

NAP Costas

Dinámica del Río de
la Plata y de la costa
oceánica. Simulación
retrospectiva del
nivel del mar,
corrientes y oleaje



Ministerio
de Ambiente



Con el apoyo de:



**Informe de actividades en el marco del proyecto:
URU/18/002 Integración del enfoque de adaptación en
ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay**

Entregable E.1.1

<u>Documento:</u>	IMFIA_CCURU1_E.1.1	
<u>Versión</u>	1.0	
<u>Fecha:</u>	12/09/2018	
<u>Autores:</u>	Rodrigo Alonso Christian Chreties Mónica Fossati Michelle Jackson Pablo Santoro Sebastián Solari	IMFIA-FING-UdelaR IMFIA-FING-UdelaR IMFIA-FING-UdelaR (Co-responsable) IMFIA-FING-UdelaR IMFIA-FING-UdelaR IMFIA-FING-UdelaR (Responsable)
<u>Contraparte:</u>	Magdalena Preve Myrna Campoleoni Mónica Gómez Iñigo Losada Melisa Menendez Juan Ortiz	PNUD PNUD Cambio Climático MVOTMA IH Cantabria IH Cantabria IH Cantabria

TABLA DE CONTENIDO

1	Introducción	3
2	Validación de los vientos de reanálisis para la generación de hindcasts de oleaje y nivel de mar en la costa uruguaya	4
2.1	Introducción	4
2.2	Metodología	4
2.2.1	Datos disponibles	4
2.2.2	Consideraciones preliminares	6
2.2.3	Análisis realizados	7
2.3	Datos altimétricos: dominio 58-52W/38-32S.	8
2.4	Comparación entre distintas bases de datos.	12
2.5	Análisis de extremos en el Río de la Plata medio e interior	16
2.5.1	Río de la Plata Medio	16
2.5.2	Río de la Plata Interior	17
2.6	Verificación con mediciones in-situ	23
2.7	Conclusiones.....	23
3	Simulación retrospectiva de niveles.....	25
3.1	Introducción	25
3.2	Metodología	25
3.3	Información utilizada	27
3.3.1	Información batimétrica.....	27
3.3.2	Información meteorológica.....	27
3.3.3	Datos de caudales fluviales	28
3.3.4	Datos de niveles	28
3.4	Modelo hidrodinámico.....	32
3.4.1	Descripción del modelo.....	32
3.4.2	Dominio y malla de cálculo	35
3.4.3	Configuración del modelo	36
3.4.4	Condiciones de borde.....	37
3.4.5	Condición inicial	38
3.5	Resultados	38
3.5.1	Calibración.....	38
3.5.2	Validación	47
3.5.3	Síntesis.....	49

4	Hindcasts de oleaje para la costa uruguaya.....	52
4.1	Introducción.....	52
4.2	Configuración del modelo.....	53
4.2.1	Compilación.....	53
4.2.2	Grillas de cálculo.....	53
4.2.3	Batimetría y línea de costa.....	55
4.2.4	Obstáculos sub-grilla.....	58
4.2.5	Forzantes y condición inicial.....	60
4.3	Calibración.....	61
4.4	Base de datos generada.....	68
4.5	Conclusiones y pasos futuros.....	70
5	REFERENCIAS.....	71
6	Anexo I: Generación de series de caudales fluviales.....	74
6.1	Análisis hidrológico.....	74
6.2	Productos generados.....	76
7	Anexo II: Hindcast de niveles.....	77
7.1	Modelo regional de marea del Atlántico Sur (ASTide).....	77
7.1.1	Dominio y batimetría.....	77
7.1.2	Condiciones de borde.....	78
7.2	Corrección estadística de los resultados del modelo ASTide.....	80
7.2.1	Calibración.....	80
7.2.2	Ajuste.....	84

1 INTRODUCCIÓN

El presente documento constituye el **Entregable E.1.1** del convenio firmado entre la Universidad de la República (Facultad de Ingeniería; Udelar-FING) y el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) **URU/18/002 “Integración del enfoque de adaptación en ciudades, infraestructura y ordenamiento territorial en Uruguay”**.

Dicho proyecto se propone fortalecer las capacidades de las instituciones de Uruguay (academia e instituciones de Gobierno a nivel nacional y departamental) para la identificación de los impactos y las vulnerabilidades originadas por la variabilidad y el cambio climático en centros urbanos e infraestructuras costeras y zonas adyacentes. A su vez, se busca fortalecer las capacidades tanto de las instituciones de Gobierno como del resto de los actores involucrados en la definición de estrategias y acciones que posibiliten el incremento de la resiliencia ante los impactos generados por la variabilidad y el cambio climático en la zona costera.

Para ello, Udelar-FING generará información histórica y proyecciones bajo distintos escenarios de cambio climático de las principales variables que determinan la dinámica costera. Esta información será transferida a diversas instituciones Uruguayas, las cuales serán capacitadas para su uso, así como al IH-Cantabria, que la usará para el análisis de vulnerabilidad y riesgo en la costa.

En concreto, en el Proyecto se generará una base de datos que contenga una reconstrucción histórica de las dinámicas de viento, oleaje, caudal, nivel del mar y corrientes del período 1980-2016, con una resolución espacial adecuada, con resolución temporal horaria, y validada con mediciones realizadas in situ. Esta base de datos será utilizada para estudiar los cambios en estas mismas variables que serán esperable bajo dos escenarios de cambio climático (RCP4.5 y RCP8.5). Por último, para seis sitios de estudio, se generarán las mismas bases de dato con mayor resolución espacial.

El objetivo de la **Actividad 1** del proyecto es la generación de bases de datos históricas de dinámica atmosférica, marítima y fluvial. En particular la validación de vientos de reanálisis y la generación y validación de datos de oleaje, nivel de mar total, corrientes y caudales fluviales a la costa en el período 1985-2016. La Actividad 1 prevé que Udelar-FING entregue dos productos:

Entregable E.1.1, correspondiente al presente informe, en el cual se describe la metodología utilizada para la generación y validación de las bases de datos.

Entregable E.1.2, correspondiente a las bases de datos generadas, las cuales se entregan en formato digital en un disco duro portátil, acompañando al presente documento.

Este documento se estructura de la siguiente forma. En el capítulo 2 se presenta la validación de los datos de viento utilizados para la generación de los *hindcast* de nivel de mar, corrientes y oleaje. En el capítulo 3 se presenta la calibración y validación del *hindcast* de nivel de mar total y corrientes. En el capítulo 4 se presenta la calibración y validación del *hindcast* de oleaje. Las referencias utilizadas se incluyen en el capítulo 5. Los Anexos I y II describen la generación de caudales fluviales y los datos de condición de contorno oceánica utilizada en el *hindcast* de nivel de mar y corrientes.

2 VALIDACIÓN DE LOS VIENTOS DE REANÁLISIS PARA LA GENERACIÓN DE HINDCASTS DE OLEAJE Y NIVEL DE MAR EN LA COSTA URUGUAYA

2.1 Introducción

En trabajos previos el IMFIA utilizó los vientos del reanálisis CFSR con resolución espacial 0.5° y paso temporal seis-horario para la generación de *hindcast* de oleaje y nivel de mar en la costa uruguaya (Alonso et al. 2012, 2017).

En el marco del proyecto “Herramientas tecnológicas para la evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay” el IMFIA generará nuevos *hindcast* de oleaje y nivel de mar en la costa uruguaya, para el período 1985-2015, incorporando diversas mejoras respecto a los trabajos previos, entre las que destaca el uso de datos de viento provenientes de reanálisis de mayor resolución espacial y temporal.

En este documento se realiza la validación de los datos de viento en superficie provenientes de distintos reanálisis, mediante la comparación de los mismos con los obtenidos a partir de registros instrumentales, tanto remotos (datos satelitales) como *in situ*.

En la sección 2 se presenta la metodología empleada, comenzando con una descripción de la información de base (2.1), luego se explicitan algunas consideraciones preliminares (2.2) y finalmente se exponen los distintos análisis realizados (2.3). En la sección 3 se presenta un análisis de los datos altimétricos comprendidos en el dominio 58-52W/38-32S, la particular atención a esta base de datos responde a que dada su cobertura espacial la consideramos la principal fuente información en un estudio de carácter regional como este. En la sección 4 se presentan los resultados obtenidos al contrastar las distintos reanálisis consideradas con los datos altimétricos. En la sección 5 se hace foco en los eventos extremos en el Río de la Plata medio e interior, por ser uno de los problemas detectados en la sección 4. En la sección 6, se complementan los resultados de la comparación con datos altimétricos, con comparaciones con las series de mediciones in-situ disponibles. Finalmente en la sección 7 se presentan las conclusiones del trabajo.

2.2 Metodología

2.2.1 Datos disponibles

2.2.1.1 *Bases de datos de reanálisis*

Se evalúan tres bases de datos de vientos de reanálisis: ERA-INTERIM, CFSR+CFSv2 y WRF-IMFIA. Estas bases de datos se describen a continuación.

ERA-INTERIM:

Es un producto del Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas de Plazo Medio (ECMWF por sus siglas en inglés) que cubre el período 1979 – hasta el presente. Dee et al. (2011) presenta las mejoras de este producto respecto a su antecesor ERA-40 (Uppala et al. 2005). Estas mejoras son consecuencia del uso de más observaciones, mejores métodos de asimilación de datos, mayor resolución y mejora en la física de los modelos que utilizan. En lo que respecta al viento en superficie, se obtiene con una resolución espacial de 0.7° y temporal de 3h.

CFSR+CFSv2:

Corresponde a campos de viento a 10 m de altura correspondientes al reanálisis atmosférico CFSR (Saha et al. 2010) y su prolongación CFSv2 (Saha et al. 2014), utilizando las grillas de mayor resolución espacial disponibles y paso temporal horario. El período abarcado por los reanálisis es 1979 – 2017, dentro del cual los datos de 1979 a 2010 corresponden al reanálisis CFSR y los datos de 2011 a 2017 al reanálisis CFSv2. Tanto para CFSR como para CFSv2 las grillas de mayor resolución son gaussianas, con paso 0.3° y 0.2° respectivamente. El viento a 10 m es una variable que no se analiza en el reanálisis, por lo que el paso horario se obtiene a partir de los pronósticos a 1h, 2h, 3h, 4h, 5h y 6h, inicializados a las 00, 06, 12 y 18 UTC de cada día.

WRF-IMFIA:

WRF-IMFIA se refiere a un downscaling dinámico realizado para la región de la Figura 1 a partir del reanálisis CFSR+CFSv2 (0.5° y 6 h) con el modelo atmosférico WRF (Franco et al. 2016). La resolución espacial de este downscaling es de 8 km y tiene paso temporal horarios. Esta base de datos presenta huecos temporales y finaliza a mediados de 2015.



Figura 1.- Grilla del WRF-IMFIA

2.2.1.2 Datos medidos de forma remota (satelitales)

La principal referencia para la validación de los reanálisis de viento en la zona son las mediciones remotas del viento sobre el mar a partir de radares altimétricos montados en satélites. La base de datos utilizada es multi-misión y fue procesada por IFREMER. La base de datos altimétricos abarca el período 1991 – 2013 y contiene datos de 9 satélites: ERS1, ERS2, Envisat, Topex, Poseidon, Jason1, GEOSATFo, Jason2 y Cryosat. Estos datos se analizan en la Sección 2.3.

2.2.1.3 Datos medidos in situ

Se utilizaron las mediciones realizadas in-situ en las siguientes estaciones (ver Figura 2):

- Pilote Norden, ubicado en el Río de la Plata (coordenadas 57.9196° W, 34.6278° S).
- Pontón Recalada, ubicado en el Río de la Plata (coordenadas aproximadas 56.25° W, 35.16° S)
- Estación meteorológica de Colonia del Sacramento (coordenadas 57.768° W, 34.452° S).

- Estación anemométrica Puerto de La Paloma (coordenadas aproximadas 54.15 ° W, 35.65 ° S)

La Tabla 1 resume los períodos cubiertos por estas series de datos, la frecuencia de muestreo y el porcentaje de datos faltantes.

Tabla 1.- Registros de mediciones in-situ analizadas.

	Período cubierto	Frecuencia de muestreo	Porcentaje de datos faltantes a escala horaria.
Pilote Norden	1/1/2009 – 7/3/2014	5 minutos	14.99 %
Colonia	1/1/2010 – 22/11/2017	horaria	50.83 %
Pontón Recalada	20/7/2011 – 12/6/2012	10 minutos	35.52 %
La Paloma	9/12/2016 – 27/4/2017	10 minutos	3.16 %

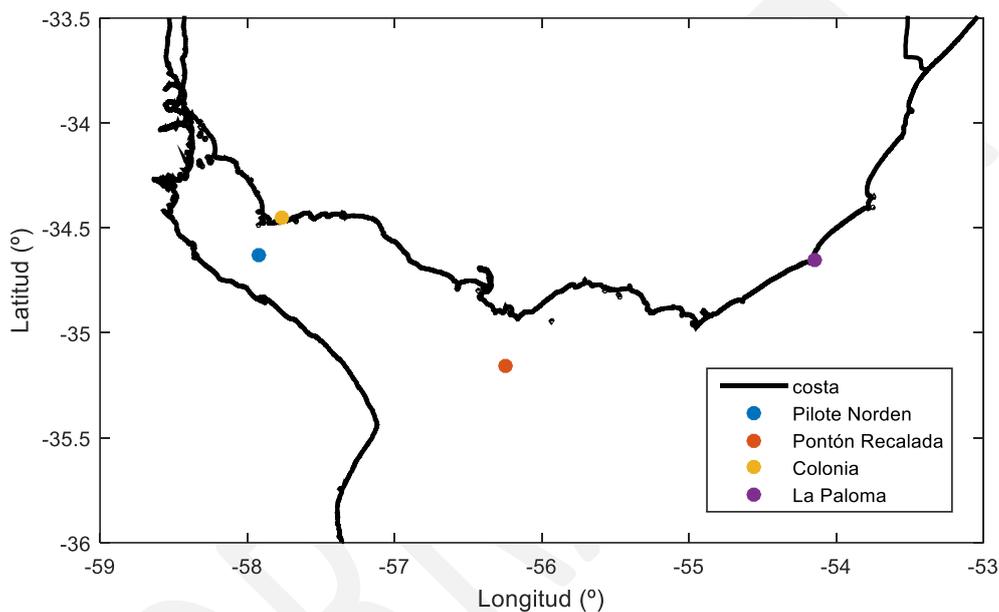


Figura 2 – Ubicación de las estaciones de medición de viento.

2.2.2 Consideraciones preliminares

El reanálisis ERA-INTERIM fue descartado ya que su performance para viento en superficie en el hemisferio sur y en particular para eventos extremos es peor que la que se obtiene con CFSR según se documenta en (Stopa y Cheung, 2014). Su análisis no se incluye en el documento.

Por su parte, también se descarta el uso de la base de datos WRF-IMFIA debido a que presenta huecos de información y finaliza a mediados del 2015. De todas formas es analizada a los efectos de obtener una idea de la mejora que se puede lograr en la representación del viento en superficie a partir de un downscaling atmosférico regional.

Por otro lado, todos los análisis que involucran el uso de datos altimétricos (satelitales) se realizaron agrupando la información por regiones. Para esto se dividió el Río de la Plata en cuatro regiones y se utilizó una grilla uniforme de 1° x 1° para el océano Atlántico, la cual en algunos casos se extendió para abarcar los datos más próximos a la costa. La Figura 2 presenta esta división, junto con los nombres utilizados para identificar a cada una de las regiones especiales (i.e. aquellas de forma irregular).

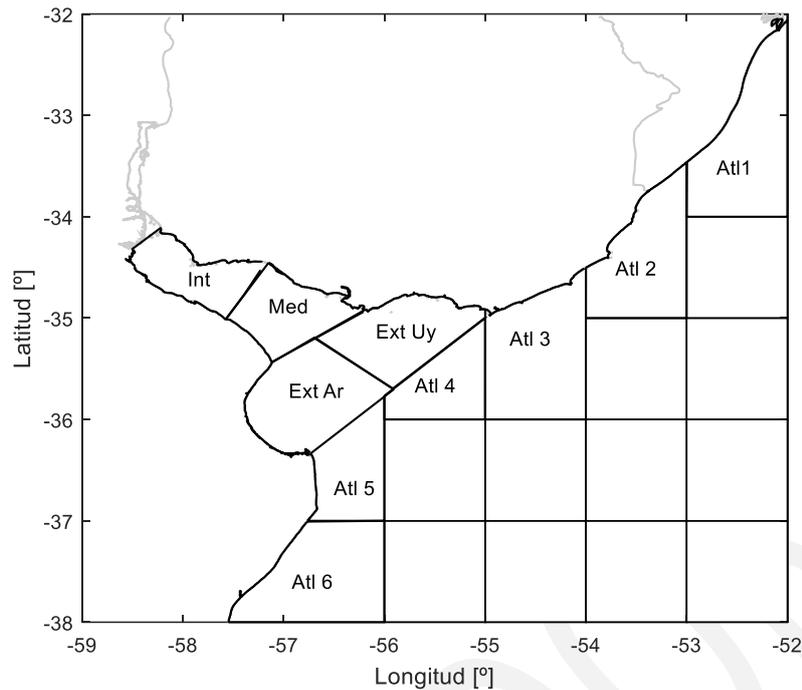


Figura 3.-División del dominio considerada en el análisis de los datos altimétricos.

2.2.3 Análisis realizados

Dada una serie de datos observados, ya sea en un punto (mediciones in-situ) o una región (sensoramiento remoto), se construye una serie homóloga interpolando linealmente en espacio y tiempo la base de datos de reanálisis. De esta forma que cada dato observado se le asigna un correspondiente obtenido del reanálisis que se analiza. Luego la serie observada y su correspondiente de reanálisis se comparan recurriendo a los estadísticos que se definen a continuación,

$$BIAS = \overline{y_r - y_o},$$

$$RMSE = \sqrt{\overline{(y_r - y_o)^2}},$$

$$SI = \frac{\sqrt{\overline{((y_r - \overline{y_r}) - (y_o - \overline{y_o}))^2}}}{\overline{y_o}} \times 100,$$

$$r = \frac{\overline{\Sigma(y_r - \overline{y_r}) - (y_o - \overline{y_o})}}{\sqrt{\overline{\Sigma(y_r - \overline{y_r})^2}} \sqrt{\overline{\Sigma(y_o - \overline{y_o})^2}}}$$

En donde el subíndice r y o hacen referencia a reanálisis y a observación respectivamente, mientras que la barra superior refiere al promedio. A su vez estos estadístico se acompañan con los cocientes entre las medias y desviación estándar de ambas series y se presentan junta a un diagrama de dispersión superpuesto con un gráfico cuantil-cuantil (e.g. Figura 9).

Los cuantiles considerados son 25 y están equiespaciados en escala Gumbel, siendo 0.001 el menor y 0.999 el mayor. Por lo que sus valores son 0.001, 0.0084, 0.0366, 0.1015, 0.2054, 0.3345, 0.4687, 0.5920, 0.6957, 0.7780, 0.8406, 0.8868, 0.9202, 0.9441, 0.9610, 0.9728, 0.9811, 0.9869, 0.9909, 0.9937, 0.9956, 0.9970, 0.9979, 0.9986 y 0.999.

Para comparar la performance entre dos reanálisis distintos se recurrió al cálculo del índice de habilidad de Brier (Winterfelt et al. 2011). El mismo, dada una serie de observaciones y dos estimadores (E_{new} y E_{old}) permite evaluar si el nuevo estimador representa una mejora respecto al anterior. Se define de la siguiente forma,

$$BSS = \begin{cases} 1 - \sigma_{new}^2 / \sigma_{old}^2 & \text{si } \sigma_{new}^2 < \sigma_{old}^2 \\ \sigma_{new}^2 / \sigma_{old}^2 - 1 & \text{si } \sigma_{new}^2 \geq \sigma_{old}^2 \end{cases}$$

Siendo σ^2 la varianza del error. Por lo que si con el nuevo estimador se obtiene un error con menor (mayor) varianza que el antecesor, BSS adopta valores positivos (negativos).

Finalmente se recurrió a un diagrama de Taylor normalizado (Taylor, 2001) para sintetizar en un solo gráfico los resultados en las distintas sub-regiones de los distintos reanálisis considerados.

2.3 Datos altimétricos: dominio 58-52W/38-32S.

En la Tabla 2 se presenta la cantidad de datos por año y por satélite en todo el dominio. Por su parte las tablas 3 a 7 presentan la misma información pero para las regiones costeras: Int, Med, Ext Uy, Atl3 y Atl2.

Por su parte en la Figura 4 se mapea la cantidad de datos disponibles por regiones y la cantidad de estados registrados. Para esto último se consideró que los datos de un mismo satélite y una misma fecha de obtención registran el mismo estado. Se observa que la cantidad de estados registrados es un orden menor que la de datos. Esto es ~ 10 datos registran un mismo estado. Por otra parte, se observa que el Río de la Plata interior presenta significativamente menos datos que el resto de las regiones.

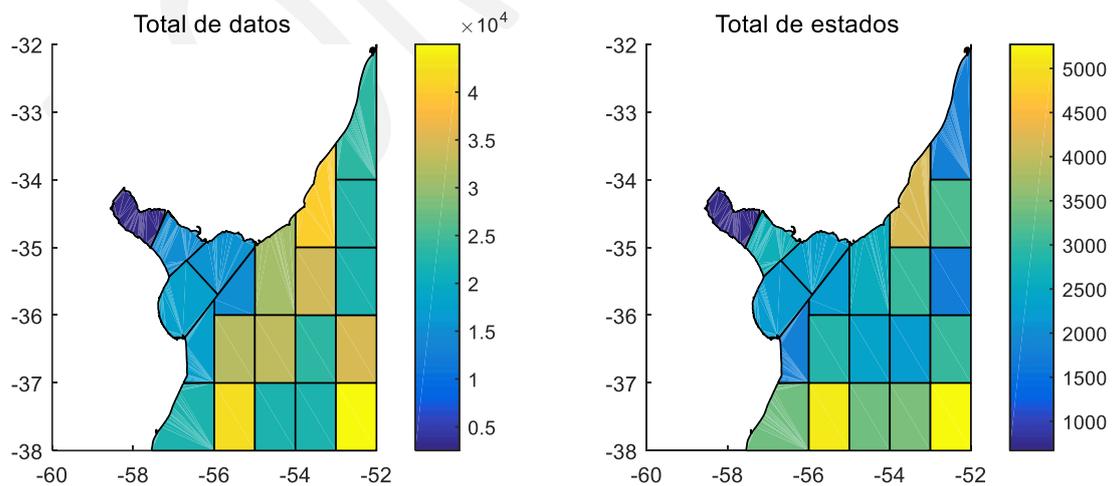


Figura 4.-Cantidad de datos altimétricos (izq.) y cantidad de estados registrados

Tabla 2.- Cantidad de datos altimétricos por año y por satélite. Todo el dominio

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	\Total	
ERS1	9380	14236	14183	16332	14708	6190																		75029	
ERS2					9133	14210	14628	14783	14716	14207	14008	14528	6845												117058
Envisat												2575	12131	12187	12947	11527	12829	13506	12413	12535	12962	3540	0	119152	
Topex	3627	12897	12992	12050	12835	12550	12632	12494	12799	13646	13935	15638		11801											159896
Poseidon	138	859	953	1559	1120	1492	1560	1477	1049	241	348														10796
Jason1												14230	14463	15086	14656	14280	14923	14491	15093	15634	16295	12563	1900		163614
GEOSATFo										10419	15243	15476	13207	13725	15480	12767	8298	4669							109284
Jason2																		7864	15664	15824	15869	15755	1378		72354
CryoSat2																						15575	4476		20051
\Total	9380	18001	27939	30277	37450	34355	28670	28975	28687	38474	43138	61092	62284	40998	54884	38574	36050	40530	43170	43993	45126	47433	7754		

Tabla 3.- Cantidad de datos altimétricos por año y por satélite. Río de la Plata Interior.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	\Total	
ERS1	0	52	102	91	128	52																			425
ERS2					59	104	64	84	99	95	100	90	49												744
Envisat												10	107	101	116	96	111	105	113	18	35	16			828
Topex												13	48	0	28										89
Poseidon																									0
Jason1																			90	11	20	34	2		157
GEOSATFo										13	17	8	6	7	11	6	10	4							82
Jason2																									0
CryoSat2																							151	39	190
\Total	0	52	102	91	187	156	64	84	99	108	117	121	210	108	155	102	121	109	203	29	55	201	41		

Tabla 4.-Cantidad de datos altimétricos por año y por satélite. Río de la Plata Medio.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	\Total
ERS1	0	131	155	171	205	91	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	753
ERS2	0	0	0	0	114	218	187	177	204	160	172	182	95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1509
Envisat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39	158	198	188	160	204	207	211	131	106	25	0	1627
Topex	0	108	388	410	364	379	393	396	385	391	383	238	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3835
Poseidon	0	2	27	17	45	46	45	44	21	41	8	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	308
Jason1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	413	393	445	412	387	448	453	23	0	0	109	27	3110
GEOSATFo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	94	167	127	120	123	140	99	99	62	0	0	0	0	0	1031
Jason2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	255	507	542	570	513	44	2431
CryoSat2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	271	63	334
\Total	0	241	570	598	728	734	625	617	610	686	730	1011	766	766	740	646	751	977	741	673	676	918	134	

Tabla 5.- Cantidad de datos altimétricos por año y por satélite. Río de la Plata Exterior, mitad norte

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	\Total
ERS1	0	191	330	226	358	151	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1256
ERS2	0	0	0	0	200	341	347	350	314	318	309	327	154	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2660
Envisat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64	303	311	325	274	260	305	306	251	208	66	0	2673
Topex	0	66	212	221	198	224	206	219	207	220	225	247	410	0	313	0	0	0	0	0	0	0	0	2968
Poseidon	0	0	19	14	27	20	28	18	21	22	7	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	182
Jason1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	170	191	212	180	162	200	195	421	471	450	233	40	2925
GEOSATFo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	102	243	193	176	192	198	167	98	64	0	0	0	0	0	1433
Jason2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	102	192	210	225	215	18	962
CryoSat2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	358	89	447
\Total	0	257	561	461	783	736	581	587	542	662	784	1007	1234	715	1016	603	558	666	919	932	883	872	147	

Tabla 6.- Cantidad de datos altimétricos por año y por satélite. Costa Atlántica (At13)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	\Total		
ERS1	0	286	372	386	452	174	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1670	
ERS2	0	0	0	0	263	371	372	436	394	392	371	399	203	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3201
Envisat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	63	348	387	405	351	364	390	354	411	435	113	0	0	3621	
Topex	0	188	651	644	604	627	603	621	606	622	666	625	521	0	395	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7373
Poseidon	0	0	49	62	74	62	62	82	82	49	3	22	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	547
Jason1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	688	675	709	693	701	701	700	491	481	529	463	74	0	6905	
GEOSATFo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	272	442	440	367	374	428	372	205	128	0	0	0	0	0	0	0	3028
Jason2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	389	730	746	735	723	61	0	3384
CryoSat2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	593	175	0	768	
\Total	0	474	1072	1092	1393	1234	1037	1139	1082	1335	1482	2237	2114	1470	1921	1424	1270	1607	1575	1638	1699	1892	310	0		

Tabla 7.- Cantidad de datos altimétricos por año y por satélite. Costa Atlántica (At12)

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	\Total		
ERS1	19	592	408	617	373	210	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2219	
ERS2	0	0	0	0	266	431	435	452	403	421	356	427	206	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3397
Envisat	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	12	406	323	403	283	399	386	364	411	405	130	0	0	3522	
Topex	0	300	992	1000	932	977	941	976	962	985	1039	636	13	0	33	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9786
Poseidon	0	0	60	72	101	73	64	108	105	54	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	667
Jason1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1124	1150	1194	1176	1177	1175	1168	185	121	133	367	43	0	9013	
GEOSATFo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	538	718	696	582	685	718	609	333	218	0	0	0	0	0	0	0	5097
Jason2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	665	1281	1294	1302	1300	110	0	5952
CryoSat2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	475	133	0	608
\Total	19	892	1460	1689	1672	1691	1440	1536	1470	1998	2113	2925	2357	2202	2330	2069	1907	2437	1830	1826	1840	2272	286	0		

2.4 Comparación entre distintas bases de datos.

Contrastando contra los datos altimétricos para cada región se evaluó la performance para estimar el viento a 10 m sobre el mar obtenidos de: reanálisis CFSR de resolución espacial 0.5° y paso temporal de 6h (CFSR coarse); reanálisis CFSR de resolución espacial 0.3° aprox. y paso temporal 1h (CFSR fine); y downscaling de CFSR coarse con el modelo WRF (WRF-IMFIA). El sesgo (BIAS), error medio cuadrático (RMSE) y coeficiente de correlación obtenido en cada caso se presentan en las figuras 5, 6 y 7 respectivamente.

