene como objetivo representar correctamente la dinámica de la salinidad en la zona de Arazatí y alrededores, se realizaron varios ajustes respecto al a configuración de partida *RPtide* y se realizaron varios análisis de sensibilidad.

De este análisis surge que la salinidad calculada por el modelo es muy sensible a cada uno de los forzantes hidrodinámicos del modelo (caudal fluvial, mareas y vientos), a la parametrización de la tensión superficial del viento sobre la superficie libre, y a la difusión horizontal del modelo. Por otra parte, los resultados obtenidos son sensibles a la resolución horizontal y a la resolución vertical del modelo. Respecto al origen del viento utilizado en el nivel de detalle N2 del modelo, se encontró una baja sensibilidad en la medida que el viento de reanálisis se verificó que representa correctamente la mayor variabilidad de los vientos en la zona, aunque subestima los vientos de mayor intensidad hacia la zona interior del Río de la Plata (cercana a Pilote Norden). Se realizaron una serie adicional de análisis de sensibilidad al modelo vinculados a la condición de borde oceánica de salinidad y otros parámetros del modelo, pero no se encontraron impactos significativos en la zona de interés y por tanto no se presentan en el informe.

7.10 Configuración *RPSal*

Considerando los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad, se definen las siguientes características para la configuración *RPSal* y se pasa a la etapa de calibración y validación.

- Incorporar la batimetría actualizada.
- Considerar todos los forzantes.
- Resolución vertical de 18 capas sigma.
- Trabajar con dos niveles de modelos anidados: dominio global de Río de la Plata y Frente Marítimo y nivel de detalle N2.
- Utilizar datos de vientos del reanálisis ERA para forzar el modelo.
- Parámetros de calibración: parametrización de la tensión superficial del viento y difusión horizontal.

8 Calibración y validación modelo RPsal

8.1 Calibración

8.1.1 Metodología

Durante el proceso de calibración del modelo numérico de salinidad *RPsal* se fueron definiendo una serie de simulaciones cambiando los dos parámetros de calibración obtenidos de la etapa de análisis de sensibilidad, la parametrización de la tensión superficial del viento y el coeficiente de difusión horizontal de salinidad del modelo. En la Tabla 5 se presentan los nombres y parámetros correspondientes de las 13 simulaciones de calibración que finalmente se realizaron. Se observa que se realizan simulaciones con $N^{\circ}Sch$ que varía entre 0.2 y 1, y para el coeficiente de la tensión superficial del viento C_d se tomaron variaciones entre 0.002 y 0.1, considerando también la formulación de tensión de viento variable (descrita en el capítulo 6 de este informe).

Tabla 5: Características de las 13 simulaciones realizadas para la calibración del modelo *RPsal*: nombre y parámetros (tensión superficial del viento y difusión horizontal).

Simulaciones		Difusión horizontal ($N^{\circ}Sch$)			
		0,2	0,4	0,6	1
Tensión superficial viento	variable	SimCal1			
	0,002	SimCal2	SimCal5		SimCal10
	0,004	SimCal3	SimCal6	SimCal8	SimCal11
	0,005		SimCal7	SimCal9	
	0,006	SimCal4			SimCal12
	0,01				SimCal13

Considerando los altos tiempos de cálculo que requieren las simulaciones con los dos niveles de modelos encajados, se define realizar la calibración en el nivel *RPtide* y posteriormente en la etapa de validación se trabaja en el nivel N2. Respecto a la discretización vertical se trabaja con las 18 capas tipo sigma con espesor variable según lo descrito en el Capítulo 6. Teniendo en cuenta la disponibilidad de mediciones se utiliza el año 2021 como período de calibración del modelo, para el cual se cuenta con datos de salinidad medidos en Arazatí (julio a diciembre) y en Punta Tigre (enero a mayo). La información de las series de medición continua de salinidad disponibles se presentó en la Tabla 1. Para ser analizados los resultados del modelo se extraen con una frecuencia horaria.

Para evaluar el modelo y seleccionar la configuración que mejor representa la dinámica del campo salino en el Río de la Plata y zona de Arazatí, se realiza por un lado un análisis cualitativo comparando gráficamente la variación temporal obtenida con el modelo con la variación temporal que muestran las mediciones, y por otra parte un análisis cuantitativo a partir de dos parámetros. Por un lado se trabaja con el error medio cuadrático (según la Ecuación 1 presentada anteriormente) entre la salinidad medida y obtenida con el modelo en los puntos de medición AR y PT, y por otro lado se evalúa cómo el modelo representa eventos de salinidad que superan un determinado umbral según definiciones presentadas en la Tabla 6. Para ambos cálculos se trabaja con los datos medidos interpolados a la frecuencia horaria de resultados del modelo.

Tabla 6: Descripción de los parámetros definidos para analizar la representación del modelo de eventos de salinidad por encima de un umbral. Se realizan los cálculos para un determinado período de tiempo considerando los datos medidos interpolados a la frecuencia horaria del modelo y por tanto ambas series tienen la misma cantidad total de datos.

PARAMETRO	DESCRIPCIÓN
UMB	Umbral de salinidad definido.
Tot_Med	Número total de datos medidos.
$SupUMB_Med$	Número de datos medidos que superan el umbral.
$NOSupUMB_Med$	Número de datos medidos que NO superan el umbral.
$\%SupUMB_{Med} = \frac{SupUMB_Med}{Tot_Med}$	Porcentaje de datos medidos que superan el umbral.
$SupUMB_Mod$	Número de datos del modelo que superan el umbral.
$\%SupUMB_{Mod} = \frac{SupUMB_Mod}{Tot_Med}$	Porcentaje de datos del modelo que superan el umbral.
$SupUMB_Real$	Número de datos del modelo que superan el umbral correctamente (cuando los datos medidos también superan el umbral).
$\%SupUMB_{Real} = \frac{SupUMB_Real}{Tot_Med}$	Porcentaje de los datos medidos que superan el umbral que son correctamente representados por el modelo.
$SupUMB_Falso$	Número de datos del modelo que superan el umbral de manera incorrecta (cuando los datos medidos no superan el umbral).
$\%SupUMB_{Falso} = \frac{SupUMB_Falso}{NOSupUMB_Med}$	Número de datos del modelo que superan el umbral incorrectamente (cuando los datos medidos no superan el umbral).

Teniendo en cuenta que el modelo numérico trabaja con 18 capas verticales tipo sigma, y que la profundidad absoluta en cada punto del dominio varía según la dinámica de marea, para comparar los resultados con el modelo con una profundidad fija correspondiente al sensor del CTD fondeado se requiere calcular para cada instante la capa del modelo numérico representativa de la medición. De esta manera, se genera una serie de salinidad del modelo con el valor de salinidad de la capa representativa del modelo de la profundidad del sensor, que es la serie temporal que se compara con la serie medida. En la Figura 45 se muestra a modo de ejemplo la comparación de las capas del modelo con la profundidad de sensor para un período de aproximadamente 1,5 meses. Se observa para ese caso que el sensor se corresponde en algunos casos con la capa 4 y en otros con la capa 5, y por tanto se deben tomar los resultados de cada una de esas capas en los instantes correspondientes para comparar con los datos medidos.

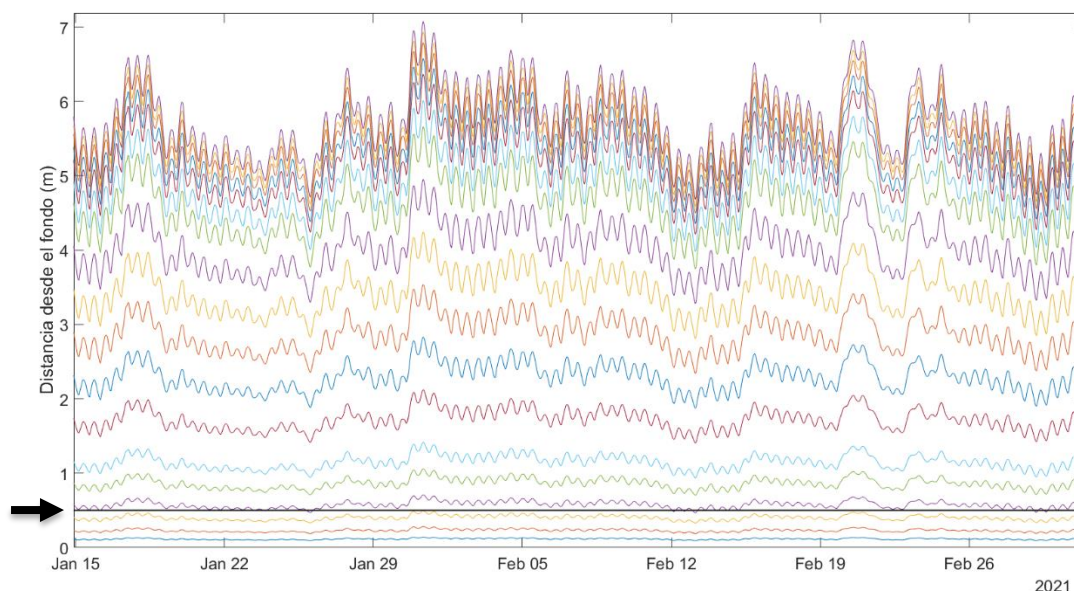


Figura 45: Ejemplo de comparación de la ubicación en la profundidad del sensor de salinidad del CTD de Arazatí a 0,5m del fondo (marcado con una flecha) con las capas verticales tipo sigma del modelo numérico (18 capas) cuya profundidad varía según la elevación de la superficie libre.

Debido al efecto que los dos parámetros de calibración tienen sobre las restantes variables hidrodinámicas (variación de la superficie libre y velocidades en todas las capas) es importante evaluar el comportamiento del modelo en relación a la correcta representación del nivel de mar y de las corrientes. Para esto se evalúan las 13 simulaciones con los niveles registrados por los mareógrafos de Colonia y Montevideo durante el año 2021, y con las corrientes en toda la columna de agua medidas por los ADCPs fondeados en Arazatí y en Punta Tigre según los detalles descriptos en la Tabla 2. La variación del nivel de mar se evalúa considerando el error medio cuadrático (RMSE) entre los valores de nivel horario medidos y obtenidos con el modelo. La evaluación de la calidad de las simulaciones en la representación de las corrientes se realiza comparando el perfil promedio en la vertical de las corrientes medidas por el perfilador acústico en las capas para las cuales durante todo el período de medición hay registros con el perfil promedio en la vertical obtenido con el modelo para las mismas profundidades. Para el caso de Arazatí esto corresponde a las profundidades entre 0,84 m y 4,44 m y para Punta Tigre a las profundidades entre 0,85 m y 2,65 m. La comparación de las corrientes promedio en vertical se realiza tanto en intensidad como en dirección, calculando el RMSE para evaluar la representación del modelo de la intensidad y con gráficos representando la variación espacial de las corrientes para evaluar las direcciones de flujo. Por más información de las mediciones realizadas con equipos fondeados consultar los informes correspondientes (IMFIA, 2021 e IMFIA, 2023).

Las simulaciones de calibración fueron realizadas en el Centro Nacional de Supercomputación de Uruguay Clusteruy utilizando 16 cores consumiendo para un año de simulación aproximadamente 1000 horas de computo de CPU en un tiempo real de aproximadamente 75 horas, lo que totaliza para las 13 simulaciones del orden de 13.000,0 horas de cómputo y 1000 horas de tiempo real.

8.1.2 Resultados obtenidos

Salinidad en Arazatí

En la Figura 46 se presentan superpuestas las series de salinidad obtenidas con el modelo para las 13 simulaciones definidas para la calibración junto con los datos medidos en Arazatí. A grandes rasgos se observa una gran variabilidad en los resultados del modelo al variar los principales parámetros. La comparación en detalle de la serie de salinidad obtenida para cada simulación con las medidas para el período simulado de 2021 en Arazatí se presenta en las Figuras 47 a 50. El error medio cuadrático correspondiente se presenta en la Tabla 7.

Los resultados muestran que, con las SimCal1, SimCal5, SimCal8, SimCal10 y SimCal11 se obtienen con el modelo valores de salinidad claramente bajos, que no representan los eventos de salinidad que muestran los datos. Por otra parte, los valores de salinidad obtenidos con el modelo en las SimCal3, SimCal4 y SimCal13 son altos en relación a las medidas, tanto en situaciones donde las medidas registran eventos de salinidad como cuando las medidas registran salinidades nulas. En cambio, las restantes simulaciones (SimCal2, SimCal6, SimCal7, SimCal9 y SimCal12) muestran valores de salinidad cercanos a los medidos, tanto durante los eventos como en los períodos de salinidad nula. Entre estas últimas se destacan las SimCal6 y la SimCal7 que representan correctamente el evento de alta salinidad registrado en agosto 2021. Analizando el RMSE se observa que se obtienen los menores errores para la SimCal2 y la SimCal6, y errores razonables para la SimCal7, SimCal9 y SimCal12.

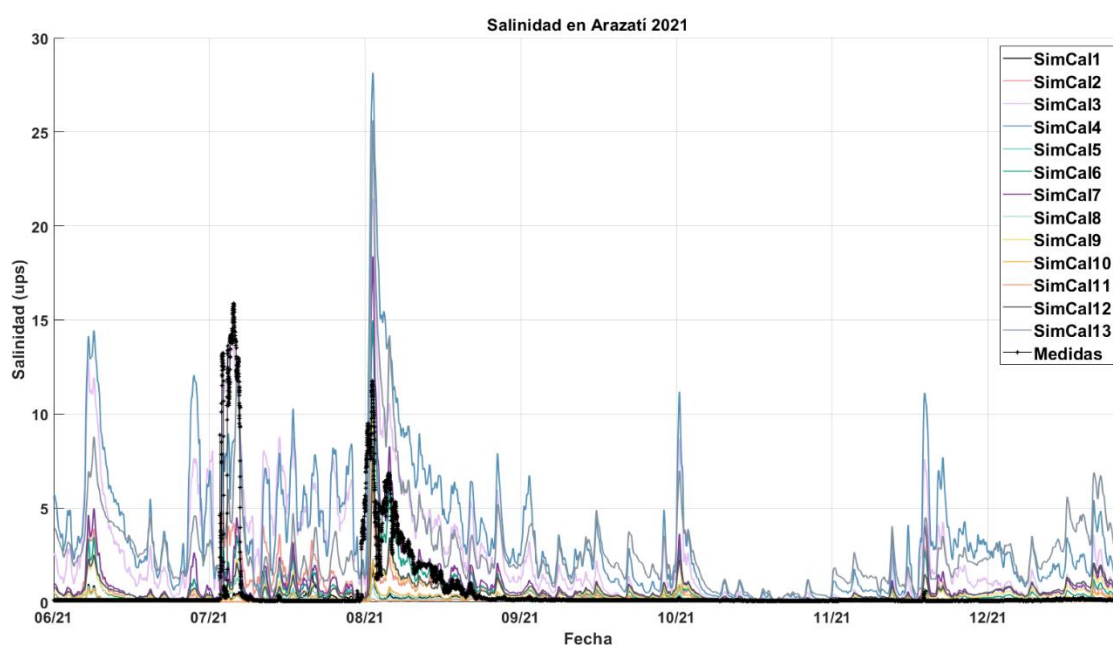


Figura 46: Series temporales de salinidad obtenidas con el modelo para todas las simulaciones de calibración y su comparación con los datos medidos en Arazatí para el período de calibración 2021.

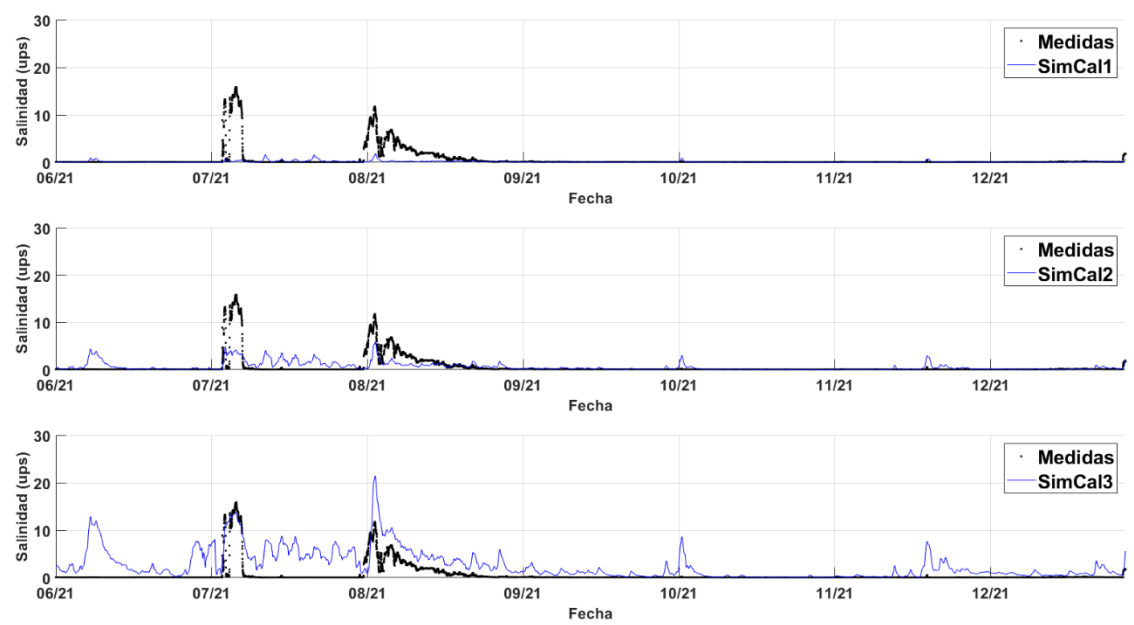


Figura 47: Comparación de la salinidad obtenida con el modelo para las simulaciones de calibración SimCal1, SimCal2 y SimCal3 con las medidas de salinidad en Arazatí para 2021.

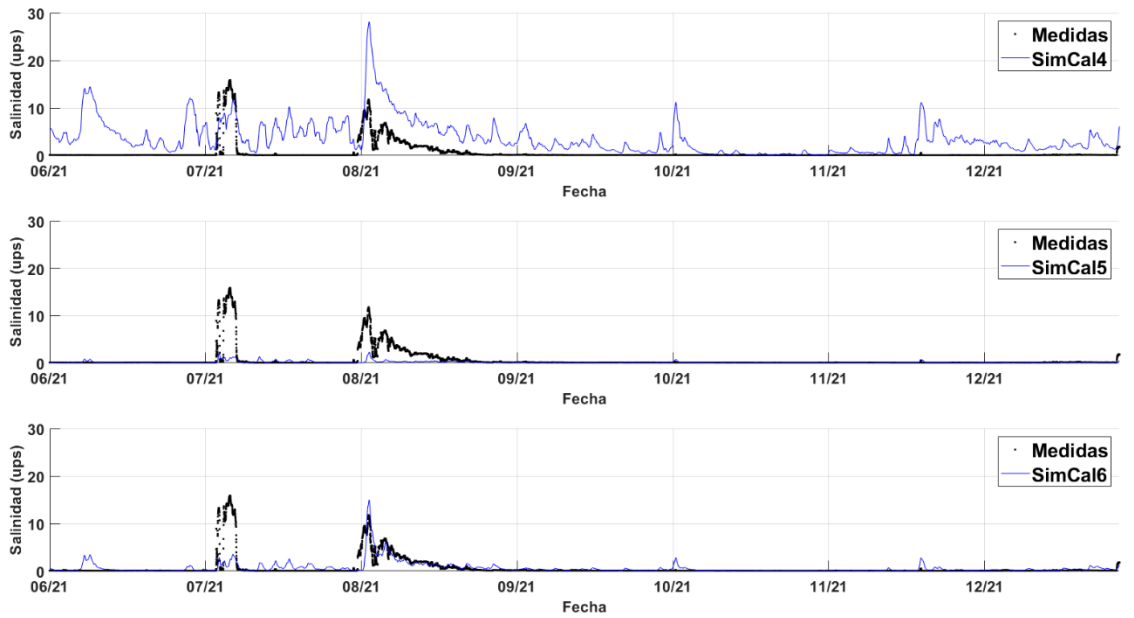


Figura 48: Comparación de la salinidad obtenida con el modelo para las simulaciones de calibración SimCal4, SimCal5 y SimCal6 con las medidas de salinidad en Arazatí para 2021.

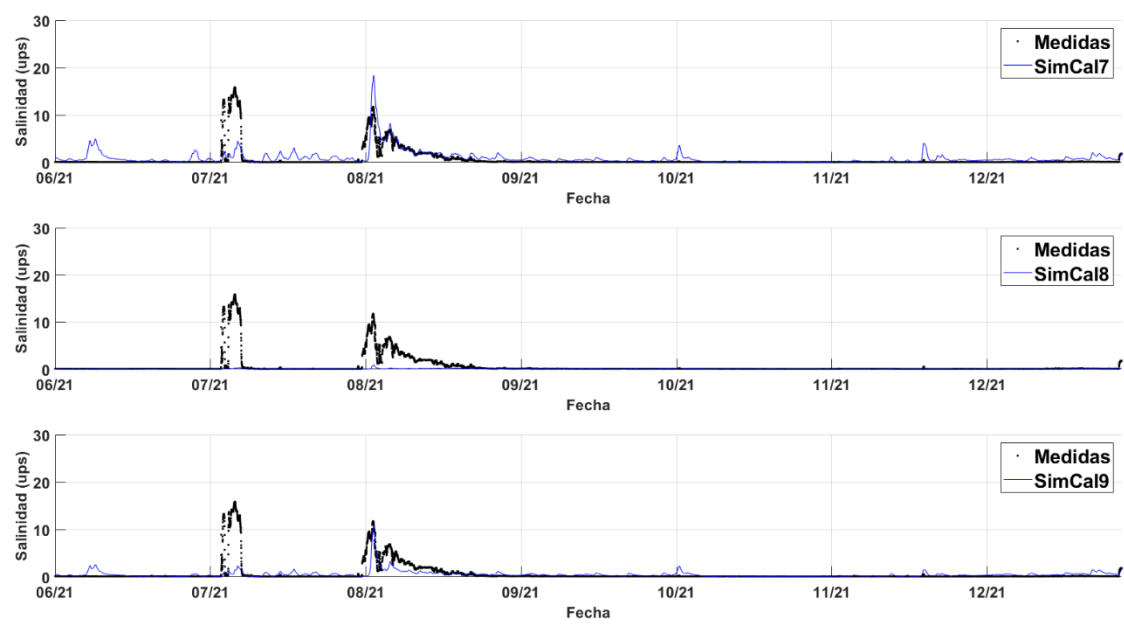


Figura 49: Comparación de la salinidad obtenida con el modelo para las simulaciones de calibración SimCal7, SimCal8 y SimCal9 con las medidas de salinidad en Arazatí para 2021.

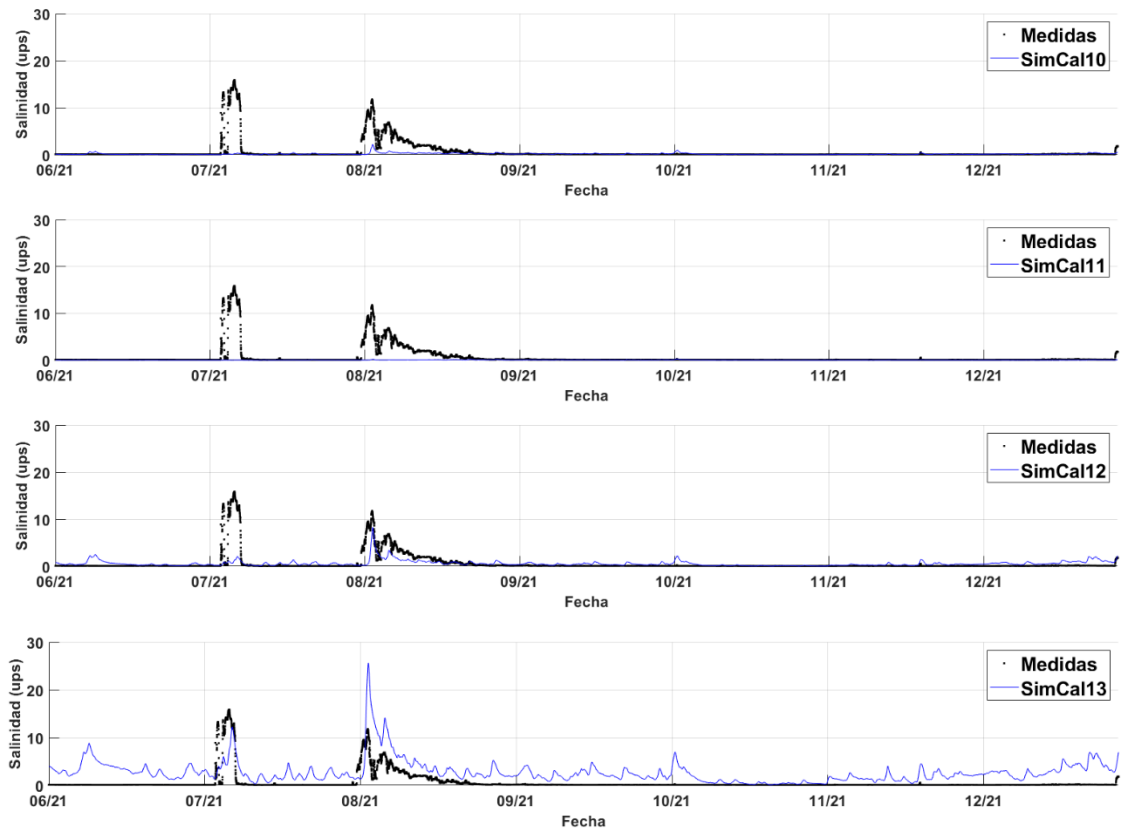


Figura 50: Comparación de la salinidad obtenida con el modelo para las simulaciones de calibración SimCal10, SimCal11, SimCal12 y SimCal13 con las medidas de salinidad en Arazatí para 2021.