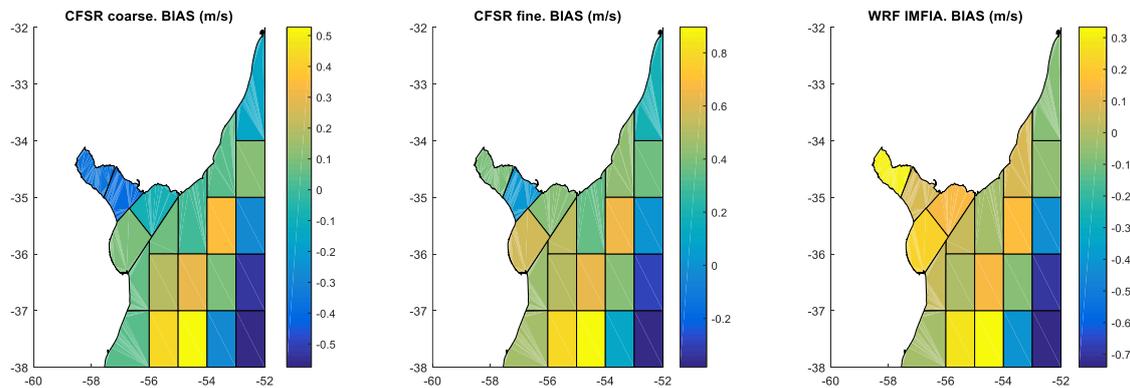


Figura 5.- Sesgo obtenido al comparar los distintos reanálisis con datos altimétricos.

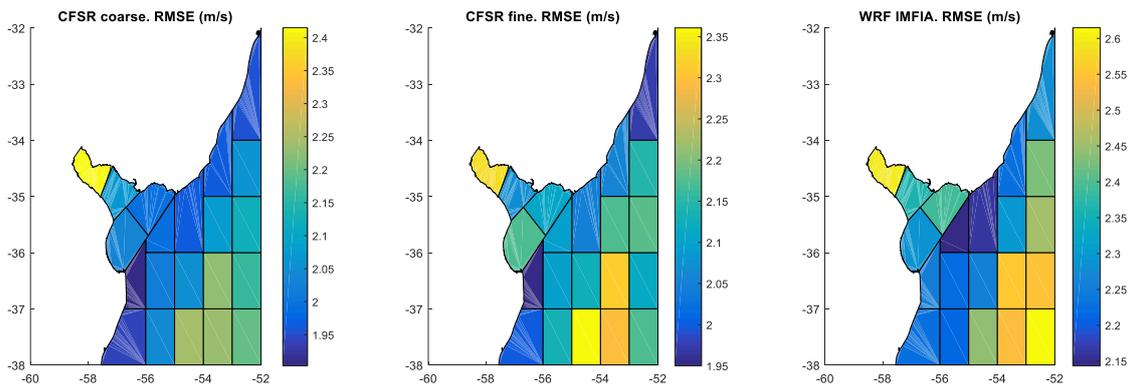


Figura 6.- Error medio cuadrático obtenido al comparar los distintos reanálisis con datos altimétricos.

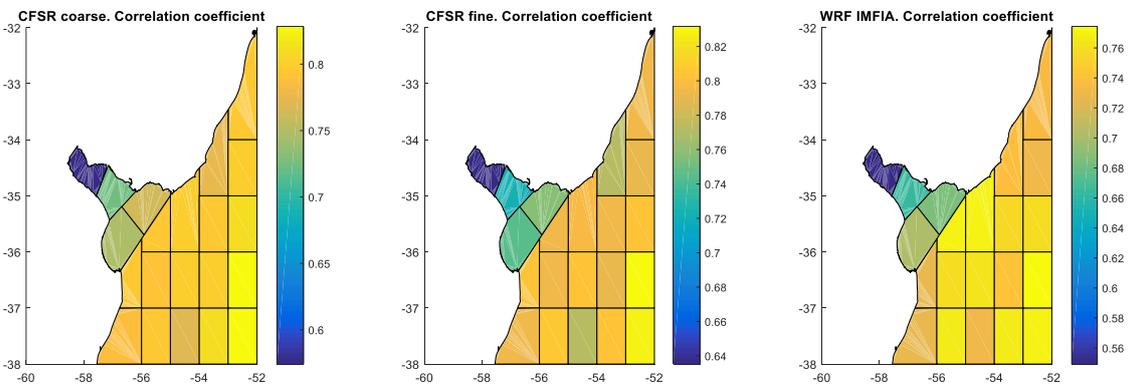


Figura 7.- Coeficiente de correlación obtenido al comparar los distintos reanálisis con datos altimétricos.

Los mapas presentaron patrones espaciales similares, siendo la principal conclusión la confirmación de que la performance en el Río de la Plata es peor que en el Atlántico, particularmente en lo que respecta al Río de la Plata interior donde se obtuvieron los mayores errores y las menores correlaciones.

Los mapas de BIAS, RMSE y r no son concluyentes en cuanto a que base de datos presenta una mejor performance. En términos generales, CFSR fine presenta las mayores correlaciones, WRF-IMFIA BIAS más próximos a 0 y CFSR coarse menores valores de RMSE. Por lo que se realizaron más análisis para evaluar.

Se calculó BSS por regiones considerando CFSR coarse como estimador viejo y CFSR fine como estimador nuevo (Figura 8, izq.) y WRF-IMFIA como estimador nuevo y CFSR fine como el viejo (Figura 8, der.).

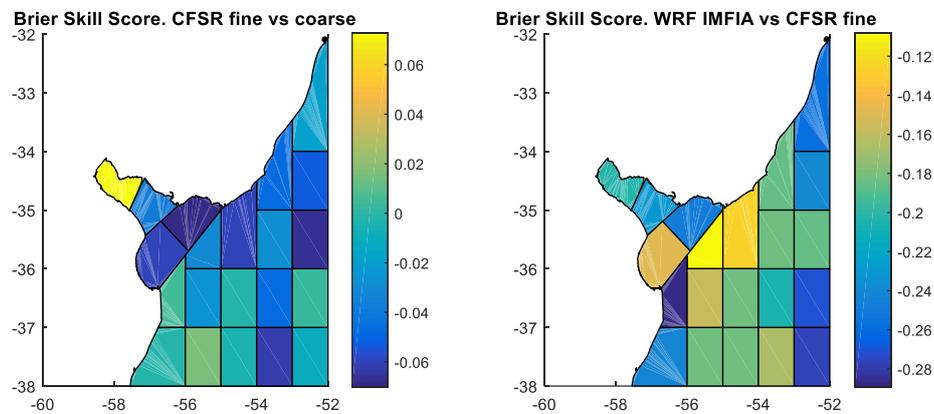


Figura 8.- Mapa de BSS comparando CFSR fine vs CFSR coarse (izq.) y WRF-IMFIA con CFSR fine (der).

En términos de BSS se observa que WRF-IMFIA no representa un mejor estimador que CFSR fine (BSS negativos en todo el dominio) y a su vez no es concluyente que este último sea mejor que CFSR coarse, ya que se obtuvieron valores de BSS cercanos a 0, en algunas regiones positivos y en otras negativos.

En lo que sigue, el análisis se enfoca en las 5 regiones costeras: Int, Med, Ext_Uy, Atl3 y Atl2 (Ver Figura 3). En las figuras 9 a 13 se presentan los diagramas de dispersión superpuestos con un gráfico cuantil-cuantil, equiespaciado en escala Gumbel, para cada una de estas regiones.

El mejor ajuste se observa con $CFSR_{fine}$, particularmente en lo que respecta a los cuantiles más altos. Precisamente en estos cuantiles, el ajuste a la recta $y=x$ es bueno para el Río de la Plata exterior (Figura 9) y para las regiones correspondientes a la costa atlántica (figuras 10 y 11), pero para el Río de la Plata interior y medio (figuras 7 y 8) se observa un apartamiento de la recta $y=x$ que es analizado en la siguiente sección.

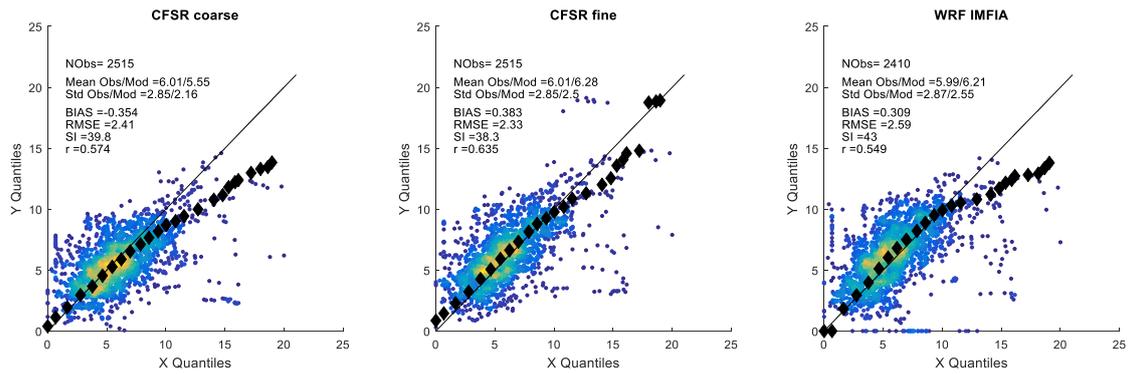


Figura 9.- Diagrama de dispersión, gráfico cuantil-cuantil y distintas medidas de error. Río de la Plata interior (Int).

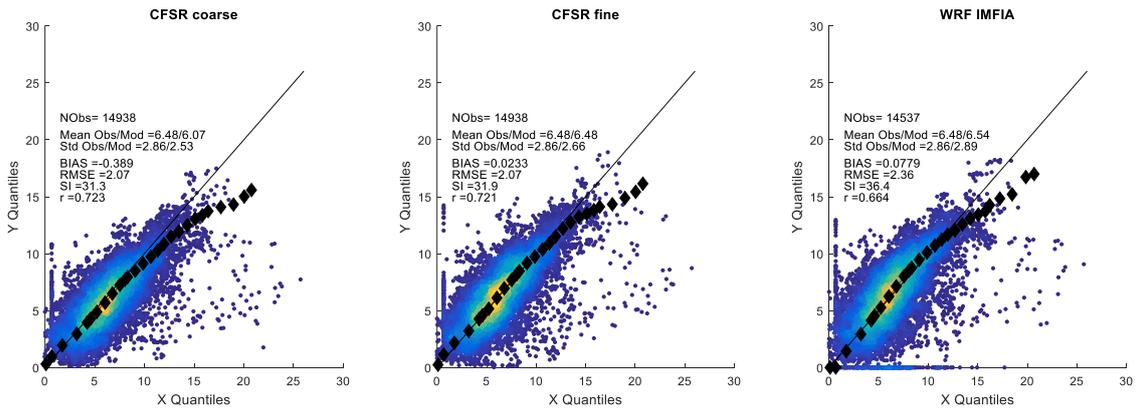


Figura 10.- Diagrama de dispersión, gráfico cuantil-cuantil y distintas medidas de error. Río de la Plata medio (Med).

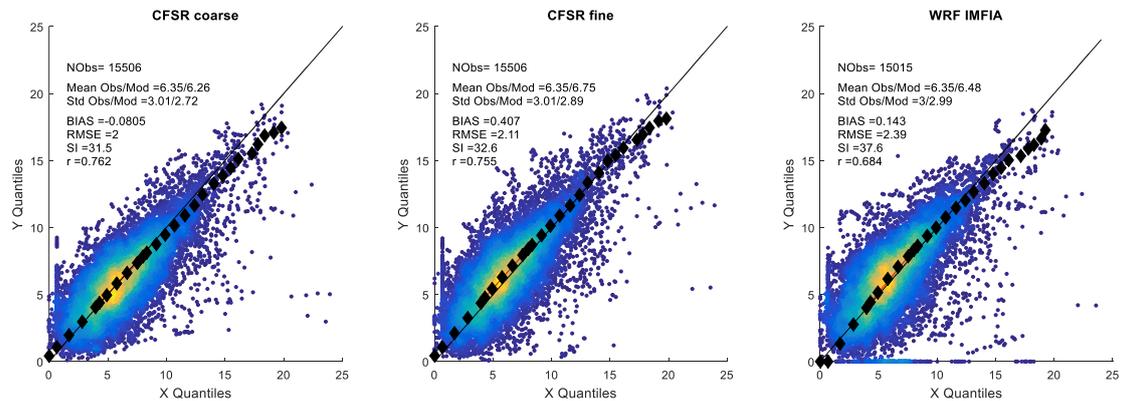


Figura 11.- Diagrama de dispersión, gráfico cuantil-cuantil y distintas medidas de error. Río de la Plata exterior (Ext_Uy).

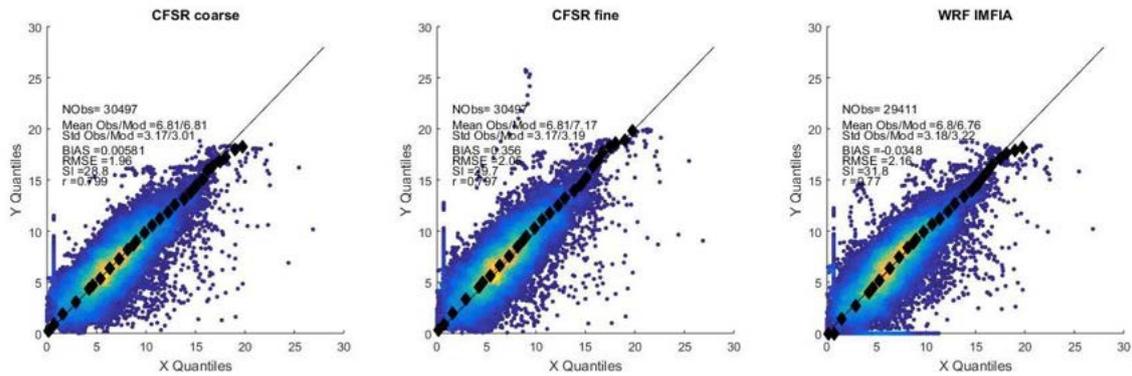


Figura 12.- Diagrama de dispersión, gráfico cuantil-cuantil y distintas medidas de error. Región Atl3.

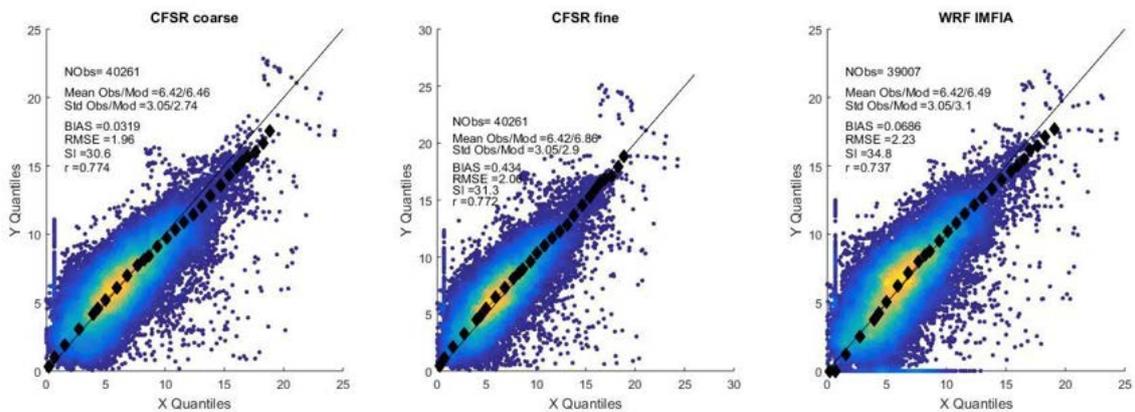


Figura 13.- Diagrama de dispersión, gráfico cuantil-cuantil y distintas medidas de error. Región Atl2.

Finalmente el diagrama de Taylor normalizado de la Figura 12 permite sintetizar gran parte de la información obtenida.

Se observa que la peor performance se tiene en el Río de la Plata interior (puntos B, C y D) y la mejor en la región Atl3 (puntos K, L, M). En lo que respecta a las bases de datos, CFSR_{fine} (puntos C, F, I, L, O) presentó la mejor performance en todas las regiones.

Por lo tanto, se confirma que el reanálisis CFSR con su mayor resolución, mejora la estimación del viento a 10m sobre el mar en el dominio analizado respecto a los datos CFSR, 0.5°, 6h empleados en trabajos antecedentes. Inclusive un downscaling con el modelo WRF que usa estos últimos como condición de borde no presenta una mejor performance que el CFSR en su mayor resolución.

El principal problema detectado es la aparente no satisfactoria representación de los eventos extremos en el Río de la Plata interior y medio. Por lo que esto fue analizado en mayor detalle y se presenta en la siguiente sección.

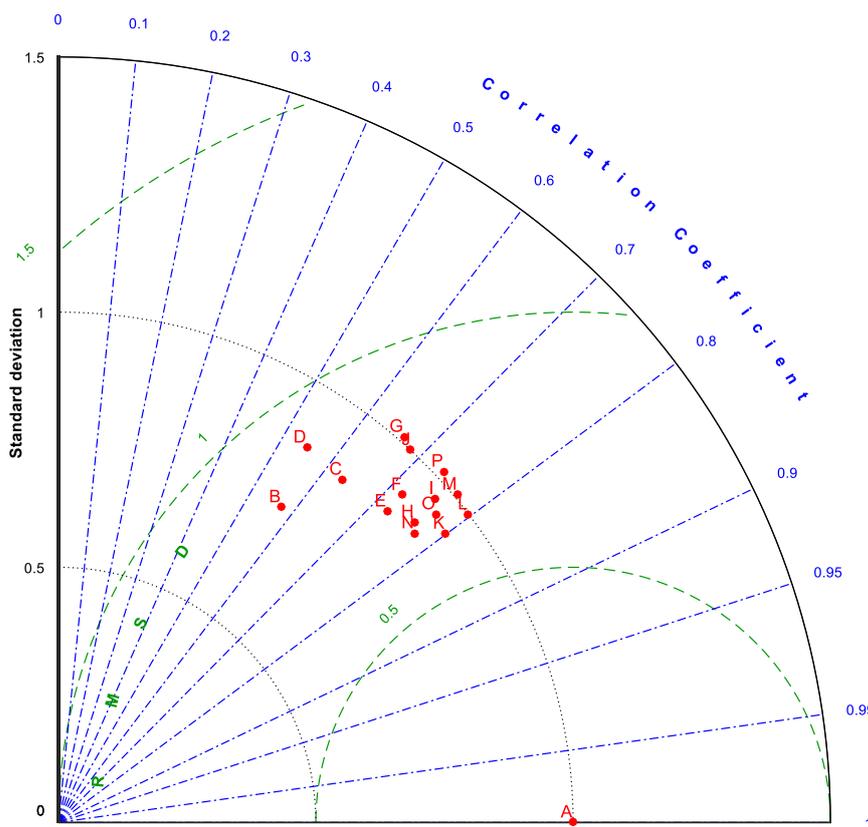


Figura 14.- Diagrama de Taylor normalizado. A corresponde a los datos altimétricos. B (CFSR_{coarse}), C(CFSR_{fine}) y D (WRF-IMFIA) corresponden al Río de la Plata interior (Int). E (CFSR_{coarse}), F(CFSR_{fine}) y G (WRF-IMFIA) corresponden al Río de la Plata medio (Med). H (CFSR_{coarse}), I(CFSR_{fine}) y J (WRF-IMFIA) corresponden al Río de la Plata exterior. K (CFSR_{coarse}), L(CFSR_{fine}) y M (WRF-IMFIA) corresponden a la costa atlántica (AtI3). N(CFSR_{coarse}), O(CFSR_{fine}) y P (WRF-IMFIA) corresponden a la costa atlántica (AtI2).

2.5 Análisis de extremos en el Río de la Plata medio e interior

2.5.1 Río de la Plata Medio

Inicialmente se identificaron los eventos a los que se denominó extremos sospechosos. En el caso del Río de la Plata Medio fueron definidos como aquellos eventos en que la velocidad de viento medida de forma altimétrica es mayor a 15 m/s y la diferencia con el dato de reanálisis es mayor al 25 %. Estos eventos se identifican con un círculo rojo en la Figura 14 (izquierda).

En la Figura 13 se presentan histogramas que muestra cómo se distribuyen todos los datos según el satélite que los registró (izq.) y como se distribuyen los eventos sospechosos. Se aprecia una concentración de los eventos sospechosos en el satélite 8 (Jason 2). Descartando los datos correspondiente a este satélite se obtiene un buen ajuste, como se aprecia en la Figura 14 derecha.

En base a esto, se admite que los datos de viento CFSR en su mayor resolución son adecuados para representar el viento sobre el mar en esta región y no se propone una corrección previa a su uso en el reanálisis de oleaje.

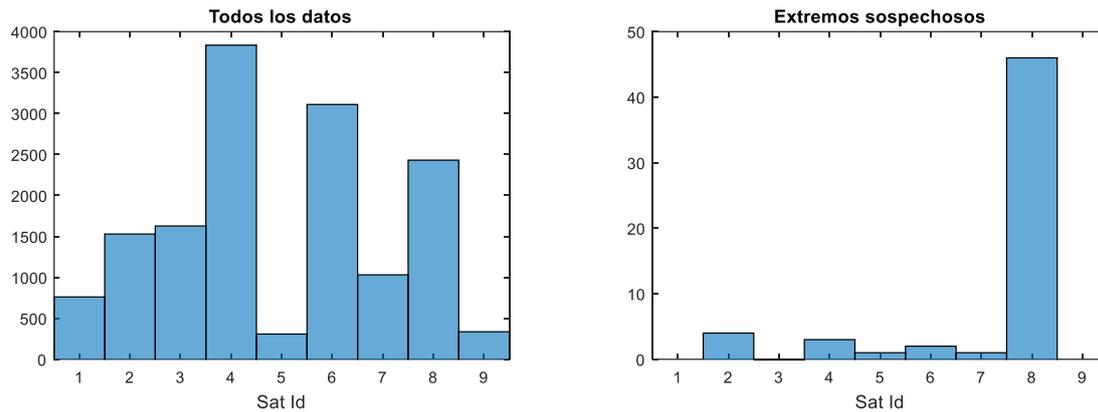


Figura 15.- Histogramas de cantidad de datos provistos por los distintos satélites. Río de la Plata Medio. Todos los datos (izq.) solamente extremos sospechosos (der.)

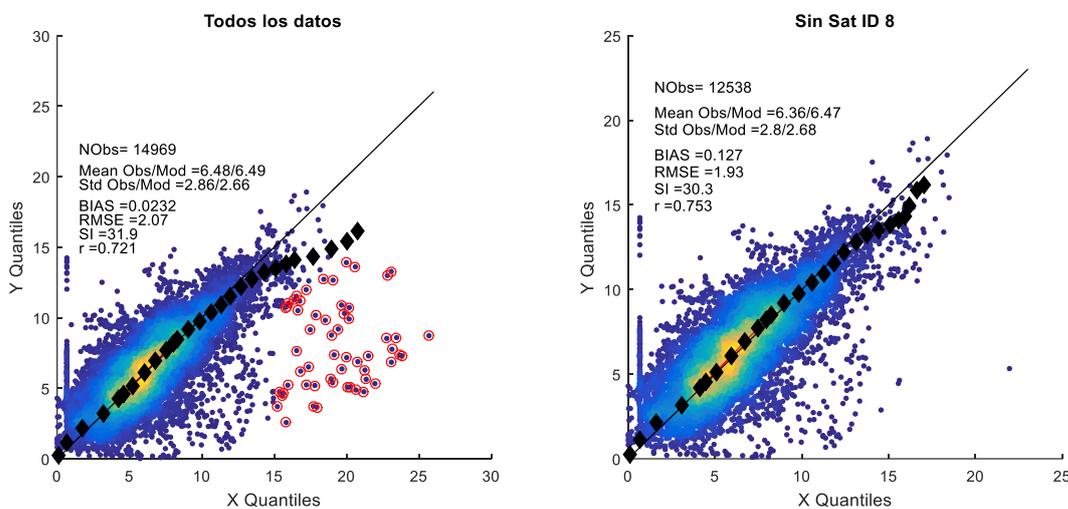


Figura 16.- Diagramas de dispersión y distintas métricas de error. Río de la Plata medio. Todos los datos (izq.) Sin los registros del satélite 8 (der.).

2.5.2 Río de la Plata Interior.

Se realiza el mismo análisis para los datos del Río de la Plata interior pero modificando el umbral de velocidad para definir los eventos sospechosos a 12 m/s. Los resultados se presentan en las figuras 15 y 16.

En esta región los extremos sospechosos se concentran en el satélite 2 () pero descartando los mismos, si bien se mejora el ajuste, este no es satisfactorio en lo que respecta a los cuantiles más altos.

Se hace notar que son pocos datos los responsables de apartar el ajuste, y muchos de ellos pertenecen a un mismo estado. A modo de ejemplo en la Figura 17 se identifican eventos correspondientes a un mismo estado, tanto en el diagrama de dispersión como en su localización geográfica. Una primera observación es que los eventos expuestos revelan un fuerte gradiente espacial, de menor escala que la grilla del reanálisis.

En total son 7 estados que no son bien representados por el reanálisis. Se presentan en la Tabla 7 a través de los datos correspondientes a un solo evento de los mismos. Se muestra la velocidad

del viento y altura de ola significativa (H_s) registrada por el altímetro y la velocidad del viento estimada por el reanálisis. Estos eventos fueron analizados individualmente contrastando las series temporales en el entorno de estos estados, de los dos puntos del reanálisis que se indican en la Figura 18, de los dos registros in-situ (Pilote Norden y Estación Meteorológica de Colonia) y los datos altimétricos. Esto se presenta en las figuras 19 a 25.

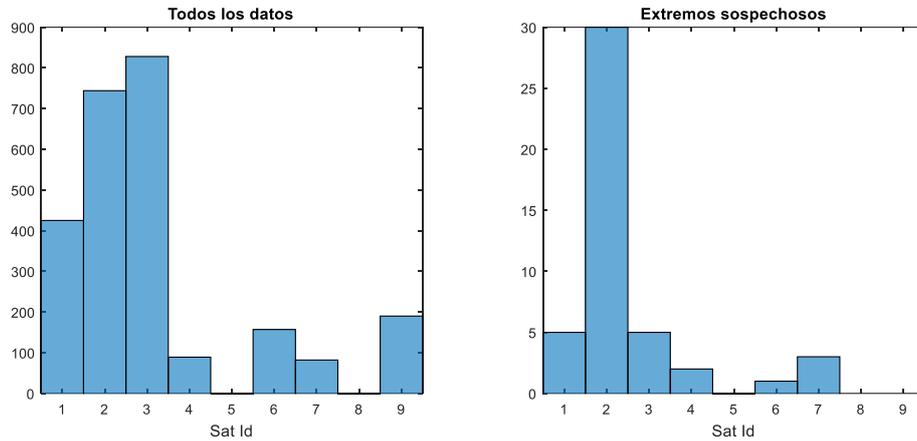


Figura 17.- Histogramas de cantidad de datos provistos por los distintos satélites. Río de la Plata Interior. Todos los datos (izq.) solamente extremos sospechosos (der.)

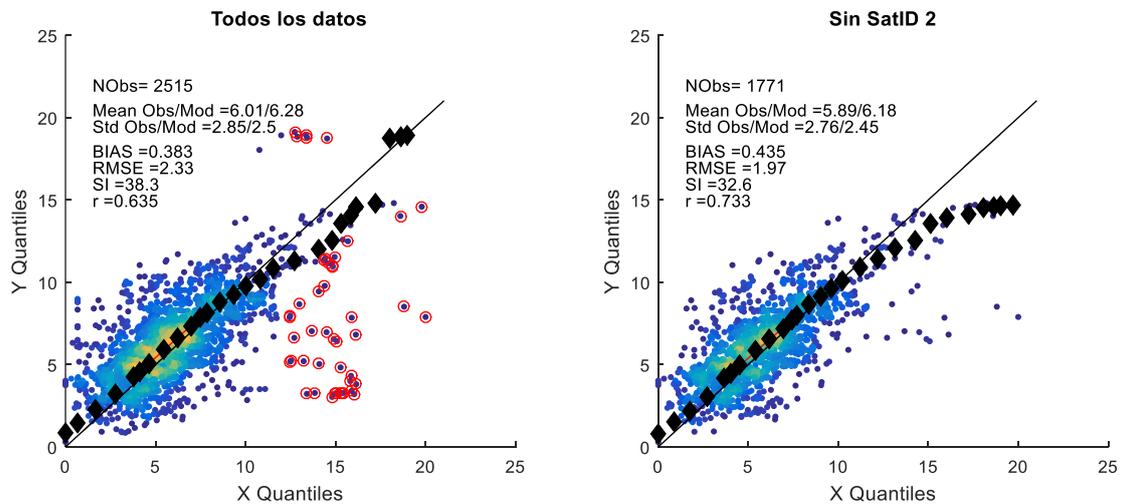


Figura 18.- Diagramas de dispersión y distintas métricas de error. Río de la Plata interior. Todos los datos (izq.) Sin los registros del satélite 2 (der.).

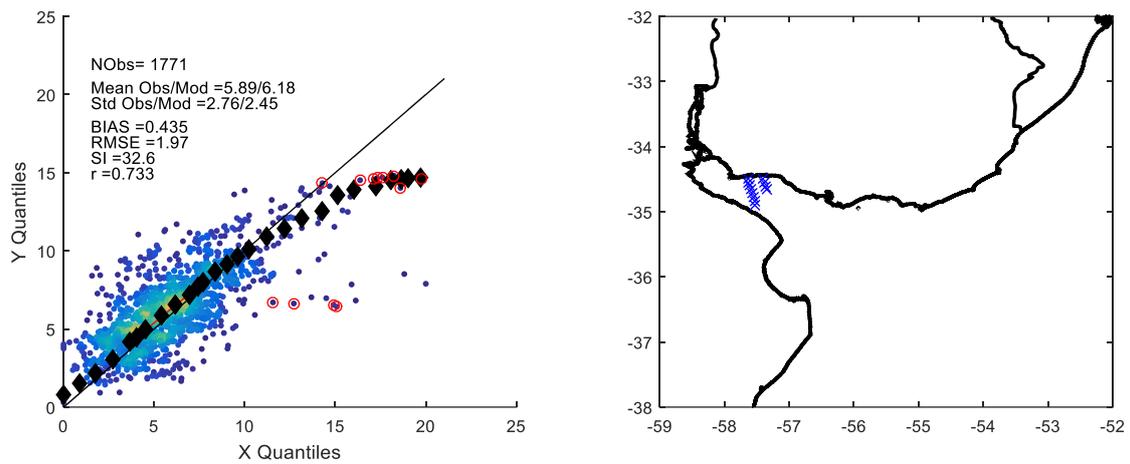


Figura 19.- Identificación de eventos sospechosos correspondientes a un mismo estado: en el diagrama de dispersión (círculos rojos en el gráfico de la izquierda) y en la localización espacial del registro (derecha).

Tabla 8.- Eventos sospechosos que se mantienen al no considerar el satélite 2.

	Fecha	$V_{\text{altimétrica}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{cfsr}} \text{ (m/s)}$	Hs(m)	Sat Id
Evento 1	08/05/1994	14,9	6,5	1,16	1
Evento 2	29/11/1994	19,8	14,6	1,67	1
Evento 3	04/12/2003	20,0	7,9	1,07	4
Evento 4	01/02/2004	13,0	8,7	1,30	3
Evento 5	17/12/2006	13,7	7,0	1,58	3
Evento 6	14/11/2017	15,7	12,5	0,96	7
Evento 7	08/02/2008	14,1	9,4	0,92	7

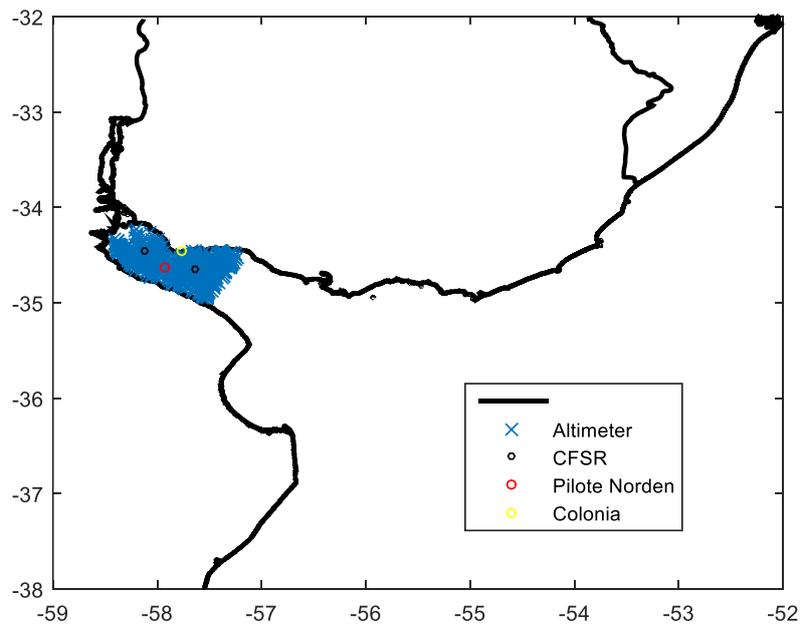


Figura 20.- Ubicación de datos altimétricos, puntos CFSR y mediciones in-situ consideradas.

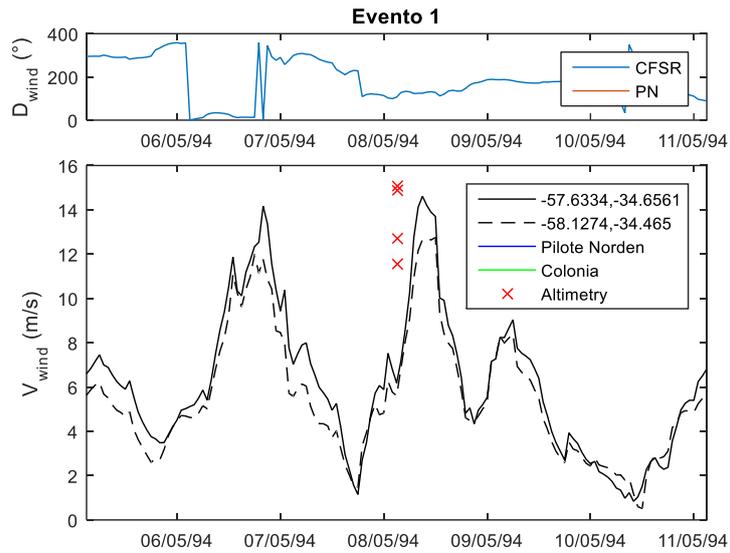


Figura 21.-Estado 1. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

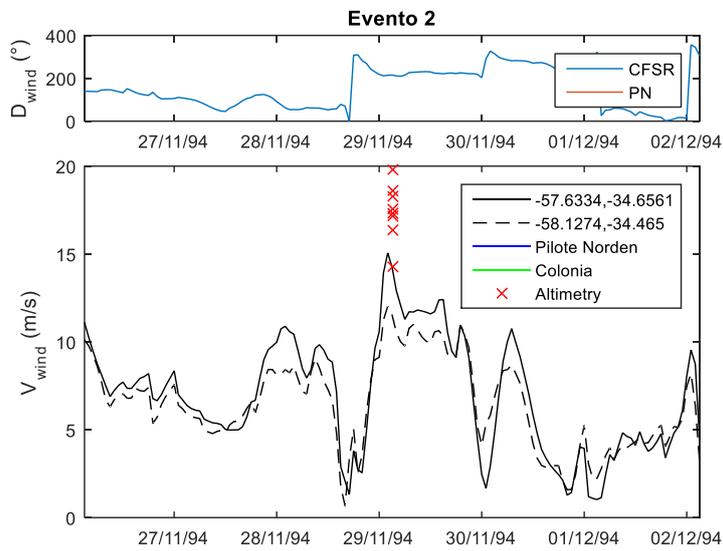


Figura 22.- Estado 2. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

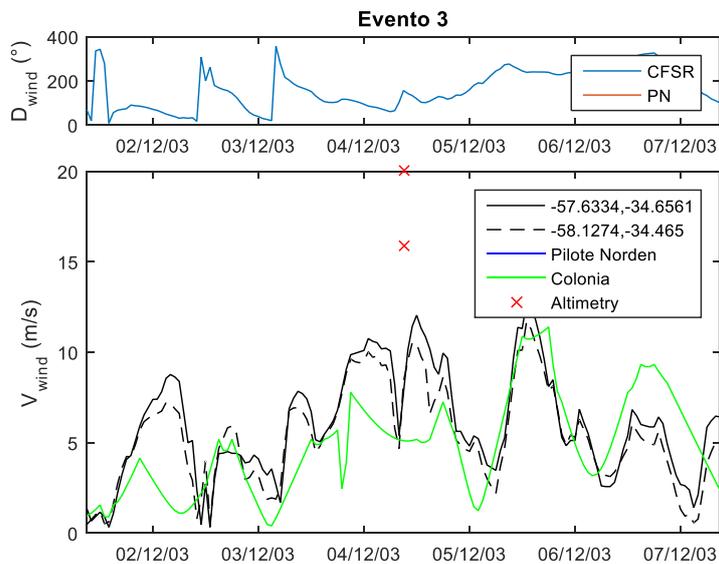


Figura 23.- Estado 3. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

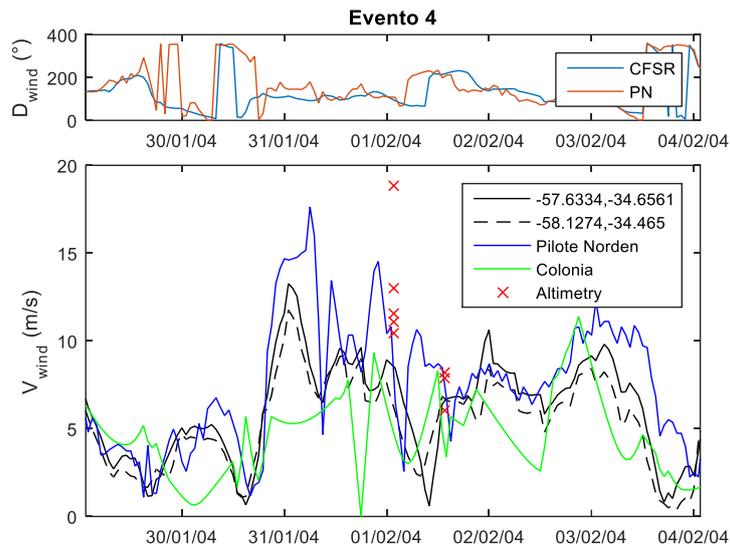


Figura 24.- Estado 4. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

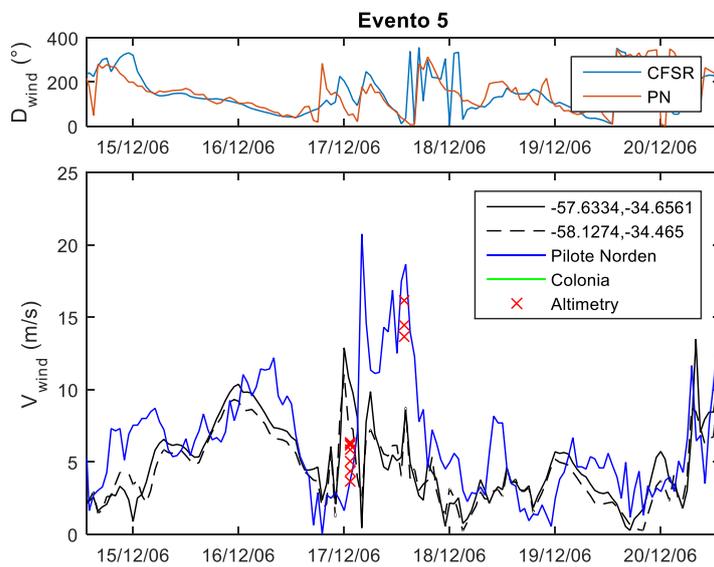


Figura 25.- Estado 5. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

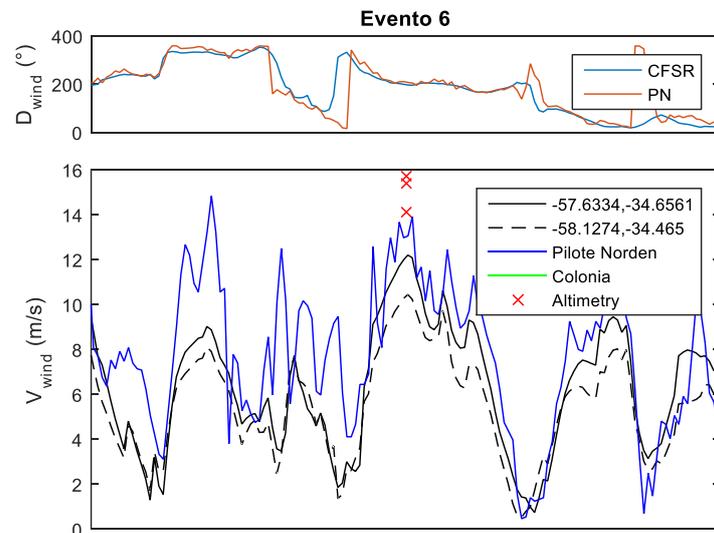


Figura 26.- Estado 6. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

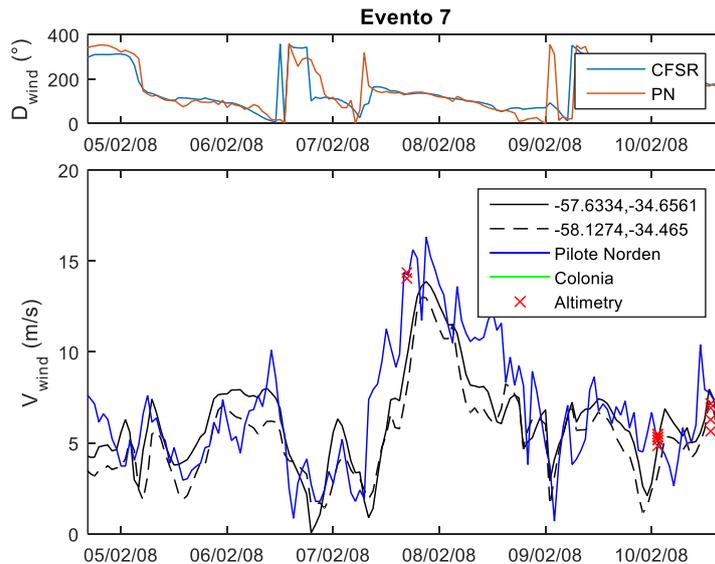


Figura 27.- Estado 7. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

En el caso 1, se observa que el reanálisis muestra un evento de similar magnitud al registro altimétrico y que la diferencia obtenida se debe a un desfase temporal. El caso 2, muestra que el evento extremo aparece en el reanálisis y su pico es similar al dato altimétrico de menor valor. No captando el fuerte gradiente espacial que aparece en lo datos altimétricos. Para el caso 3 se cuenta con datos registrados en Colonia. Este registro, al igual que el reanálisis, no da indicios de la existencia de un evento extremos, por lo que no se consideran fiables los valores de los dos datos altimétricos correspondientes a este caso. En los casos que siguen se cuenta con el respaldo de las medidas en Pilote Norden. Los casos 4 y 5 son los más preocupantes en términos de la performance del reanálisis. Se trata de eventos extremos registrado en los datos altimétricos y en Pilote Norden e ignorados por el reanálisis. Finalmente en el caso 6, el reanálisis capta el evento pero subestima los registros altimétricos y el pico registrado en Pilote Norden, mientras en el caso 7 es similar al 1, en el sentido que la diferencia tiene lugar debido a un desfase temporal.

Resumiendo, se tiene un caso (caso 3) donde los registros altimétricos no son fiables, 2 casos (caso 1 y 7) en que la diferencia se da debido a un desfase temporal, existiendo en el reanálisis un evento de similar magnitud al registrado, 2 casos (2 y 6) en donde se observa una subestimación del pico del evento y 2 casos (4 y 5) donde el evento extremos no existe en el reanálisis y hay evidencia de su existencia provista por el dato altimétrico y el registro de Pilote Norden.

Solamente 2 casos, no son suficientes como para confirmar una tendencia a la subestimación de los picos de los eventos de viento por parte del reanálisis CFSR de alta resolución en el Río de la Plata interior, y por ende ensayar una eventual corrección. Se constató la existencia de eventos extremos no capturados por el reanálisis.

2.6 Verificación con mediciones in-situ

En la Figura 28 se presenta la comparación del reanálisis CFSR +CFsv2 con los 4 registros in-situ disponibles. En todo los casos se aprecia un ajuste adecuado, esto es $r \sim 0.7$, $RMSE \sim 2\text{m/s}$ y $|BIAS| < 1\text{m/s}$. La mejor performance se aprecia en La Paloma y las peores en Colonia y Pilote Norden, lo cual es consistente con lo observado a partir de los datos altimétricos.

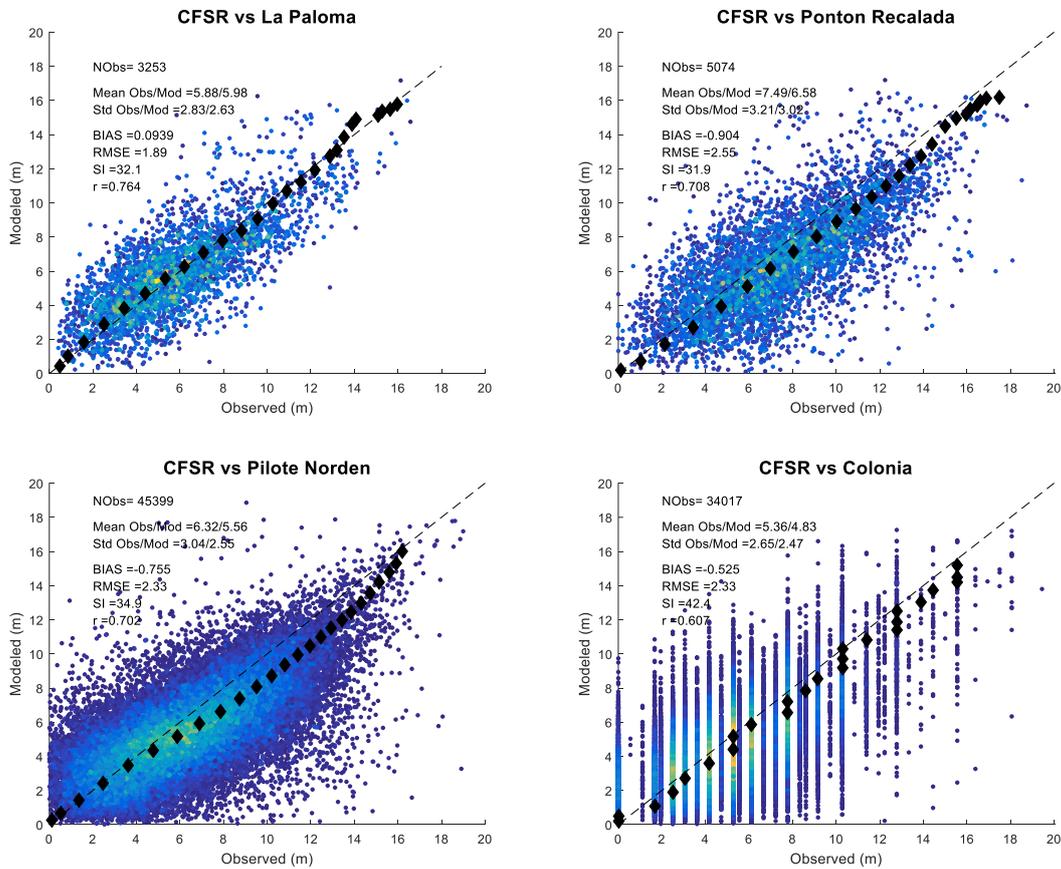


Figura 28. Comparación CFSR_{fine} y las mediciones in-situ disponibles.

2.7 Conclusiones

Tomando como referencia datos altimétricos de velocidad del viento sobre el mar; los datos obtenidos del reanálisis atmosférico CFSR en su mayor resolución presentan en términos generales una buena performance en el dominio analizado, constatándose una mejoría respecto a CFSR de menor resolución empleado en trabajos antecedentes. Por otra parte, también presentó mejores resultados que un downscaling del CFSR de menor resolución hecho con el modelo atmosférico WRF con el objetivo de mejorar la estimación del viento en tierra (zonas donde existen o se proyectan parques eólicos).

Los análisis se realizaron por regiones. Para el Río de la Plata exterior y las regiones correspondientes a la costa atlántica se obtuvieron los mejores ajustes. En el caso del Río de la Plata Medio se percibieron diferencias entre el dato CFSR y el dato altimétrico en una cantidad significativa de eventos extremos, lo que apartaba el ajuste para los cuantiles altos. Analizando los datos que presentaban estas diferencias, se identificó que provenían casi exclusivamente de uno de los satélites de los nueve que conforman la base de datos, y que descartando este satélite

el ajuste se tornaba satisfactorio. Finalmente en el Río de la Plata interior es donde se cuenta con menos datos altimétricos y también donde se constató la peor performance del CFSR. De todas formas, este es aceptable y no se dispone de registros de eventos extremos independientes suficientes como para confirmar sesgos y ensayar una corrección estadística de los mismos. Analizando casos particulares en esta región se encontraron eventos extremos de viento que no son captados en el reanálisis. Este informe se limita a llamar la atención sobre la existencia de los mismos, ya que estudiar este problema en mayor profundidad excede el alcance del proyecto.

3 SIMULACIÓN RETROSPECTIVA DE NIVELES

3.1 Introducción

Los niveles de la superficie libre son un insumo fundamental para la evaluación de los efectos del cambio climático sobre los riesgos de erosión e inundación en la costa Uruguaya. En este capítulo se presenta la generación de una base de datos de nivel de mar homogénea que cubre toda la costa de Uruguay, con alta resolución temporal y espacial y de larga duración. A los efectos de obtener un producto con estas características la aproximación empleada se basa en la implementación de un modelo hidrodinámico, apropiadamente calibrado y validado en base a la información de campo disponible, para luego realizar simulaciones retrospectivas (hindcast) cubriendo un período de 30 años.

El Río de la Plata presenta una dinámica compleja, existe una clara diferencia en el comportamiento de la zona interior-intermedia del estuario y la zona exterior, la cual se define a partir de la denominada “zona del frente”, donde coincide la gran expansión de la sección con un aumento de profundidad (Figura 29). La hidrodinámica del Río de la Plata, además de estar controlada por los forzantes locales (atmosféricos, caudales erogados por sus afluentes), depende fuertemente de la marea astronómica y meteorológica que ingresa desde el Océano Atlántico, en particular de las ondas que se propagan desde la plataforma continental Argentina (Santoro et al., 2013). Si bien existe experiencia en la modelación numérica del nivel de mar y las corrientes en la costa Uruguaya (Piedra Cueva et al 2007; Fossati et al, 2013; Santoro et al., 2013), hasta la fecha no se había implementado a partir de dichos modelos un pronóstico retrospectivo de nivel de mar cubriendo un período de larga duración.

A continuación se presenta la metodología seguida para la implementación del modelo hidrodinámico, su calibración y validación; la información de campo utilizada; los resultados obtenidos; y finalmente un análisis de las series de niveles obtenidas en algunas estaciones de la costa Uruguaya.

3.2 Metodología

Se implementó un modelo hidrodinámico para el Río de la Plata, el cual fue calibrado y validado en base a información de niveles medidos en diversas estaciones de la costa Uruguaya. Una vez calibrado el modelo se realizaron simulaciones retrospectivas (hindcast) cubriendo el período 1985 – 2016 (31 años). Se escogió como herramienta numérica el modelo TELEMAC-MASCARET (Hervouet, 2007), en particular su módulo hidrodinámico bidimensional TELEMAC2D. Si bien nuestro grupo de trabajo utiliza diversos modelos numéricos, se decidió emplear este modelo por tratarse de herramientas de código abierto, muy eficiente computacionalmente, en continuo desarrollo por grupos de reconocido prestigio internacional, y con una comunidad de usuarios extendida y con fluida comunicación (www.opentelemac.org). El modelo TELEMAC ha sido aplicado exitosamente en numerosos estudios de dinámica de estuarios (Briere et al., 2007; Jones et al., 2008; Guillou & Chapalain, 2012; Huybrechts et al 2012, Huybrechts & Villaret, 2013; Luo et al., 2013; Jia et al., 2015; Sathish Kumar & Balaji, 2015).