Tabla 7: Error medio cuadrático RMSE (psu) obtenido para la salinidad en Arazatí para las 13 simulaciones de calibración realizadas.

RMSE Salinidad AR (psu)		Difusión horizontal (N° Sch)			
		0,2	0,4	0,6	1
Tensión superficial viento	variable	1,88			
	0,002	1,57	1,80		1,87
	0,004	3,16	1,54	1,92	1,96
	0,005		1,69	1,65	
	0,006	4,33			1,69
	0,01				3,00

La representación de los eventos por sobre un umbral complementa el análisis realizado considerando la variación temporal y los errores. Según las definiciones descriptas en la metodología (Tabla 6) es deseable que el modelo represente un gran porcentaje de los eventos de salinidad por encima del umbral (altos valores de %SupUMBReal) pero sin generar falsos eventos de alta salinidad (bajos valores de %SupUMBFalso). Se selecciona para este caso un umbral de salinidad bajo de 0,5 psu pues la dinámica de salinidad en Arazatí para el año 2021 muestra valores bajos de salinidad con eventos puntuales de incremento de salinidad, y es de interés que el modelo logre representar justamente cuando hay eventos de salinidad no nulos. Del total de 4937 datos horarios de salinidad medidos para el año 2021, 579 midieron valores por encima del umbral UMB=0,5psu, es decir, 12% de los datos medidos en 2021 superaron ese umbral, y 4358 no superaron ese umbral.

Los resultados obtenidos para un umbral de 0,5 psu para las distintas simulaciones de calibración para Arazatí se presentan en la Tabla 8 y Figura 51. Se observa que hay una serie de simulaciones (SimCal5, SimCal8, SimCal10 y SimCal11) con las cuales se obtienen valores bajos de %SupUMBFalso pero también valores bajos de %SupUMBReal, es decir, que dan pocos valores falsos de salinidad por encima del umbral pero que no representan correctamente los picos de salinidad. Por otra parte, las SimCal3, SimCal4, SimCal7, SimCal12 y SimCal13 reproducen el 100% de los picos de salinidad por encima del umbral pero generan porcentajes altos de picos falsos de salinidad (mayores al 70% para SimCal3, SimCal4 y SimCal13 y entre 30 y 50% para SimCal7 y SimCal12). Por último, SimCal2, SimCal6 y SimCal9, no alcanzan el 100% de representación de picos sobre el umbral pero sí valores altos mayores a 88% y a su vez valores bajos (menores al 25%) de falsos eventos de salinidad.

Tabla 8: Porcentajes sobre umbral %SupUMBReal y %SupUMBFalso obtenidos para las 13 simulaciones de calibración para Arazatí considerando un umbral de 0,5 psu.

UMB=0,5 psu		Difusión horizontal (N° Sch)							
		0,2		0,4		0,6		1	
AR		%SupUMB _{Real}	%SupUMB _{Falso}	%SupUMB _{Real}	%SupUMB _{Falso}	%SupUMB _{Real}	%SupUMB _{Falso}	%SupUMB _{Real}	%SupUMB _{Falso}
Tensión superficial viento	variable	8	4						
	0,002	94	24	20	3			14	2
	0,004	100	71	94	22	3	0	0	0
	0,005			94	45	88	23		
	0,006	100	86					89	34
	0,01							100	91

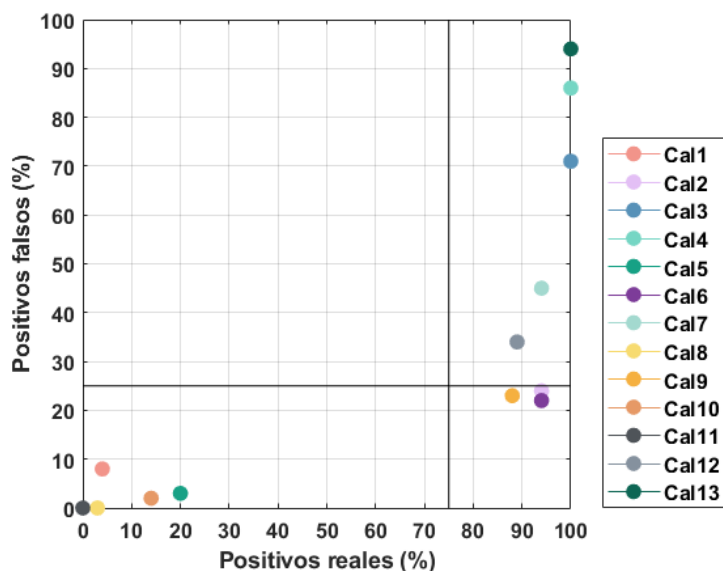


Figura 51: Porcentajes sobre umbral %SupUMBReal y %SupUMBFalso obtenidos para las 13 simulaciones de calibración para Arazatí considerando un umbral de 0,5 psu.

Salinidad en Punta Tigre

Los resultados obtenidos en Punta del Tigre se presentan desde la Figura 52 a la Figura 56 y en la Tabla 9. Se observa una gran variabilidad en la salinidad obtenida con el modelo para las distintas simulaciones, lo que se refleja tanto en la comparación de las series temporales como en los errores obtenidos. Los resultados obtenidos con SimCal3, SimCal4 y SimCal13 destacan por los valores en general elevados de salinidad obtenidos en relación a los datos medidos, mientras que al contrario las SimCal10 y SimCal11 reproducen salinidades sistemáticamente menores a las medidas (salvo en los eventos del último mes del período simulado). No obstante, estas últimas simulaciones muestran RMSE bajos del orden de 6 psu mientras que el error para las primeras es alto entre 13 y casi 15 psu. Las restantes simulaciones SimCal1, SimCal2, SimCal5, SimCal6, SimCal7, SimCal8, SimCal9 y SimCal12 representan razonablemente la variabilidad temporal de la salinidad registrada en Punta Tigre, diferenciándose en la calidad de la representación de algunos eventos en particular, subestimando en algunos casos o sobrestimando en otros casos, y en consecuencia los RMSE varían entre 5,2 psu (SimCal1) y 11,3 psu (SimCal7).

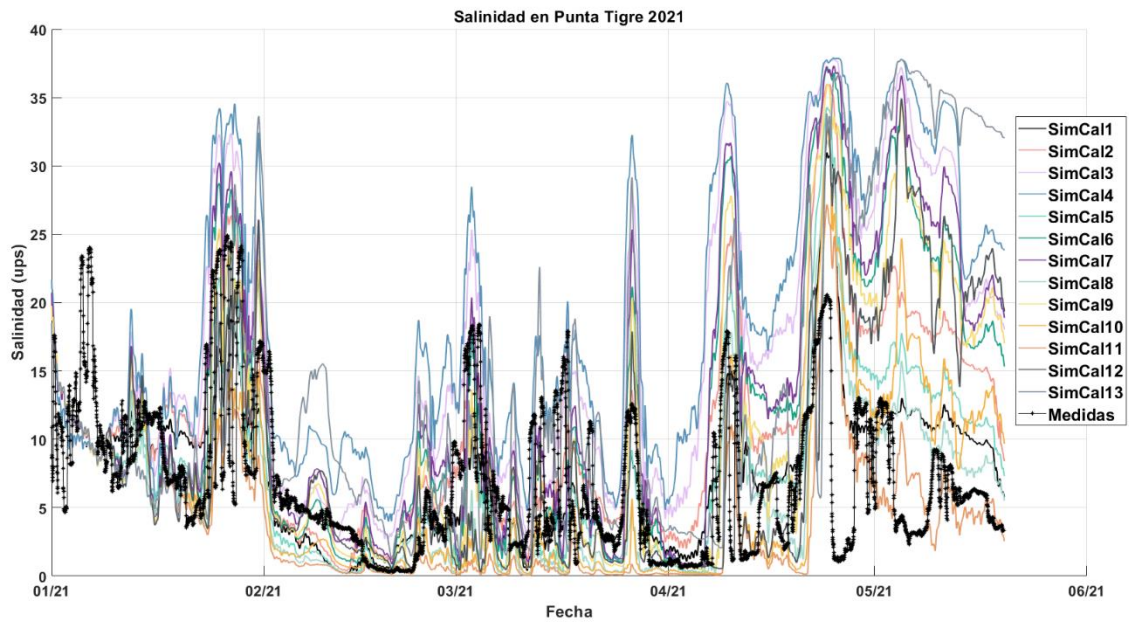


Figura 52: Series temporales de salinidad obtenidas con el modelo para todas las simulaciones de calibración y su comparación con los datos medidos en Punta Tigre para el período de calibración 2021.

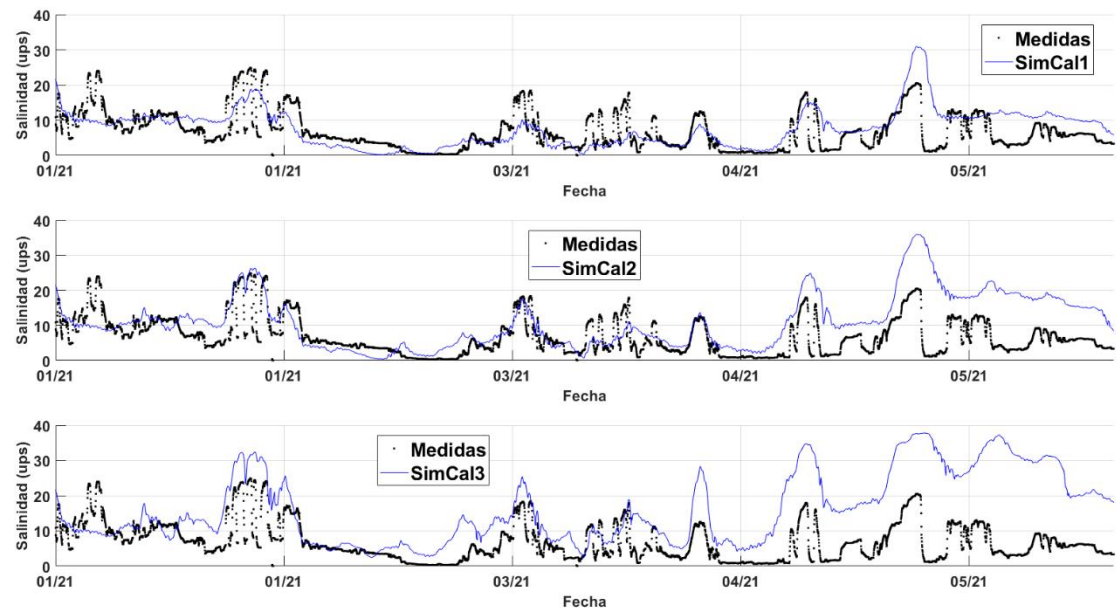


Figura 53: Comparación de la salinidad obtenida con el modelo para las simulaciones de calibración SimCal1, SimCal2 y SimCal3 con las medidas de salinidad en Arazatí para 2021.

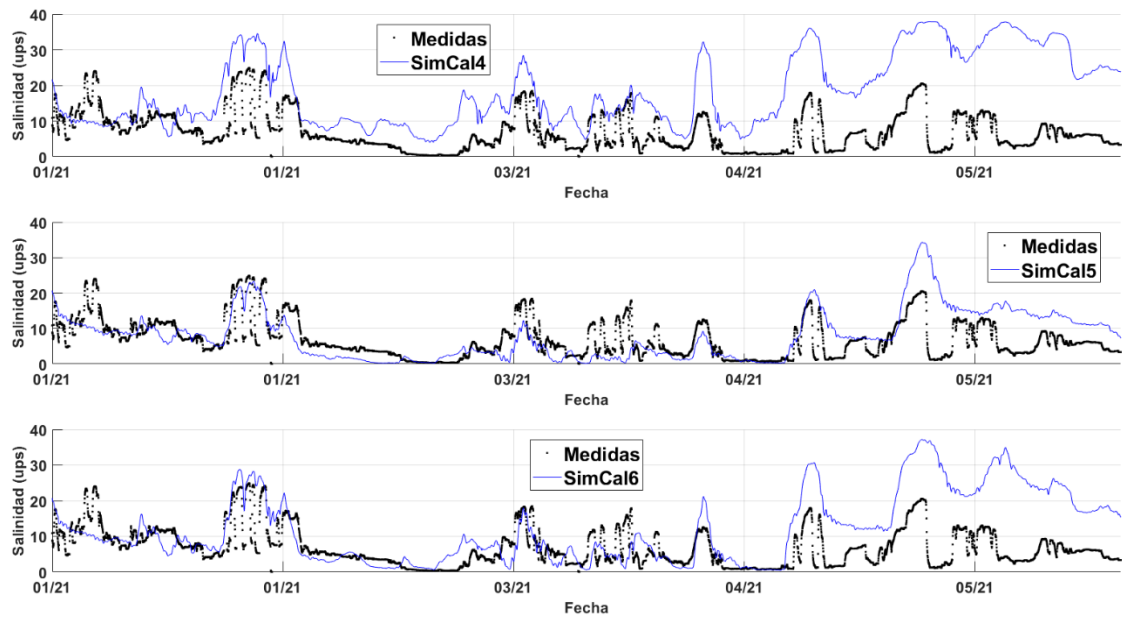


Figura 54: Comparación de la salinidad obtenida con el modelo para las simulaciones de calibración SimCal4, SimCal5 y SimCal6 con las medidas de salinidad en Arazatí para 2021.

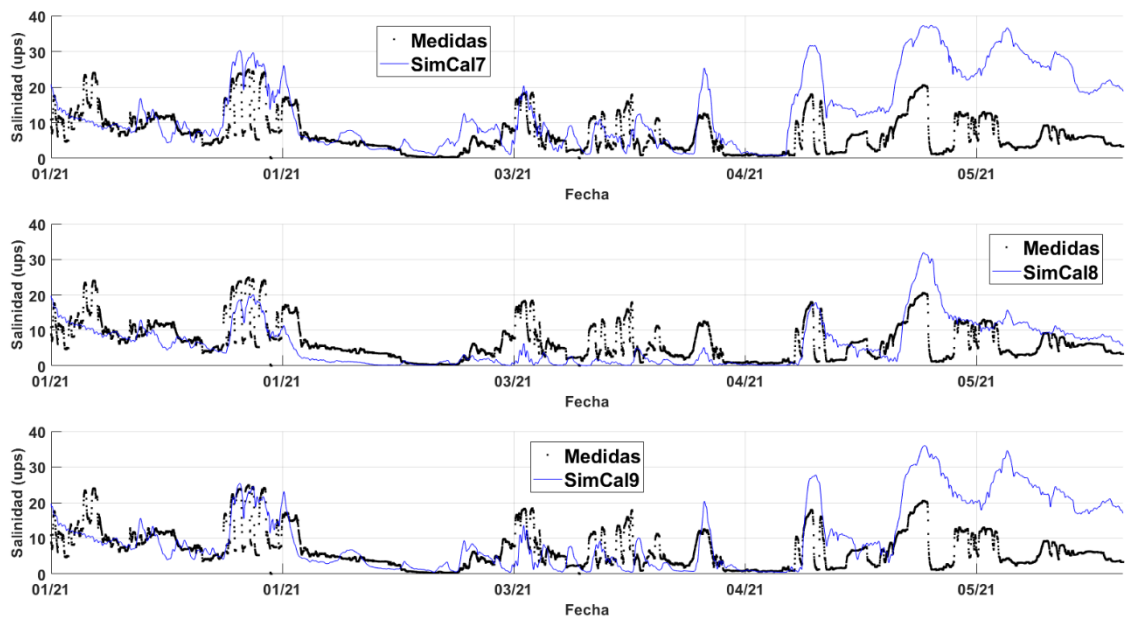


Figura 55: Comparación de la salinidad obtenida con el modelo para las simulaciones de calibración SimCal7, SimCal8 y SimCal9 con las medidas de salinidad en Arazatí para 2021.

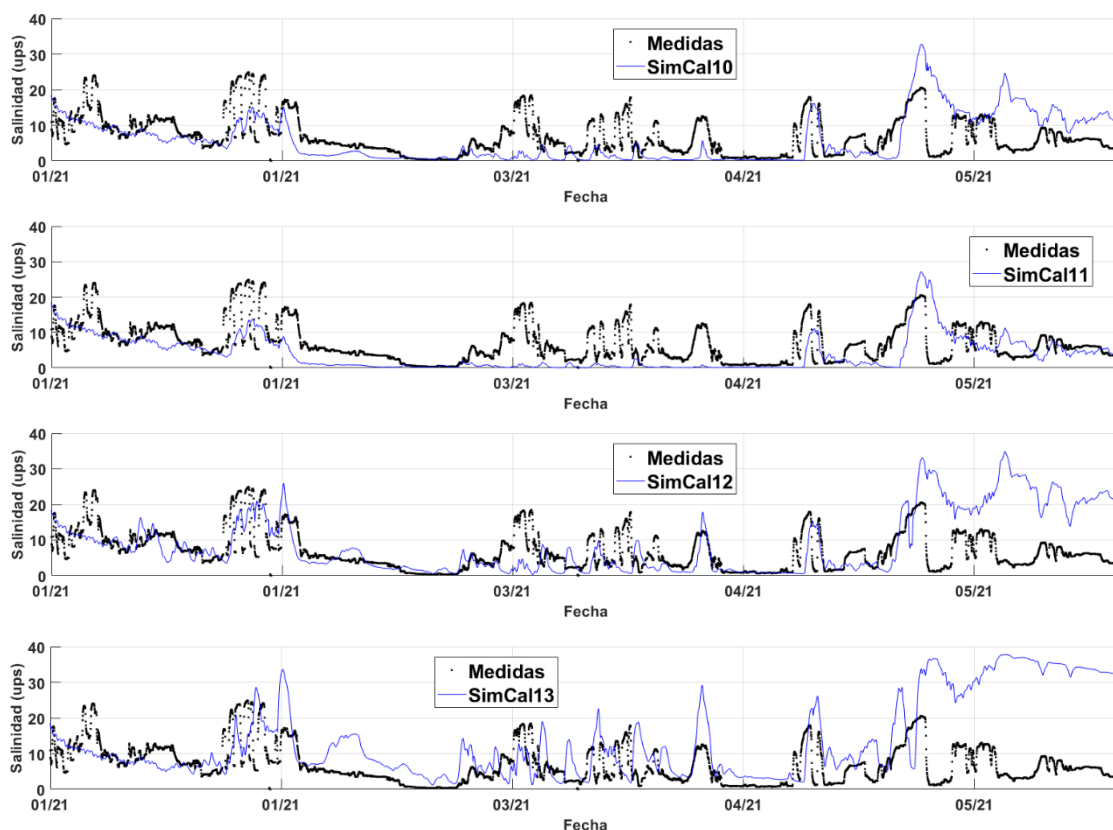


Figura 56: Comparación de la salinidad obtenida con el modelo para las simulaciones de calibración SimCal10, SimCal11, SimCal12 y SimCal13 con las medidas de salinidad en Arazatí para 2021.

Tabla 9: Error medio cuadrático RMSE (psu) obtenido para la salinidad en Punta Tigre para las 13 simulaciones de calibración realizadas.

RMSE Salinidad PT (psu)		Difusión horizontal (N° Sch)			
		0,2	0,4	0,6	1
Tensión superficial viento	variable	5,19			
	0,002	7,82	6,30		6,81
	0,004	13,11	10,28	6,01	6,05
	0,005		11,32	9,46	
	0,006	14,98			9,05
	0,01				13,51

La representación de los eventos por sobre un umbral complementa el análisis realizado considerando la variación temporal y los errores. Considerando que durante el año 2021 la salinidad en Punta Tigre muestra valores frecuentes de altas salinidades con gran variabilidad temporal, se selecciona para este caso un umbral de salinidad media de 10 psu. Del total de 3327 datos horarios de salinidad medidos para el año 2021, 824 midieron valores por encima del umbral $UMB=10\text{psu}$, es decir, 25% de los datos medidos en 2021 superaron ese umbral, y 2503 no superaron ese umbral.

Los resultados obtenidos para un umbral de 10 psu para las distintas simulaciones de calibración para Punta Tigre se presentan en la Tabla 10 y Figura 57. Se observa que las simulaciones mayormente se agrupan mostrando una correlación directa entre %SupUMBReal y %SupUMBFalse, es decir, a mayor porcentaje de representación de los casos reales de

superación del umbral, mayor porcentaje de casos falsos representados. Por ejemplo, en las simulaciones SimCal3 y SimCal4 se obtienen los mayores %SupUMBReal, mayores a 80%, pero también un %SupUMBFalse alto mayor a 55%. Por el contrario, en las simulaciones Cal9, Cal10 y Cal11 se obtienen los valores más bajos de %SupUMBFalse menores al 25% pero a su vez esos casos tienen %SupUMBReal bajos (menores al 50%) y por tanto no representan correctamente la mayoría de los eventos de alta salinidad. Por otra parte, son de destacar las simulaciones SimCal2, SimCal4 y SimCal6 presentan valores de %SupUMBReal relativamente alto (aproximadamente 75%) y valores de %SupUMBFalse relativamente bajos (aprox. 40%).

Tabla 10: Porcentajes sobre umbral %SupUMBReal y %SupUMBFalse obtenidos para las 13 simulaciones de calibración para Punta Tigre considerando un umbral de 10 psu.

UMB=10 psu		Difusión horizontal (N° Sch)							
		0,2		0,4		0,6		1	
		%SupUMB _{Real}	%SupUMB _{Falso}	%SupUMB _{Real}	%SupUMB _{Falso}	%SupUMB _{Real}	%SupUMB _{Falso}	%SupUMB _{Real}	%SupUMB _{Falso}
Tensión superficial viento	variable	57	27						
	0,002	75	43	59	26			46	22
	0,004	81	58	73	39	50	15	25	6
	0,005			75	41	67	30		
	0,006	83	71					58	26
	0,01							62	41

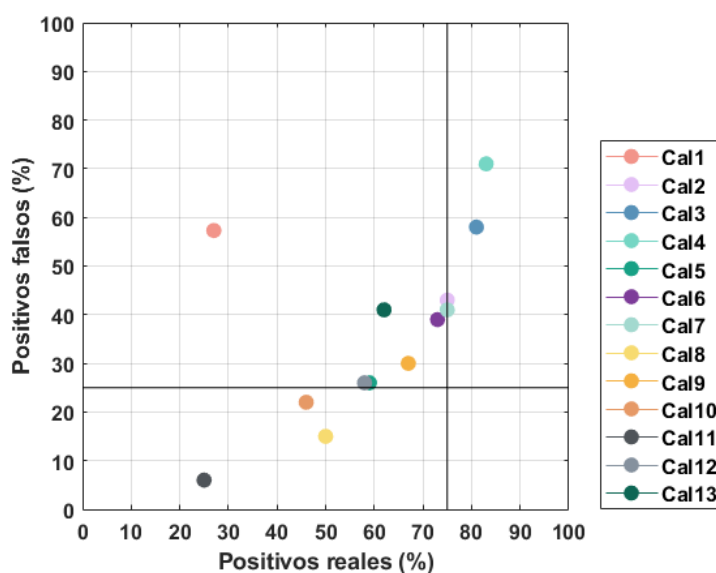


Figura 57: Porcentajes sobre umbral %SupUMBReal y %SupUMBFalse obtenidos para las 13 simulaciones de calibración para Punta Tigre considerando un umbral de 10 psu.

Niveles y corrientes

La elevación de la superficie libre evaluada en Montevideo, Punta Tigre, Arazatí y Colonia varía considerablemente entre las distintas simulaciones de calibración realizadas, principalmente cuando se modifica el parámetro vinculado a la tensión superficial del viento. Los errores obtenidos para las 13 simulaciones de calibración en las 4 estaciones de control se presentan en las Tablas 11 a 14 y las gráficas que muestran la variación temporal de los datos y de las medidas se presentan en el Anexo 1. Se pueden identificar 3 grupos de simulaciones con las que se obtienen comportamientos similares. Por un lado, los errores más bajos con una correcta representación de los niveles para las simulaciones SimCal1, SimCal2, SimCal5, SimCal8 y

SimCal11; errores intermedios para SimCal3, SimCal6, SimCal7, SimCal9 y SimCal10; y los mayores errores para la SimCal4, SimCal12 y SimCal13 en las cuales el modelo reproduce una mayor variabilidad de los niveles respecto a los valores medidos.

Tabla 11: Error medio cuadrático RMSE (m) de la elevación de la superficie libre en Montevideo para las 13 simulaciones de calibración realizadas. Año 2021; 96,9% de datos disponibles en el año.

RMSE Nivel (m)		Difusión horizontal (N° Sch)			
Montevideo		0,2	0,4	0,6	1
Tensión superficial viento	variable	0,15			
	0,002	0,17	0,16		0,26
	0,004	0,28	0,29	0,16	0,16
	0,005		0,34	0,33	
	0,006	0,42			0,39
	0,01				0,65

Tabla 12: Error medio cuadrático RMSE (m) de la elevación de la superficie libre en Punta Tigre para las 13 simulaciones de calibración realizadas. Año 2021; 68,3% de datos disponibles en el año.

RMSE Nivel (m)		Difusión horizontal (N° Sch)			
Punta Tigre		0,2	0,4	0,6	1
Tensión superficial viento	variable	0,17			
	0,002	0,19	0,18		0,26
	0,004	0,30	0,28	0,18	0,18
	0,005		0,34	0,33	
	0,006	0,42			0,38
	0,01				0,63

Tabla 13: Error medio cuadrático RMSE (m) de la elevación de la superficie libre en Arazatí para las 13 simulaciones de calibración realizadas. Año 2021; 56,4% de datos disponibles en el año.