La implementación del modelo considera las principales características de la dinámica del Río de la Plata (Santoro et al., 2013). La hidrodinámica en el Río de la Plata muestra una variabilidad influenciada claramente por dos procesos que tienen origen y escalas temporales distintas, la

marea astronómica y los eventos de marea meteorológica u ondas de tormenta. Las primeras responden a un forzante astronómico y su régimen es semidiurno con desigualdades diurnas. Las segundas responden al forzante meteorológico (viento y presión en superficie) su duración es de varios días y ocurren con una frecuencia aproximadamente semanal.

El modelo se calibró con datos medidos en diferentes puntos del Río de la Plata y la costa atlántica. En la calibración se utilizó una estación en la zona interior del Río de la Plata (Colonia), una en la zona intermedia (Montevideo) y una en la zona exterior o frente marítimo (La Paloma), de forma de representar correctamente las tres zonas analizadas (Figura 29). Por otra parte se buscaron años con pocos datos faltantes y ocurrencia de eventos severos o extremos por encima de lo habitual, seleccionándose los años 2002, 2003 y 2004 para la calibración.

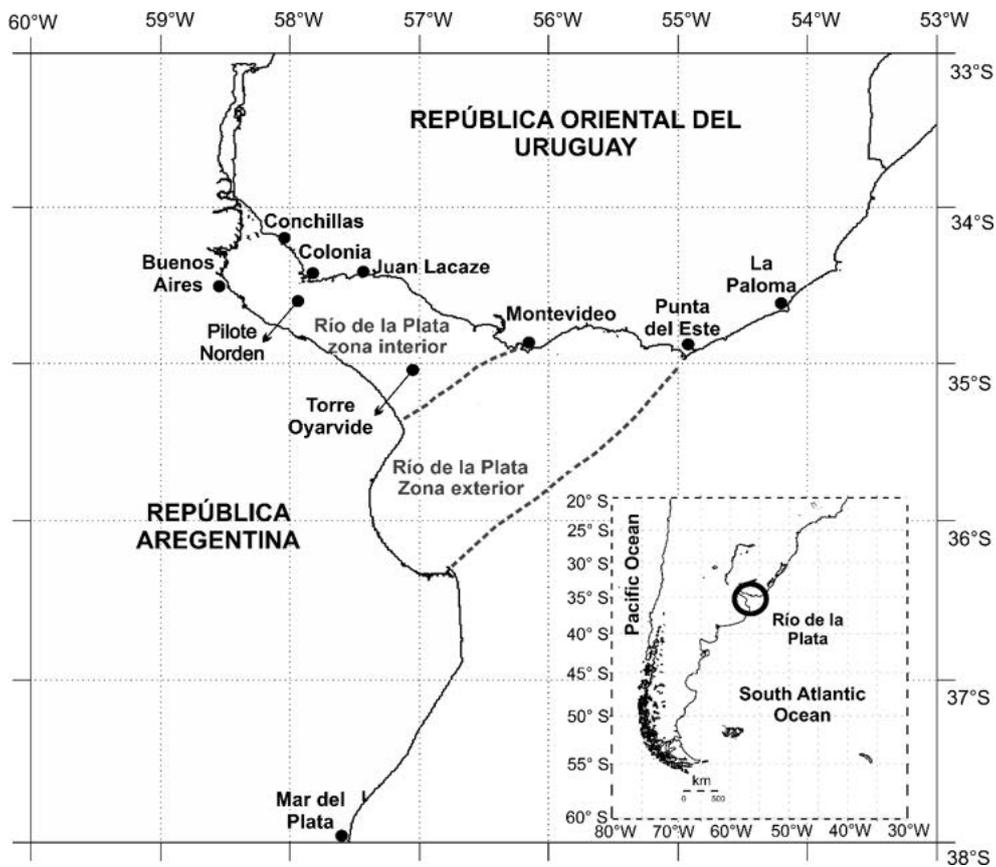


Figura 29: Río de la Plata y estaciones de medición de niveles utilizadas en este trabajo.

La calibración del modelo se realizó en función de dos parámetros: el coeficiente de fricción de fondo (en este caso el número de Manning, n) y el coeficiente de arrastre del viento (C_D).

La tensión en el fondo se calcula según:

$$\tau_{fondo} = \frac{1}{2} \rho_{agua} C_{fr} \bar{U} |\bar{U}|$$

Ecuación 1

siendo ρ_{agua} la densidad del agua, U la corriente integrada en vertical, y C_{fr} un coeficiente de fricción, que para el caso de la formulación de Manning es:

$$C_{fr} = \frac{2gn^2}{h^{1/3}}$$

Ecuación 2

siendo n el número de Manning, g la gravedad y h la altura del a columna de agua. Se consideraron configuraciones con número de Manning uniforme en todo el domino, así como una configuración no uniforme dividiendo el estuario en tres zonas, interior, intermedia y exterior.

La tensión en superficie ejercida por la acción del viento se representa con una formulación de arrastre del tipo:

$$\tau_{viento} = C_D \rho_{aire} \vec{W} |\vec{W}|$$

Ecuación 3

siendo C_D el coeficiente de arrastre, ρ_{aire} la densidad del aire y W la velocidad del viento en 10m. Se evaluaron las alternativas de utilizar un C_D constante, caso en el cual se calibra directamente el valor del parámetro, y C_D variable (función de la velocidad de viento), caso en el cual se calibra un parámetro de escala que mayor (o menor) el valor de C_D no uniforme obtenido a partir de la formulación de Flather (1976):

$$C_D = \begin{cases} 0.565 \times 10^{-6} & \text{si } \|\vec{W}\| < 5 \text{ m/s} \\ (-0.12 + 0,137 \times 0.565 \|\vec{W}\|) \times 10^{-6} & \text{si } 5 < \|\vec{W}\| < 19.22 \text{ m/s} \\ 2.5131 \times 10^{-6} & \text{si } \|\vec{W}\| > 19.22 \text{ m/s} \end{cases}$$

Ecuación 4

Las diferentes simulaciones se evalúan calculando el RMSE (Root mean square-error), el sesgo (BIAS) gráficos de dispersión y gráficos cuantil-cuantil de todos los datos. Además al momento de seleccionar la mejor alternativa se compara la distribución de los Picos de Tormenta medidos y modelados mediante gráficos cuantil-cuantil.

3.3 Información utilizada

3.3.1 Información batimétrica

Se utilizó información cartográfica correspondiente a las cartas náuticas del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA). Se digitalizaron las cartas que contenían información útil para el dominio a simular y se construyó un modelo digital de la batimetría del Río de la Plata y su frente marítimo.

3.3.2 Información meteorológica

Se utilizaron los datos de viento en 10 m y presión a nivel del mar de Reanalysis de NCEP, CFSR para el período 1985 – 2010 y CFSRv2 para el período 2010 – 2016. Se trabajó con series horarias las cuales están compuestas por datos de Analysis cada 6 horas y datos de pronósticos en entre

cada uno de ellos. Los datos de viento se descargaron con una resolución espacial de $0.205^{\circ} \times 0.204^{\circ}$, mientras que los de presión tiene una resolución de $0.312^{\circ} \times 0.312^{\circ}$.

3.3.3 Datos de caudales fluviales

Se utilizaron series de caudales diarios de los ríos Paraná (Guazú y Las Palmas) y Uruguay para el período 1985 – 2016. Las mismas fueron recopiladas a través del Instituto Nacional de Agua Argentino (INA), la Comisión Técnica Mixta de Salto Grande (CTM) y la Administración de Usinas Térmicas del Estado (UTE).

3.3.4 Datos de niveles

Se tienen datos de nivel medidos en varias estaciones del Río de la Plata provenientes de diferentes instituciones. En la Figura 29 se muestra la ubicación geográfica de cada una de estas estaciones. La mayor parte de la información utilizada fue recopilada durante varios años por el IMFIA y suministrada por diversos organismos e instituciones tanto uruguayas como argentinas. En general las series presentan diversas frecuencias de muestreo, duración y cantidad de datos faltantes. En la Tabla 9 se muestran las estaciones donde se tienen datos medidos y la institución proveedora de la información.

En la estación La Paloma se cuenta con datos tomados tanto por el SOHMA como la DNH, ambas estaciones se encuentran ubicadas en el Puerto de La Paloma ($34^{\circ}39'.2$ S, $54^{\circ}08'.5$ W). Los datos correspondientes a junio-julio de 1997 y enero a junio de 1998 fueron provistos por la DNH, mientras que el resto de los datos disponibles fueron brindados por el SOHMA. Los registros del SOHMA están referidos al cero de la escala del Puerto el cual coincide con el Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton), mientras que el cero al que se refieren los de la DNH se encuentra 1 cm por debajo del cero Wharton.

Los datos disponibles en la estación Punta del Este fueron suministrados por la DNH, la estación se encuentra ubicada en el puerto de Punta del Este, coordenadas ($34^{\circ} 57.7'$ S, $54^{\circ} 57.1'$ W) y el cero de la escala se encuentra 2 cm por debajo del Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton).

En lo que respecta a la estación Montevideo, los datos disponibles fueron brindados por el SOHMA y corresponden a la estación de Punta Lobos ($34^{\circ}54,2$ S, $56^{\circ} 15.4'$ W), cuyo cero de escala coincide con el Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton). Los datos tienen una resolución temporal de una hora, salvo los años comprendidos entre 2006 y 2008 que tienen una resolución de tres horas.

Los datos de la estación Juan Lacaze fueron suministrados por la DINAGUA, la estación se encuentra ubicada en el puerto deportivo de dicha localidad, coordenadas ($34^{\circ} 26'$ S, $57^{\circ} 27'$ W). El cero de la escala se encuentra 23 cm por debajo del Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton).

Los datos de la estación Colonia fueron suministrados por la DINAGUA, la estación se encuentra ubicada en el puerto de la ciudad de Colonia, coordenadas ($34^{\circ} 28.5'$ S, $57^{\circ} 50.6'$ W). El cero de la escala se encuentra 37 cm por encima del Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton).

Los datos de la estación Conchillas fueron suministrados por la Riovía S.A., la estación se encuentra ubicada en (34° 26' S, 57° 27' W). El cero de la escala se encuentra 26 cm por debajo del Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton).

La estación Pilote Norden, no se trata de una estación costera y se ubica precisamente en las coordenadas (34° 37' 43" .7 S, 57° 55' 29" .5 W). Los datos disponibles fueron provistos por Riovía S.A. tienen una resolución temporal de 5 minutos, y se encuentran referidos al cero de la escala que se encuentra 45 cm por encima del Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton).

Tabla 9

Estación	Fuente	Período
La Paloma	Dinagua	1934-2016
Punta del Este	Dinagua	1971-2017
Montevideo	Dinagua/ANP	1969-2017
Isla de Flores	ANP	2014-2017
Juan Lacaze	Dinagua	1979-2014
Colonia	Dinagua	1936-2017
Conchillas	Riovía S.A	2007-2009
Pilote Norden	Riovía S.A	2003-2014

Todas las series medidas se pasan a frecuencia horaria (8760 datos anuales) y se refieren al Plano Hidrométrico Provisorio (Ex - Wharton). En la Tabla 10 y Tabla 11 se presentan la cantidad de datos horarios disponibles por año y el nivel medio anual en cada una de las estaciones. Se observa que existen varios años con gran cantidad de datos medidos en diferentes estaciones.

Tabla 10- Cantidad de datos medidos disponibles por estación (1934-1975).

		1934	1935	1936	1937	1938	1939	1940	1941	1942	1943	1944	1945	1946	1947	1948	1949	1950	1951	1952	1953	1954
La Paloma	Cantidad de datos	1083	942	1098	1095	954	365	530	1002		1095	1098	1095	760	243		312	269	272	553	550	263
	Nivel medio anual	0.89	0.94	0.84	0.73	0.77	0.83	0.80	0.79		0.82	0.79	0.91	0.89	0.96		0.86	0.85	0.88	0.90	0.86	0.91
Punta del Este	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
Montevideo	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
Isla de Flores	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
Juan Lacaze	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
Colonia	Cantidad de datos	276		1098		1095	1095	1095	1083		993	1069	365	1095	1095	1098	1095	365	334	732	457	1095
	Nivel medio anual	1.06		1.16		1.12	1.17	1.18	1.18		1.11	1.06	1.05	1.14	1.11	1.07	1.06	1.10	1.07	1.07	1.05	1.06
Conchillas	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
Pilote Norden	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
		1955	1956	1957	1958	1959	1960	1961	1962	1963	1964	1965	1966	1967	1968	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975
La Paloma	Cantidad de datos	355	1001	987	334	365	366	299	116	239	366	365	365	1303	1033	365	365	1095	1036	1002		
	Nivel medio anual	0.85	0.88	0.84	0.94	0.95	0.96	1.01	0.91	1.00	0.88	1.02	1.00	0.91	0.86	0.95	0.98	0.96	1.04	1.06		
Punta del Este	Cantidad de datos																	1095	1098	1096	1096	1096
	Nivel medio anual																	0.84	0.87	0.89	0.87	0.87
Montevideo	Cantidad de datos															8284	6818	4007	4181	655		
	Nivel medio anual															0.92	0.93	0.97	0.95	0.91		
Isla de Flores	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
Juan Lacaze	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
Colonia	Cantidad de datos	365	366	365	365	365	365	343	347	320	364	363	131	365	366	365					8743	8600
	Nivel medio anual	0.96	1.02	1.07	1.10	1.18	1.08	1.12	1.06	1.14	1.02	1.16	1.15	1.14	1.14	1.01					0.98	0.98
Conchillas	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
Pilote Norden	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					

Tabla 11- Cantidad de datos medidos disponibles por estación (1976-2017).

		1976	1977	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996
La Paloma	Cantidad de datos	253		735	1095	1098	1095	1095	1034	1098	1094	3250	6451	3313	7978	8509	6677	103	1094	11		843
	Nivel medio anual	0.89		0.83	0.87	0.88	0.89	0.90	0.93	0.92	0.88	0.84	0.89	0.96	0.88	0.90	0.89	0.98	0.94	1.86		0.88
Punta del Este	Cantidad de datos	1099	1069	1096	1096	1099	1095	1266	1090	1099	4407	4120	8185	6621	4706	7121	5570	7733	5903	62	8332	560
	Nivel medio anual	0.89	0.85	0.82	0.83	0.86	0.80	0.93	1.01	0.98	0.96	0.89	0.92	0.90	0.91	0.91	0.92	0.98	1.01	1.00	1.00	0.89
Montevideo	Cantidad de datos	2331			6176	8594	8355	8084	8075	7060	7397	7854	8500	8229	8195	8398	8349	8678	8642	7807		2875
	Nivel medio anual	1.04			0.97	1.01	1.14	1.06	1.04	1.12	1.06	1.03	0.99	0.97	0.97	1.01	1.01	1.02	1.08	1.04		0.95
Isla de Flores	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
Juan Lacaze	Cantidad de datos			201	1095	1098	1095	1093	1095	1098	1095	1095	1095	1250	1432	1186	1095	4900	1144	1809	6696	4374
	Nivel medio anual			0.89	0.86	0.88	0.97	0.95	1.20	1.15	1.15	1.13	1.12	1.07	1.08	1.13	1.09	1.18	1.20	1.24	1.13	1.04
Colonia	Cantidad de datos	8776	3623	1095	1095	1098	1095	1095	1095	3659	1078	3621	8235	7075	3977	5796	6981	7495	5466	6405	7758	8271
	Nivel medio anual	1.04	1.08	1.00	1.04	1.01	0.97	1.08	1.16	1.13	1.10	1.15	1.10	1.05	1.00	1.05	1.06	1.12	1.17	1.13	1.16	1.09
Conchillas	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
Pilote Norden	Cantidad de datos																					
	Nivel medio anual																					
		1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017
La Paloma	Cantidad de datos			7424	6831	7639	8287	8508	7541	7028	7855	1095	1088	1094	360	5133	8358	7472	6873	6713	4664	
	Nivel medio anual			0.88	0.85	0.93	0.97	0.99	0.94	0.97	0.91	0.94	0.87	0.94	1.02	0.94	0.96	1.01	0.93	0.97	1.01	
Punta del Este	Cantidad de datos	8330	8680	8668	8784	7320	8424	7189	4920		1609	7959	7450	8086	8350	6966	7023	4220	7207	6139	8202	2471
	Nivel medio anual	0.96	1.01	0.92	0.92	0.90	0.97	0.95	0.90		0.85	1.01	0.95	0.96	0.95	0.91	0.97	1.00	1.02	1.03	1.04	1.04
Montevideo	Cantidad de datos	8521	8563	7120	8203	8460	7807	7511	8713	5486	6070	6136	8521	7492	6624	4045			2837	8634	8783	6607
	Nivel medio anual	1.03	1.05	1.00	1.02	1.01	1.09	1.09	0.96	1.03	1.03	1.06	0.98	1.02	1.03	0.95			1.08	1.07	1.10	1.07
Isla de Flores	Cantidad de datos																		3955	8626	7925	6590
	Nivel medio anual																		0.89	0.91	0.94	0.92
Juan Lacaze	Cantidad de datos	803	509	4759	5885	4974	8701	8759	8782	8740	8000	7752	7403	2879	3	5770	876	7904	370			
	Nivel medio anual	1.19	1.24	1.09	1.07	1.08	1.15	1.13	1.07	1.14	1.05	1.15	1.10	1.15	2.20	1.11	1.08	1.12	1.26			
Colonia	Cantidad de datos	8681	8140	7872	8036	7636	5782	7741	8703	6070	4958	7128	7131	7053	5478	3441	7078	7017	7089	7385	7442	4780
	Nivel medio anual	1.18	1.22	1.12	1.14	1.16	1.18	1.20	1.12	1.22	1.12	1.19	1.12	1.16	1.22	1.09	1.13	1.14	1.19	1.21	1.25	1.22
Conchillas	Cantidad de datos											4959	8733	8092								
	Nivel medio anual											1.39	1.28	1.33								
Pilote Norden	Cantidad de datos						8755	8451	6304	8760	8683	8761	8666	160	8467	7481	3221	1104				
	Nivel medio anual						1.18	1.13	1.20	1.10	1.15	1.10	1.09	1.22	1.16	1.15	1.12	1.24				

3.4 Modelo hidrodinámico

Se trabajó con el sistema TELEMAC-MASCARET (Hervouet, 2007), el mismo fue creado y desarrollado principalmente por el Laboratorio Nacional de Hidráulica y el Ambiente, un departamento de la División para la Investigación y el Desarrollo de la Compañía de Electricidad Francesa (EDF – R&D). Al día de hoy se ha convertido en un sistema de código abierto, y es desarrollado por el consorcio Open TELEMAC-MASCARET del cual participan instituciones de varios países europeos (www.opentelemac.org). El sistema ofrece diversos modelos numéricos que permiten el estudio de la hidrodinámica, transporte de sustancias y sedimentos. En particular en este trabajo se utilizó su módulo hidrodinámico bidimensional integrado en vertical TELEMAC-2D.

3.4.1 Descripción del modelo

El modelo TELEMAC-2D fue diseñado para simular flujos a superficie libre de fluidos Newtonianos. En particular, debido a sus hipótesis, es apropiado el estudio de la hidrodinámica de cuerpos de agua someros como son áreas costeras, estuarios, ríos y lagos. Además el modelo ofrece la posibilidad de simular la evolución de sustancias disueltas que pueden afectar la densidad integrada en la vertical.

El modelo TELEMAC-2D resuelve mediante el método de elementos finitos sobre mallas no estructuradas, las ecuaciones de aguas someras (Shallow Water Equations) en un espacio bidimensional. Estas ecuaciones incluyen el balance de masa o ecuación de continuidad y la ecuación de balance de cantidad de movimiento bajo las hipótesis y aproximaciones que se describirán en los siguientes párrafos. Además el modelo permite resolver en forma simultánea y acoplada, la ecuación de transporte para sustancias disueltas. La densidad promedio vertical puede depender de la concentración de dicha propiedad como es el caso de la salinidad en un estuario.

Una descripción detallada de las ecuaciones y la implementación de su resolución numérica se puede encontrar en Hervouet (2007). Las ecuaciones de Navier-Stokes y de balance de masa, que gobiernan la cinemática y dinámica de fluidos Newtonianos, son simplificadas bajo las siguientes hipótesis. El fluido se considera incompresible y homogéneo en la vertical. La distribución de presiones es hidrostática, lo que reemplaza a la proyección vertical de la ecuación de balance mecánico. Las ecuaciones de balance mecánico son promediadas en la vertical. En esta operación se imponen condiciones de borde en el fondo y la superficie libre. Estas incluyen por ejemplo el efecto de la fricción en el fondo y el efecto de la tensión inducida por el viento y la presión atmosférica en la superficie libre.

De esta forma el sistema de ecuaciones resuelto es:

Ecuación de balance de masa o continuidad:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla h + h \nabla \cdot \vec{U} = S_h$$

Ecuación 5

Ecuaciones de balance mecánico:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla u = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h v_i \nabla u) + F_x$$

Ecuación 6

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla v = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h v_i \nabla v) + F_y$$

Ecuación 7

Ecuación de transporte de sustancias:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla T = \frac{1}{h} \nabla \cdot (h v_T \nabla T) + Q$$

Ecuación 8

Siendo:

x, y coordenadas espaciales

Z la cota de la superficie libre

h la profundidad

$\vec{U} = (u, v)$ el vector velocidad y sus respectivas en cada punto e instante

g la aceleración gravitatoria

U_i, U_T los coeficientes de difusión de cantidad de movimiento y trazadores respectivamente

t tiempo

T trazador pasivo

S_h término fuente o sumidero en la ecuación de balance de masa

F_x, F_y términos fuentes o sumideros en la ecuación de balance mecánico

Q fuente o sumidero del trazador

Las variables a determinar son justamente $h, u, v, y T$.

Los términos fuentes en la ecuación de balance de cantidad de movimiento (F_x, F_y) pueden incluir el efecto del viento, la fuerza de Coriolis, la fricción de fondo u otros procesos modelados con términos de esta forma. El modelo permite resolver la advección utilizando el método de las características (Hervouet, 2007), en cuyo caso los diferentes términos de estas ecuaciones son procesados en más de un paso:

1. Se resuelve la advección de $h, u, v, y T$
2. Se resuelve la propagación, difusión y términos fuentes de la ecuación de balance

mecánico

3. Se resuelve la difusión y términos fuentes en la ecuación de transporte de trazadores

Cualquiera de estos pasos puede no tenerse en cuenta y se estarán resolviendo versiones simplificadas de las ecuaciones.

En lo que respecta a la condición de borde en el fondo, la fricción de fondo puede ser modelada por diversas leyes no lineales dependientes de la velocidad como son Chezy, Manning-Strickler o Nikuradse.

En la superficie libre el modelo permite imponer el efecto de la tensión generada por el viento mediante una ecuación del tipo de arrastre. El coeficiente de arrastre puede ser considerado como constante, o se incluye sino la formulación propuesta por el Instituto de Ciencias Oceanográficas del Reino Unido (Flather, 1976) según la cual depende de la velocidad del viento en 10m.

Para la modelación de la turbulencia se utiliza la descomposición de Reynolds y un promedio estocástico, que resultan en la aparición de las tensiones de Reynolds las que son modeladas utilizando una viscosidad turbulenta como propuso Bussinesq. De esta forma la viscosidad impuesta incluye la molecular y los efectos turbulentos, y puede ser aproximada por los siguientes modelos: un valor isotrópico promedio en la vertical, un valor no isotrópico dependiendo de la velocidad promedio vertical (formulación de Elder), modelo de Smagorinski, modelo k-Epsilon, que agrega la resolución de ecuaciones para la evolución de la energía cinética turbulenta.

En lo que respecta a la resolución numérica, como ya fue mencionado TELEMAC-2D utiliza el método de elementos finitos. La solución es calculada en cierto número de nodos dentro del dominio, y en los puntos del espacio que no son nodos el modelo define las variables en base a la aplicación de los valores en nodos cercanos y la aplicación de funciones de interpolación que son lineales. Esto último puede ser una limitante si la solución o parámetros físicos como por ejemplo la elevación del fondo sufren variaciones muy abruptas en comparación con la distancia entre nodos. En esos casos se puede mejorar la calidad de los resultados refinando la malla. Algunas alternativas en elementos finitos utilizan funciones cuadráticas o de mayor orden para las funciones de interpolación pudiendo representar más detalles dentro de cada elemento, pero complejizan los cálculos y por tanto el tiempo de cómputo. No es claro en general si es más conveniente tener menos elementos con funciones de interpolación más complejas, o más elementos con funciones de interpolación lineales. Sin embargo, el uso de funciones de interpolación lineales en TELEMAC-2D implica que las integrales sobre los elementos son calculadas a partir de fórmulas analíticas, y por tanto más precisas y eficientes.

La discretización temporal del sistema de ecuaciones es semi-implícita, resultando en un sistema de $3N$ ecuaciones algebraicas a ser resueltas en casa paso de tiempo, siendo N el número de nodos en el dominio. El sistema es resuelto mediante técnicas iterativas del tipo gradiente conjugado o mediante técnicas directas. El modelo incluye varios métodos de gradiente conjugado, así como también opciones de preconditionamiento del sistema.

El término no lineal de advección puede ser resuelto mediante diversos esquemas: método de las características, dos variantes del esquema SUPG (Streamline Upwind Petrov Galerkin), esquema N y esquema PSI (Positive Streamline Invariant). Cada uno de estos métodos tiene diferentes ventajas en términos de precisión, monotonicidad, conservación de masa, difusión numérica y velocidad de cómputo. En algunos casos el problema a ser resuelto puede influenciar la elección del método más apropiado y eficiente, pero en general las elecciones por defecto de los métodos arrojan buenos resultados.

Finalmente en lo que respecta a las condiciones de borde abiertas, cada variable dependiente (h , u , v , y eventualmente T) puede ser prescrita o libre. Para las condiciones de borde sólidas, las ecuaciones gobernantes son escritas en su forma débil y se impone una condición de flujo normal nulo. Un tratamiento similar se realiza con las condiciones de borde abiertas con velocidades prescritas. Finalmente hay una opción para tratar con condiciones de borde sobre determinadas o sub determinadas, es el método de Thompson, en cuyo caso los valores dados son considerados como valores objetivo pero no son estrictamente prescritos.

El modelo permite trabajar con zonas que presentan condiciones de secado y mojado en simulaciones no estacionarias.

3.4.2 Dominio y malla de cálculo

El dominio escogido cubre el Río de la Plata y su Frente Marítimo (Figura 29). Se incluye la desembocadura de los principales afluentes, los ríos Paraná y Uruguay en su borde Oeste, el Río de la Plata en su totalidad y la zona del Frente Marítimo hasta los 200 m de profundidad de la plataforma continental. Los límites del dominio de cálculo en la frontera oceánica se ubicaron normales a la costa. De esta forma la frontera abierta se sitúa aproximadamente en forma paralela a la línea Punta Rasa – Punta del Este y la frontera Sur se posiciona de tal manera que la principal componente de marea (la componente M2) ingresa al dominio de cálculo prácticamente con su frente de onda paralelo a la frontera. Esta condición de ingreso de la onda es favorable para la modelación según estudios anteriores realizados en el IMFIA (Fossati and Piedra-Cueva, 2013; Fossati and Piedra-Cueva, 2008).