RMSE Nivel (m)		Difusión horizontal (N° Sch)			
Arazatí		0,2	0,4	0,6	1
Tensión superficial viento	variable	0,21			
	0,002	0,23	0,22		0,32
	0,004	0,35	0,34	0,22	0,22
	0,005		0,41	0,40	
	0,006	0,50			0,47
	0,01				0,76

Tabla 14: Error medio cuadrático RMSE (m) de la elevación de la superficie libre en Colonia para las 13 simulaciones de calibración realizadas. Año 2021; 78,1% de datos disponibles en el año.

RMSE Nivel (m)		Difusión horizontal (N° Sch)			
Colonia		0,2	0,4	0,6	1
Tensión superficial viento	variable	0,23			
	0,002	0,24	0,24		0,37
	0,004	0,39	0,41	0,24	0,24
	0,005		0,47	0,47	
	0,006	0,58			0,55
	0,01				0,92

Por otra parte, se evalúa cómo las 13 simulaciones de calibración representan las corrientes medidas por los ADCPs instalados en Punta Tigre y en Arazatí, calculando el RMSE en la intensidad promedio en la vertical, y a través de la comparación gráfica de las componentes de la velocidad promedio en la vertical. Los resultados obtenidos se presentan en las Tablas 15 y 16, y los gráficos se presentan en el Anexo 1. Los resultados muestran una variación en los errores entre 0,11m/s y 0,17m/s en Punta Tigre, y entre 0.10 m/s y 0.17m/s en Arazatí, siendo los mayores errores para las simulaciones con coeficientes de tensión superficial de viento mayor (SimCal4, SimCal7, SimCal9 y SimCal13). Las distintas simulaciones de calibración muestran diferencias básicamente en la intensidad de la corriente y no en las direcciones principales de flujo. Los errores más bajos se obtienen para las simulaciones SimCal1, SimCal 5, SimCal8 y SimCal11.

Tabla 15: Error medio cuadrático RMSE (m/s) de la intensidad de la corriente promedio en vertical en Punta Tigre para las 13 simulaciones de calibración realizadas. Año 2021; 68,3% de datos disponibles en el año.

RMSE Corriente (m/s)		Difusión horizontal (N° Sch)			
Punta Tigre		0,2	0,4	0,6	1
Tensión superficial viento	variable	0,11			
	0,002	0,12	0,11		0,13
	0,004	0,13	0,13	0,11	0,11
	0,005		0,14	0,14	
	0,006	0,15			0,14
	0,01				0,17

Tabla 16: Error medio cuadrático RMSE (m/s) de la intensidad de la corriente promedio en vertical en Arazatí para las 13 simulaciones de calibración realizadas. Año 2021; 56,4% de datos disponibles en el año.

RMSE Corriente (m/s)		Difusión horizontal (N° Sch)			
Arazatí		0,2	0,4	0,6	1
Tensión superficial viento	variable	0,10			
	0,002	0,11	0,10		0,12
	0,004	0,13	0,12	0,10	0,10
	0,005		0,13	0,13	
	0,006	0,15			0,13
	0,01				0,17

8.1.3 Discusión

Las distintas simulaciones de calibración definidas muestran una gran variabilidad en los resultados obtenidos, tanto en la variable de mayor interés como la salinidad, así como también en las otras variables hidrodinámicas analizadas, elevación de la superficie libre y corrientes.

Considerando que la salinidad en la zona de Arazatí es la prioridad del modelo *RPsal* que se desarrolla en este estudio, la simulación que mejores resultados otorga es la SimCal6, para la cual se obtiene el menor error (1,54 psu), y gráficamente se observa que representa correctamente el evento de alta salinidad del mes de agosto. A su vez, definiendo el umbral bajo de 0,5 psu, esta simulación muestra que en el 94% de los casos reproduce las salinidades por

encima de ese umbral, generando un 22% de falsos positivos. Algunas otras simulaciones muestran errores en salinidad similares, pero gráficamente se observa que el evento de salinidad se subestima (por ejemplo SimCal2) o se eleva el porcentaje de falsos positivos (por ejemplo SimCal7).

Considerando la salinidad en Punta Tigre, se observa que para las simulaciones que se minimiza el RMSE, gráficamente hay muchos eventos que no se representan correctamente y a su vez tampoco son buenos los porcentajes analizando un umbral. De hecho, si se observa detalladamente la variación temporal se observa que cuando una simulación (es decir, una parametrización) reproduce correctamente la mayor parte de los eventos hasta marzo inclusive, sobrestima la salinidad durante los últimos meses, y en cambio cuando una simulación reproduce valores cercanos de salinidad los últimos meses, subestima considerablemente la salinidad los primeros meses. Debido a esto, en las simulaciones que se obtuvieron errores más bajos, gráficamente no se observa una buena representación de los datos, y a su vez presentan bajos porcentajes de representación de los eventos por encima del umbral. Y por otra parte, para las simulaciones que gráficamente muestran resultados aceptables y con porcentajes de representación del umbral suficientes, los errores pueden ser elevados. En este último caso se encuentra la SimCal6, cuyos resultados muestran una buena representación de la salinidad en Punta Tigre principalmente los primeros meses, aunque el error es de 10 psu.

Por último, considerando la representación del modelo de la elevación de la superficie libre y las corrientes integradas en vertical, tanto en Arazatí como en Punta Tigre, como en Montevideo y Colonia (estaciones donde no hay datos de corrientes), se observa que las parametrizaciones que consideran bajos coeficientes de tensión de corte del viento son las que reproducen correctamente dichas variables. No obstante, para esos casos el modelo prácticamente no reproduce valores de salinidad en Arazatí, y subestima la salinidad en Punta Tigre, lo que indica que no se representa correctamente el ingreso del frente salino a la zona intermedia del Río de la Plata. Para eso es necesario considerar mayores valores de la tensión de corte del viento en la superficie libre, lo que a su vez incrementa un poco el error en niveles. Este es el caso de la SimCal6, para la cual los errores en niveles en todas las estaciones no son los mínimos obtenidos.

En síntesis, luego del proceso de calibración y considerando como prioridad del modelo *RPsal* la representación de la salinidad en Arazatí, se selecciona la parametrización denominada SimCal6 para seguir trabajando y pasar a la etapa de validación del modelo.

8.2 Validación

8.2.1 Metodología

Para la validación del modelo *RPsal* se trabaja con el nivel de mayor resolución N2. La validación se realiza simulando los años 2016, 2017 y 2022, de manera de poder validar el modelo comparando los resultados de salinidad con las mediciones disponibles en Arazatí (2022), Punta Tigre (2016 y 2017) y en Gas Sayago (2017). Además, se realiza la validación de los resultados del 2021 en el nivel de detalle N2 ya que la calibración se realizó en el dominio global del Río de la Plata. Los resultados del modelo se comparan con los datos medidos a partir de la comparación gráfica y del cálculo del RMSE.

Como se mencionó anteriormente, la medición de salinidad de la estación Gas Sayago se hizo con un sensor ubicado a 0,7 m de profundidad respecto a una boya oceanográfica ubicada en las cercanías de la costa de Montevideo. Por tanto, la medida de salinidad en este caso es solidaria a la variación de la superficie libre y no a una profundidad fija. Esto se tiene en cuenta al comparar los resultados del modelo para seleccionar la capa del modelo representativa de la medida registrada en la boya.

Las simulaciones para la validación del modelo numérico *RPsal* se realizaron en el Centro Nacional de Supercomputación de Uruguay Clusteruy utilizando 16 cores ejecutando en simultaneo ambos niveles de resolución (modelo global del Río de la Plata y nivel de detalle N2) consumiendo para un año de simulación aproximadamente 3250 horas de computo de CPU en un tiempo real de aproximadamente 216 horas, lo que totaliza para los 4 años simulados para la validación del orden de 13.000,0 horas de cómputo y 865 horas de tiempo real.

8.2.2 Resultados obtenidos

Período 2021

La validación del modelo *RPsal* en el nivel de detalle N2 para el período 2021 muestra errores similares a los obtenidos para el dominio global del Río de la Plata. Las comparaciones de las series temporales para salinidad, nivel de mar y corrientes en Arazatí y en Punta Tigre, y para el nivel de mar en Colonia y en Montevideo y los valores de RMSE correspondientes se presentan en las Figuras 58 a 60 y en la Tabla 17. Se destaca la leve mejora que se observa en la representación del modelo de la dirección principal de la corriente integrada en vertical en Arazatí, aunque se mantiene el mismo RMSE.

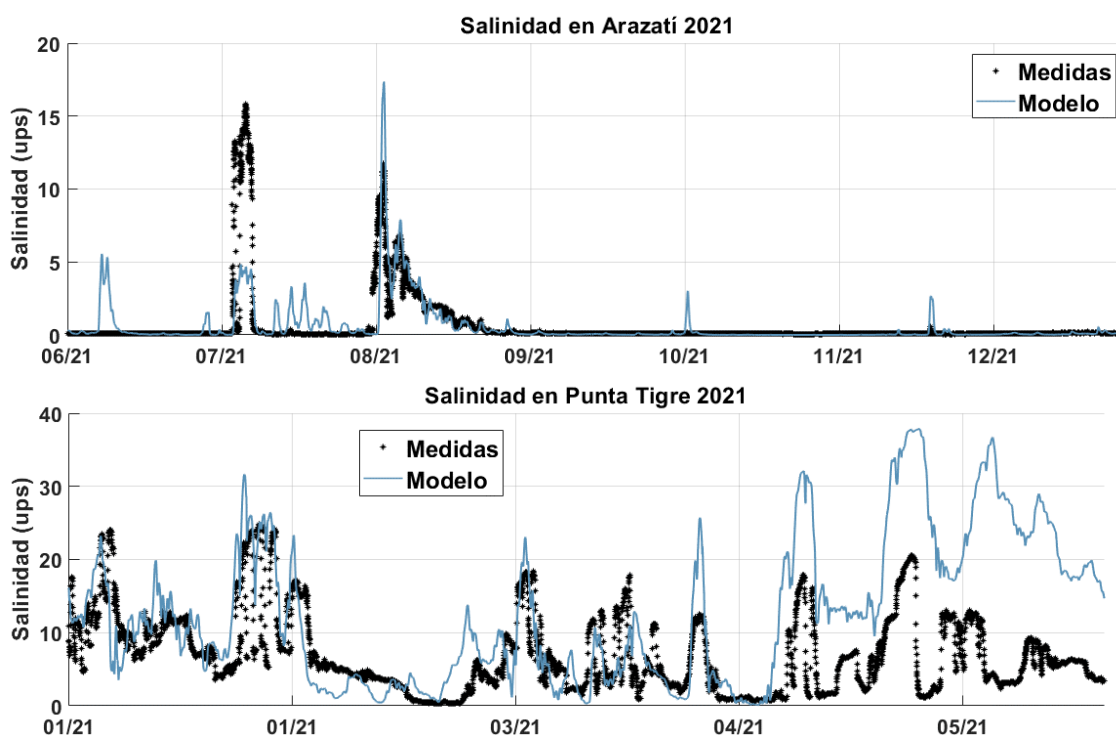


Figura 58: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación de la salinidad (psu) obtenida con el modelo calibrado con los datos medidos en Arazatí (panel superior) y Punta Tigre (panel inferior) para el año 2021.

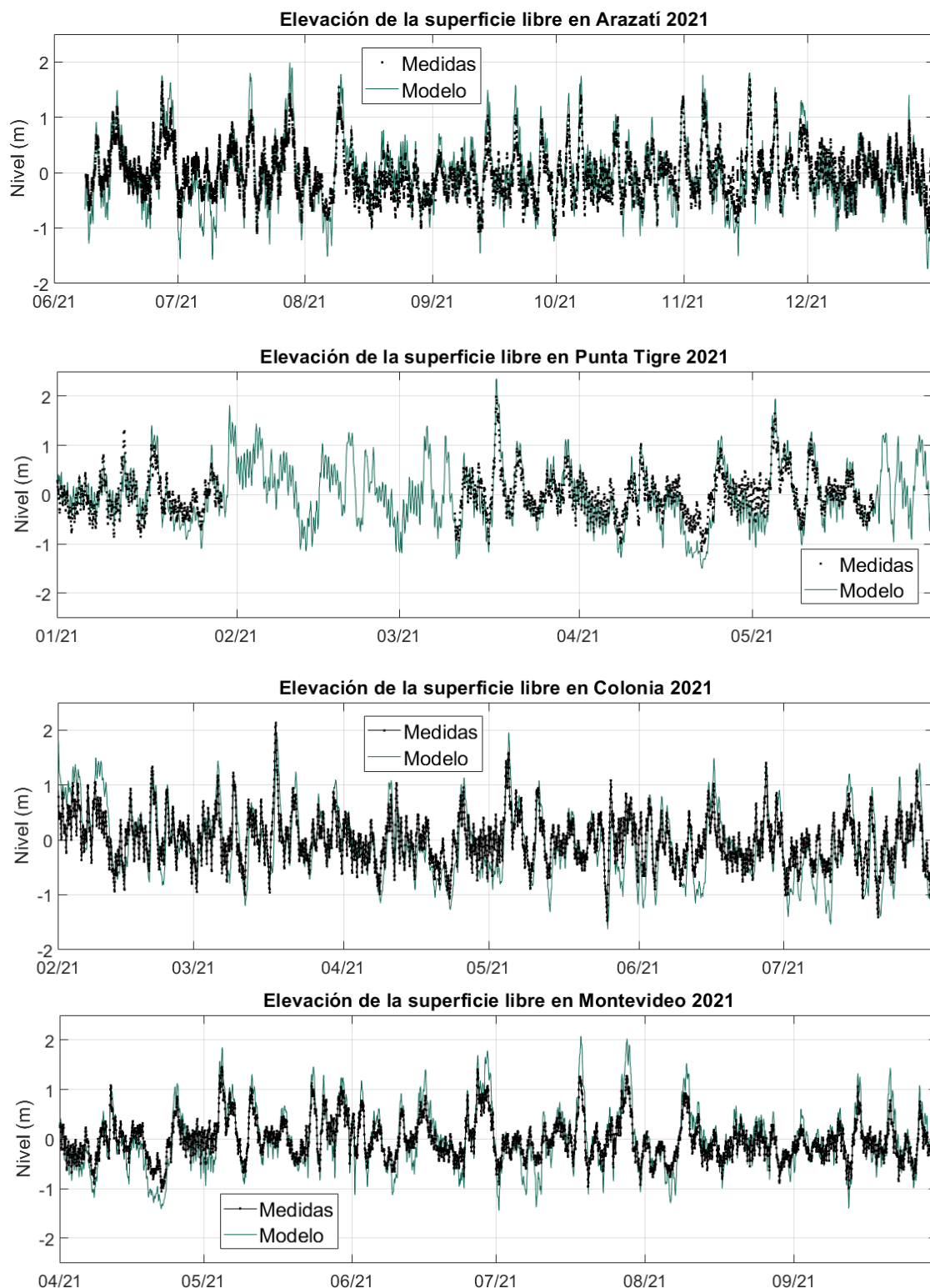


Figura 59: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación de la elevación de la superficie libre respecto al nivel medio (m) obtenida con el modelo calibrado y los datos medidos en Arazatí (panel superior), Punta Tigre (segundo panel), Colonia (tercer panel) y Montevideo (panel inferior) para el año 2021.

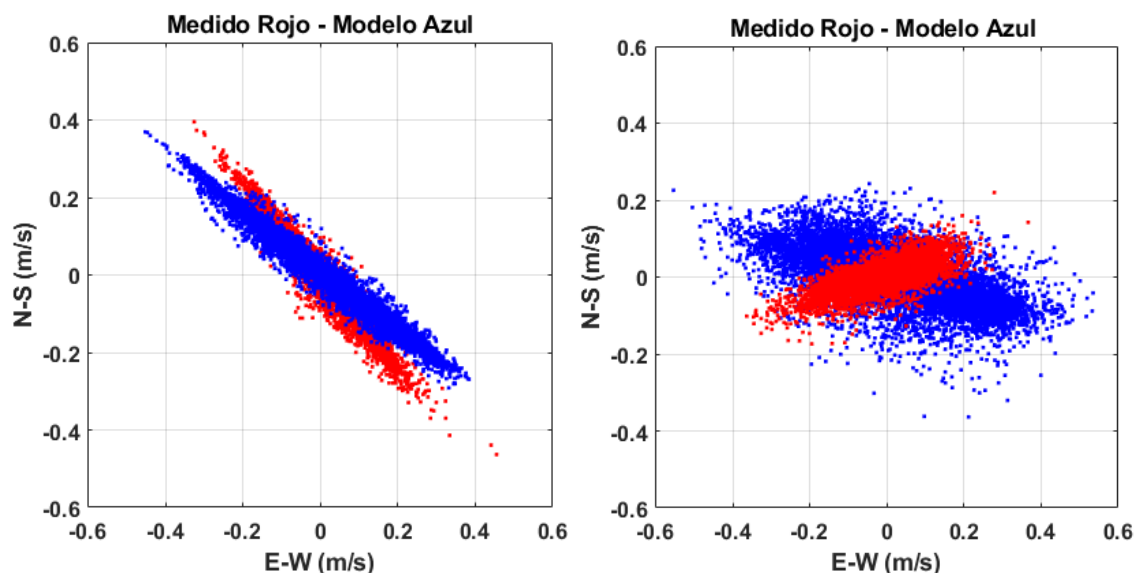


Figura 60: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación espacial de la corriente integrada en vertical (m/s) obtenida con el modelo calibrado respecto a los datos de corriente medidos en Arazatí (panel izquierdo) y Punta Tigre (panel derecho) para el año 2021.

Tabla 17: Valores de error medio cuadrático RMSE obtenidos para la salinidad, niveles y corrientes en Arazatí y Punta Tigre, y niveles en Colonia y Montevideo para la validación del modelo en el nivel de detalle N2 para el año 2021.

	RMSE		
	Salinidad (psu)	Nivel (m)	Corrientes (m/s)
Arazatí	1,41	0,34	0,13
Punta Tigre	10,63	0,28	0,13
Montevideo		0,27	
Colonia		0,38	

Período 2022

Para el año 2022 se cuenta solamente con datos de salinidad medidos en Arazatí. Los resultados obtenidos con el modelo calibrado muestran muy buenos resultados manteniendo la calidad del ajuste obtenido durante la calibración en Arazatí. En la Figura 61 se observa que el modelo reproduce correctamente el gran evento de salinidad registrado en los datos los primeros meses del año; aunque hay diferencia en algunos valores de salinidad la duración del evento se representa. El error RMSE del modelo para el 2022 es 0,93 psu (Tabla 18).

La comparación entre los resultados del modelo y la elevación de la superficie libre medida en Arazatí, Montevideo y Colonia (Figura 62), y la corriente promedio en vertical medida en Arazatí (Figura 63) también muestra valores similares a los obtenidos para la calibración. El modelo en general sobrestima la elevación de la superficie libre en todas las estaciones, con errores entre 0,3 y 0,4 m (Tabla 18), mientras que para la corriente en Arazatí se obtiene un RMSE en intensidad igual a 0,15 m/s con direcciones de flujo muy similares a las medidas.

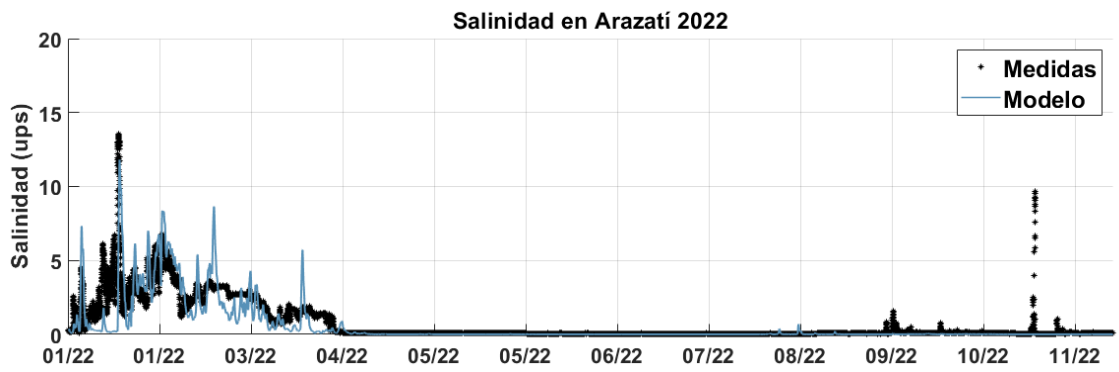


Figura 61: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación de la salinidad (psu) obtenida con el modelo calibrado con los datos medidos en Arazatí para el año 2022.

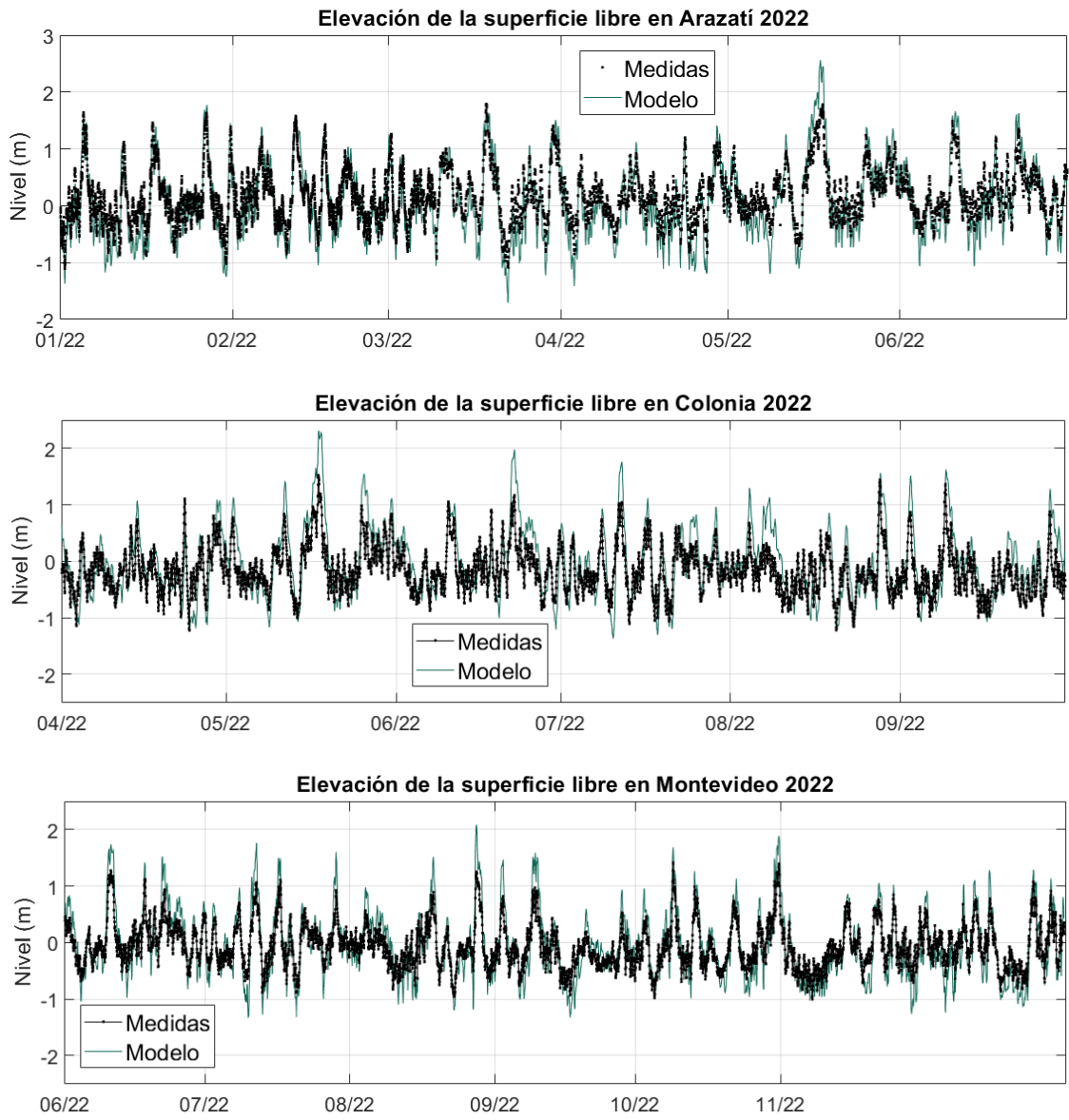


Figura 62: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación de la elevación de la superficie libre respecto al nivel medio (m) obtenida con el modelo calibrado y los datos medidos en Arazatí (panel superior), Colonia (panel intermedio) y Montevideo (panel inferior) para el año 2022.

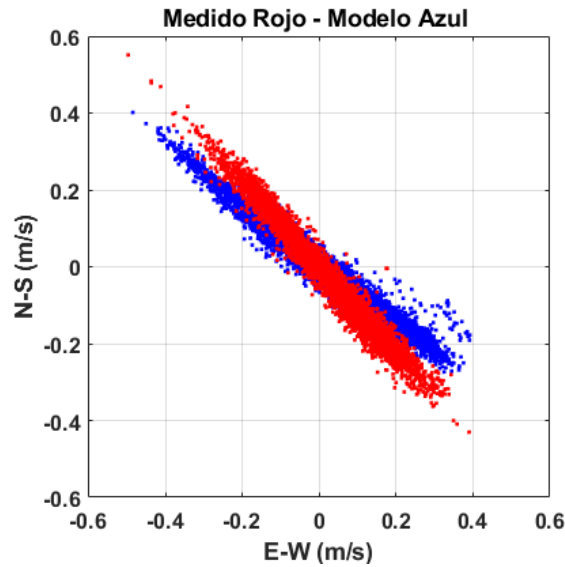


Figura 63: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación espacial de la corriente integrada en vertical (m/s) obtenida con el modelo calibrado respecto a los datos de corriente medidos en Arazatí para el año 2022.

Tabla 18: Valores de error medio cuadrático RMSE obtenidos para la salinidad, niveles y corrientes en Arazatí, y niveles en Colonia y Montevideo para la validación del modelo en el nivel de detalle N2 para el año 2022.

	RMSE		
	Salinidad (psu)	Nivel (m)	Corrientes (m/s)
Arazatí	0,93	0,33	0,12
Montevideo		0,30	
Colonia		0,44	

Período 2016

Para comparar los resultados del modelo en el período de validación 2016 se cuenta con datos medidos de salinidad en Punta Tigre y Gas Sayago, nivel y corrientes medidos en Punta Tigre, y mediciones de nivel en Montevideo y Colonia. Los resultados obtenidos se presentan en las Figuras 64, 65 y 66 y los errores en la Tabla 19. Se observa que el modelo representa correctamente la variabilidad de la salinidad medida en Punta Tigre, aunque en algunos casos subestima los picos de salinidad, pero con un error global para todo el año bajo igual a 2,6 psu. En Gas Sayago el modelo en general reproduce prácticamente todos los eventos de incremento de salinidad salvo un evento grande de marzo 2016. Es importante aclarar que la señal medida luego de ese evento (con un incremento sostenido de salinidad) muestra un comportamiento inusual para la salinidad en la zona que hace dudar de los datos medidos desde marzo hasta agosto inclusive. De todas maneras, el error global obtenido es razonable igual a 6,3 psu.

La calidad de los resultados del modelo en elevación de la superficie libre y corrientes es similar a la obtenida para la calibración y los otros períodos de validación, con una sobrestimación de los niveles y una diferencia en la dirección de la corriente promedio vertical en Punta Tigre con un error en la intensidad de 0,14 m/s.

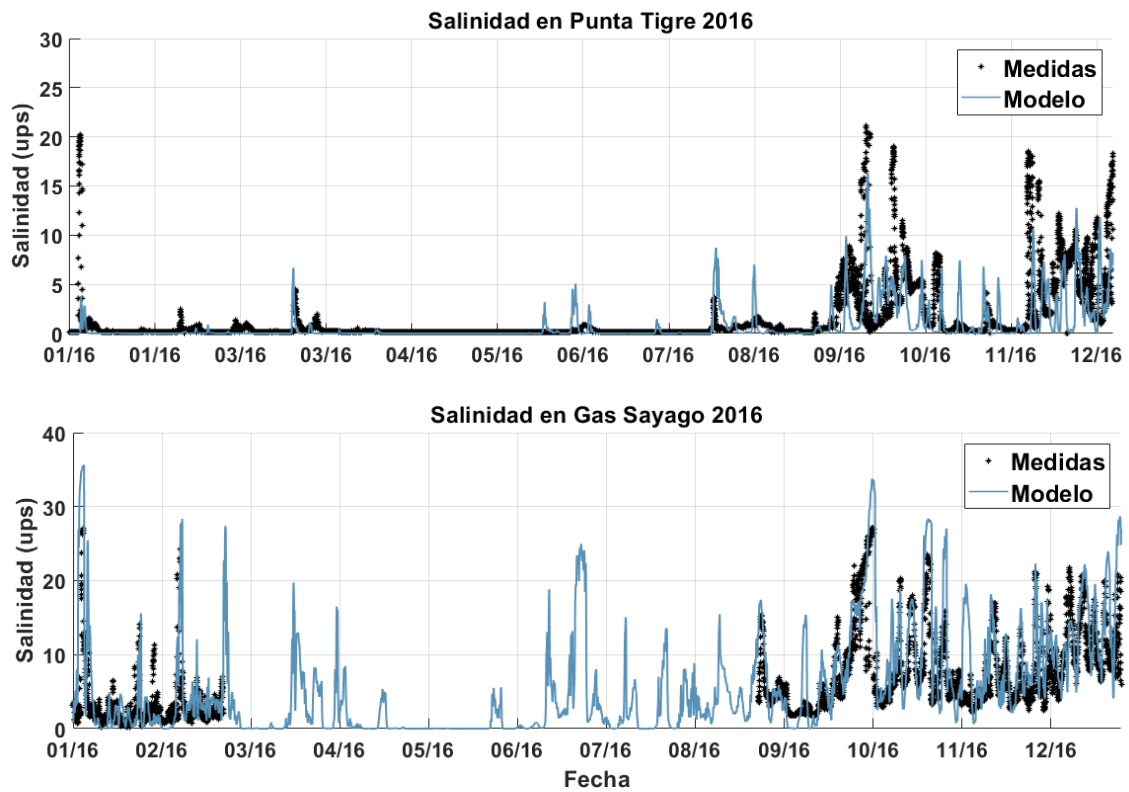


Figura 64: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación de la salinidad (psu) obtenida con el modelo calibrado con los datos medidos en Punta Tigre (panel superior) y Gas Sayago (panel inferior) para el año 2016.

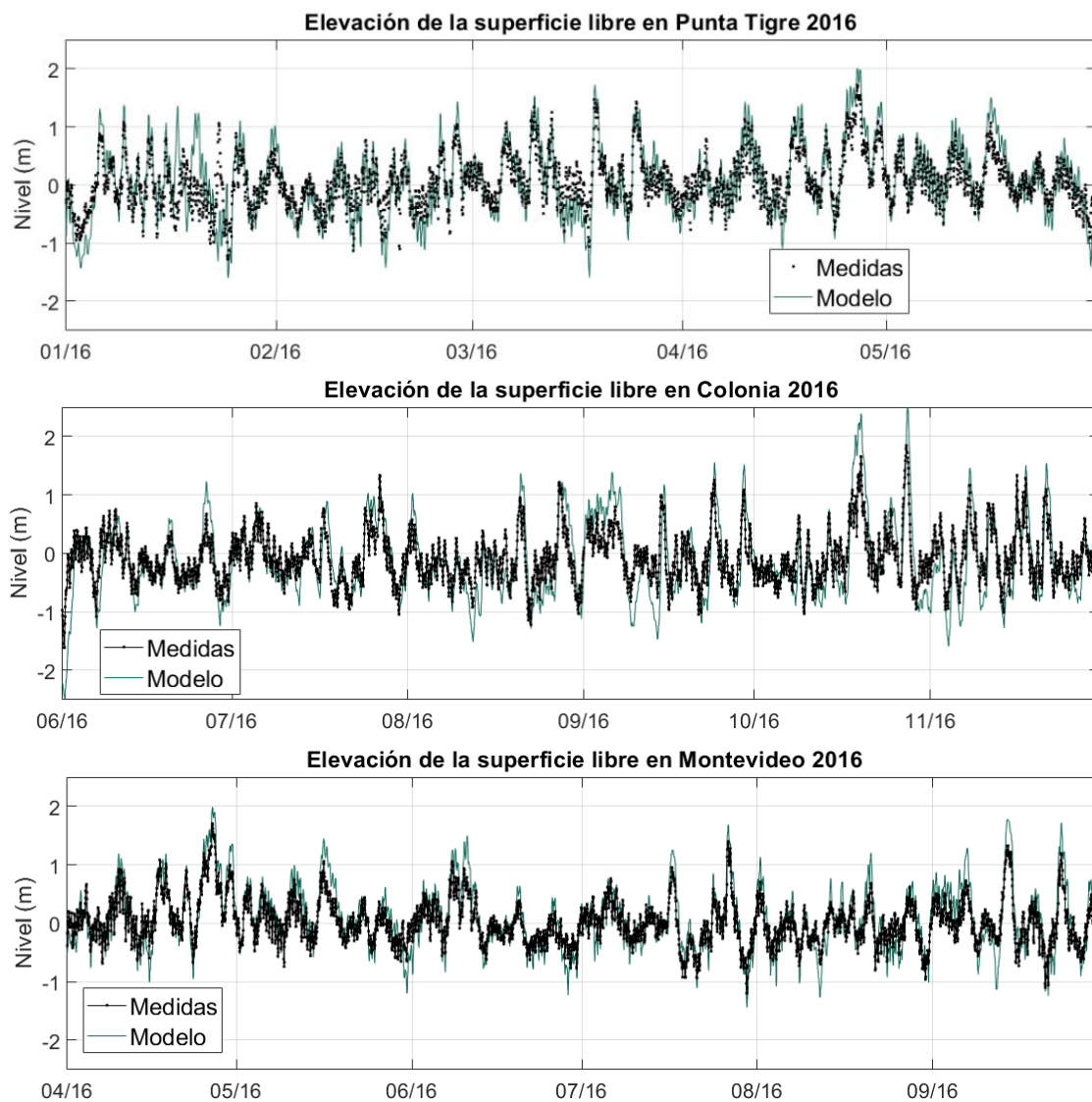


Figura 65: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación de la elevación de la superficie libre respecto al nivel medio (m) obtenida con el modelo calibrado y los datos medidos en PuntaTigre (panel superior), Colonia (panel intermedio) y Montevideo (panel inferior) para el año 2016.

Tabla 19: Valores de error medio cuadrático RMSE obtenidos para la salinidad, niveles y corrientes en Punta Tigre, salinidad en Gas Sayago, y niveles en Colonia y Montevideo para la validación del modelo en el nivel de detalle N2 para el año 2016.

	RMSE		
	Salinidad (psu)	Nivel (m)	Corrientes (m/s)
Punta Tigre	2.59	0.31	0.14
Gas Sayago	5.59		
Montevideo		0.28	
Colonia		0.42	

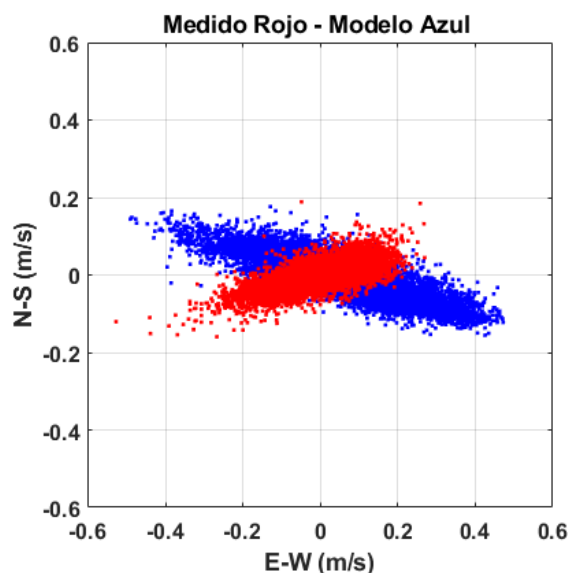


Figura 66: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación de corriente promedio en vertical (m/s) obtenida con el modelo calibrado con los datos medidos en Punta Tigre para el año 2016.

Período 2017

Para el año 2017 se cuenta con datos de salinidad, corrientes y niveles medidos en Punta Tigre, y niveles en Montevideo y Colonia. La comparación de la serie temporal de salinidad obtenida con el modelo con los datos medidos (Figura 67) muestra que el modelo reproduce correctamente varios eventos de incremento de salinidad, pero también en varios casos sobrestima la salinidad medida mostrando eventos de incremento de salinidad cuando las medidas muestran valores nulos. El error en la salinidad obtenido es de 5,3 psu (Tabla 20), un poco mayor al obtenido para el año 2016 pero menor al obtenido para el año 2021.

La calidad de los resultados del modelo en elevación de la superficie libre (Figura 68) y corrientes (Figura 69) es similar a la obtenida para la calibración y los otros períodos de validación, con una sobrestimación de los niveles y una diferencia en la dirección de la corriente promedio vertical en Punta Tigre con un error en la intensidad de 0,15 m/s (Tabla 20).

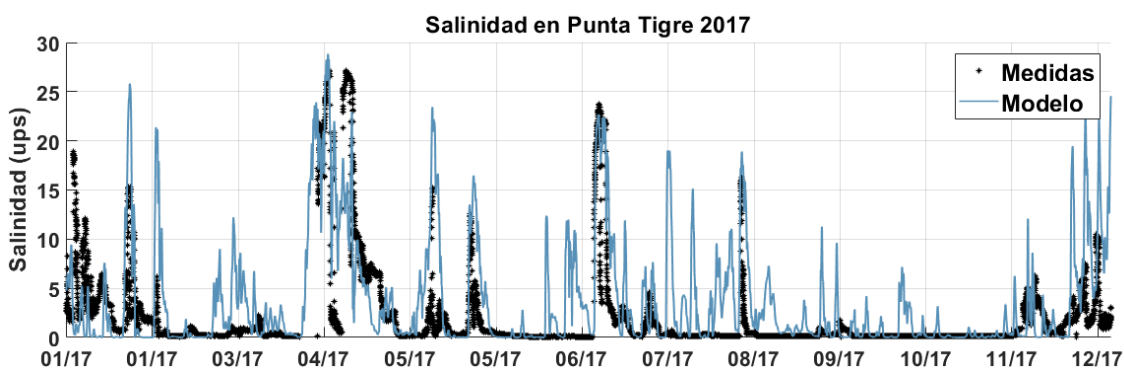


Figura 67: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación de la salinidad (psu) obtenida con el modelo calibrado con los datos medidos en Punta Tigre para el año 2017.

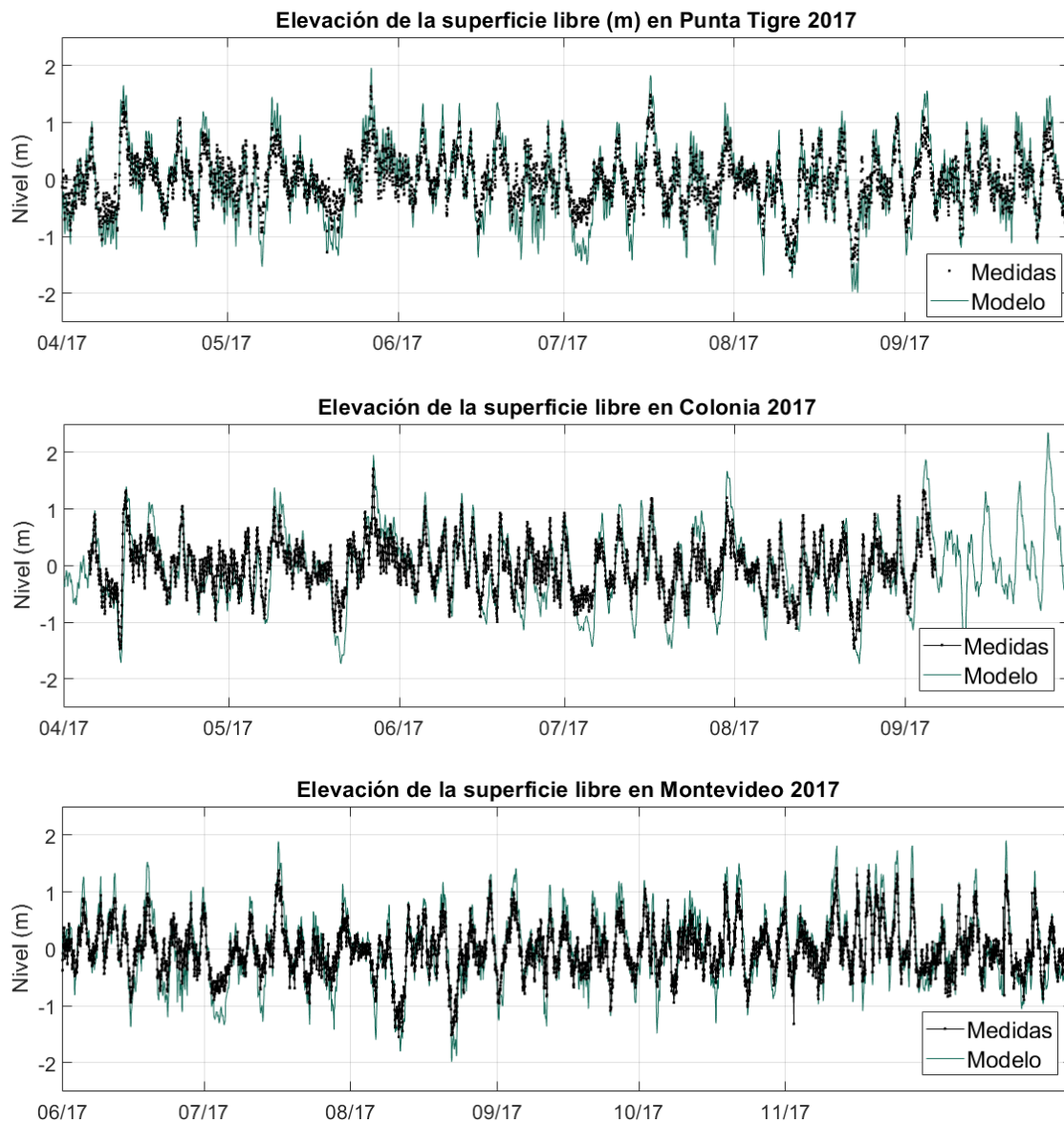


Figura 68: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación de la elevación de la superficie libre respecto al nivel medio (m) obtenida con el modelo calibrado y los datos medidos en PuntaTigre (panel superior), Colonia (panel intermedio) y Montevideo (panel inferior) para el año 2017.

Tabla 20: Valores de error medio cuadrático RMSE obtenidos para la salinidad, niveles y corrientes en Punta Tigre, y niveles en Colonia y Montevideo para la validación del modelo en el nivel de detalle N2 para el año 2017.

	RMSE		
	Salinidad (psu)	Nivel (m)	Corrientes (m/s)
Punta Tigre	5,27	0,29	0,15
Montevideo		0,29	
Colonia		0,40	

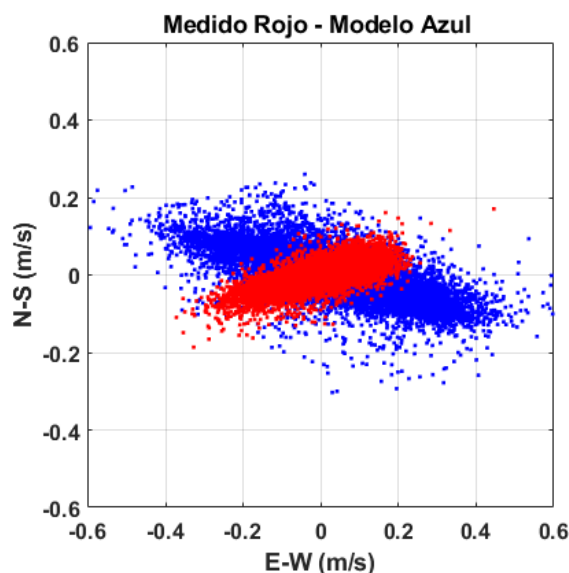


Figura 69: Validación del modelo en el nivel de detalle N2: comparación de corriente promedio en vertical (m/s) obtenida con el modelo calibrado con los datos medidos en Punta Tigre para el año 2017.

8.2.3 Discusión

Se realizó una exhaustiva validación del modelo numérico *RPsal* considerando el nivel de alta resolución N2 y simulando 3 años (2016, 2017 y 2022), para los cuales se cuenta con datos de salinidad en Arazatí, Punta Tigre y Gas Sayago, datos de niveles y corrientes en Arazatí y Punta Tigre, y datos de elevación de la superficie libre en Arazatí, Punta Tigre, Montevideo y Colonia. Además, se validó el nivel N2 para el año 2021 que se había utilizado en la calibración.

Los resultados obtenidos durante la etapa de validación del modelo muestran que se mantiene el nivel de calidad que tiene el modelo en la representación de la salinidad, niveles y corrientes.

8.3 Síntesis

Los resultados muestran que el modelo numérico calibrado y validado reproduce correctamente la variación espacial y temporal de la salinidad en la costa uruguaya, principalmente la salinidad medida en Arazatí, representando los eventos de incremento y descenso de salinidad, y mayormente los períodos en los cuales se registra salinidad nula. Por otra parte, el modelo sobrestima levemente los valores de elevación de la superficie libre en todas las estaciones analizadas con algunas diferencias principalmente en la dirección de la corriente promedio en vertical en Punta Tigre.

Teniendo en cuenta que el objetivo del modelo *RPsal* es reproducir la dinámica del campo salino en toda la costa uruguaya pero principalmente en la zona de Arazatí, se considera que la calidad del modelo implementado es buena y suficiente para pasar a la etapa de generación del hindcast de salinidad.

9 Hindcast de salinidad en Arazatí

9.1 Metodología

9.1.1 Período de tiempo

El modelo *RPsal* calibrado y validado para la zona de Arazatí se utiliza para generar un hindcast de la salinidad en la zona de varios años de duración. Para esto, se mantienen los parámetros y características principales de la implementación del modelo, pero se modifican las condiciones de borde según los forzantes correspondientes a cada año en base a datos históricos. Estos forzantes son los caudales fluviales (ríos Paraná y Uruguay), campos de vientos y presiones atmosféricas (de la reanálisis del ECWMF) y mareas provenientes del Atlántico Sur (modelo regional *ASTide* forzado por vientos y presiones de reanálisis ERA-5 y ERA-INTERIM).

El período de tiempo para el cual se genera el hindcast de salinidad en Arazatí en este estudio son los 35 años comprendidos entre 1988 y 2022. De esta manera se simula un período de tiempo extenso que incluye diversas condiciones de los forzantes que determinan la salinidad en la zona de estudio, los caudales fluviales, los vientos y las mareas. En la Figura 70 se presenta la serie temporal de caudales fluviales ingresados al modelo para el período simulado 1988 a 2022. Es importante aclarar que no se incluyó el año 2023 en el hindcast pues las medidas de salinidad en Arazatí registraron valores nulos durante todo el período.

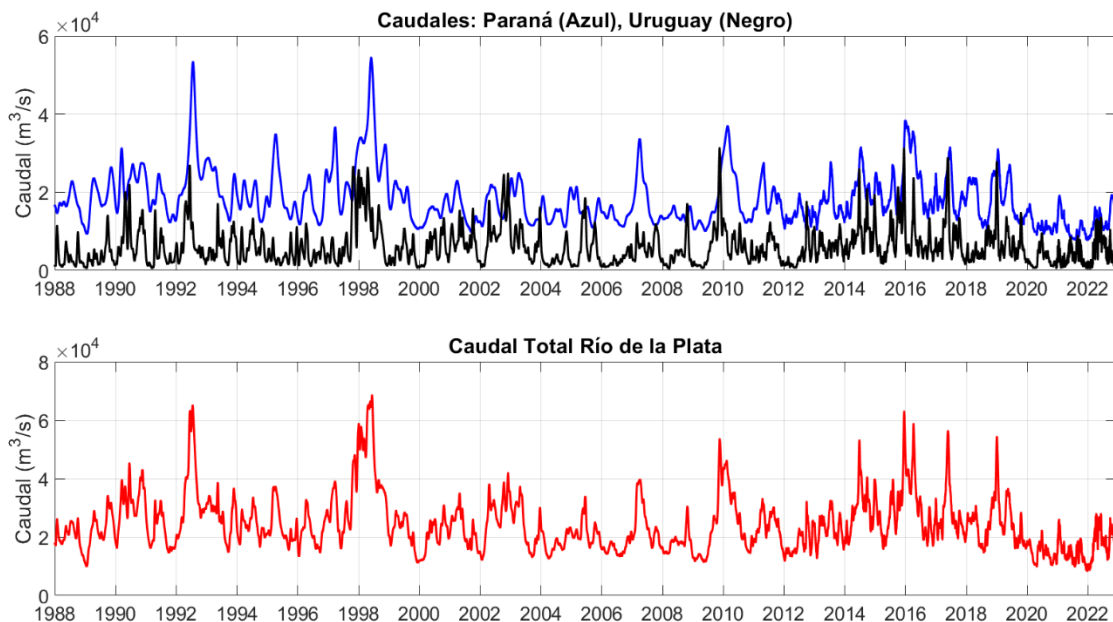


Figura 70: Valores diarios de caudal fluvial de los ríos Paraná, Uruguay y total del Río de la Plata ingresados al modelo para generar el hindcast de salinidad.

9.1.2 Implementación numérica

La generación del hindcast implicó la realización de una gran cantidad de simulaciones con el modelo y cálculos de preprocesamiento y postprocesamiento. Todas las simulaciones se realizaron en el Centro Nacional de Supercomputación de Uruguay Clusteruy utilizando 16 cores ejecutando en simultaneo ambos niveles de resolución (modelo global del Río de la Plata y nivel de detalle N2). Para poder correr los años en paralelo se definió una metodología que consistió

en inicializar algunos años (por ejemplo el año n) a partir de una condición inicial interpolada a partir de resultados de otro año de caudal fluvial similar y luego cuando se tiene simulado el año anterior ($n-1$) se repite el primer mes del año n , tiempo suficiente para independizarse de la condición inicial. Considerando los recursos disponibles en el Clusteruy se pudieron simular aproximadamente de a 6 y 8 años en paralelo. Además del modelo *RPsal*, para cada año fue necesario correr previamente el modelo regional de marea *AStide* para generar las condiciones de borde de marea. Simular cada año del hindcast implicó un total de aproximadamente 3.425 horas de computo de CPU en un tiempo real de aproximadamente 231 horas. Considerando los 35 años totaliza aproximadamente 120.000,0 horas de computo de CPU y un tiempo real de 8.091 horas.