Como ya fue mencionado el sistema de modelos TELEMAC-MASCARET trabaja en base a mallas de elementos/volúmenes finitos de tipo triangular. La malla fue generada utilizando el software libre BlueKenue y cuenta con 37534 nodos y 73768 elementos. En la Figura 30 se presenta la configuración horizontal de la malla en elementos finitos utilizada en este trabajo, la cual se estructuró sobre la base de un sistema coordenado Este-Oeste y Norte-Sur a partir de los contornos y de los datos batimétricos digitalizados. Se observa que la malla está formada por elementos triangulares de tamaño variable según la precisión en el cálculo requerida para las diferentes zonas del dominio. Los elementos de mayor tamaño (aproximadamente 7 Km de lado) se encuentran en la zona del borde oceánico. En la zona estuarina del Río de la Plata entre la línea Montevideo Punta Piedras y la línea Punta del Este Punta Rasa, los elementos tienen lados de aproximadamente 2 Km, y sobre la costa Uruguaya los elementos tienen aproximadamente 1 Km de lado.

La batimetría del dominio de cálculo se confeccionó a partir de información cartográfica correspondiente a las cartas náuticas del SOHMA. En la Figura 30 se presenta la batimetría del

área modelada ingresada al modelo en todo el dominio de cálculo. Se observa en la misma la gran variación de la profundidad en el dominio de estudio; mientras en la zona de la plataforma continental las profundidades superan los 100 m, en la zona exterior del Río de la Plata varían entre los 15 y 50 m; y en la zona interior son menores a 10 m habiendo incluso algunas islas.

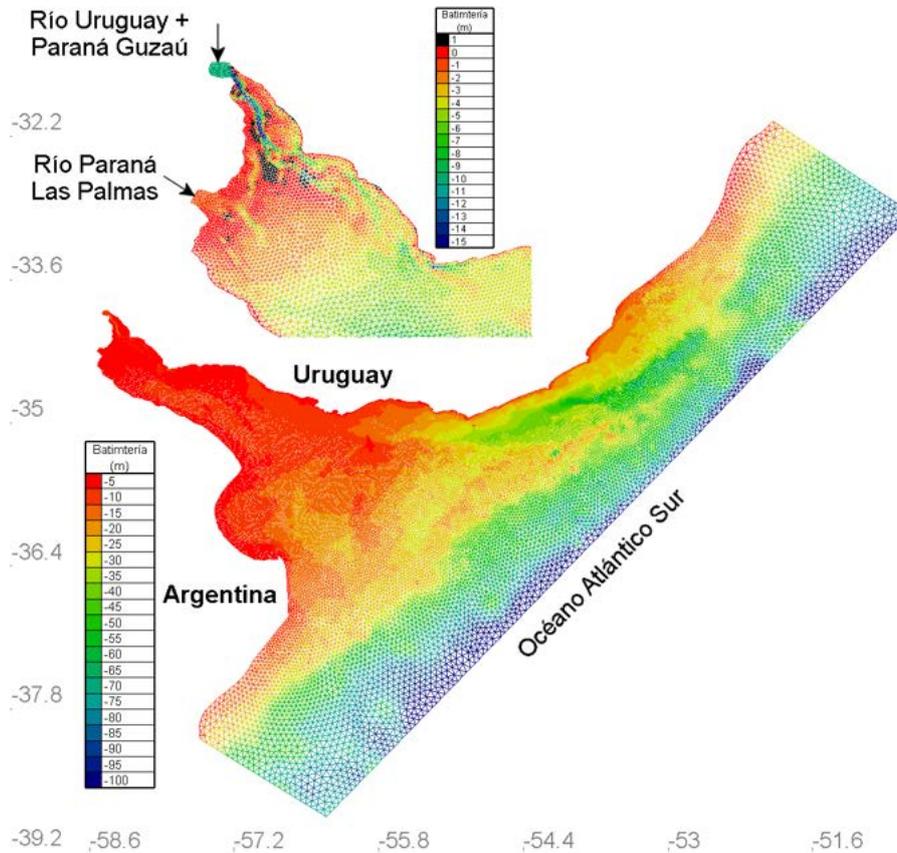


Figura 30: Malla de cálculo y batimetría.

3.4.3 Configuración del modelo

El paso de tiempo escogido es de 60 segundos, el cual muestra ser adecuado para la malla que se está utilizando presentando excelentes tiempos de ejecución y habiendo mostrado no influir en los resultados obtenidos. En lo que respecta a la ley de fricción de fondo, por tratarse de un modelo bidimensional en el cual las velocidades se promedian en la vertical, se considera que la formulación de Manning es conceptualmente acertada. En lo que respecta al coeficiente de Coriolis, su efecto no es despreciable dada las escalas espaciales del Río de la Plata, se optó por trabajar en coordenadas esféricas con lo cual el modelo calcula para cada nodo el valor del coeficiente de Coriolis de acuerdo a su latitud. Como ya fue mencionado se incluye el efecto del viento mediante una formulación del tipo de arrastre. Se tiene en cuenta el efecto de la presión atmosférica en la superficie. En esta implementación bidimensional se tiene en cuenta el efecto de la salinidad a través de los gradientes horizontales de densidad. Se empleó la opción que considera la presencia de planicies de inundación en el dominio, de esta forma se tiene un tratamiento especial de las zonas someras que puedan quedar sin agua durante la evolución de la simulación lo cual ocurre especialmente en la desembocadura de los ríos Paraná y Uruguay. En lo que respecta a las opciones de advección se utiliza el método N para las componentes de la velocidad y para la elevación de la superficie libre el método PSI distribuido. El modelo de

turbulencia utilizado es del Smagorinski. El solver utilizado corresponde al método del gradiente conjugado.

3.4.4 Condiciones de borde

3.4.4.1 *Caudal fluvial*

Una de las condiciones de borde que deben especificarse en el modelo son los flujos que ingresan al dominio. En el caso del Río de la Plata por la frontera Oeste ingresa el mayor aporte de caudal a través de la descarga de los ríos Paraná y Uruguay. En este caso se ingresa el valor medio diario de caudal en ambos ríos. En Figura 30 se observan las dos secciones de aporte de caudal fluvial definidas en la zona interior del Río de la Plata. Como se observa en la misma una de las secciones corresponde al ingreso de los ríos Uruguay y Paraná-Guazú, y la otra al ingreso del caudal del río Paraná Las Palmas. Como la información que se maneja consiste en valores medios diarios de caudal en los ríos Uruguay y Paraná, se realiza una división del caudal del río Paraná para dividirlo en los dos brazos que descargan al Río de la Plata: 73% del caudal del río Paraná corresponde al río Paraná Guazú y el 27% al río Paraná Las Palmas.

3.4.4.2 *Elevación de la superficie libre en la frontera oceánica*

Las ondas de marea relevantes para la hidrodinámica en todo el Río de la Plata son impuestas en los nodos correspondientes a la frontera oceánica del modelo y los valores impuestos provienen del modelo ASTide presentado en el Anexo 1.

La condición de borde impuesta en cada nodo de la frontera oceánica es de tipo Dirichlet, esto es, se impone el valor de la variable en cuestión.

3.4.4.3 *Viento y presión atmosférica*

La condición de borde en la superficie libre es la que permite tener en cuenta el efecto de los forzantes atmosféricos. Por un lado la componente normal de la tensión en la superficie libre se impone como la presión atmosférica a nivel del mar, y por un lado se impone la componente tangencial o rasante de la tensión en base a una formulación de tipo de arrastre que tiene en cuenta la velocidad del viento (Ecuación 9).

$$\tau_{sup} = \frac{1}{2} C_D * \rho_{air} * \vec{W} * |\vec{W}|$$

Ecuación 9

Siendo CD el coeficiente de arrastre, ρ_{air} la densidad del aire y W la velocidad del viento a 10m sobre la superficie libre. El modelo permite definir un CD constante o utilizar la formulación de Flather (1976) que calcula el CD en función del módulo de la velocidad del viento en 10m.

3.4.4.4 *Fondo*

En lo que refiere a la condición de borde en fondo, se utilizó la formulación de Manning-Stirckler en función del coeficiente de rugosidad de Manning (n). Tal como se mencionó en la metodología el mismo fue un parámetro de calibración, evaluándose varias alternativas que incluyen distintos valores del coeficiente de fricción así como configuraciones con un valor uniforme para todo el dominio y otras con una distribución por zonas.

3.4.5 Condición inicial

El modelo requiere la especificación de una condición inicial para las variables del sistema, es decir, para la elevación de la superficie libre y para la velocidad. La condición inicial para la elevación de la superficie es un valor uniforme en todo el dominio de cálculo, igual a 0,91 m. Dicho valor corresponde al nivel medio en Montevideo referido al cero Wharton, cero al cual está referida la batimetría del modelo. En los que respecta al campo de velocidades la condición inicial es el reposo.

3.5 **Resultados**

3.5.1 Calibración

Tal como se describió en la metodología, las simulaciones realizadas se pueden agrupar en tres configuraciones diferentes:

- Número de Manning constante en todo el dominio y coeficiente de arrastre del viento constante.
- Número de Manning constante en todo el dominio y coeficiente de arrastre del viento variable.
- Número de Manning variable en el dominio, y coeficiente de arrastre del viento variable con coeficiente de mayoración igual a 1.

En el caso de la tercera configuración, luego se evaluaron distintas alternativas de zonificación, se presentan aquí los resultados correspondientes a una división del dominio en tres zonas (exterior, intermedia e interior) según se muestra en la Figura 31.

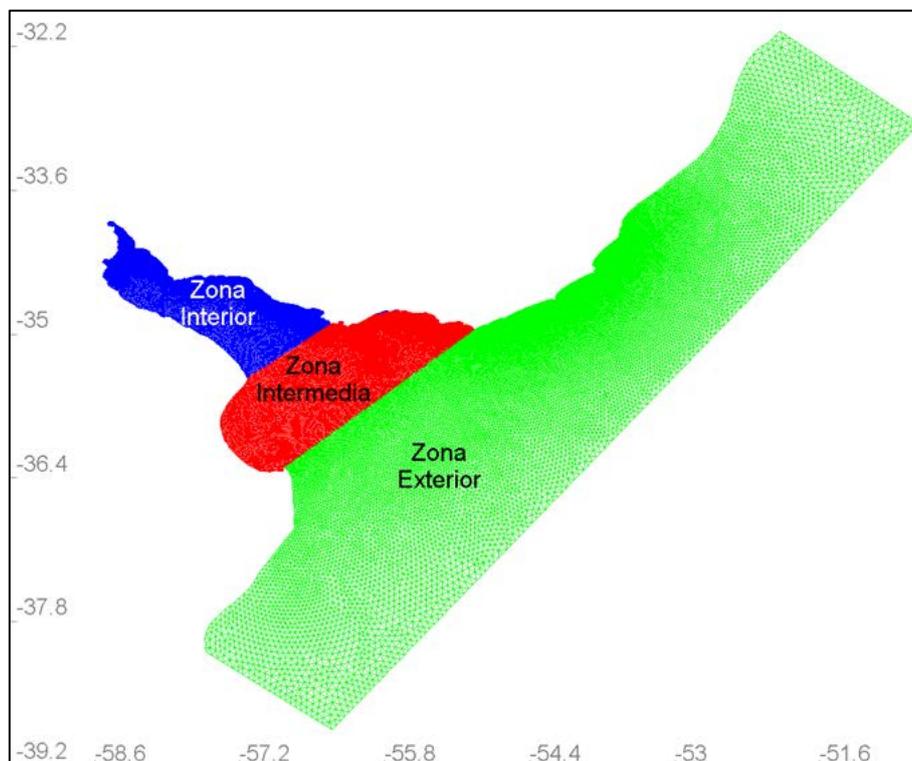


Figura 31: Zonificación del dominio para el cálculo de la fricción de fondo.

En la Tabla 12 y Tabla 14 se muestran las alternativas simuladas para el caso de C_d Fijo y C_d variable respectivamente, ambos con número de Manning constante en el dominio. A modo de

concentrar la información se realiza la suma del BIAS y el RMSE de cada estación para cada alternativa. En la Tabla 13 y Tabla 15 se muestran dichos resultados.

3.5.1.1 *C_d Fijo*

Se realizaron simulaciones con C_d fijo variando dicho coeficiente entre 0.75 E-6 y 4 E-6 y el número de Manning desde 0.0075 hasta 0.03.

De la Tabla 12, que muestra el BIAS y el RMSE correspondiente a las simulaciones con C_d fijo, se desprende que los mejores resultados no se dan para las mismas condiciones en las tres estaciones. Además, para una misma estación, exceptuando a La Paloma, el mejor BIAS y RMSE tampoco se da para las mismas condiciones. A modo de ejemplo, en Montevideo, el RMSE disminuye a medida que disminuye el número de Manning mientras que el BIAS aumenta en esta dirección. Algo similar sucede para Colonia.

Por otra parte, al analizar la Tabla 13, se desprende que la simulación correspondiente al número de Manning 0.01 y $C_d 1\text{E-6}$ es una de las cuales presenta los menores BIAS y RMSE totales. En la Figura 32 se muestran los gráficos de dispersión, gráficos cuantil-cuantil de todas las medidas y gráficos cuantil-cuantil de los extremos, para las tres estaciones. Las rectas azules corresponden a datos modelados igual a datos medidos ($x=y$). Además en el gráfico se muestran otros estadísticos como son la cantidad de observaciones comparadas, el SI, la correlación, la razón entre medias y la razón entre desviaciones estándar de datos medidos y modelados.

Tabla 12- BIAS y RMSE obtenido para las simulaciones con Cd fijo para las estaciones de La Paloma, Montevideo y Colonia.

LA PALOMA							MONTEVIDEO							COLONIA						
BIAS																				
Cd(E-6)/n	0.75	1	1.5	2	3	4	0.75	1	1.5	2	3	4	0.75	1	1.5	2	3	4		
0.0075	0.47						0.21						0.46							
0.009	0.01	0.00	0.01	0.01			0.04	0.04	0.03	0.02			0.09	0.10	0.10	0.10				
0.01		0.02		0.01	0.02	0.04		0.06		0.04	0.03	0.00		0.03		0.04	0.04	0.04		
0.0125			0.01	0.01					0.07	0.06					0.07	0.08				
0.015				0.01	0.00	0.02				0.08	0.06	0.05				0.10	0.04	0.11		
0.02		0.00	0.00		0.01			0.11	0.10		0.13			0.13	0.14		0.17			
0.03			0.01			0.00			0.13			0.11			0.19				0.22	
RMSE																				
Cd(E-6)/n	0.75	1	1.5	2	3	4	0.75	1	1.5	2	3	4	0.75	1	1.5	2	3	4		
0.0075	3.70						1.33						1.02							
0.009	1.42	1.45	1.54	1.51			0.87	0.88	0.90	0.88			0.44	0.43	0.42	0.41				
0.01		0.19		0.21	0.26	0.32		0.23		0.22	0.27	0.34		0.25		0.24	0.32	0.43		
0.0125			0.19	0.20					0.22	0.22					0.23	0.23				
0.015				0.19	0.21	0.26				0.21	0.22	0.29				0.23	0.24	0.37		
0.02		0.18	0.18		0.20			0.24	0.23		0.23			0.29	0.27		0.30			
0.03			0.19			0.21			0.26			0.26			0.35				0.41	

Tabla 13- Suma de BIAS y RMSE de las estaciones de La Paloma, Montevideo y Colonia, obtenido para las simulaciones con Cd fijo.

SUMA														
BIAS (m)							RMSE (m)							
Cd(E-6)/n	0.75	1	1.5	2	3	4	Cd(E-6)/n	0.75	1	1.5	2	3	4	
0.0075	1.14						0.0075	6.05						
0.009	0.15	0.14	0.14	0.14			0.009	2.72	2.77	2.87	2.80			
0.01		0.11		0.10	0.09	0.08	0.01		0.67		0.68	0.85	1.09	
0.0125			0.15	0.15			0.0125			0.63	0.64			
0.015				0.19	0.11	0.19	0.015				0.64	0.67	0.92	
0.02		0.24	0.24		0.30		0.02		0.72	0.68		0.73		
0.03			0.33			0.34	0.03			0.80			0.89	

Tabla 14- BIAS y RMSE obtenido para las simulaciones con Cd variable para las estaciones de La Paloma, Montevideo y Colonia.

LA PALOMA				MONTEVIDEO				COLONIA				
BIAS												
Coef/n	0.85	1	1.15	1.3	0.85	1	1.15	1.3	0.85	1	1.15	1.3
0.0075	0.51	0.50	0.49		0.22	0.21	0.21		0.47	0.47	0.46	
0.009	0.00	0.01	0.01	0.02	0.05	0.04	0.05	0.04	0.10	0.11	0.10	0.11
0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.07	0.07	0.06	0.07	0.04	0.04	0.04	0.11
0.015		0.00	0.01	0.01		0.09	0.09	0.09		0.10	0.10	0.11
0.02		0.01				0.11				0.14		
0.03				0.02				0.13				0.20
RMSE												
Coef/n	0.85	1	1.15	1.3	0.85	1	1.15	1.3	0.85	1	1.15	1.3
0.0075	3.80	3.76	3.67		1.32	1.31	1.31		1.01	1.02	1.00	
0.009	1.42	1.47	1.43	1.47	0.86	0.89	0.85	0.87	0.43	0.43	0.41	0.42
0.01	0.19	0.20	0.20	0.22	0.22	0.22	0.22	0.24	0.25	0.24	0.24	0.28
0.015		0.18	0.18	0.18		0.22	0.22	0.22		0.24	0.24	0.24
0.02		0.18				0.23				0.28		
0.03				0.19				0.26				0.34

Tabla 15- Suma de BIAS y RMSE de las estaciones de La Paloma, Montevideo y Colonia, obtenido para las simulaciones con Cd variable.

SUMA									
BIAS (m)					RMSE (m)				
Coef/n	0.85	1	1.15	1.3	Coef/n	0.85	1	1.15	1.3
0.0075	1.20	1.18	1.16		0.0075	6.14	6.09	5.99	
0.009	0.15	0.16	0.16	0.17	0.009	2.72	2.79	2.69	2.77
0.01	0.11	0.11	0.11	0.19	0.01	0.66	0.66	0.66	0.74
0.015		0.20	0.20	0.21	0.015		0.65	0.64	0.64
0.02		0.26			0.02		0.69		
0.03				0.35	0.03				0.79

Los gráficos de dispersión muestran buenos resultados en las tres estaciones, presentando una correlación mayor a 0,8 en los tres casos. Sin embargo, los gráficos cuantil-cuantil muestran en La Paloma una leve rotación respecto a la recta 45° en torno aproximadamente al valor observado 1 m, lo que indica una sobrestimación de los cuantiles mayores a 1 y una subestimación de los cuantiles menores a 1 por parte del modelo. En Montevideo el gráfico cuantil-cuantil se encuentra paralelo a la recta de 45° pero desplazado hacia arriba algunos centímetros. En Colonia, se observa que el modelo subestima los cuantiles medidos más altos.

Continuando con el análisis de la simulación se observa que los valores extremos no se encuentran satisfactoriamente representados. En La Paloma se observa que el modelo sobreestima la mayoría de los cuantiles a no ser por los cola superior donde los subestima. En Montevideo el modelo sobreestima todos los cuantiles hasta por más de 20 cm. Finalmente en Colonia subestima los cuantiles extremos por más de 20 cm.

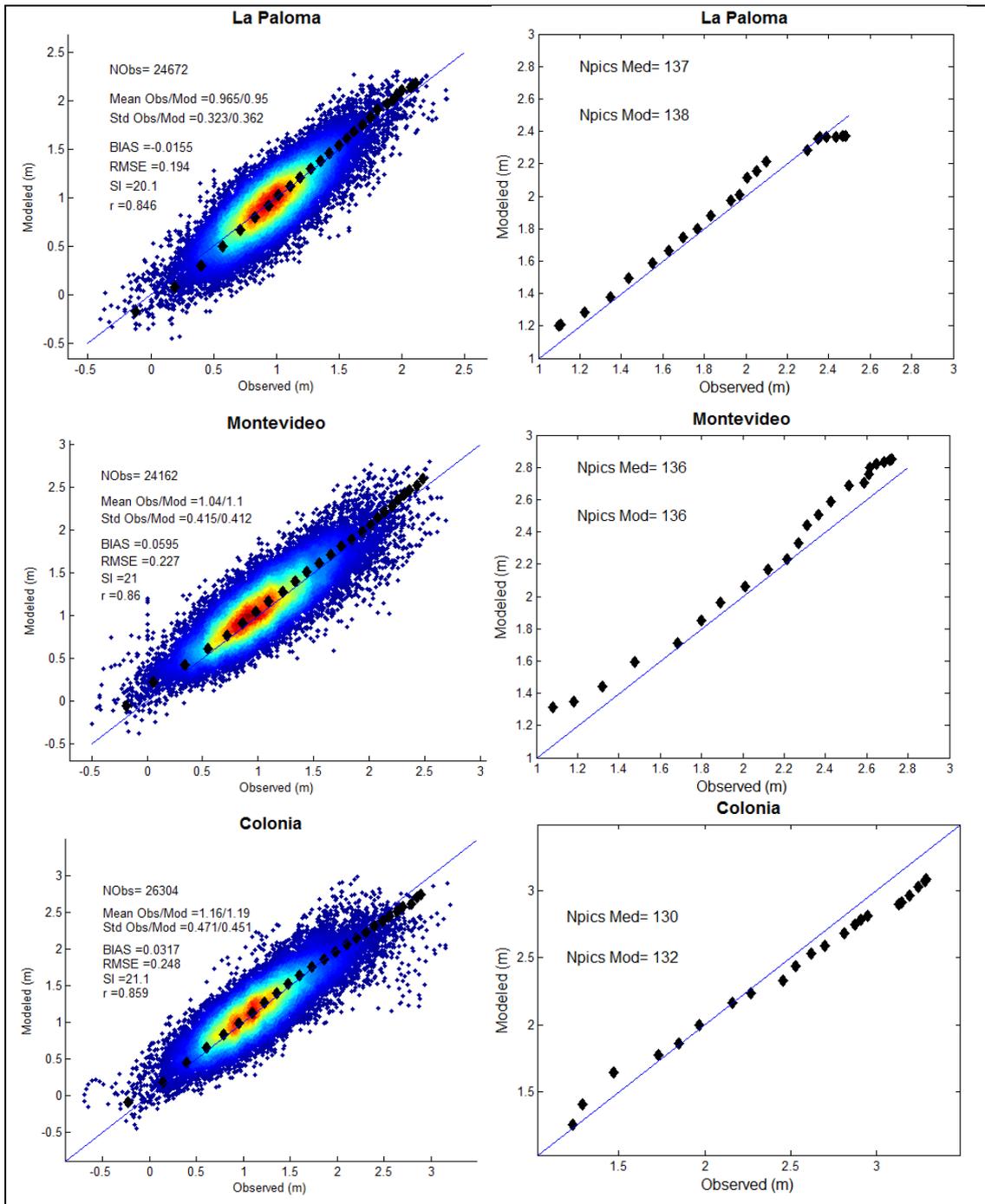


Figura 32: Gráficos de dispersión y cuantil-cuantil en las estaciones La Paloma, Montevideo y Colonia para la simulación con Manning uniforme igual a 0.01 y Cd fijo igual a 1E-6.

3.5.1.2 Cd Variable

Se realizaron simulaciones con C_d variable variando el coeficiente de escala desde 0.85 hasta 1.3 y el número de Manning desde 0.0075 hasta 0.03.

Los mejores resultados en las tres estaciones se observan para coeficientes de escala entre 0.85 y 1.15. A partir de la Tabla 15 que muestra la suma del BIAS y el RMSE de las tres estaciones se observa que la simulación con coeficiente de mayoración 1 y número de Manning 0.01 presentan BIAS y RMSE relativamente bajos.

En la Figura 33 se muestran los gráficos de dispersión, gráficos cuantil-cuantil de todas las medidas y gráficos cuantil-cuantil de los extremos, para las tres estaciones evaluadas para el caso de Cd variable con coeficiente de escala 1 y número de Manning 0.01. La correlación es buena para las tres estaciones superando el 0,85.

En La Paloma se encuentra que el grafico cuantil-cuantil de todos los datos se encuentra rotado respecto a la recta 45° en torno a valor observado 1 m al igual que en el caso mostrado de la figura x. En Montevideo se observa que el grafico cuantil-cuantil se encuentra por arriba de la recta de 45° y hacia los cuantiles más altos se alejan más de la misma. Por otra parte en Colonia se observa una muy buena representación de los cuantiles totales.

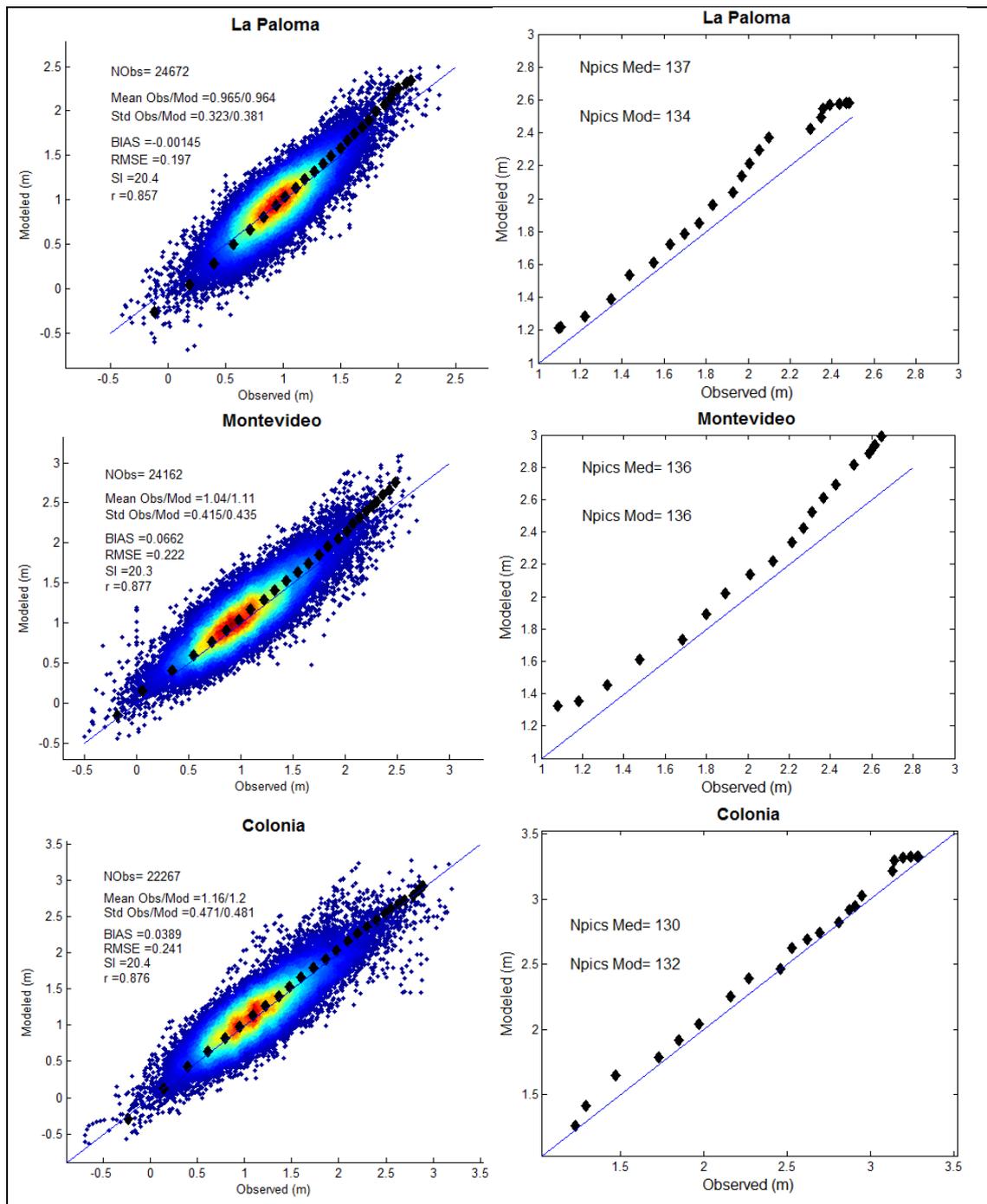


Figura 33: Gráficos de dispersión y cuantil-cuantil en las estaciones La Paloma, Montevideo y Colonia para la simulación con Manning uniforme igual a 0.01 y Cd variable con coeficiente de mayoración igual a 1.