9.1.3 *Análisis de los resultados*

Como resultado del hindcast se obtienen valores horarios de salinidad en las 18 capas verticales del modelo en todas las celdas del dominio del modelo de detalle N2 y del modelo global del Río de la Plata. También se obtienen la elevación de la superficie libre y las corrientes en cada celda de cálculo del modelo. Para este estudio se extraen y analizan las series de salinidad obtenidas en el punto de control AR del modelo correspondiente a la ubicación del equipo CTD fondeado en el marco del convenio, y cercano a la obra de toma proyectada para la nueva planta de tratamiento.

Los resultados obtenidos se analizan de diversas maneras. En primer lugar, se presentan gráficamente los resultados de salinidad obtenidos con el modelo para los 35 años simulados y se analiza la serie temporal obtenida año a año. En segundo lugar, se define un umbral de interés para el cual los resultados del modelo son confiables y se realiza una estadística de las características de los eventos de salinidad que superan dicho umbral. En tercer lugar, se realiza un análisis en detalle de los años para los cuales se observan eventos importantes de salinidad.

Para definir el/los umbral/es para el/los cual los resultados del hindcast son más confiables se calcula el porcentaje de aciertos (%SupUMBReal) y el porcentaje de falsos aciertos (%SupUMBFalse) para varios umbrales utilizando el período en común entre el modelo y los datos de salinidad medidos en Arazatí de los años 2021 y 2022. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 21 y en la Figura 71. Se observa que para el umbral de 0,2 psu se obtiene un valor de %SupUMBReal alto mayor a 85% con un 10% de falsos positivos. Para un umbral un poco mayor 0,3 psu estos valores también son aceptables iguales a 80% y 7%, respectivamente. Para los umbrales 0,4 psu y 0,5 psu estos porcentajes son muy similares iguales a 77 y 75%, y 6 y 5%. Para umbrales mayores los valores de %SupUMBReal son un poco más desfavorables (menores a 75%) aunque los valores de %SupUMBFalse también disminuyen a valores bajos siendo menores a 3%. Este análisis muestra que los resultados del modelo son confiables para umbrales de salinidad bajos, principalmente para valores menores a 0,5 psu. Se toma por tanto el valor de 0,45 psu como umbral para estudiar estadísticamente los eventos de salinidad obtenidos en el hindcast que superan dicho umbral.

La estadística de los eventos de salinidad a partir del hindcast se realiza tomando un umbral de 0,45 psu y la capa 3 del modelo, es decir, la salinidad cercana al fondo. Esto significa que los eventos de salinidad se definen cuando la salinidad en Arazatí en el fondo supera dicho umbral y tiene una duración determinada hasta que la salinidad baja por debajo de ese umbral. Se

analizó estadísticamente la independencia entre eventos y se determinó que los eventos separados por un intervalo de 26 horas o menos constituyen un mismo evento. Una vez definidos todos los eventos de salinidad se analizan estadísticamente las características de estos, principalmente su duración y ocurrencia a lo largo de todo el período y de manera anual. Además, se analiza la duración entre eventos y como varía ese indicador año a año.

Tabla 21: Porcentajes sobre umbral %SupUMBReal y %SupUMBFalso de representación del modelo RPsal de los datos medidos en Arazatí durante 2021 y 2022 según distintos umbrales definidos. El total de datos medidos es 12.221,0.

UMBRAL (psu)	Nºdatos medidos superan umbral	Nºdatos medidos NO superan umbral	%SupUMBReal	%SupUMBFalso
0,1	4923	7298	65,9	12,9
0,2	2906	9315	86,4	9,5
0,3	2730	9491	80,7	7,1
0,4	2662	9559	76,8	5,9
0,5	2605	9616	74,9	5,2
1	2338	9883	68,6	3,0
2	1538	10683	65,8	2,4
3	900	11321	71,7	2,5
4	468	11753	72,9	2,3
5	284	11937	51,8	1,9

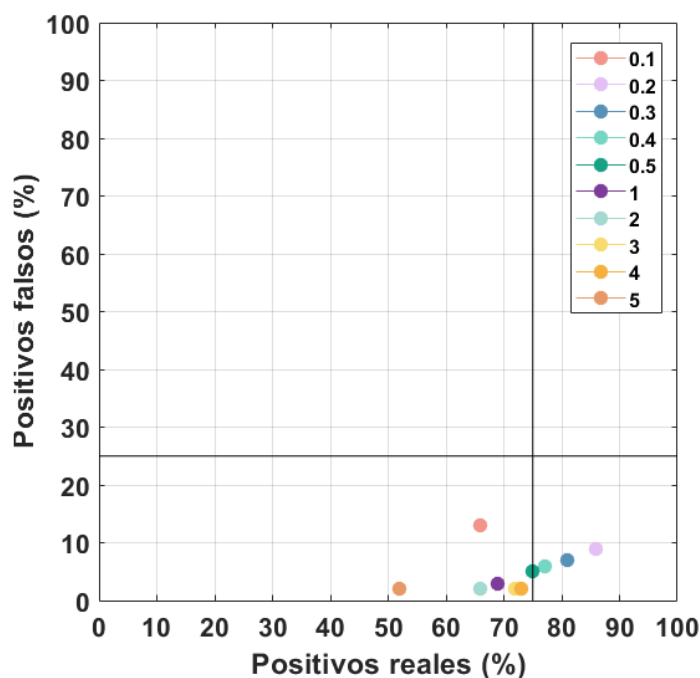


Figura 71: Comparación gráfica de %SupUMBReal y %SupUMBFalso de representación del modelo RPsal de los datos medidos en Arazatí durante 2021 y 2022 según distintos umbrales definidos.

9.2 Resultados obtenidos

9.2.1 Serie temporal de salinidad en Arazatí

La serie total de salinidad obtenida con el hindcast en Arazatí para los 35 años entre 1988 y 2022 se presenta en la Figura 72 y el detalle de año a año se presenta en las Figuras 73 a 77. Se

presentan los resultados en dos capas verticales del modelo, una cercana al fondo y otra cercana a la superficie, y se observa que mayormente ambas coinciden, pero en algunos eventos de alta salinidad hay diferencia entre ambas capas. Los resultados obtenidos muestran una gran variabilidad en la salinidad, con años en los cuales prácticamente la salinidad es nula en la zona (1998, 2007, 2010, 2013, 2014, 2016 y 2017), años en los cuales hay algunos pocos eventos esporádicos de salinidad (1990, 1992, 1994, 1999, 2005, 2011, 2015 y 2019), años en los cuales hay varios eventos cortos de incremento de salinidad distribuidos en el año (1988, 1989, 1991, 1995, 1996, 1997, 2000, 2001, 2002, 2003, 2006, 2008, 2012, 2018) y años con eventos muy frecuentes ó de larga duración de alta salinidad (2004, 2008, 2009, 2020, 2021, 2022).

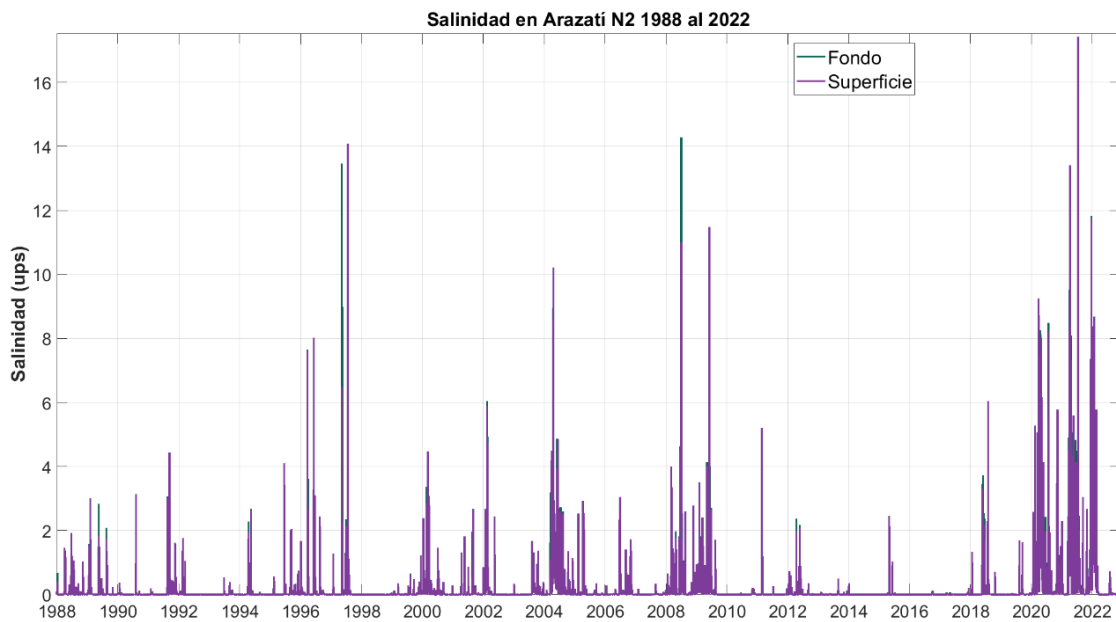


Figura 72: Salinidad en Arazatí obtenida en el hindcast con el modelo RPsal para el período 1988 a 2022.

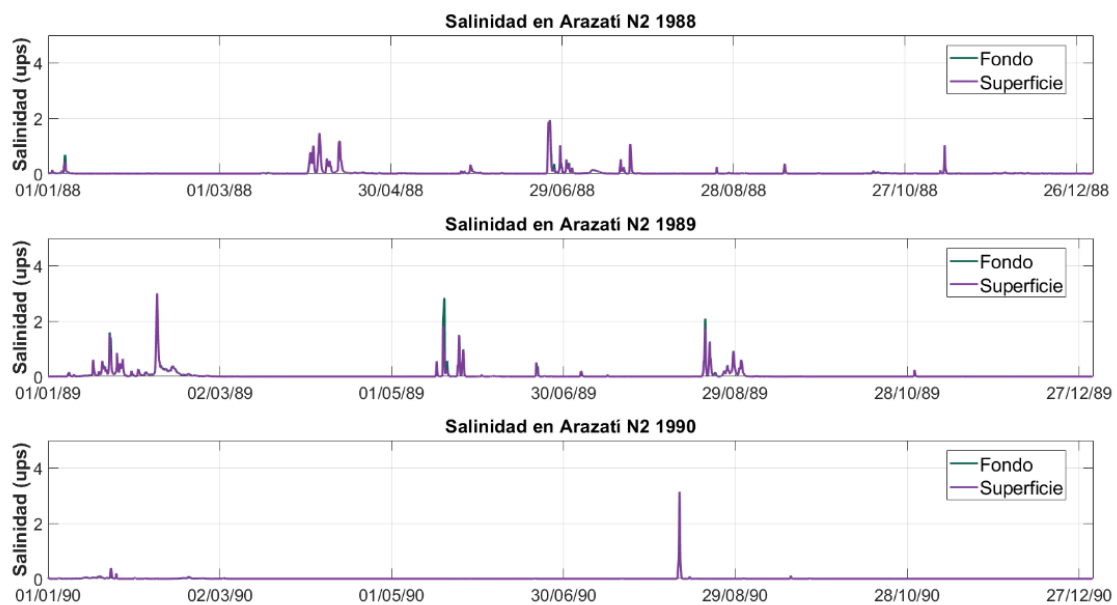


Figura 73: Salinidad en Arazatí obtenida en el hindcast con el modelo RPsal para el período 1988 a 2022. Detalle de los años 1988 a 1990.

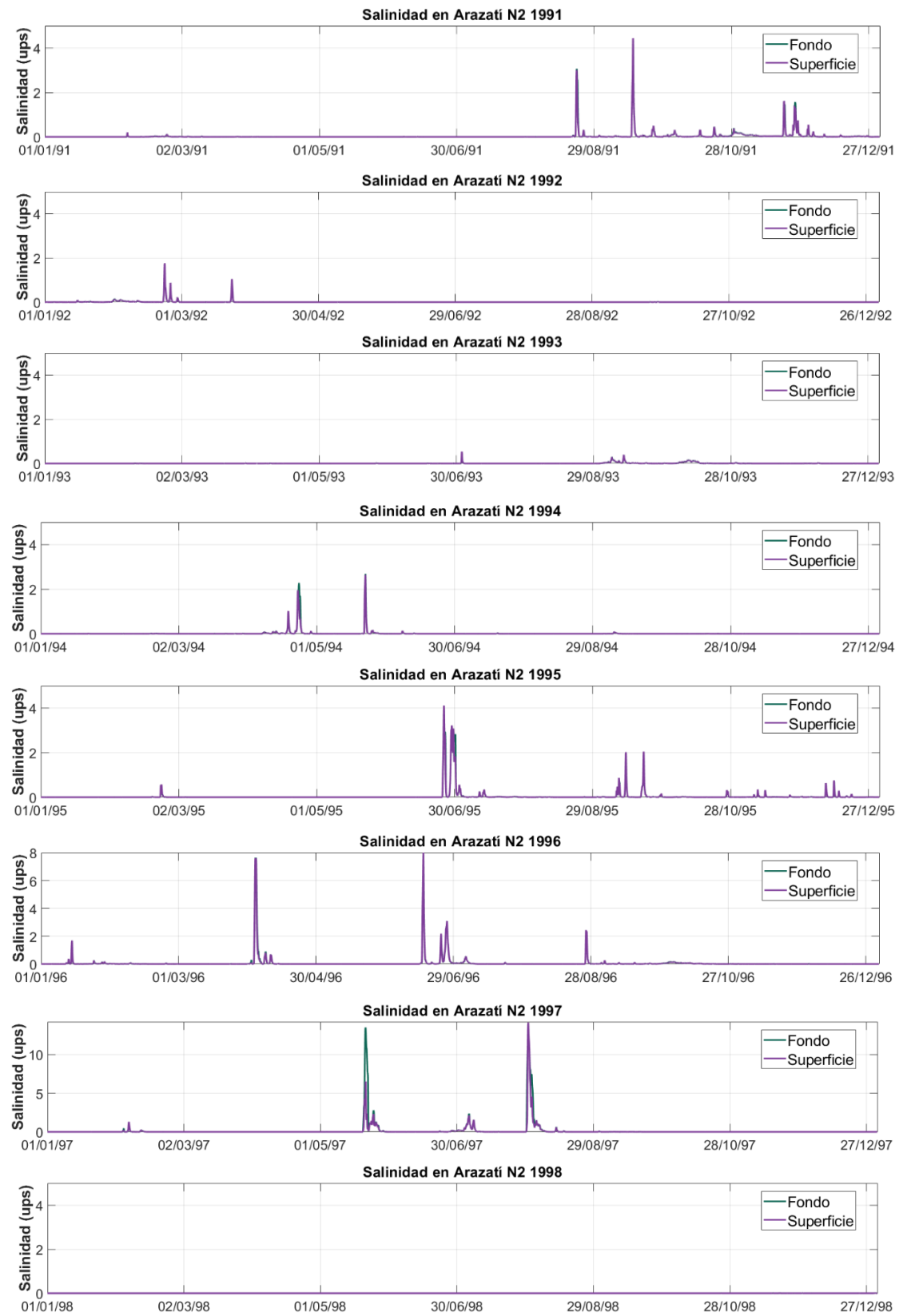


Figura 74: Salinidad en Arazatí obtenida en el hindcast con el modelo RPsal para el período 1988 a 2022. Detalle de los años 1991 a 1998.

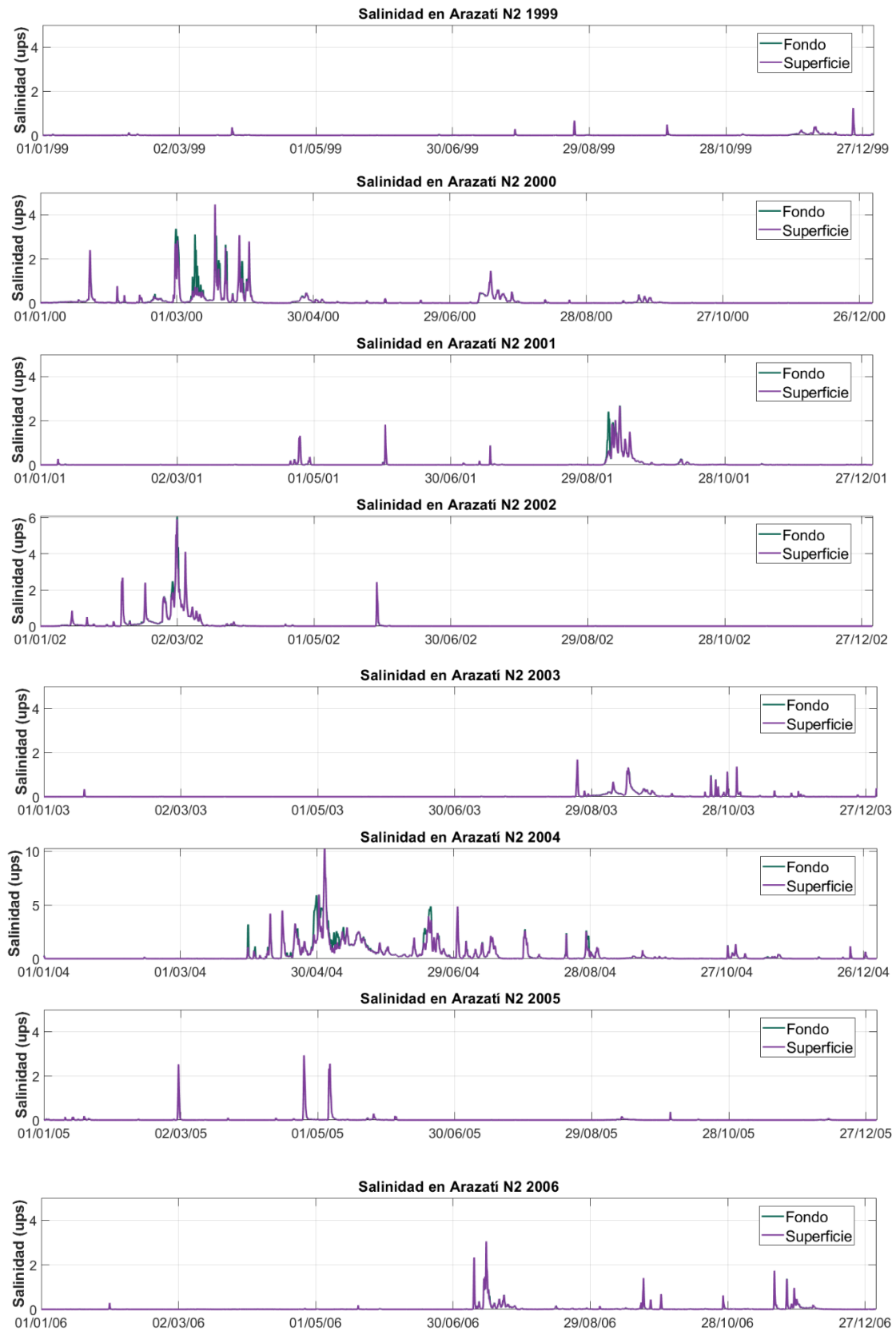


Figura 75: Salinidad en Arazatí obtenida en el hindcast con el modelo RPsal para el período 1988 a 2022. Detalle de los años 1999 a 2006.

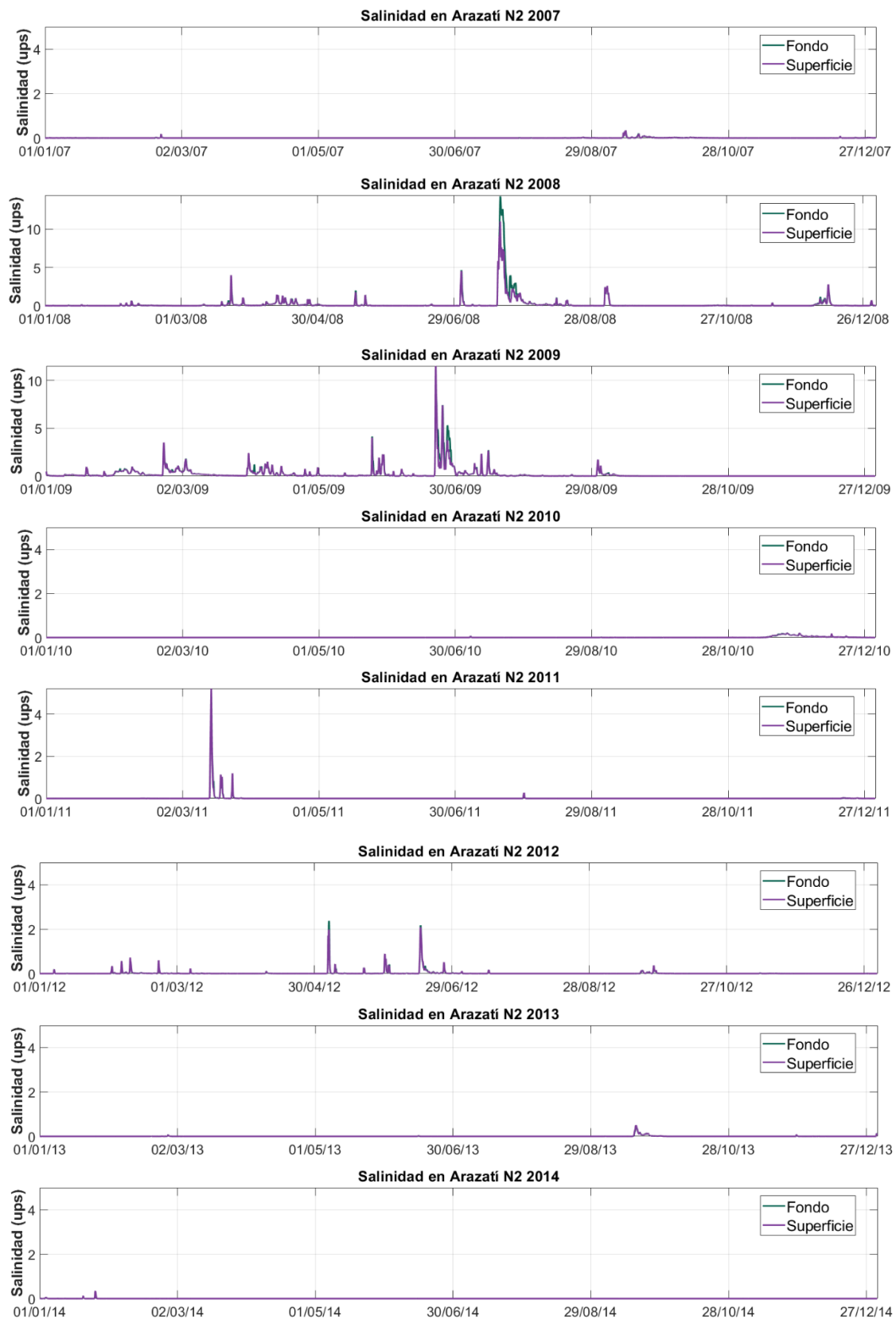


Figura 76: Salinidad en Arazatí obtenida en el hindcast con el modelo RPsal para el período 1988 a 2022. Detalle de los años 2007 a 2014.

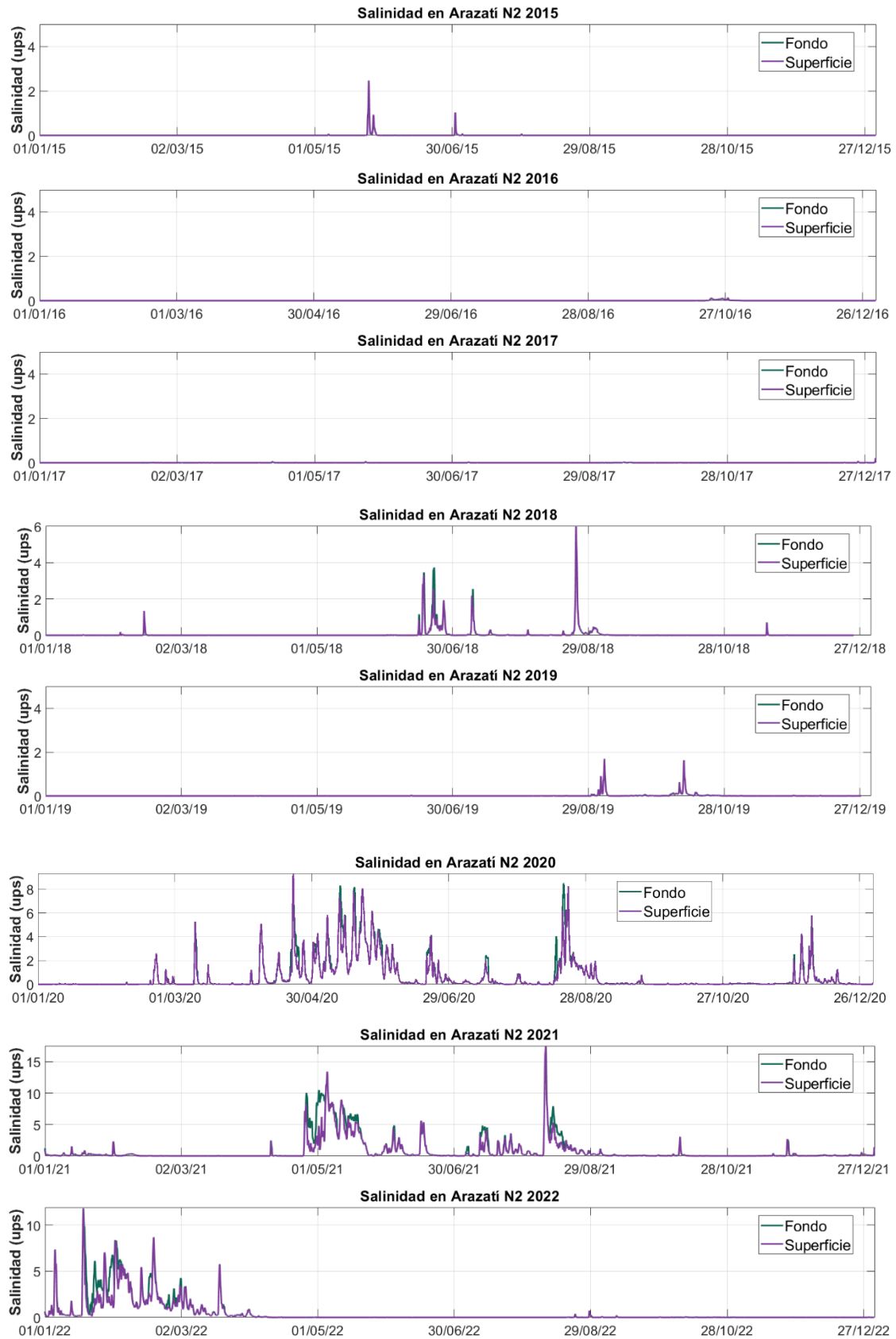


Figura 77: Salinidad en Arazatí obtenida en el hindcast con el modelo RPsal para el período 1988 a 2022. Detalle de los años 2015 a 2022.

9.2.2 Análisis de eventos de salinidad

Tomando un umbral de 0,45 psu y un intervalo mínimo entre eventos de 26 horas para que los eventos de salinidad en Arazatí sean independientes, se identifican durante los 35 años del hindcast 247 eventos en total, de los cuales 224 son eventos cortos de duración menor a 5 días, 20 eventos tienen una duración entre 5 días y 1 mes, y 3 eventos superan el mes de duración. En la Tabla 22 se presentan los resultados obtenidos de los distintos eventos y sus características por año para todo el período del hindcast. En la Figura 78 se presenta el histograma de frecuencia de ocurrencia para los eventos de duración menor a 30 días de todo el período; se observa que de los eventos menores a 5 días más del 60% tienen una duración menor a 1 día mientras que de los eventos entre 5 días y 30 días la mayoría tienen duración entre 5 y 15 días; solamente hay 5 eventos de duración entre 15 días y 30 días.

Se observa que los años con mayor cantidad de días con salinidad mayor al umbral son los años 2020 (96 días), 2021 (81 días), 2004 (74 días), 2022 (64 días), 2009 (45 días) y 2008 (casi 31 días); en la Figura 79 se presentan en detalle esos eventos. En esos 6 años la salinidad máxima superó los 10 psu. En el año 1997 también la salinidad máxima supera los 10 psu pero solamente 17 días la salinidad superó el umbral. Respecto a los 3 eventos de duración mayor a 30 días corresponden a los años 2004, 2020 y 2022, siendo el mayor evento obtenido con el modelo el del 2022 de una duración de 54.5 días.

Tabla 22: Caracterización estadística de los eventos de salinidad por sobre el umbral de 0,45 psu durante los 35 años del hindcast.

AÑO	N° días eventos	EVENTOS MAYORES UMBRAL 0,45 PSU										
		N° eventos				Duraciones Eventos (días)			Intervalos Entre Eventos (días)			Salinidad máxima (psu)
		Total	Menor a 5 días	Entre 5 y 30 días	Mayor a 30 días	Mínimo	Medio	Máximo	Mínimo	Medio	Máximo	
1988	7	11	11	0	0	0.1	0.7	1.6	1	30	110	1.9
1989	9	12	12	0	0	0.1	1.0	2.6	2	27	122	3.0
1990	1	1	1	0	0	0.8	0.8	0.8	144	182	220	3.1
1991	5	7	7	0	0	0.0	0.8	2.2	3	45	232	4.4
1992	2	3	3	0	0	0.4	0.6	0.8	2	91	283	1.7
1993	0	1	1	0	0	0.1	0.1	0.1	182	182	182	0.5
1994	3	3	3	0	0	0.5	1.0	1.5	4	90	223	2.7
1995	8	9	9	0	0	0.2	0.9	2.6	1	36	122	4.0
1996	9.8	8	8	0	0	0.3	1.3	3.9	2	39	127	7.9
1997	17.3	5	3	2	0	0.3	3.7	6.9	7	58	141	14.0
1998	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0
1999	1	3	3	0	0	0.0	0.3	0.6	9	91	233	1.2
2000	20.3	11	10	1	0	0.1	1.9	5.8	2	29	158	4.4
2001	11.5	4	3	1	0	0.3	3.2	11.1	37	70	113	2.7
2002	18.1	6	5	1	0	0.0	3.4	16.7	6	49	217	6.0
2003	5	7	7	0	0	0.3	0.8	2.3	2	45	233	1.6
2004	74.4	22	20	1	1	0.1	3.6	43.7	1	12	89	10.2
2005	4	3	3	0	0	0.8	1.1	1.4	10	90	239	2.9
2006	7	10	10	0	0	0.1	0.6	2.8	2	33	189	3.0
2007	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0
2008	31.0	19	18	1	0	0.2	1.8	11.7	1	17	92	14.3
2009	45.8	24	20	4	0	0.0	2.2	12.4	0	13	120	11.4
2010	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0
2011	3	3	3	0	0	0.3	1.0	1.8	3	90	283	5.2
2012	4	7	7	0	0	0.1	0.5	1.5	4	45	189	2.4
2013	0	1	1	0	0	0.0	0.0	0.0	105	182	260	0.5
2014	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0
2015	2	3	3	0	0	0.4	0.6	1.0	1	91	183	2.4
2016	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0
2017	0	0	0	0	0	0.0	0.0	0.0	0	0	0	0.0
2018	11	8	7	1	0	0.1	1.5	6.4	1	38	121	6.0
2019	3	3	3	0	0	0.2	1.1	2.2	2	89	245	1.7
2020	95.8	23	19	3	1	0.1	4.3	38.3	2	11	66	9.2
2021	81.5	22	18	4	0	0.1	3.8	28.1	0	12	69	17.4
2022	64.5	8	6	1	1	0.3	8.4	54.5	0	33	149	11.8

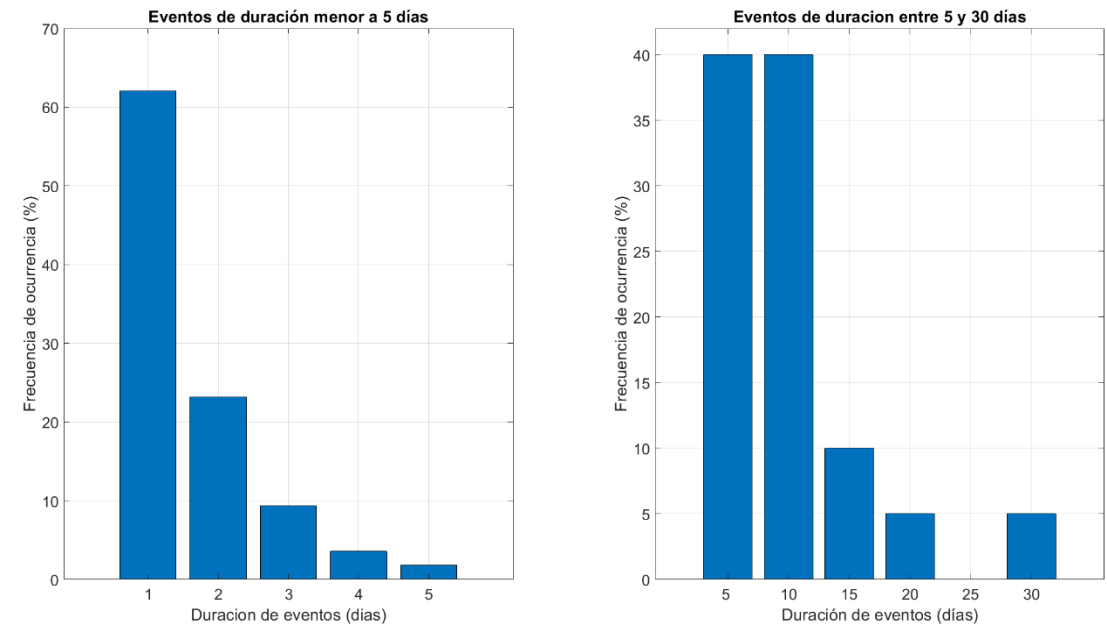


Figura 78: Histogramas de frecuencia de ocurrencia de los eventos de salinidad de duración menor a 5 días (panel izquierdo) y de duración entre 5 y 30 días (panel derecho).

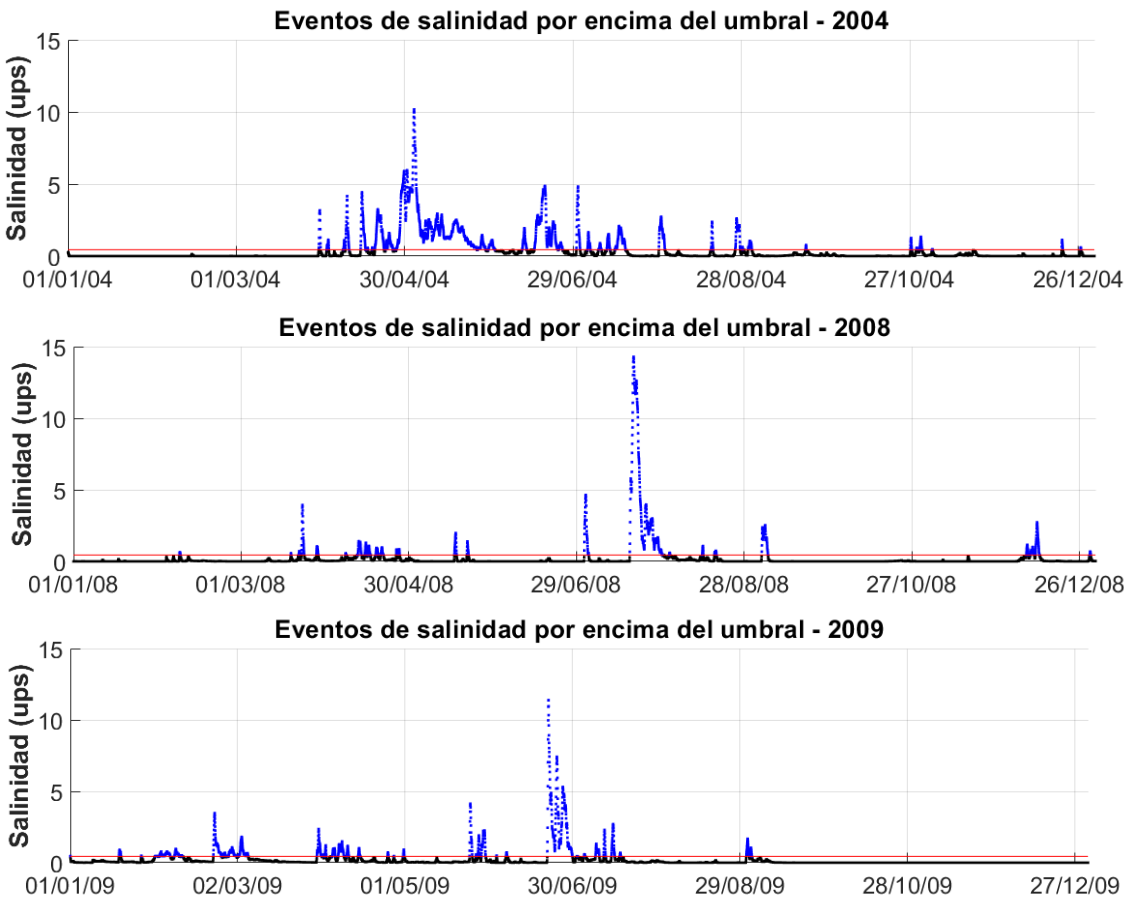




Figura 79: Detalle de los eventos de salinidad para los años con mayor cantidad de días con salinidad por encima del umbral.

9.3 Discusión

En este capítulo se presentó el hindcast de salinidad realizado en este estudio en base al modelo numérico *RPsal* ajustado para el Río de la Plata y principalmente para el área de Arazatí. El hindcast generado es de 35 años correspondiente al período 1988 – 2022 utilizando datos medidos y de reanálisis globales y regionales para forzar el modelo. Los resultados muestran gran variabilidad de salinidad en la zona a lo largo de los 35 años. Si solamente se analizan los eventos (considerando un intervalo mínimo entre ellos de 26 horas para ser considerados independientes), la estadística muestra 247 eventos en total, de los cuales 224 son eventos cortos de duración menor a 5 días, 20 eventos tienen una duración entre 5 días y 1 mes, y 3 eventos superan el mes de duración. El evento de mayor duración identificado es de 54 días obtenido para el 2022.

No obstante, es importante notar que hay que analizar algunos años particulares en detalle, que muestran una gran cantidad de días en el año que se supera el umbral, aunque no sea asociado a un único evento. Así, fueron identificados que los años con más cantidad de días en los cuales la salinidad supera un umbral de 0,45 psu son (en orden decreciente de días) el 2020, 2021, 2022, 2004, 2009 y 2008. En particular, en el año 2020 se contabilizan un total de 96 días con salinidad por encima del umbral. A su vez, si se considera el período marzo 2020 a marzo 2022 (inclusive) se cuantifican 242 días con salinidad por encima del umbral, es decir, una relación de

casi 1:3 entre días con salinidad por encima del umbral y días con salinidad por debajo del umbral.

Estos resultados del hindcast de salinidad del modelo numérico complementan los resultados obtenidos a partir del análisis de la posición del frente de turbidez y su correlación con la salinidad en Arazatí (IMFIA, 2004). Durante el período en común entre ambos análisis (2002 a 2022) se observa que, en la mayoría de los eventos de retracción hacia el oeste del frente de turbidez, identificados en el análisis de imágenes satelitales, el modelo numérico también reproduce valores de salinidad por encima del umbral 0,45 psu. Esto incluye los eventos de los años 2004, 2009, 2011, 2012, 2015, 2018, 2020, 2021 y 2022. Por otra parte, en los casos que se observan diferencias, estas pueden interpretarse como parte de incertidumbres asociadas a cada una de las aproximaciones y a su distinta resolución temporal (horario en el modelo numérico vs quincenal en el análisis satelital).

10 Conclusiones

En este estudio se ha generado el hindcast de salinidad en la costa de Arazatí a partir de la implementación y calibración de un modelo numérico que resuelve la hidrodinámica del sistema incluyendo la dinámica del campo salino (denominado *RPsal*). Para esto, se partió de la experiencia previa con el modelo *RPtide* de todo el Río de la Plata y se realizaron ajustes en base al estudio de los datos recientes y a una serie de análisis de sensibilidad del modelo numérico. Para la calibración y validación del modelo *RPsal* se ajustaron las parametrizaciones de la tensión superficial del viento y la difusión horizontal disponibles para representar las medidas recientes de salinidad en la zona.

El modelo *RPsal* implementado es un modelo 3D baroclínico que resuelve el flujo y el campo salino en la zona intermedia del Río todo el Río de la Plata y el Frente Marítimo, desde la desembocadura de los ríos Uruguay y Paraná hasta el área limitada por Mar del Plata (Argentina) hasta Rio Grande (Brasil), extendiéndose 170 km offshore hasta aproximadamente los 200 m de profundidad en la plataforma continental (ver Figura B). El mismo es forzado en la frontera oceánica por el nivel de mar y las corrientes provenientes del modelo regional *ASTide* (Martínez et al., 2015), que es una implementación barotrópica 2D del modelo numérico MOHID para el Océano Atlántico Sur con una resolución de grilla horizontal de 0,1° en longitud (aproximadamente 9 km) y latitud (aproximadamente 11 km) (ver dominio en Figura B). El modelo *RPsal* trabaja con dos dominios encajados para incrementar la resolución en la zona intermedia del Río de la Plata donde se sitúa Arazatí, pasando de una grilla de 0,01° de resolución horizontal en longitud (aproximadamente 1,8 km) y latitud (aproximadamente 2,2 km) a una grilla del doble de resolución en el nivel de detalle N2, es decir, de 0,02° de resolución horizontal en longitud (aproximadamente 900 m) y latitud (aproximadamente 1100 m) (ver Figura B). La resolución vertical del modelo *RPsal* en ambos niveles de resolución es de 18 capas tipo sigma con mayor resolución cerca de la superficie libre y cerca del fondo.

Los resultados muestran que el modelo numérico calibrado y validado reproduce correctamente la variación espacial y temporal de la salinidad en la costa uruguaya, tanto en la zona de Arazatí como también en Punta Tigre y cerca de Montevideo (datos de Gas Sayago). En Arazatí se reproducen muy bien los eventos de incremento y descenso de salinidad que se midieron en la zona, reproduciendo también los períodos en los cuales se registra salinidad nula, con un RMSE de 1,4 psu. Por otra parte, el modelo sobrestima levemente los valores de elevación de la superficie libre en todas las estaciones analizadas y presenta algunas diferencias principalmente en la dirección de la corriente promedio en vertical en Punta Tigre.

El modelo *RPsal* calibrado y validado para la zona de Arazatí se utiliza para generar un hindcast de la salinidad en la zona de varios años de duración. Para esto, se mantienen los parámetros y características principales de la implementación del modelo, pero se modifican las condiciones de borde según los forzantes correspondientes a cada año en base a datos históricos. Estos forzantes son los caudales fluviales (ríos Paraná y Uruguay), campos de vientos y presiones atmosféricas (de la reanálisis del ECWMF) y mareas provenientes del Atlántico Sur (modelo regional *ASTide* forzado por vientos y presiones de reanálisis ERA-5 y ERA-INTERIM).

El período de tiempo para el cual se genera el hindcast de salinidad en Arazatí en este estudio son los 35 años comprendidos entre 1988 y 2022. De esta manera se simula un período de

tiempo extenso que incluye diversas condiciones de los forzantes que determinan la salinidad en la zona de estudio, los caudales fluviales, los vientos y las mareas.

Los resultados obtenidos muestran una gran variabilidad en la salinidad, con años en los cuales prácticamente la salinidad es nula en la zona, años en los cuales hay algunos pocos eventos esporádicos de salinidad, años en los cuales hay varios eventos cortos de incremento de salinidad distribuidos en el año y años con eventos muy frecuentes o de larga duración de alta salinidad.

Tomando un umbral de 0,45 psu y una duración mínima de 26 horas para que los eventos de salinidad en Arazatí sean independientes, se identifican durante los 35 años del hindcast 247 eventos en total, de los cuales 224 son eventos cortos de duración menor a 5 días, 20 eventos tienen una duración entre 5 días y 1 mes, y 3 eventos superan el mes de duración. Se observa que los años con mayor cantidad de días con salinidad mayor al umbral son los años 2020 (96 días), 2021 (81 días), 2004 (74 días), 2022 (64 días), 2009 (45 días) y 2008 (casi 31 días). Respecto a los 3 eventos de duración mayor a 30 días corresponden a los años 2004, 2020 y 2022, siendo el mayor evento obtenido con el modelo el del 2022 de una duración de 54 días. De los resultados obtenidos se destaca el período marzo 2020 a marzo 2022, durante el cual aproximadamente un tercio de los días el hindcast muestra salinidades mayores al umbral.

Estos resultados del hindcast de salinidad del modelo numérico complementan los resultados obtenidos a partir del análisis de la posición del frente de turbidez y su correlación con la salinidad en Arazatí (IMFIA, 2024). Durante el período en común entre ambos análisis (2002 a 2022) se observan algunas diferencias en los resultados que resaltan la incertidumbre que existe en la determinación de la ubicación del frente de salinidad con umbrales tan bajos como 0,45 psu, en un ambiente con la complejidad del Río de la Plata. Sin embargo, en la mayoría de los eventos de retracción hacia el oeste del frente de turbidez identificados en el análisis de imágenes satelitales, el modelo numérico también reproduce valores de salinidad por encima del umbral 0,45 psu. Esto incluye los eventos de los años 2004, 2009, 2011, 2012, 2015, 2018, 2020, 2021 y 2022.

Aunque en este informe se presentan algunos estadísticos de los eventos de salinidad para la zona de Arazatí calculados a partir de los resultados del hindcast, es importante mencionar que el hindcast pone a disposición series extensas de 35 años de duración de datos numéricos de frecuencia horaria de salinidad en toda la costa uruguaya, a partir de las cuales se pueden realizar otro tipo de cálculos estadísticos. Además, el modelo numérico implementado es una base para el análisis de otros escenarios futuros que podría ser de interés analizar, como variaciones en los forzantes por variabilidad y cambio climático.

Por último, es importante recordar que los resultados del modelo numérico son una aproximación de la hidrodinámica y dinámica de salinidad de la zona y que, aunque se reproducen correctamente sus principales características, hay limitación en los resultados obtenidos, fundamentalmente por limitaciones de la información de base que el modelo utiliza. Entre ellas se destaca la batimetría local, como se mencionó en la Sección 6, se utilizó la información de la carta de la zona intermedia del Río de la Plata, la carta N° 50 del SOHMA que, a pesar de ser la carta de mayor detalle para la zona, fue elaborada a partir de datos escasos. Por tanto, si a futuro se desea mejorar las capacidades predictivas del modelo sería de gran

interés realizar un relevamiento batimétrico moderno de la zona intermedia del Río de la Plata entre Montevideo y Colonia.

11 Referencias

Alonso, R., Jackson, M., Santoro, P., Fossati, M., Solari, S., (2017). Wave and tidal energy resource assessment in Uru-guayan shelf seas. *Renewable Energy*, 114A, 18-31.

Dee, D.P. et al. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system, *Q. J. R. Meteorol. Soc.* 137 (2011) 553e597.

Fernández, M., and Piedra-Cueva, I. (2011). “Revisión de un modelo regional de marea astronómica implementado sobre la región suroeste del Océano Atlántico,” Tesis De Maestria En Mecánica de los fluidos aplicada. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.

Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (2013a). A 3D hydrodynamic numerical model of the Río de la Plata and Montevideo’s coastal zone. *Appl Math Modell.*; 37: 1310-32.

Fossati, M.; Fernández, M.; Piedra-Cueva I. (2013b). Determination of a submarine outfall discharge location based on a 3D hydrodynamic-lagrangian high resolution model implemented for the Río de la Plata in South America. Libro: *Ocean modelling for coastal management a Case studies with MOHID*, IST Press, Lisboa (2013), pp. p69-p82. Editores Marcos MATEus, Ramiro Neves.

Fossati, M., Santoro, P., Mosquera, R., Martínez, C., Ghiardo, F., Ezzatti, P., Pedocchi, F., Piedra-Cueva, I. (2014b). Dinámica de flujo, del campo salino y de los sedimentos finos en el Río de la Plata. *RIBAGUA-Revista Iberoamericana del Agua*, 1, 48-63.

IMFIA (2018). Actualización del procesamiento de las mediciones de parámetros meteoceánicos registrados por la boya de Gas Sayago SA (Regasificadora). Convenio entre Gas Sayago SA y la Facultad de Ingeniería – Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA).

IMFIA (2021). Monitoreos hidrodinámicos y biológicos en el Río de la Plata en la zona de Punta del Tigre. Convenio entre UTE y la Facultad de Ingeniería – Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA).

IMFIA (2024). Estudio de salinidad en las aguas del Río de la Plata en la zona de Arazatí – Bocas del Cufre. Convenio entre OSE y la Facultad de Ingeniería – Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental (IMFIA).

Jackson, M.; Sienra, G.; Santoro, P.; Fossati, M. (2021). Temporal and Spatial Variability Scales of Salinity at a Large Microtidal Estuary. *J. Mar. Sci.Eng.* 2021, 9, 860.

Large, W. G., and S. Pond, 1981: Open ocean momentum flux measurements in moderate to strong winds. *J. Phys. Ocean.*, 11, 324-481.

Lyard, F.; Lefevre, F.; Letellier, T.; Francis, O. (2006). Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004, *Ocean. Dyn.* 56 (2006) 394e415.

Martínez, C., Silva, J.P., Dufrechou, E., Santoro, P., Fossati, M., Ezzati, P., Piedra-Cueva, I. (2015). Towards a 3D Hydro-dynamic numerical modeling system for long term simulations of the Río de la Plata dynamic. E-proceedings of the 36th IAHR World Congress, The Hague, the Netherlands.

Mateus, M.; Neves, R. (Eds.) Ocean Modelling for Coastal Management—Case Studies with Mohid; IST Press: Lisbon, Portugal, 2013.

Saha, S., Moorthi, S., Pan, H. L., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., ... Goldberg, M. (2010). The NCEP climate forecast system reanalysis. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 91(8), 1015–1057.