Por otra parte, en el análisis de extremos no se observa una buena representación, sobre todo en La Paloma y en Montevideo. En ambas estaciones el modelo sobrestima los cuantiles extremos por más de 40 cm. Estos resultados, junto con los correspondientes a Cd fijo conducen a probar simulaciones con número de Manning variable en el dominio.

3.5.1.3 Cd Variable y número de Manning variable en el dominio

Partiendo de la dificultad de representar correctamente las medidas en tres zonas bien diferenciadas del Río de la Plata se decidió realizar simulaciones diferenciando el número de Manning según la zona sea interior, intermedia o exterior. Todas las simulaciones se realizan con C_d variable y coeficiente de mayoración igual a 1. En la Tabla 16 se muestran las características de las seis simulaciones realizadas.

Tabla 16: Simulaciones con coeficiente de Manning no uniforme en el dominio

Simulaciones con n variable en el dominio						
	1	2	3	4	5	6
n interior	0.009	0.009	0.009	0.007	0.007	0.007
n intermedio	0.01	0.009	0.015	0.015	0.0125	0.0175
n exterior	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015

En la Tabla 17 se muestran el BIAS y el RMSE obtenido para cada simulación en las estaciones La Paloma, Montevideo y Colonia. Se observa que los mejores resultados se encuentran para La Paloma y el BIAS más alto se da para Montevideo.

Tabla 17: BIAS y RMSE obtenido para las simulaciones con Manning no uniforme para las estaciones de La Paloma, Montevideo y Colonia.

Sim	La Paloma		Montevideo		Colonia	
	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE	BIAS	RMSE
1	0.01	0.19	0.08	0.22	0.03	0.24
2	0.01	0.19	0.08	0.22	0.03	0.24
3	0.01	0.18	0.09	0.23	0.04	0.23
4	0.00	0.18	0.09	0.23	0.01	0.23
5	0.01	0.19	0.09	0.23	0.01	0.24
6	0.00	0.18	0.10	0.23	0.02	0.23

En la Figura 34 se muestran los gráficos de dispersión, gráficos cuantil-cuantil de todas las medidas y gráficos cuantil-cuantil de los extremos, para las tres estaciones evaluadas para los resultados de la simulación 4.

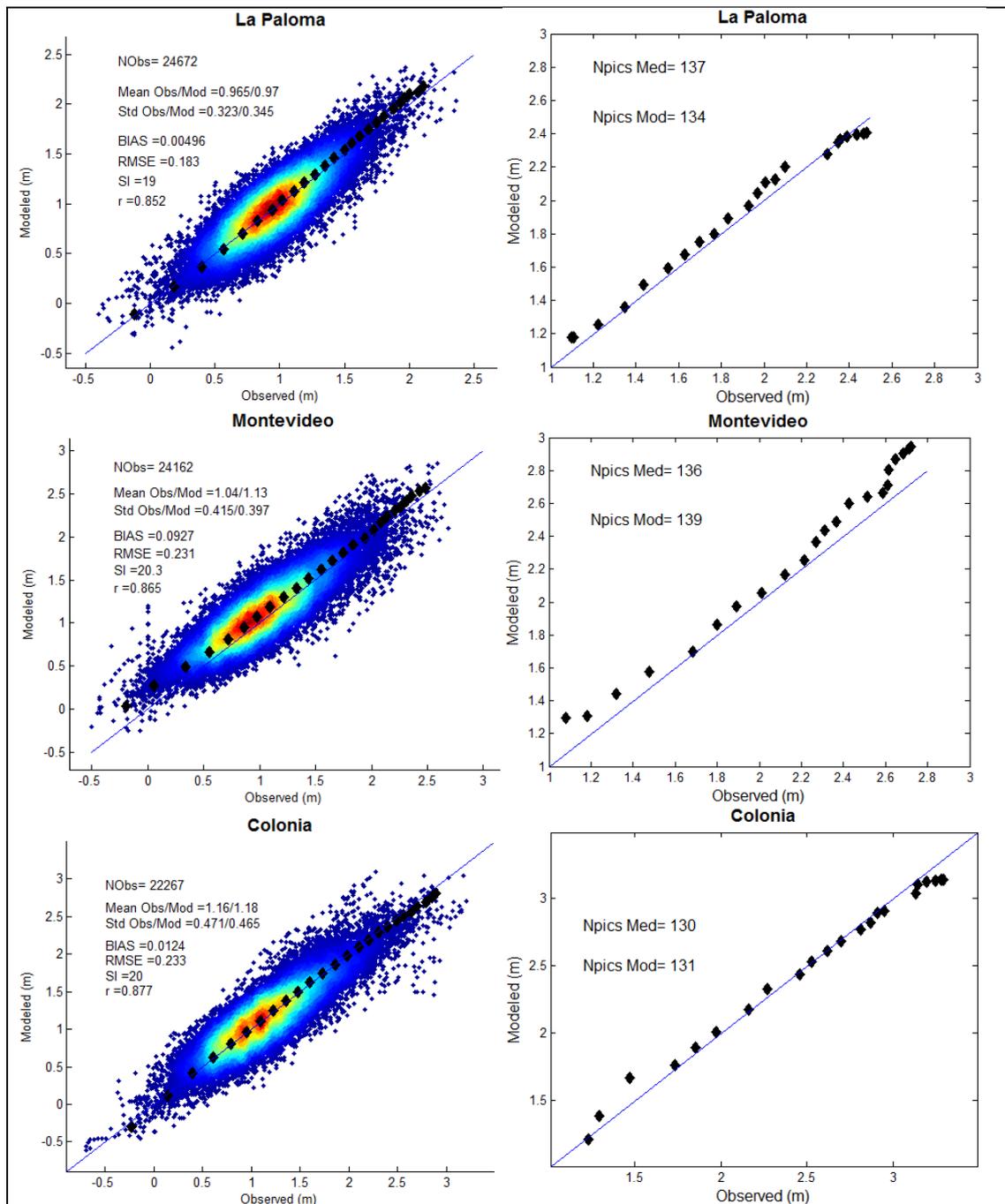


Figura 34: Gráficos de dispersión y cuantil-cuantil en las estaciones La Paloma, Montevideo y Colonia para la simulación 4 (ver Tabla 16).

En La Paloma se encuentra una muy buena representación de los cuantiles totales, apenas rotado respecto a la recta de 45°. Respecto a los cuantiles de los valores extremos se observa que el modelo apenas sobrestima los valores a no ser por la cola superior donde llega a subestimarlos. En términos generales se observa unas muy buenas representaciones de las medidas incluidos los extremos.

En Montevideo se observa que los valores modelados se encuentran apenas desplazados hacia arriba de la recta de 45°. Respecto al grafico cuantil-cuantil de extremos se observa una buena representación de los extremos, aunque el modelo sobrestima los cuantiles medidos, haciéndolo aún más hacia los cuantiles más altos.

Por ultimo en colonia se observa una muy buena representación de las medidas, en especial en los valores extremos, donde se observa que el grafico cuantil-cuantil está muy cercano a la recta de 45°, y el modelo subestima por pocos centímetros los cuantiles más altos.

Se determina seleccionar la configuración correspondiente a la simulación 4, cuyas características se resumen en la Tabla 18.

Tabla 18: Parámetros finales del modelo

n		C _d	Coeficiente de mayoración para C _d
Zona interior	0.007	Variable (Flather, 1976)	1
Zona intermedia	0.015		
Zona exterior	0.015		

3.5.2 Validación

La validación del modelo se realiza comparando todos los datos medidos exceptuando los utilizados para calibrar. En la Tabla 19 se presentan los resultados del BIAS y del RMSE para las estaciones utilizadas para calibrar.

Tabla 19: BIAS y del RMSE en las estaciones La Paloma, Montevideo y Colonia para el período de validación.

Estación	BIAS (m)	RMSE (m)
La Paloma	0.04	0.20
Montevideo	0.12	0.26
Colonia	0.04	0.26

En la Figura 35 se muestran los gráficos de dispersión y los gráficos cuantil-cuantil de los extremos, para La Paloma, Montevideo y Colonia respectivamente. Se observa que tanto el sesgo como el RMSE no aumentan más de 3 cm respecto a los de la calibración en ninguna de las estaciones.

Por otra parte en la representación de los extremos por parte del modelo se observa una sobrestimación máxima aproximada de 30 cm para las tres estaciones.

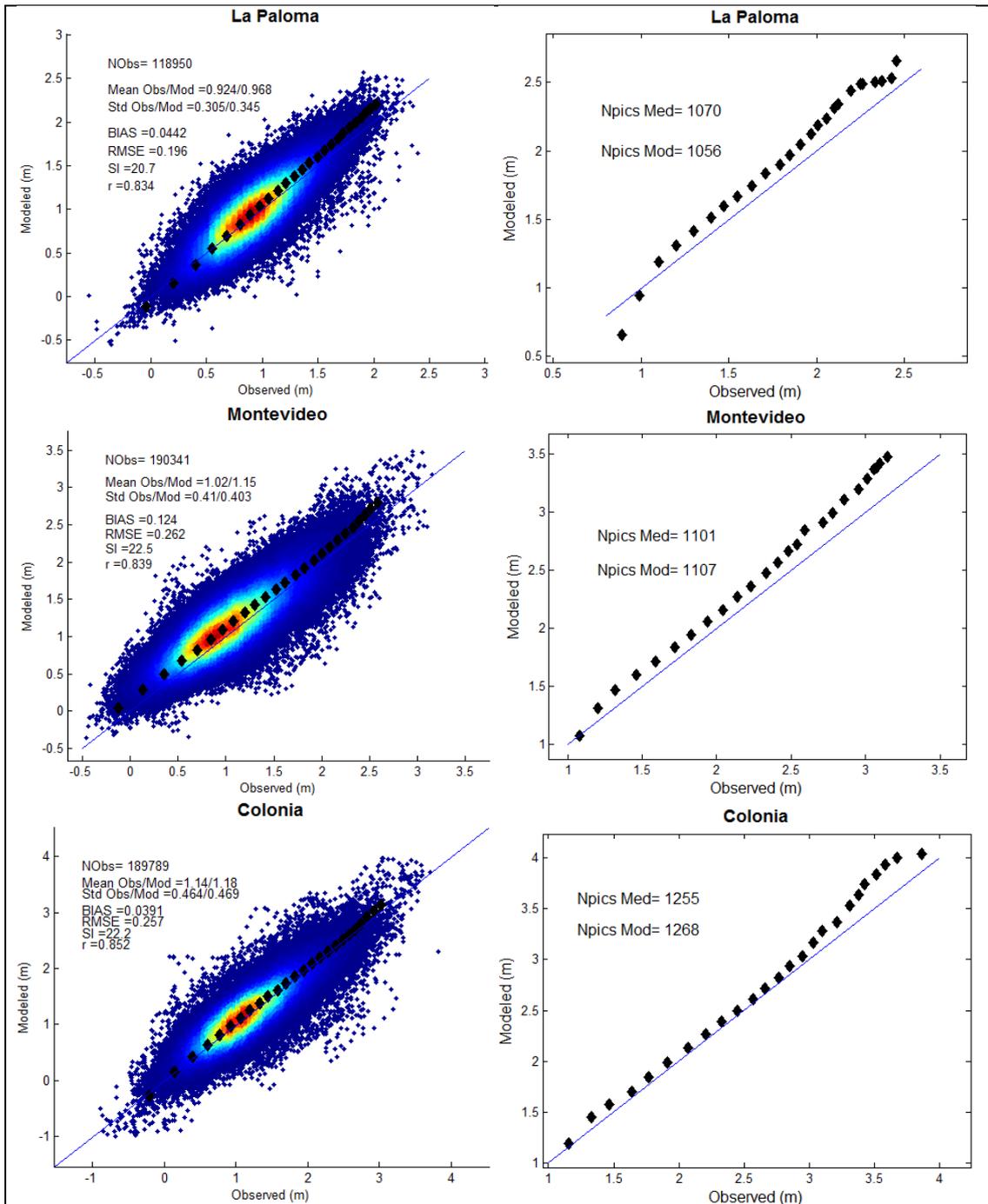


Figura 35: Gráficos de dispersión y cuantil-cuantil en las estaciones La Paloma, Montevideo y Colonia para el período de validación.

En la Figura 36 se muestran los gráficos de dispersión y los gráficos cuantil-cuantil de los extremos para las estaciones de Punta del Este, Juan Lacaze y Pilote Norden, comparando todos los datos medidos disponibles desde 1985 hasta 2016.

En términos generales, analizando los gráficos de dispersión se observa una muy buena representación por parte del modelo en las tres estaciones. Al analizar los cuantiles extremos se observa en Punta del Este que el modelo simula correctamente, pero hacia los cuantiles más altos se observa una tendencia a sobrestimar los niveles. En Juan Lacaze se observa una muy buena representación de los extremos a pesar de que se observa que algunos extremos entre

los valores observados 3 y 3.5 m. Para Pilote Norden se observa que hacia los extremos más altos el modelo sobrestima por más de medio metro dichos cuantiles.

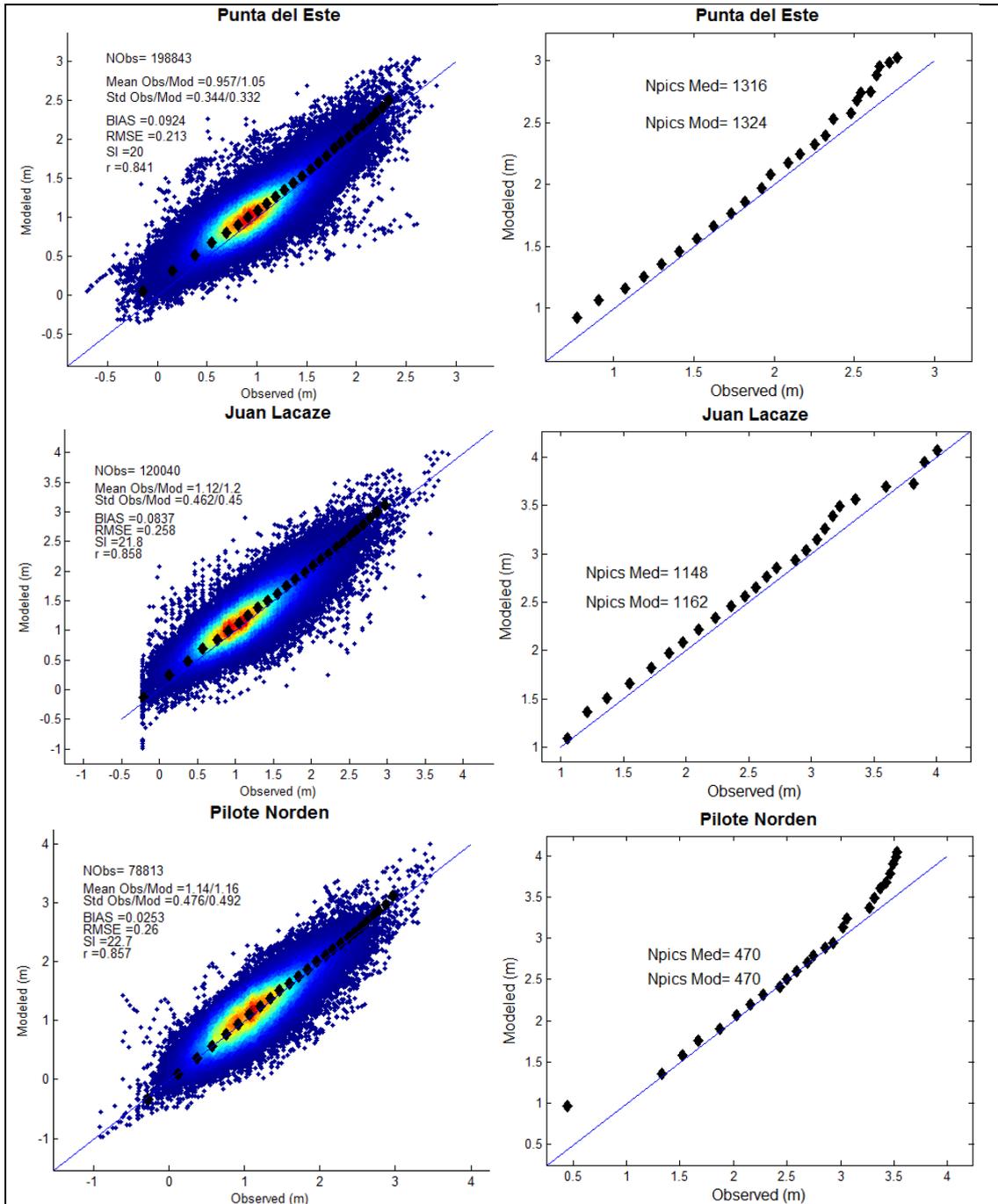


Figura 36: Gráficos de dispersión y cuantil-cuantil en las estaciones Punta del Este, Juan Lacaze y Pilote Norden para el período de validación.

3.5.3 Síntesis

Se generaron series de niveles horarias cubriendo un período de 31 años (1985-2016) en base a un modelo hidrodinámico para el Río de la Plata, el cual fue calibrado y validado en base a información de niveles medidos en diversas estaciones de la costa Uruguaya. El modelo considera las principales características de la dinámica del Río de la Plata y sus forzantes. Su calibración tuvo en cuenta registros de niveles en las zonas interior, intermedia y exterior del estuario y su frente marítimo, prestando especial atención a los eventos extremos de nivel.

Luego de calibrado el modelo, se validaron sus resultados en un período de tiempo más extenso y en varias estaciones mareográficas de la costa Uruguay no utilizadas en la calibración. La calidad de los resultados obtenidos se mantuvo, y es muy satisfactoria considerando que se trata de un cuerpo de agua con una dinámica micromareal con gran influencia de la marea meteorológica.

4 HINDCASTS DE OLEAJE PARA LA COSTA URUGUAYA.

4.1 Introducción

En este documento se presenta el nuevo *hindcast* de oleaje para Uruguay realizado por el IMFIA en el marco del proyecto “Herramientas tecnológicas para la evaluación de impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en la zona costera de Uruguay”.

El *hindcast* cubre un período de 32 años comprendido entre el 1/1/1985 y el 31/12/2016. Los productos generados tienen una resolución temporal horaria y consisten en campos de los principales parámetros descriptores del oleaje y las series temporales de 77 espectros direccionales distribuidos en toda el área de estudio. Los detalles sobre la base de datos generada se presentan en la sección 4.

El modelo numérico de oleaje utilizado se implementó en la plataforma de modelación de oleaje WAVEWATCH III® versión 5.16 (WW3DG, 2016), en la modalidad multi-grilla. Se utilizaron 5 grillas, partiendo de una grilla global de baja resolución espacial ($O(1^\circ)$) y alcanzando a cubrir toda la faja costera y todo el Río de la Plata medio e interior con una resolución espacial un poco menor a 1km. Los detalles de las grillas y toda la información relativa a la configuración del modelo se presentan en la sección 2.

Los datos de entrada del modelo de oleaje son los campos de viento en superficie obtenidos del reanálisis atmosférico CFSR (Saha et al. 2010) y su prolongación CFSv2 (Saha et al. 2014) en su formato de mayor resolución; y los campos de niveles y corrientes obtenidos de un *hindcast* regional realizado en base al modelo TELEMAC (Hervouet, 2007). La validación de los datos de viento mencionados a los efectos de su uso en el *hindcast* de oleaje, así como el el *hindcast* de niveles y corrientes se reportaron en informes previos del presente proyecto.

Para la calibración y validación del *hindcast* se recurrió a datos altimétricos de altura de ola significativa. Estos datos fueron obtenidos de la misma base de datos multi-misión procesada en IFREMER (Queffeuou y Croizé-Fillon, 2013) que fuera utilizada para validar los vientos en superficie y cuyas características en el área de estudio se presentaron en el informe correspondiente. La metodología y resultados de la calibración se presentan en la sección 3.

Finalmente en la sección 5 se presentan las conclusiones del trabajo y se describen las actividades que actualmente se están realizando y contribuirán a la evaluación del *hindcast*.

4.2 Configuración del modelo

4.2.1 Compilación.

En la Figura 1 se presenta el archivo *switch* utilizado para compilar el WAVEWATCH III. El significado de cada opción se encuentra en las páginas 256 a 264 del respectivo manual (WWDG, 2016). En particular se hace notar la elección de la opción ST4. Esta opción establece como modelar la parte del término fuente de la ecuación de acción del oleaje correspondiente al aporte de energía del viento y la disipación por rotura (i.e. *whitecapping*). Las referencias bibliográficas a esta parametrización son: Ardhuin et al. (2010), Ardhuin et al. (2009), Leckler et al. (2013) y Rasche y Ardhuin (2013). Junto con la parametrización que se activa con la opción ST6 y cuyas referencias son: Babanin (2006), Babanin (2011), Rogers et al. (2012) y Zieger et al. (2015); constituyen el estado del arte en cuanto a la modelación de estos procesos.

Se optó por ST4 en base a los resultados de Stopa et al. (2016) y Campos y Alves (2013). El primero muestra una comparación entre cuatro *hindcast* globales que se diferencian por la parametrización que utilizan (i.e. ST2, ST3, ST4 y ST6). Se observa que para la región occidental del Atlántico Sur, ST4 es la que presenta la mejor performance (ver figuras 3 y 4 de Stopa et al. 2016). Por su parte, Campos y Alves (2013) constituye un antecedente exitoso de modelación de oleajes extremos en el Atlántico Sur con ST4.

```
F90 NOGRB NOPA LRB4 SHRD PR3 UQ FLX0 LN1 ST4 STAB3 NL1 BT1 DB1 MLIM TR0 BS0 IC0  
REF1 XX0 WNT1 WNX1 CRT1 CRX1 IS0 00 01 02 03 04 05 06 07 011 014 016 OMPG OMPX
```

Figura 37.- Archivo *switch* con el que se compiló el WAVEWATCH III

4.2.2 Grillas de cálculo.

El modelo se implementó en la modalidad multi-grilla, empleando 5 grillas regulares que en los casos de las grillas 4 y 5 no cubren dominios rectangulares debido a que se inactivan puntos de la misma.

La grilla de menor resolución (Grilla 1) es de cobertura global a los efectos de prescindir de condiciones de borde. De esta forma todo el oleaje es generado dentro del modelo. La que le sigue (Grilla 4) abarca el Atlántico Sur con una resolución que se asimila a los campos de viento utilizados como forzante. Luego la Grilla 3, es una grilla intermedia, implementada con el objetivo de ir aumentando la resolución espacial hacia el área de estudio de forma gradual. Finalmente, las grillas 4 y 5 cubren el área de estudio. La grilla 4 abarca la plataforma continental Atlántica de Uruguay y el Río de la Plata exterior con una resolución de 2' (~3km), mientras que la grilla 5 cubre una faja costera de ~15 km de ancho y el Río de la Plata medio e interior con una resolución de 40'' (~1km). En la Tabla 1 se presentan los detalles de las grillas y en las figuras 2 y 3 se delimitan las regiones que abarcan.

Tabla 20.- Grillas de cálculo

	Nombre	Rango de Longitudes	Rango de Latitudes	Δlon	Δlat	Nlon	Nlat	# Puntos	# Puntos activos
Grilla 1	Global	-180° / 180°	-78° / 78°	1.25°	1°	288	157	45216	29085
Grilla 2	AtlSur4	-70° / 20°	-78° / 10°	0.5°	0.5°	181	179	32399	23304
Grilla 3	Region32	-66° / -42°	-42° / -22°	10'	10'	145	121	17545	7828
Grilla 4	localF12	-59° / -51.5°	-36.5° / -33.5°	2'	2'	226	91	20556	5692
Grilla 5	costaF12	-59° / -51.5°	-36.5° / -33.5°	40''	40''	676	271	183196	14548

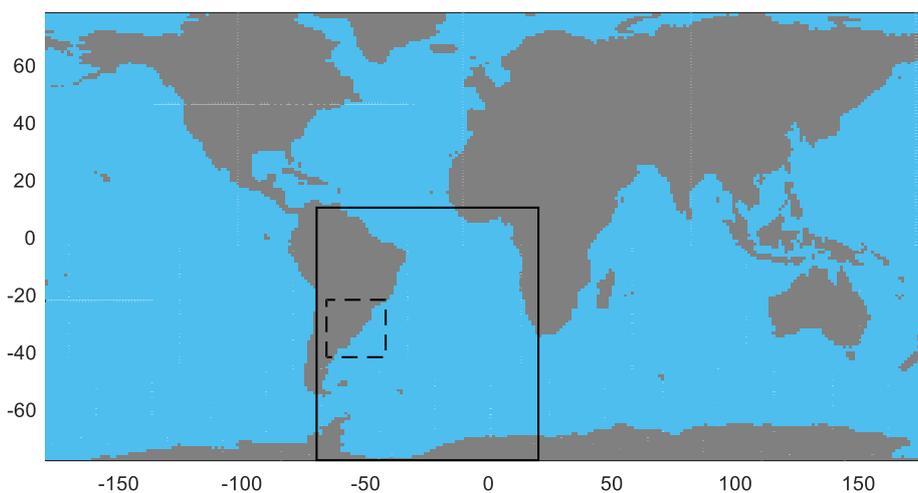


Figura 38.- Delimitación de los dominios de las grillas 2 y 3

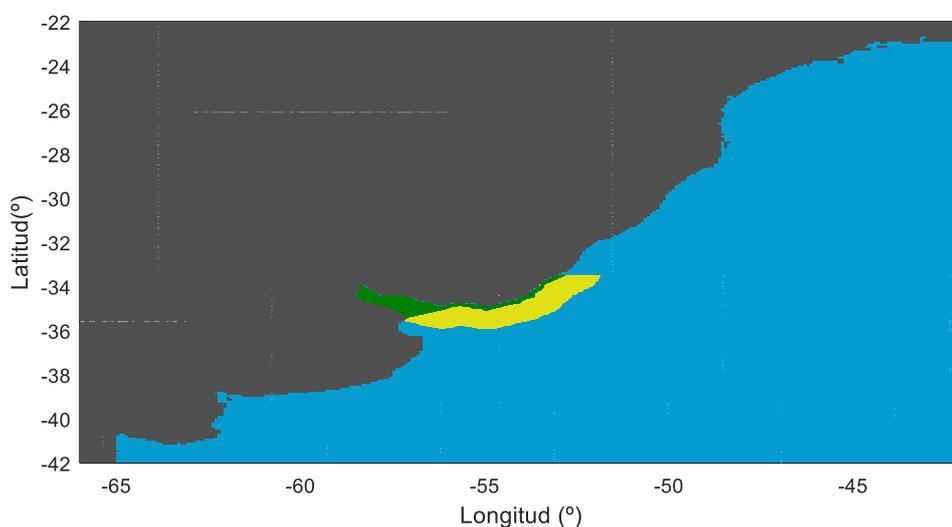


Figura 39.- Dominio de la Grilla 3 (celeste), Grilla 4 (amarillo) y Grilla 5 (verde).

Originalmente se buscó llegar a toda la faja costera (Atlántico y Río de la Plata) con una resolución espacial de 15", la cual intercambiaba información con una grilla que abarcaba la plataforma continental y el Río de la Plata con una resolución de 1'. Este esquema fue abandonado por el alto costo computacional que requirió, disminuyéndose la resolución a la mitad, i.e. faja costera con una resolución de 30" y plataforma continental y Río de la Plata con una resolución de 2'. Este esquema resultó viable por su costo computacional pero se observó sensibilidad a la malla en el Río de la Plata interior. Es decir, se constató que 2' es una resolución demasiado gruesa para el Río de Plata interior. Esto derivó en la configuración final que fue presentada y que implicó, aumentar la resolución del Río de la Plata medio e interior incluyéndolos en la grilla más fina (i.e. costera, grilla 5) a costa de disminuir la resolución de la misma a 40" a los efectos de mantener el costo computacional.

4.2.3 Batimetría y línea de costa.

Para cada una de las grillas, la batimetría, la definición de cada tipo de nodo en un *mask file* y los obstáculos sub-grilla, se definieron recurriendo al paquete *Automated grid generation for WAVEWATCH III* (Chawla y Tolman, 2007) desarrollado para MATLAB®.

La información de base fue obtenida de base de datos globales de batimetría y línea de costa, y de una base de datos local generada a partir de las cartas náuticas del Servicio de Oceanografía Hidrografía y Meteorología de la Armada de Uruguay (SOHMA).

La base de datos global de batimetría utilizada es la ETOPO1 (Amante y Eatkins, 2009), mientras que la de línea de costa es la GSHHS (Wessel y Smith, 1996).

La base de datos local se generó georreferenciando, digitalizando y llevando a un mismo cero de referencia las cartas náuticas del SOHMA. Esto se realizó en el software QGIS, generándose una línea de costa local de alta resolución y una grilla batimétrica regular de 0.002° de resolución que abarca el dominio [-58.5° -51.5°] x [-39° - 33.5°].

En la Tabla 2 se indica la información de base que se utilizó en cada grilla para definir su batimetría y línea de costa. Mientras que en las figuras 4 a 9 se presentan los mapas batimétricos en la resolución de cada una de las grillas de cálculo.

Tabla 2.- Información de base para definir batimetría y línea de costa.

	Batimetría	Línea de costa
Grilla 1	ETOPO1	GSHHS <i>high resolution</i>
Grilla 2	ETOPO1	GSHHS <i>full resolution</i>
Grilla 3	ETOPO1 + SOHMA	GSHHS <i>full resolution</i>
Grilla 4	SOHMA	SOHMA
Grilla 5	SOHMA	SOHMA

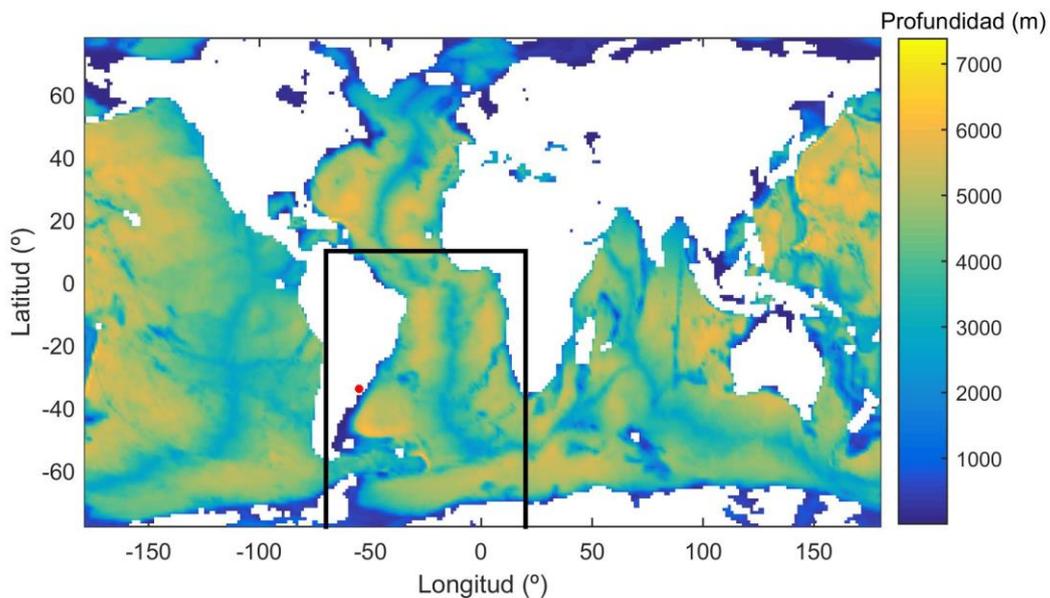


Figura 40.- Batimetría de la grilla Global (Grilla 1). El marco negro es el dominio de la grilla correspondiente al Atlántico Sur (Grilla 4). En rojo Uruguay.

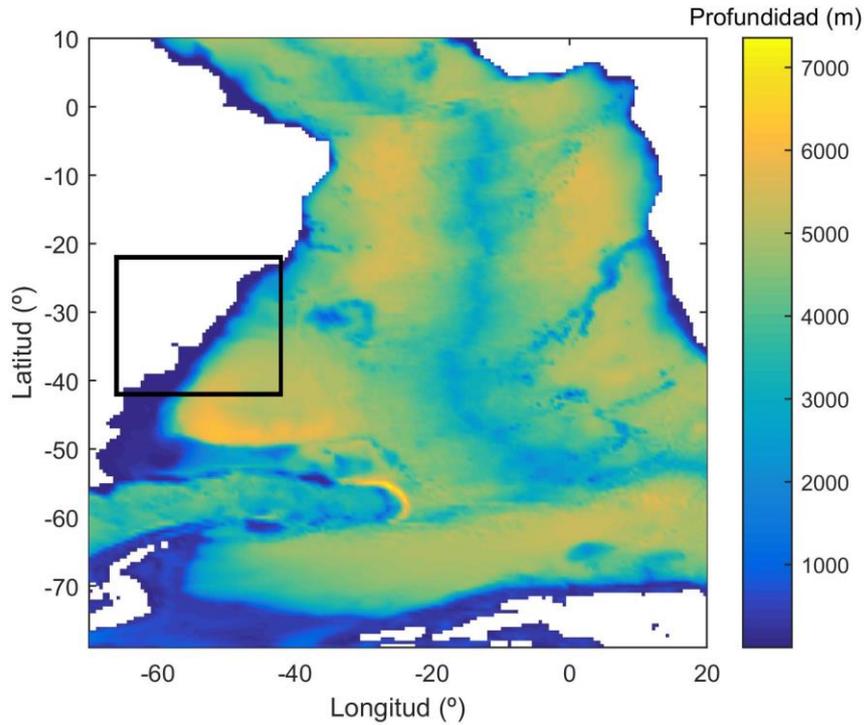


Figura 41.- Batimetría de la grilla correspondiente al Atlántico Sur (Grilla 2). El marco negro es el dominio de la Grilla 3 (Region32).

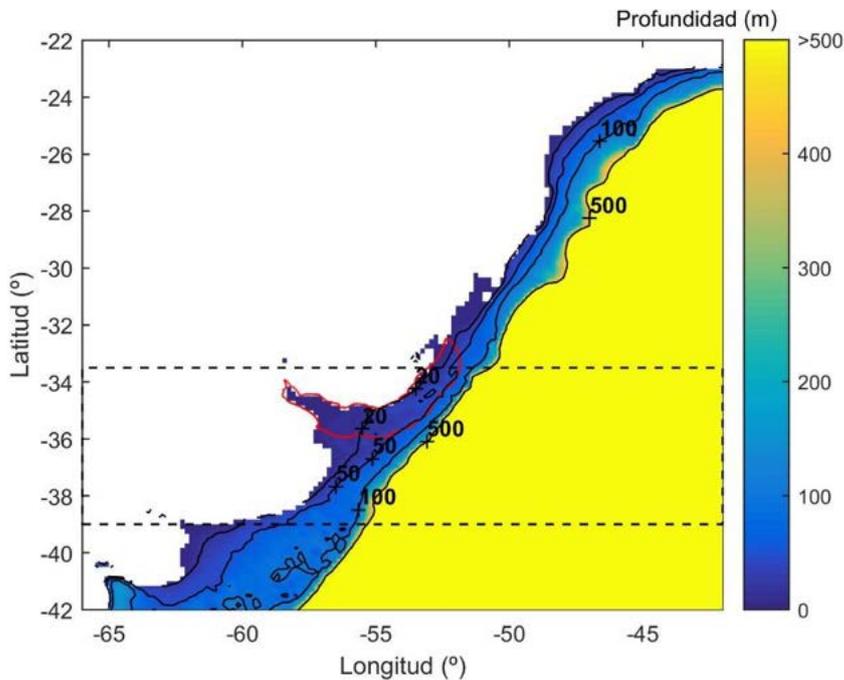


Figura 42.- Batimetría de la Grilla 3. El marco negro punteado delimita el área donde la información de referencia es la del SOHMA. Fuera de la línea punteada se utilizó ETOPO1 y GSHHS. La línea roja delimita la región de puntos activos correspondiente a la Grilla 4 (localF12).

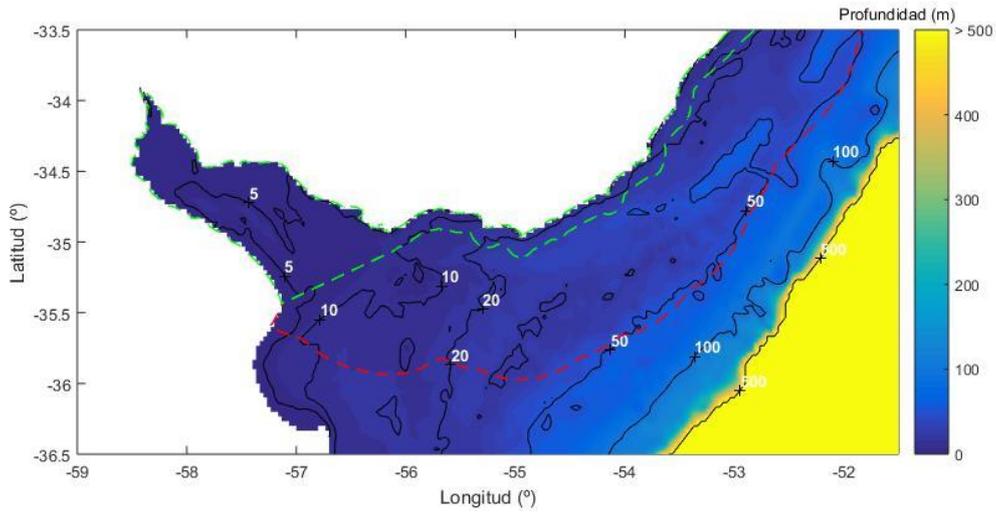


Figura 43.- Batimetría de la Grilla 4 (localF12). La línea roja punteada delimita la región de puntos activos de esta grilla, mientras que la línea verde punteada delimita la región de puntos activos de la Grilla 5 (CostaF12).

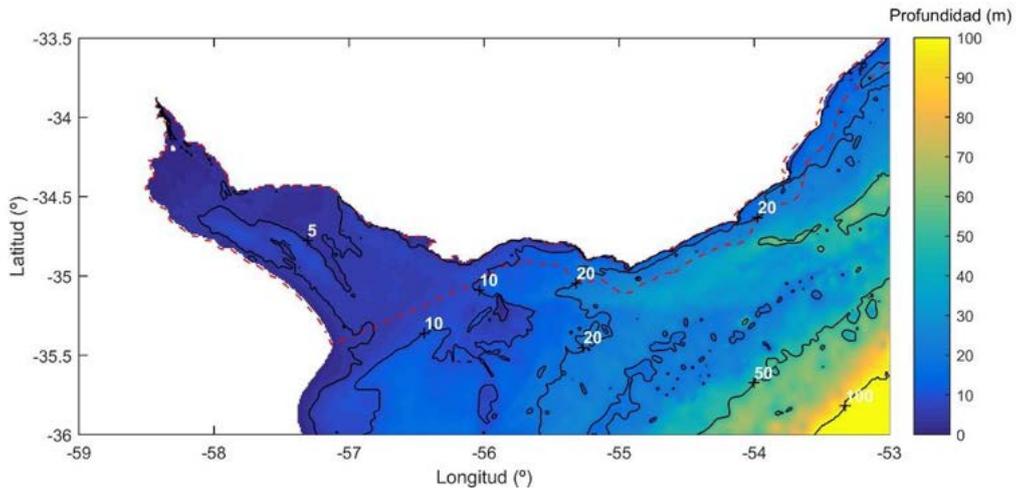


Figura 44.- Batimetría de la Grilla 5 (CostaF12). La línea roja punteada delimita la región de puntos activos de esta grilla.

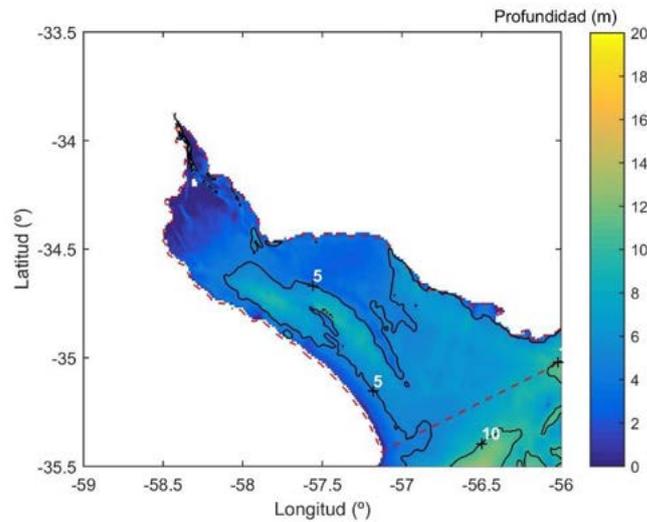


Figura 45.-Acercamiento para el Río de la Plata medio e interior en la batimetría de la Grilla 5 (Costa F12).

4.2.4 Obstáculos sub-grilla.

Los porcentajes de obstrucción según x e y debido a obstáculos de menor tamaño que una celda de cálculo fueron también definidos en base al paquete *Automated grid generation for WAVEWATCH III* (Chawla y Tolman, 2007). Las líneas de costa de las islas fueron obtenidas de GSHHS en el caso de las grillas 1, 2 y 3, mientras que para las grillas 4 y 5 se obtuvieron de las cartas del SOHMA. En este último caso se definieron 51 islas, donde la mayoría se encuentran en el Río de la Plata interior y están dentro del dominio ocupado por la Grilla 5

Para cada una de las regiones delimitada en la Figura 10, en las figuras 11 a 15 se presenta un acercamiento de los campos de porcentaje de obstrucción en x (S_x) e y (S_y) considerados por la Grilla 5.

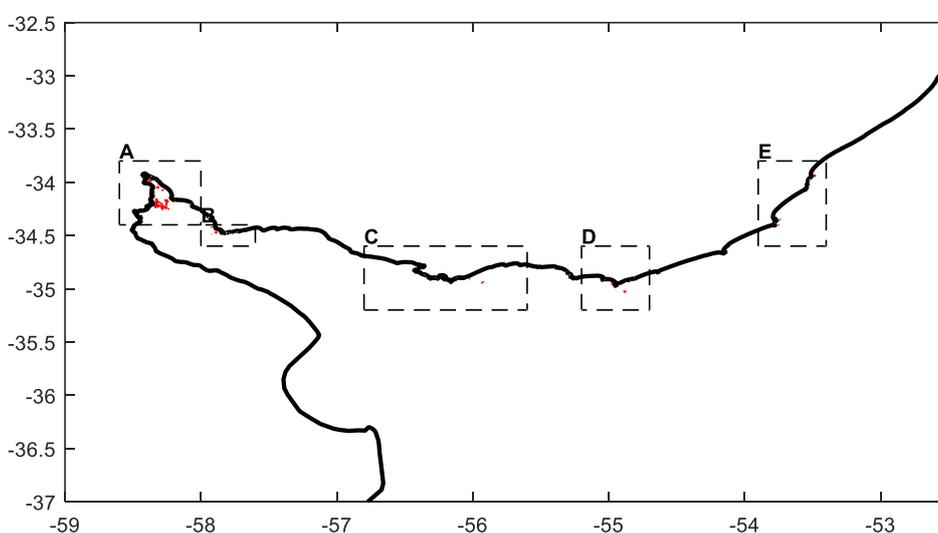


Figura 46.- Regiones en donde se hace un acercamiento para mostrar los obstáculos sub-grilla

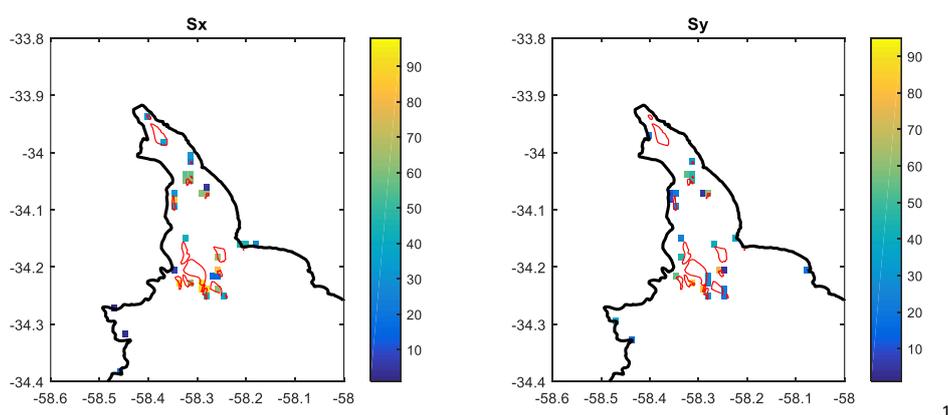


Figura 47.- Obstáculos sub-grilla. Grilla 5, Región A.

¹ El color blanco es 0% de obstrucción. No hay obstáculos sub-grilla. Lo cual no estaría coincidiendo con la barra de colores en donde 0 está indicado en azul.

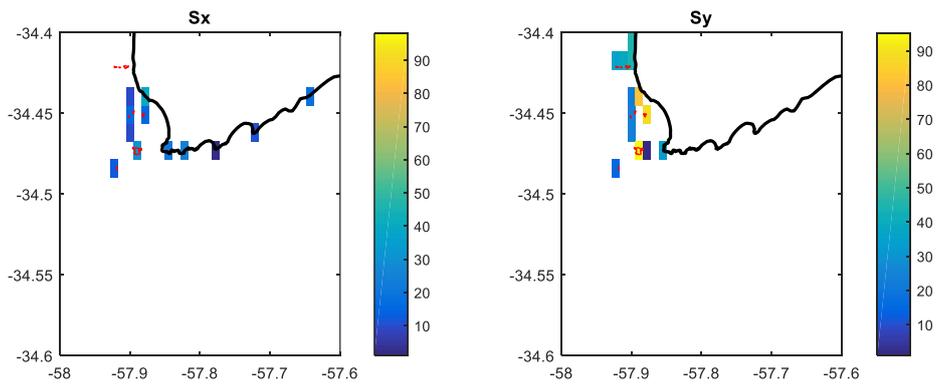


Figura 48.- Obstáculos sub-grilla. Grilla 5, Región B.

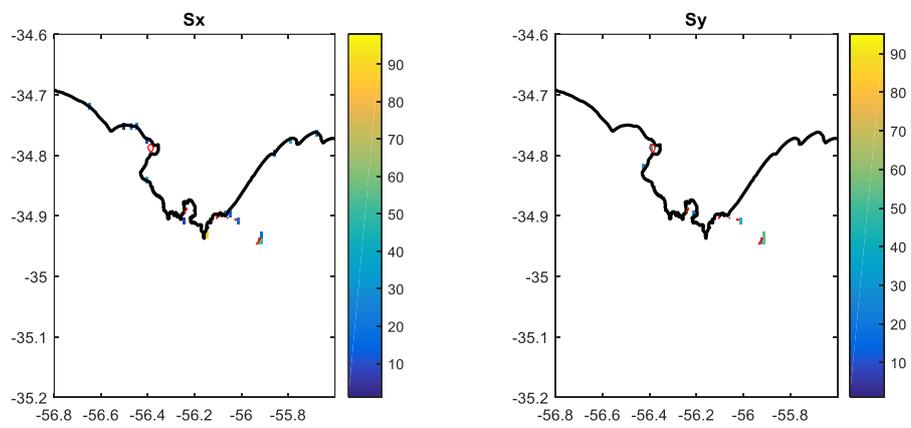


Figura 49.- Obstáculos sub-grilla. Grilla 5, Región C.

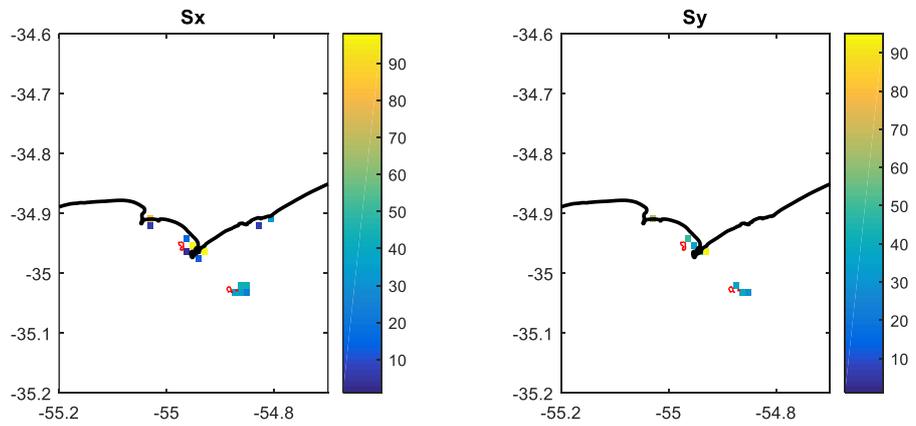


Figura 50.- Obstáculos sub-grilla. Grilla 5, Región D.

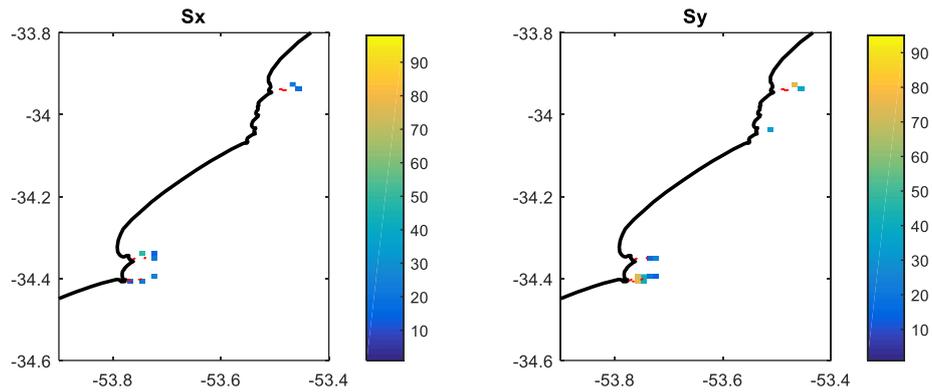


Figura 51.- Obstáculos sub-grilla. Grilla 5, Región E.

4.2.5 Forzantes y condición inicial.

Los campos de viento en superficie utilizados corresponden al reanálisis atmosférico CFSR (Saha et al. 2010) y su prolongación CFSv2 (Saha et al. 2014) en su formato de mayor resolución. Debido a que hay un aumento de la resolución espacial entre CFSR (1979 -2010) y CFSv2 (2011 – Actualidad) y a los efectos de mantener la misma resolución a lo largo de todo el período analizado, los campos de CFSv2 se llevaron mediante interpolación bilineal por componentes los a la resolución de CFSR.

En las 5 grillas de cálculo se usaron los mismos campos de vientos. Los cuales están definidos en una grilla global regular de $0.3125^\circ \times 0.3122^\circ$. Debido a que los datos originales están en una grilla Gaussiana, que si bien presenta una resolución similar, fue necesario interpolar bilinealmente por componentes para el pasaje a la grilla regular utilizada. La cual quedó definida por el origen de coordenadas: $-180^\circ, -89.7575^\circ$, y la resolución mencionada anteriormente. A modo de referencia, en la Figura 16 se presentan los nodos de la grilla del campo de viento en lo que respecta a la zona en estudio.

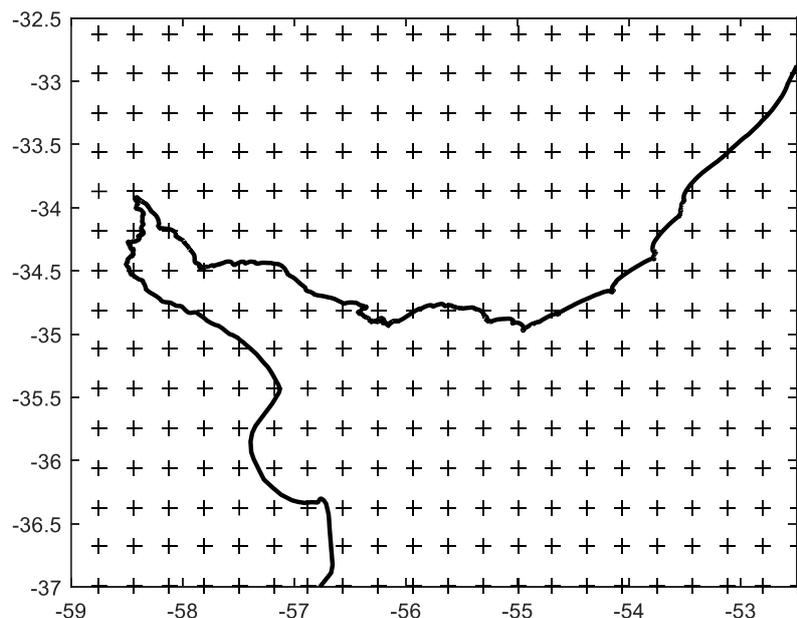


Figura 52.- Nodos de la grilla en donde se definen los campos de viento utilizados como forzante

La validación del uso de estos campos de viento se presentó en un informe previo del presente proyecto.