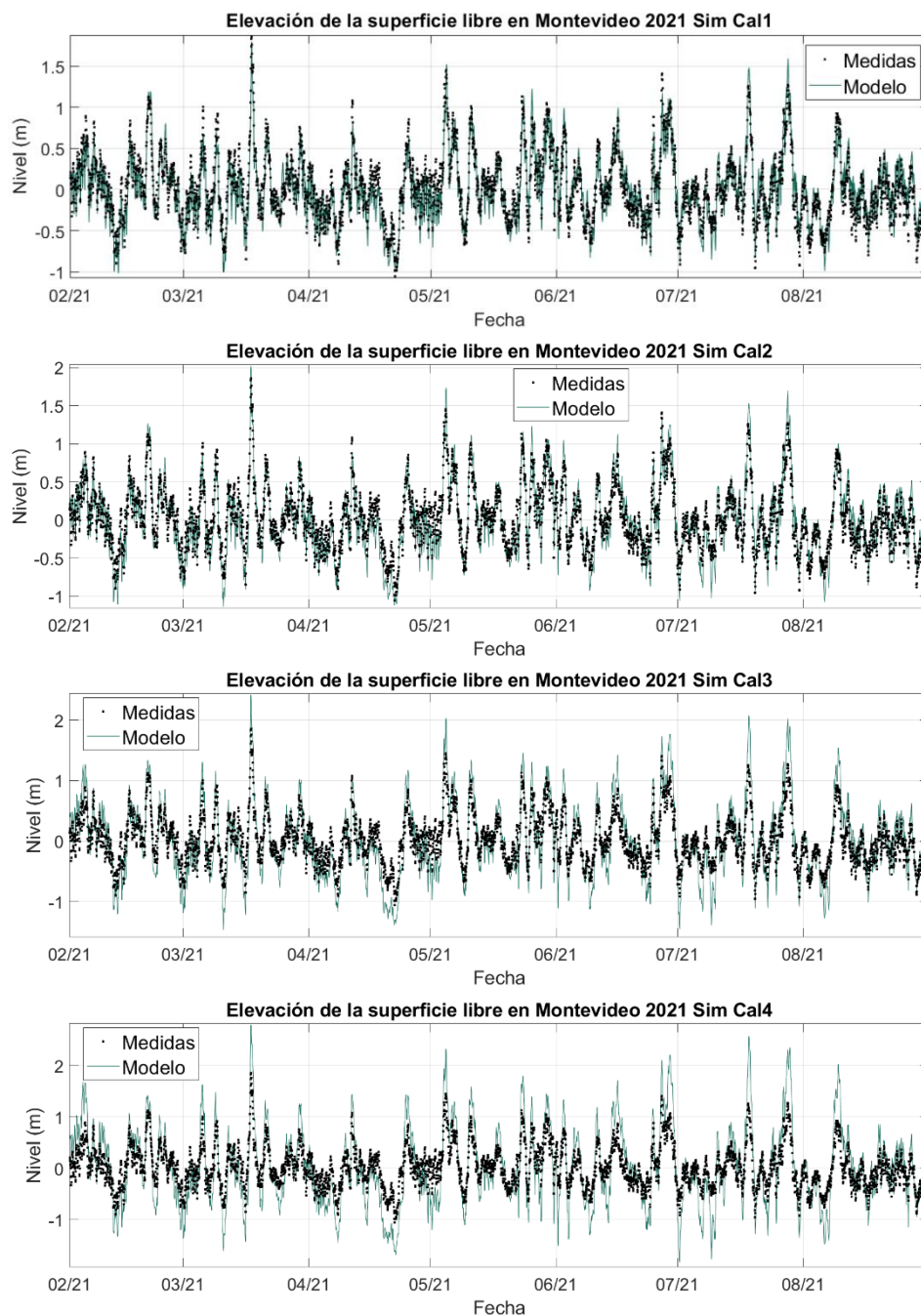
Santoro P, Fossati M, Piedra-Cueva I, (2013). Study of the meteorological tide in the Río de la Plata. *Continental Shelf Research*.

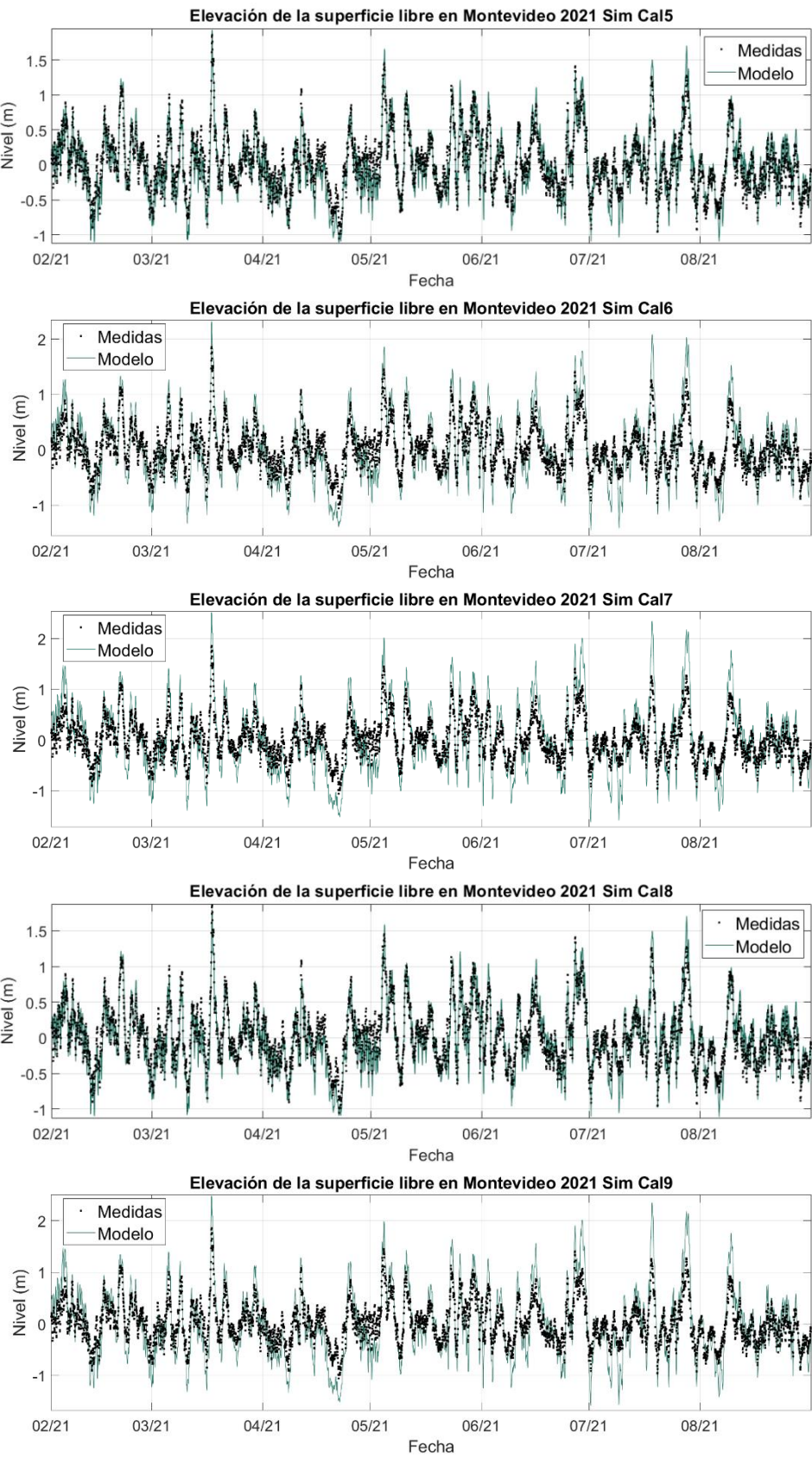
Simionato, C., Moreira, D., Piedra Cueva, I., Fossati, M. (2011). Proyecto FREPLATA – FFEM Modelado numérico y mediciones insitu y remotas de las transferencias de sedimentos finos a través del Río de la Plata. Parte A: adquisición de datos. *Frente Marítimo*, v. 22, p. 265-304.

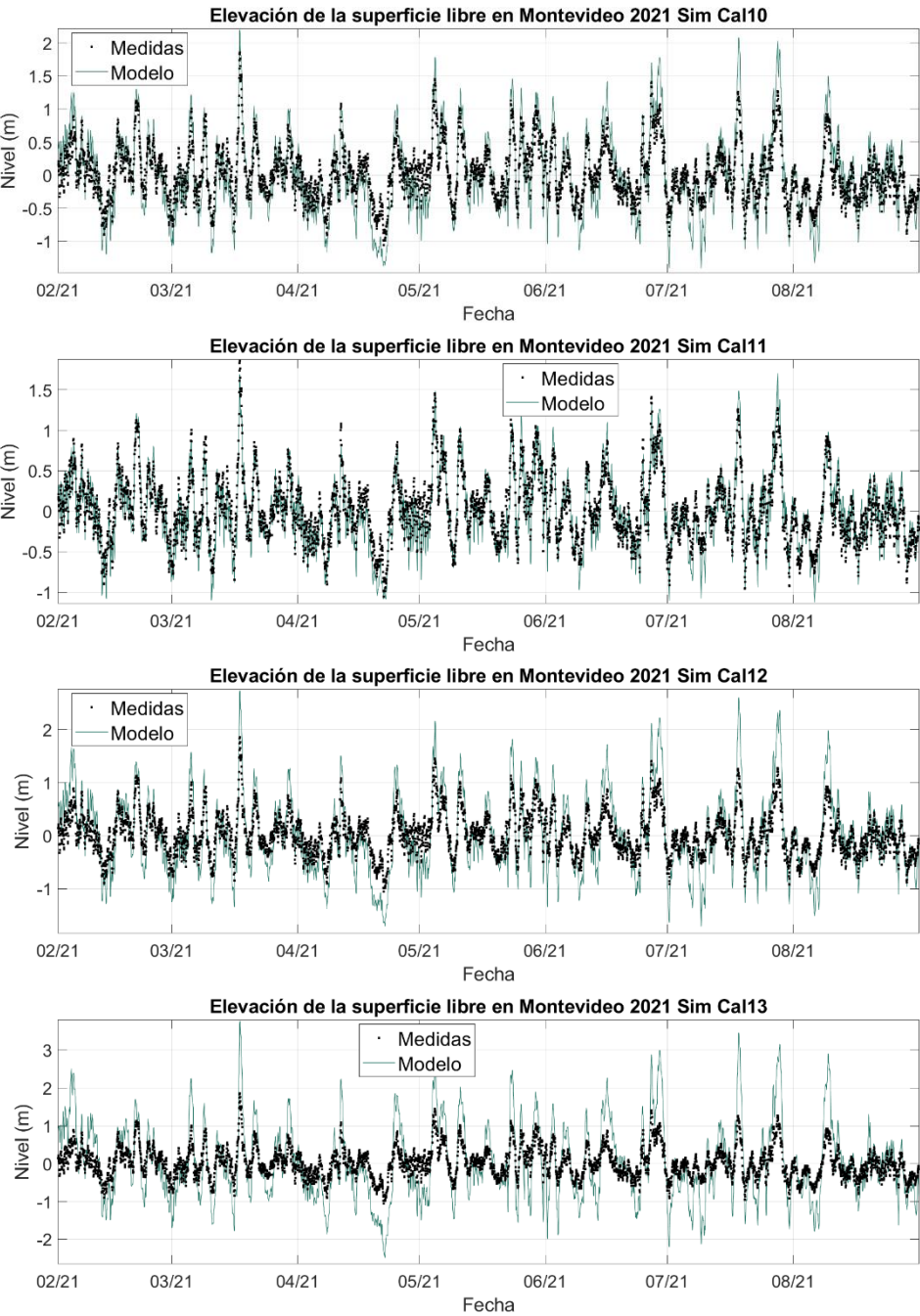
12 Anexos

12.1 Anexo 1: calibración del modelo Rpsal

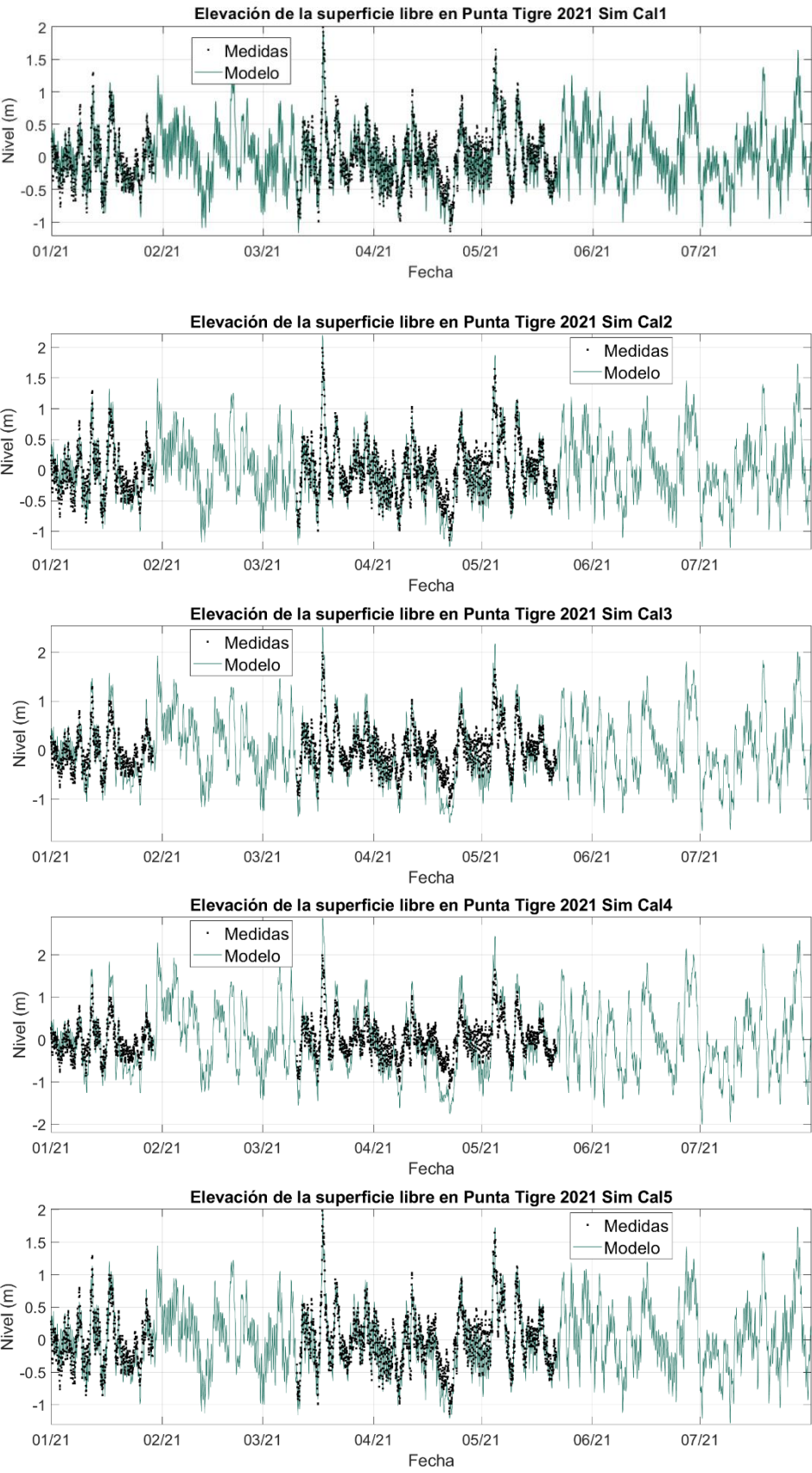
12.1.1 Niveles en Montevideo

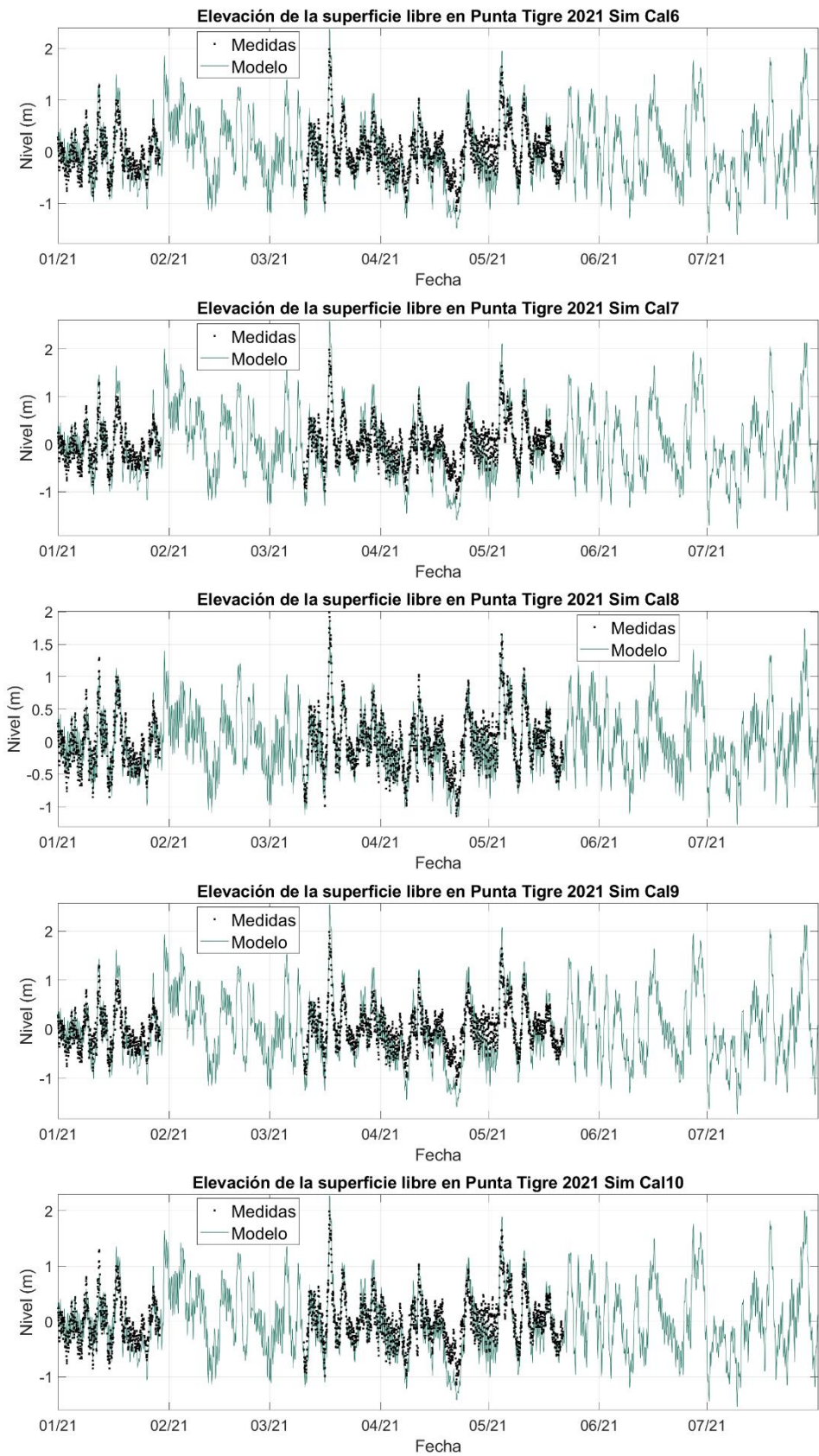


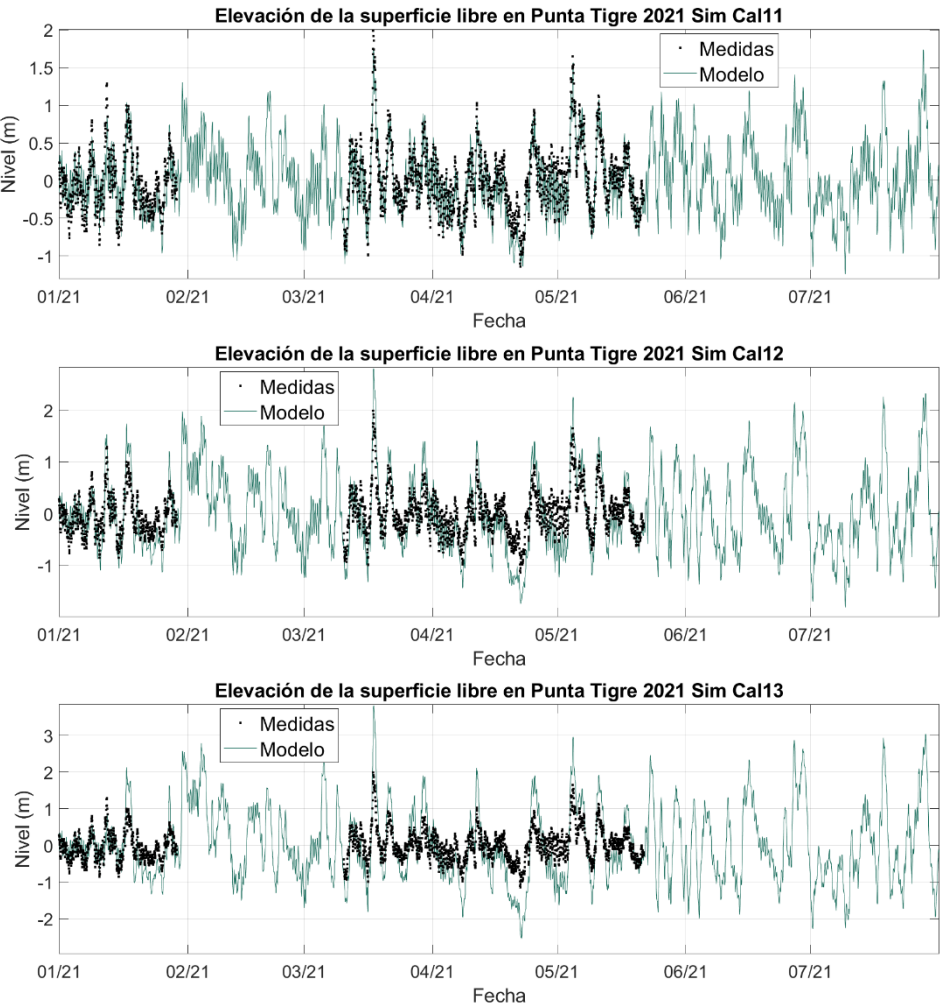




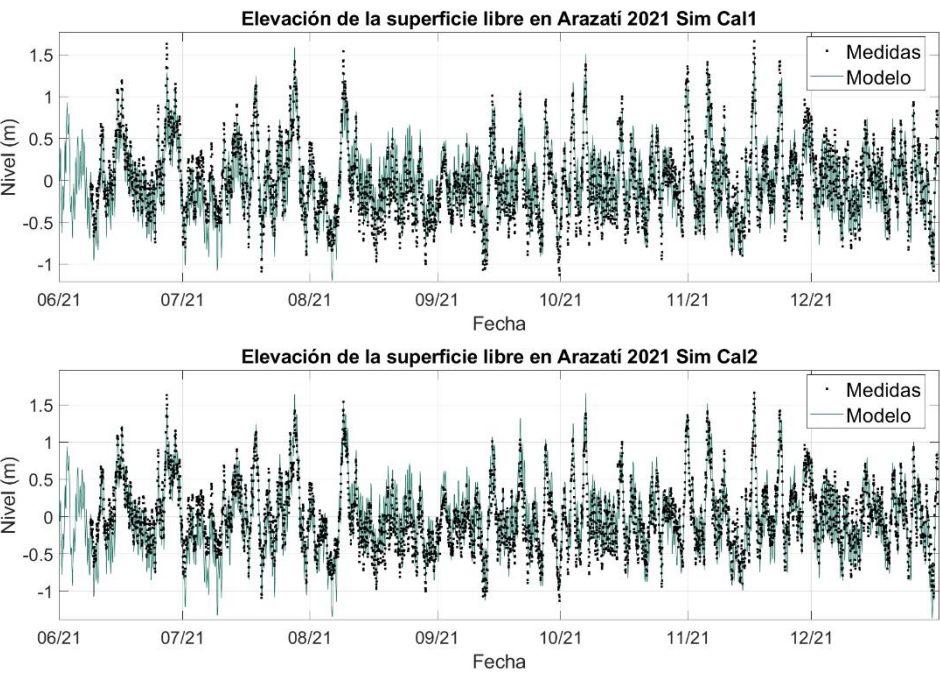
12.1.2 Niveles en Punta Tigre

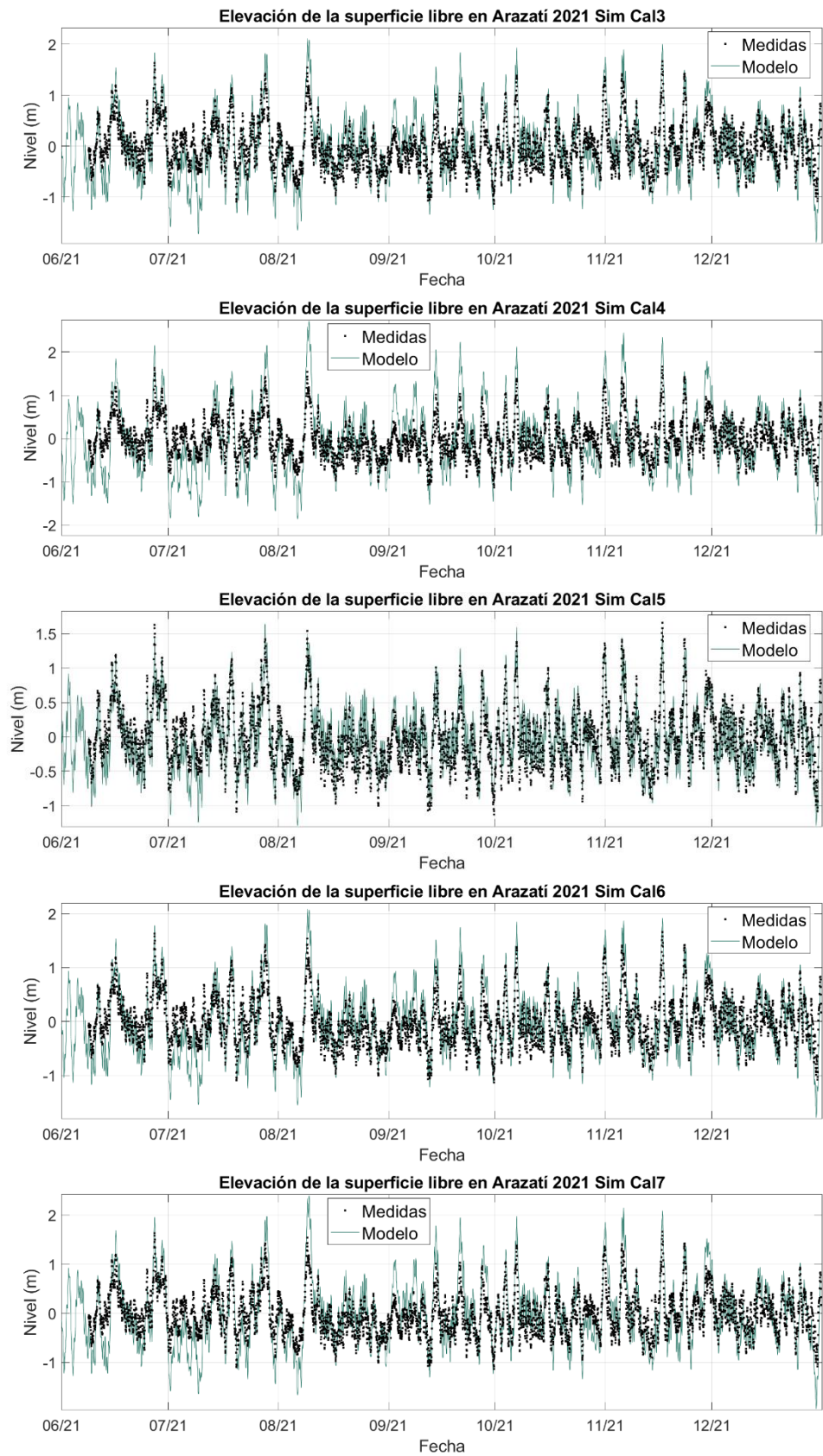


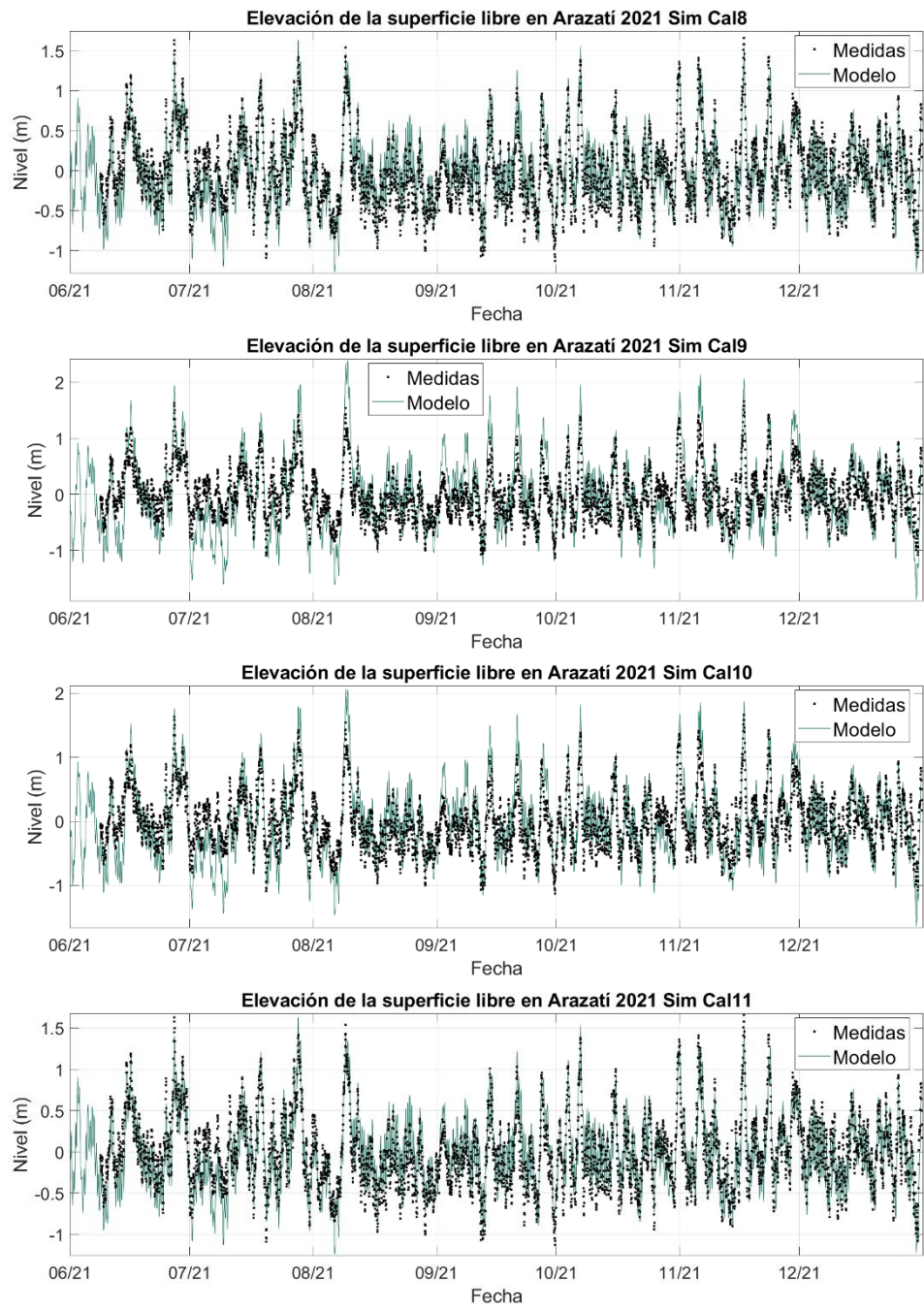


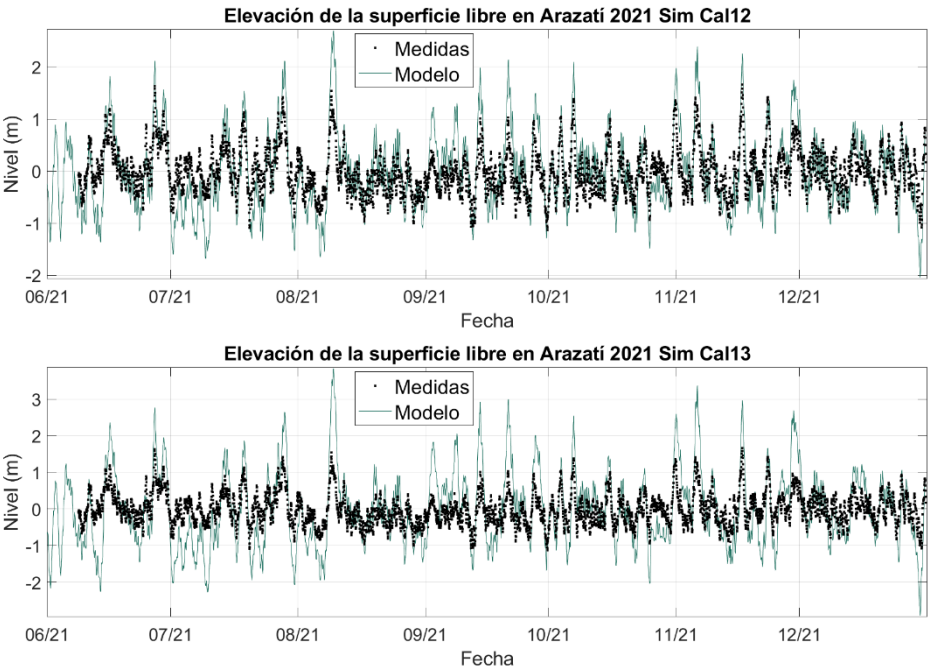


12.1.3 Niveles en Arazatí

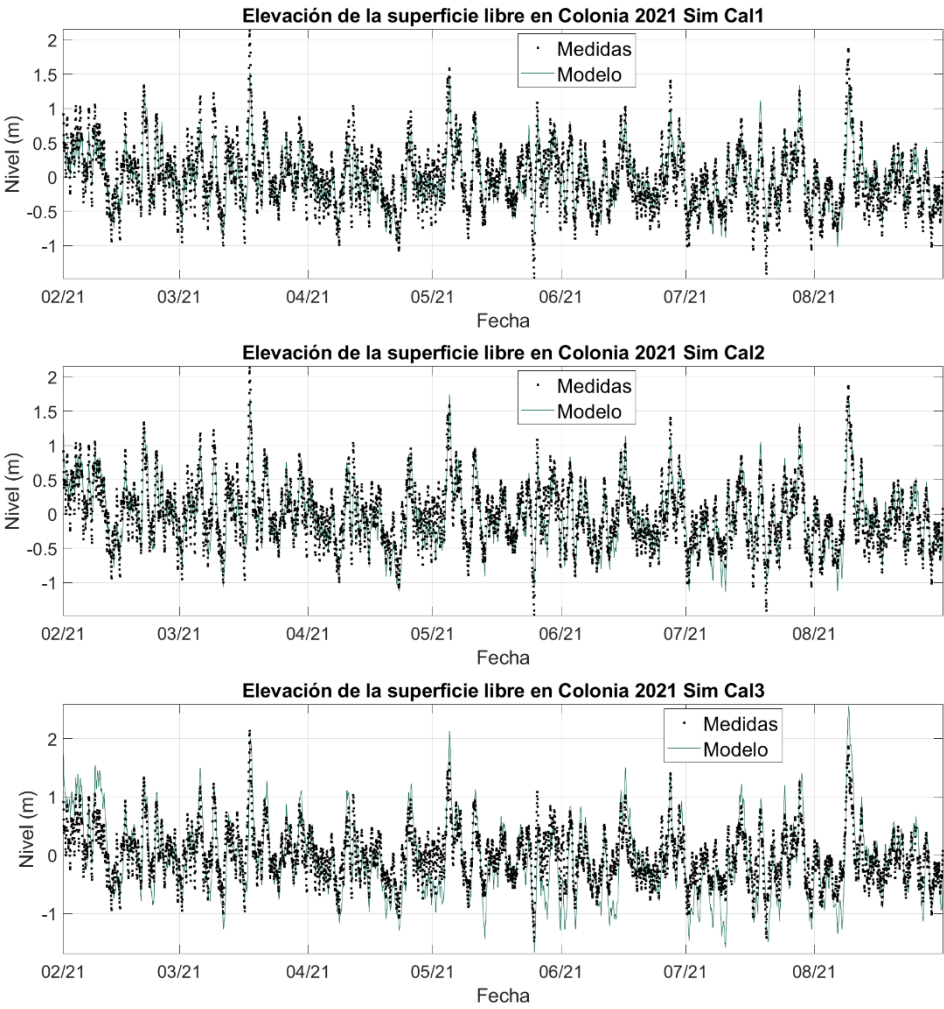


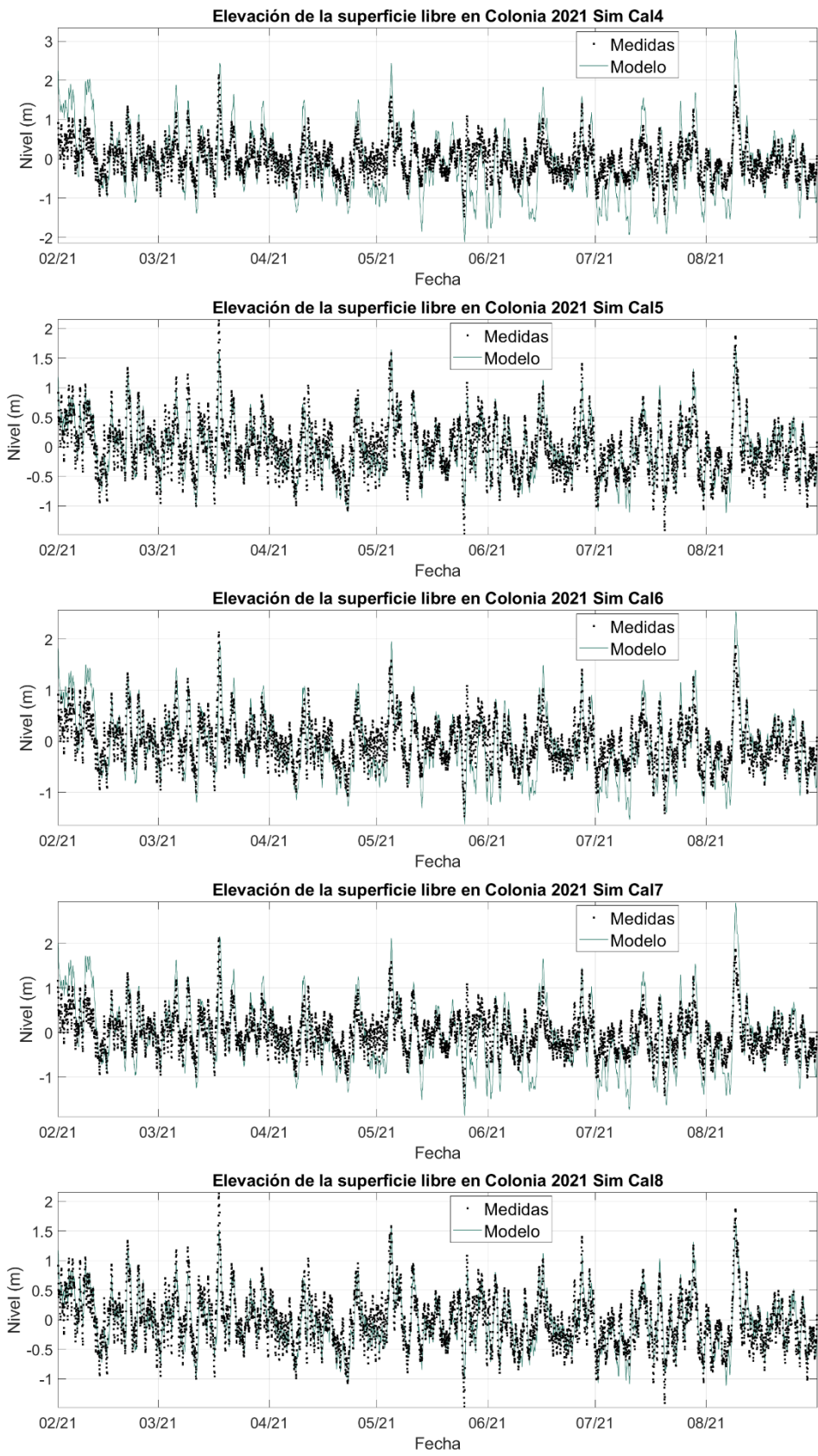


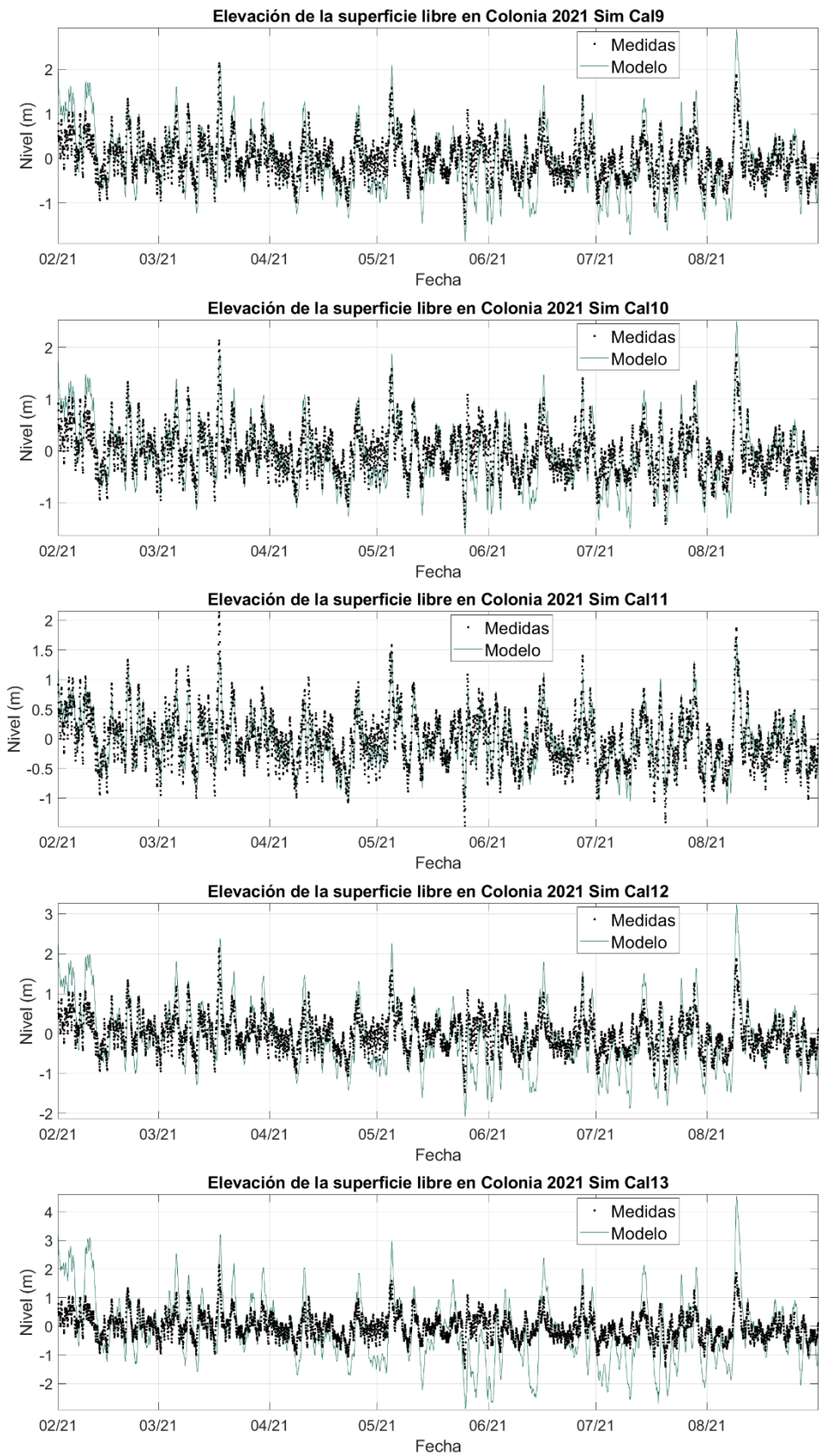




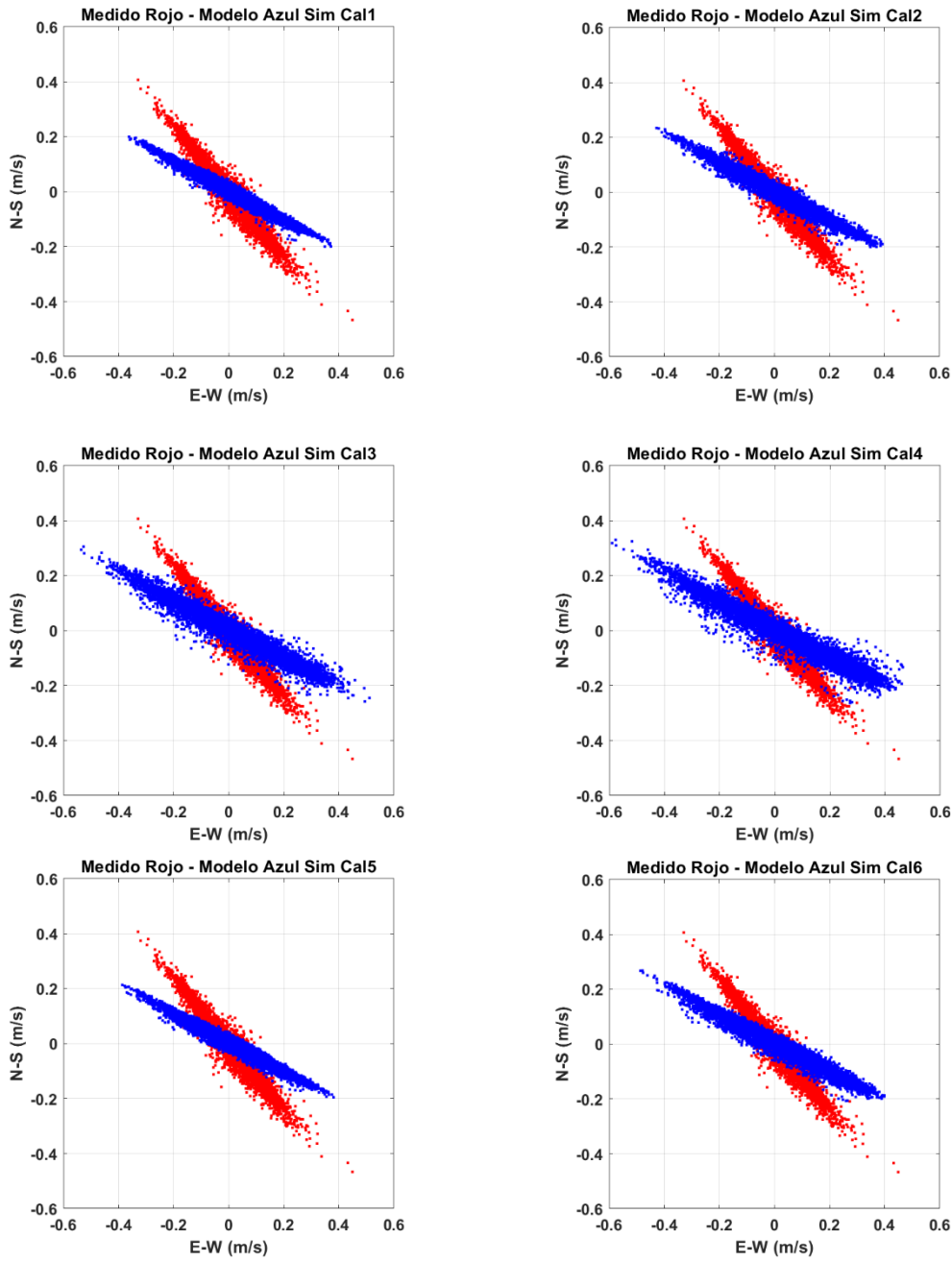
12.1.4 Niveles en Colonia

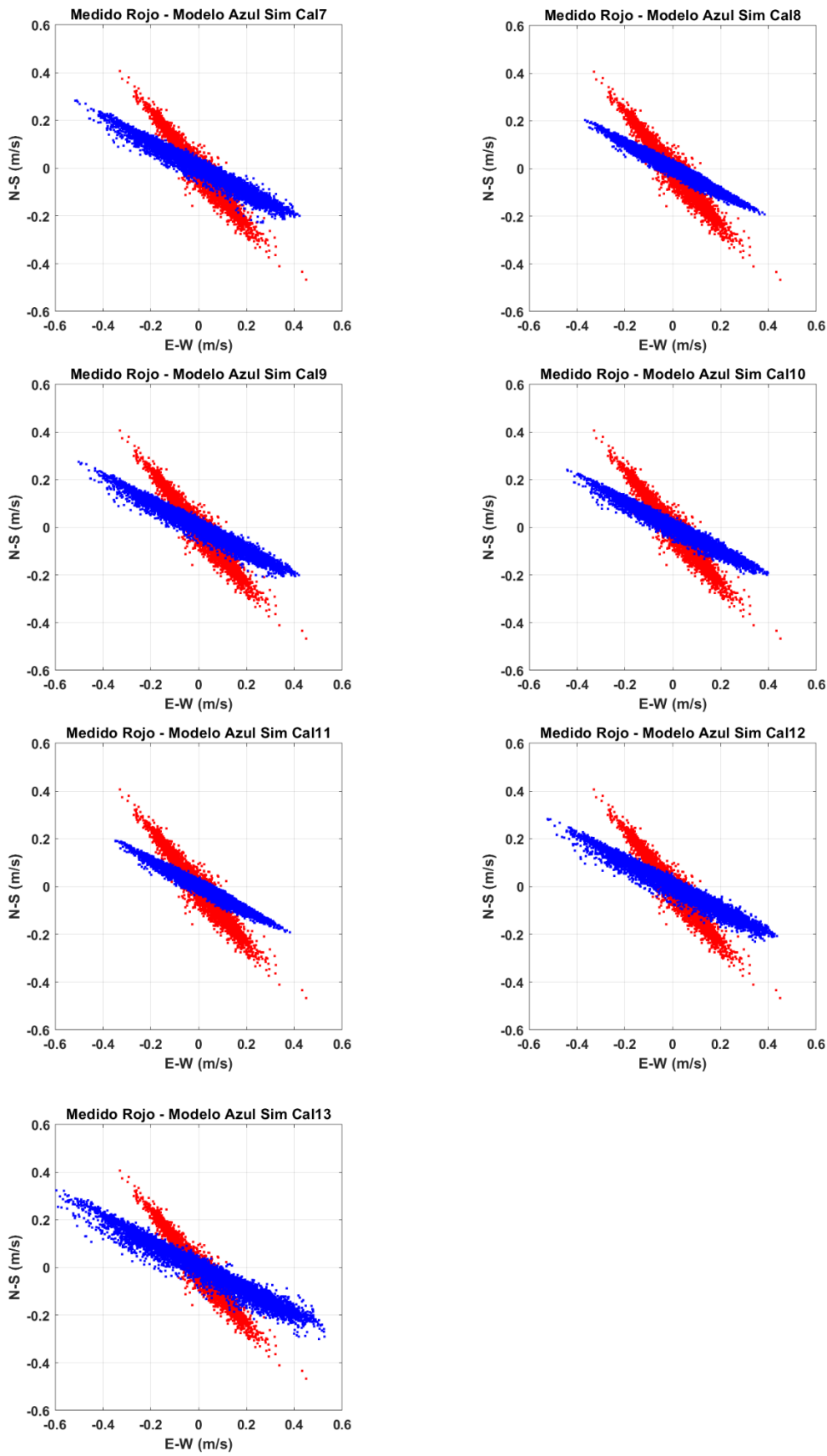






12.1.5 Corrientes en Arazatí





12.1.6 Corrientes en Punta Tigre