Los campos de niveles y corrientes utilizados fueron generados a partir de un *hindcast* regional realizado en base al modelo TELEMAT (Hervouet, 2007) y que fuera reportado en un informe anterior. Estos campos son utilizados para el cálculo en las grillas 4 y 5.

Los resultados del modelo hidrodinámico están en una grilla no estructurada. Por lo que, al igual que para el caso de los datos de viento, se pasaron a grillas regulares. Ambas ocupan una región rectangular definida entre las longitudes -59° y -51.5° , y las latitudes -36.5° y -33.5° , pero que se diferencian en su resolución. Los campos de corrientes se definieron con una resolución de $1'$, mientras que para los de niveles se usó una resolución de $2'^2$.

En cuanto a la condición inicial, en todas las simulaciones se partió del reposo y se descartaron los resultados correspondientes al primer mes. Típicamente las simulaciones fueron anuales, arrancando el 1 de diciembre del año anterior y guardando los resultados a partir del 1 de enero.

4.3 Calibración

La calibración se realizó tomando como referencia los datos de altura de ola significativa obtenidos de la base de datos altimétrica cuya descripción y análisis se presentó en el informe de validación de los campos de viento. De las subregiones descritas en dicho informe, se consideraron aquellas que tenían un borde costero. Por otra parte, las subregiones correspondientes al Río de la Plata medio (Med) e interior (Int) se agruparon en una sola (RDP Med e Int) debido a que la última contenía muy pocos datos. En la Figura 17 se presentan las 4 subregiones consideradas.

Para la elección del período de calibración se cuantificó la cantidad de datos altimétricos disponibles para cada año por subregión. A su vez, como los eventos extremos son de particular importancia para este estudio, para cada subregión se calculó el percentil 90 (H90) considerando todos los años, y para cada año se cuantificó la cantidad de datos mayores que dicho H90. Estos resultados se presentan en la Tabla 3, en la cual para cada subregión se marca con verde aquellos años que presentan más datos que su promedio, tanto para el total de los datos (tabla superior) como para los mayores al H90 respectivo (tabla inferior). En base a este análisis, se aprecia que el año 2002 presenta para todas las subregiones más datos altimétricos que el promedio de todos los años, tanto para el total de los datos, como para los mayores a H90. En base a este resultado se definió el 2002 como período de calibración.

² El modelo presentó problemas si se definían campos de niveles con mayor resolución que la grilla de cálculo. De esta forma $2'$ coincide con la resolución de la grilla 4.

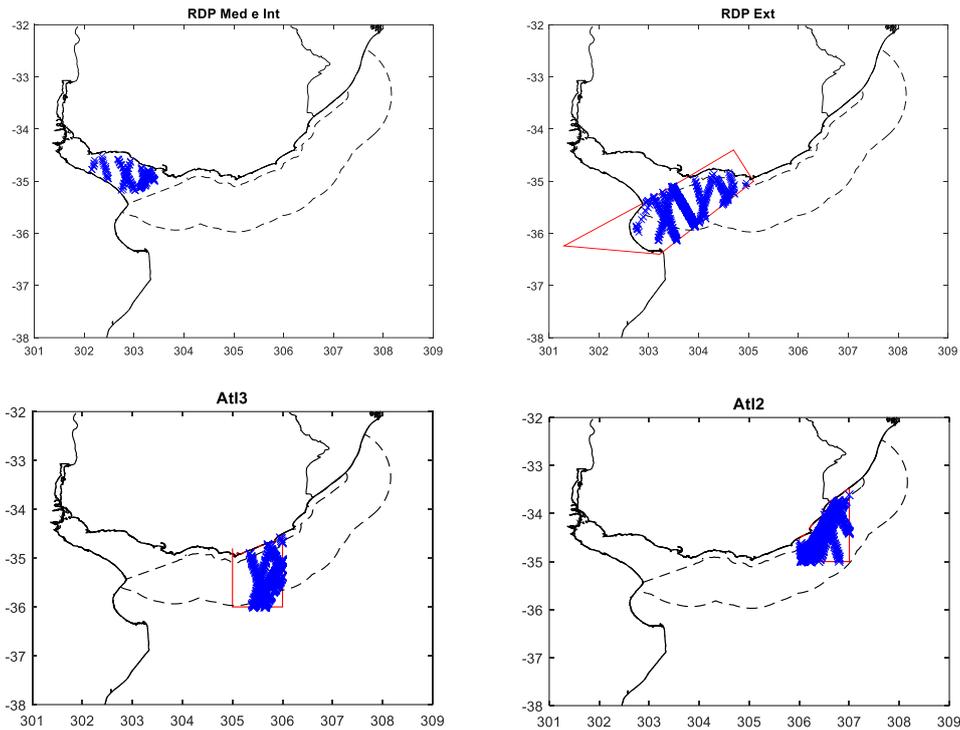


Figura 53.- Subregiones consideradas en la calibración del modelo de oleaje con datos altimétricos.

Tabla 3.- Cantidad de datos por año y por región (arriba). En verde cuando hay más datos que la media. Cantidad de datos mayores al percentil 90 (H90) por año y por región (abajo). En verde también se indica cuando hay más datos que el promedio anual de datos mayores a H90.

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	LAverage
Int2	0	52	102	91	167	159	64	84	93	109	117	121	210	109	155	102	121	109	203	29	55	201	41	109
Med2	0	241	570	598	723	734	625	617	610	666	730	1011	766	768	740	646	751	572	741	673	676	918	134	649
EstU	0	257	561	461	763	736	591	587	542	662	784	1007	1234	715	1016	603	558	666	919	932	883	872	147	674
EstA	0	378	640	605	932	914	689	720	691	896	1017	1152	1057	967	971	831	839	96	742	671	737	1164	169	771
Atl1	88	1166	857	1547	1137	1024	814	752	821	871	988	1399	1405	1166	1196	1041	1091	1252	1058	978	897	1470	315	1015
Atl2	19	892	1460	1689	1672	1691	1440	1536	1470	1998	2113	2325	2357	2202	2330	2069	1907	2437	1830	1826	1840	2272	286	1750
Atl3	0	474	1072	1092	1393	1234	1037	1139	1082	1335	1482	2237	2114	1470	1921	1424	1270	1607	1575	1638	1699	1892	310	1326
Atl4	0	219	385	257	588	559	352	386	393	652	918	1110	1410	915	1249	753	623	540	784	826	896	720	113	633
Atl5	0	254	451	328	673	609	485	460	453	811	1013	1368	1730	943	1535	861	733	645	1073	1108	1165	812	122	767
Atl6	0	303	457	370	836	719	471	491	498	855	1017	1454	2384	928	1989	828	774	619	1704	1817	1835	1221	200	947
rec1	0	666	1659	1495	1998	1914	1621	1677	1672	2168	2447	3228	2507	2338	2354	2172	1968	2465	1732	1682	1628	2182	288	1820
rec2	0	329	757	700	1051	926	745	781	762	950	1101	1525	1731	1046	1500	988	849	1004	1168	1218	1332	1424	232	961
rec3	34	825	576	959	912	809	587	569	593	826	968	1521	2142	928	1725	856	751	703	1378	1363	1467	1149	219	951
rec4	37	959	1705	1961	2049	1926	1798	1807	1752	2299	2484	3506	2557	2362	2519	2272	2153	2608	1898	1809	1843	2389	315	1956
rec5	0	513	1347	1367	1540	1546	1309	1379	1372	1454	1562	2225	1722	1523	1602	1418	1466	1939	1449	1445	1452	2028	288	1309
rec6	0	535	1096	830	1498	1312	1032	1134	1097	1659	1624	2406	2627	1729	2326	1838	1389	1693	1633	1645	1635	1638	254	1410
rec7	26	763	558	1078	876	709	596	578	598	973	1219	1790	2096	1165	1829	1077	906	859	1295	1344	1563	1292	204	1016
rec8	67	1093	1420	1902	1724	1683	1477	1491	1472	1574	1591	2394	1760	1549	1596	1491	1543	1899	1519	1486	1533	2068	313	1509
rec9	27	952	1324	1479	1676	1572	1342	1377	1379	1610	1755	2436	2189	1673	1869	1576	1519	1839	1542	1468	1382	1640	278	1481
re10	76	921	496	1037	750	669	491	460	498	394	1174	1629	2187	1093	1895	1032	863	693	1198	1361	1367	1077	205	965
re11	81	1127	483	1372	762	670	513	474	514	752	884	1429	2350	817	1850	731	671	569	1578	1750	1911	1163	228	986
Total	465	12929	17926	21254	23773	22093	18069	18499	18358	24033	27188	37863	38476	26303	34166	24389	22744	26085	26999	27107	27826	29762	4671	

	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	
Int2	0	3	14	17	9	29	27	11	19	12	17	11	9	4	5	4	14	5	12	3	8	10	3	11
Med2	0	16	81	49	50	37	36	94	48	77	114	85	76	61	121	43	73	118	74	76	61	56	12	63
EstU	0	30	49	32	116	54	28	46	35	31	42	111	135	109	96	51	52	42	131	161	98	93	5	67
EstA	0	17	105	61	81	86	50	82	74	102	123	73	75	103	109	53	61	124	97	73	86	96	14	76
Atl1	2	107	51	114	117	55	51	86	103	73	165	307	93	173	66	88	101	126	90	95	91	94	59	100
Atl2	0	77	154	166	182	154	145	117	106	283	235	271	268	201	159	132	184	294	170	159	284	216	24	173
Atl3	0	13	139	88	159	91	99	117	104	141	154	208	250	170	193	118	109	124	122	160	286	193	15	131
Atl4	0	44	91	19	115	57	34	29	43	64	74	108	120	99	75	98	47	30	79	97	99	51	4	63
Atl5	0	45	57	18	137	88	26	38	60	60	111	111	75	122	161	59	53	61	144	129	103	84	0	77
Atl6	0	26	46	14	130	90	54	40	55	78	78	106	243	117	147	80	42	55	113	246	149	148	0	93
rec1	0	43	239	143	261	124	108	163	133	222	275	222	371	310	217	250	163	226	102	129	224	177	20	181
rec2	0	43	107	81	196	72	82	81	44	67	112	105	196	168	135	84	95	83	71	38	115	134	32	96
rec3	0	59	59	193	137	41	56	26	83	66	78	144	264	131	238	84	75	71	127	112	116	76	42	95
rec4	0	78	173	185	265	168	200	157	170	242	296	353	258	221	278	183	161	259	210	168	166	269	34	195
rec5	0	53	233	144	192	107	130	119	121	116	159	142	236	223	142	132	112	205	111	102	181	216	7	138
rec6	0	34	132	76	233	108	109	119	98	176	181	193	278	173	152	198	151	81	106	125	288	160	53	140
rec7	0	62	49	110	100	29	41	48	53	89	113	202	209	217	238	96	66	101	123	110	121	132	24	101
rec8	0	91	147	208	213	138	126	104	144	181	198	253	147	148	145	134	173	181	154	113	151	218	35	148
re10	0	116	121	178	151	122	121	130	102	193	173	256	229	225	157	103	159	173	150	157	152	171	34	147
re11	0	102	58	113	109	51	39	19	71	84	161	230	169	134	208	43	86	105	101	119	84	82	34	96
re11	0	129	63	133	108	42	38	15	79	38	110	240	231	135	189	60	79	76	127	131	136	84	31	98
Total	2	1179	2158	2052	3061	1734	1600	1667	1750	2395	2969	3731	3931	3234	3211	2079	2076	2542	2414	2663	2988	2756	482	

En la Figura 18 se presentan los resultados obtenidos al simular 4 meses (enero -diciembre 2002) con los parámetros por defecto.

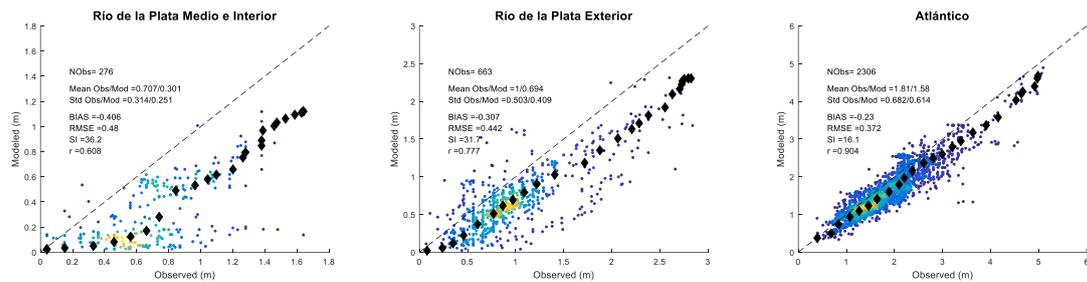


Figura 54.- Resultados con los parámetros del modelo por defecto. Para el atlántico (derecha) se agruparon las dos regiones Atl3 y Atl2.

Se observa una tendencia a la subestimación de Hs en las tres regiones, agravándose para el Río de la Plata, particularmente en su región media e interior. Por otra parte, para esta última región se observan grandes diferencias entre resultado del modelo y dato observado cuando Hs obtenida del modelo es menor a 0.25m (Figura 19, gráfico de la izquierda). Sacando estos datos (Figura 19, gráfico de la derecha) la dispersión disminuye y la correlación aumenta. Las comparaciones de la Figura 20, demuestran que la mala representación de los puntos recuadrados en rojo se debe a una mala representación del viento. En lo que sigue, en lo que respecta al Río de la Plata medio e Interior y a los efectos de la calibración, se descartan los datos en los que Hs del modelo es menor a 0.25m. Se trata de un filtro simple que busca que en la calibración del modelo no se consideren eventos en donde el viento está mal representado.

Se seleccionó BETAMAX de la parametrización del aporte de energía por parte del viento y GAMMA de la parametrización JONSWAP de la disipación por fondo (Haselmann et al. 1973) como los dos parámetros de calibración. Se realizaron 9 simulaciones correspondientes a las combinaciones de BETAMAX y GAMMA que se presentan en la Tabla 4. Los resultados obtenidos se presentan en las figuras 21 a 24 y en las tablas 5 a 12.

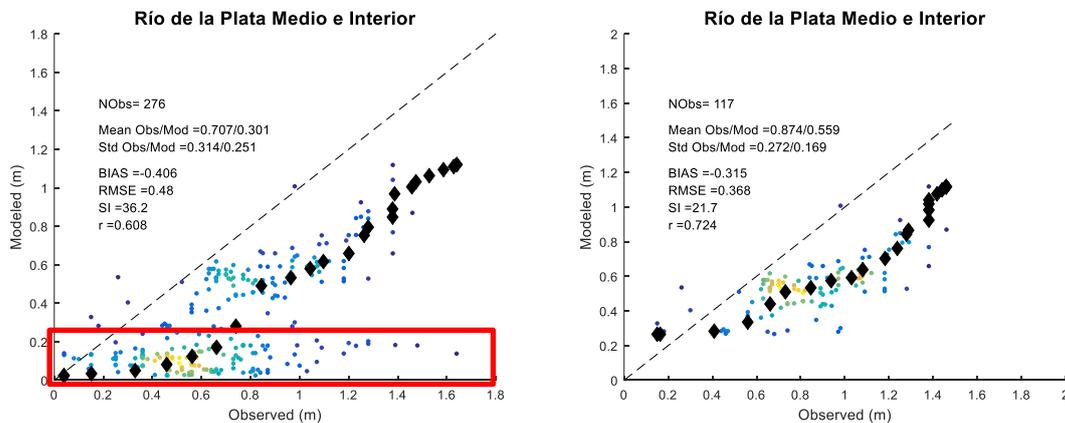


Figura 55.- Comparación entre resultados del modelo y medición altimétrica de Hs. Río de la Plata medio e interior. Período simulado: Enero-Abril 2002. En el gráfico de la derecha no se eliminaron los puntos recuadrados en rojo en el gráfico de la izquierda (i.e. Hs modelo <0.25m).

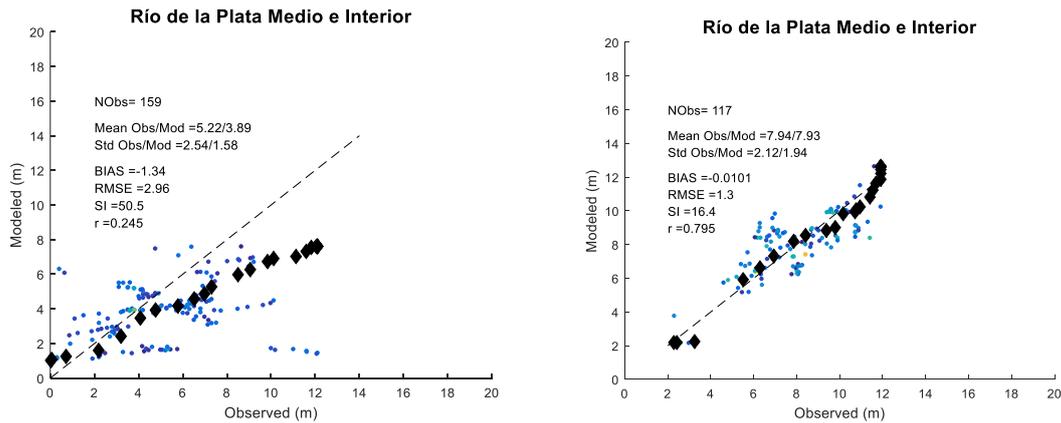


Figura 56.- Comparación entre viento CFSR (Modeled) y medición altimétrica (Observed). El gráfico de la izquierda muestra los eventos correspondientes a $H_{s_{mod}} < 0.25m$ (recuadro rojo de la Figura 19), mientras que el de la derecha muestra los eventos correspondientes a $H_{s_{mod}} > 0.25m$ (fuera del recuadro rojo de la Figura 19). Las unidades son m/s.

Tabla 4.- Combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m ² s ⁻³	SIM 11	SIM 12	SIM 13
GAMMA = -0.03 m ² s ⁻³	SIM 21	SIM 22	SIM 23
GAMMA = -0.067 m ² s ⁻³	SIM 31	SIM 32	SIM 33

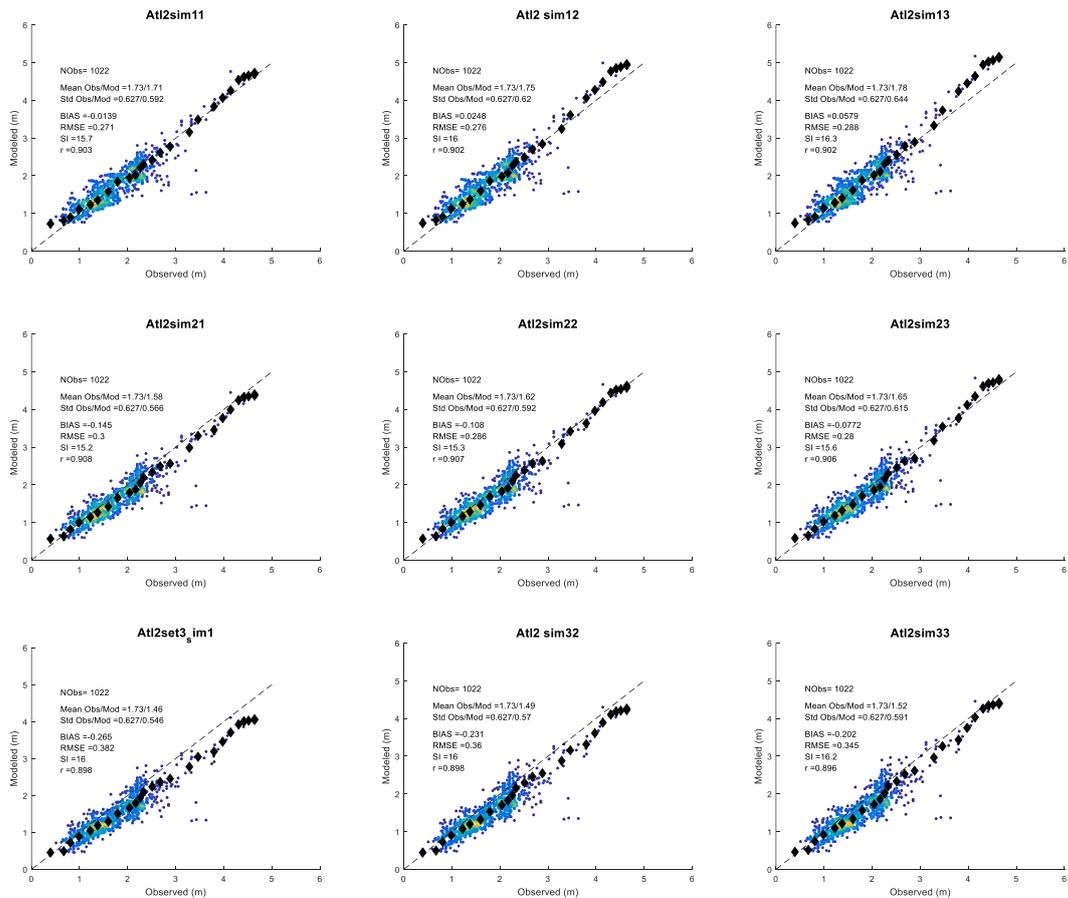


Figura 57.- Resultados obtenidos con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA en la región de la costa Atlántica Atl2.

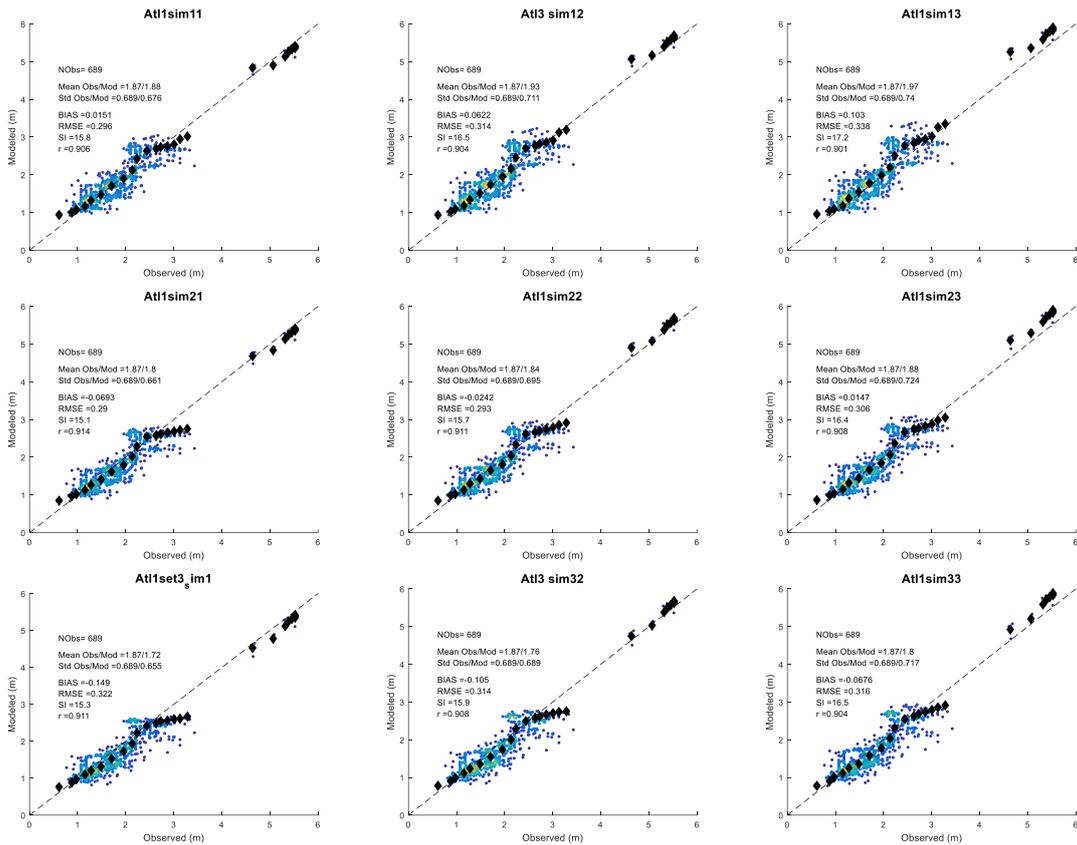


Figura 58.- Resultados obtenidos con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA en la región de la costa Atlántica At13.

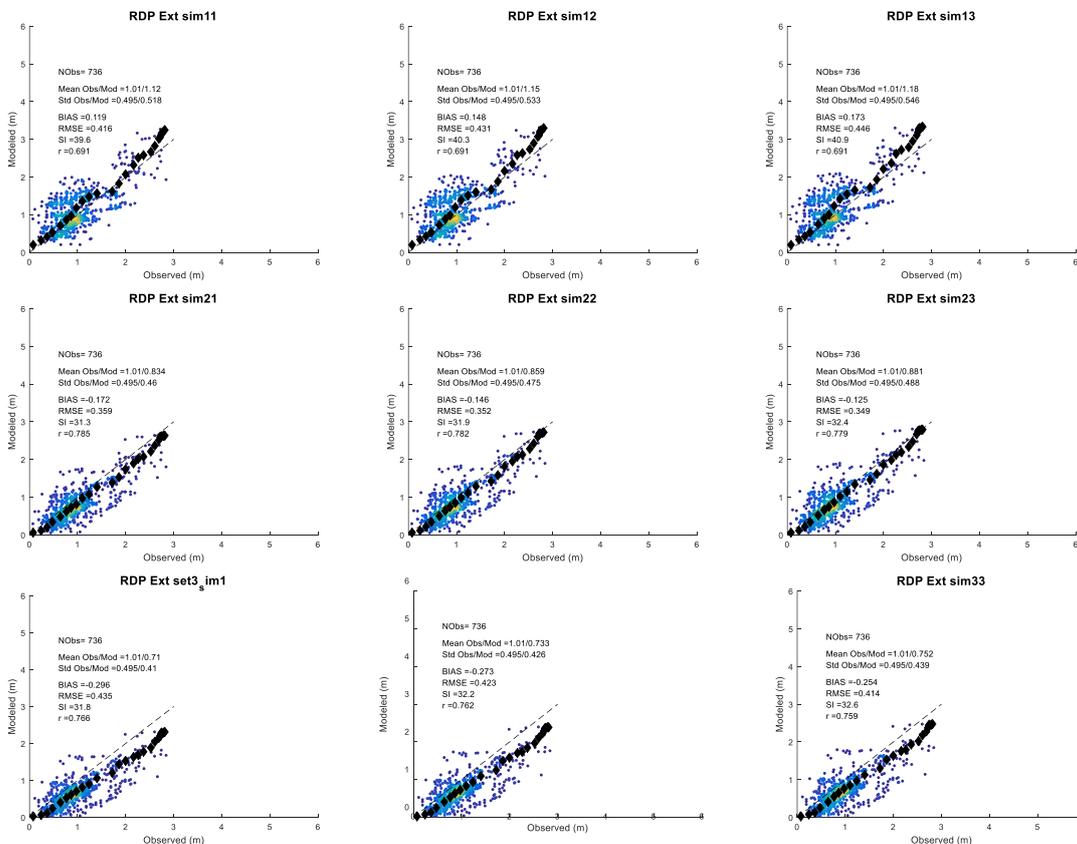


Figura 23.- Resultados obtenidos con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA en la región exterior del Río de la Plata.

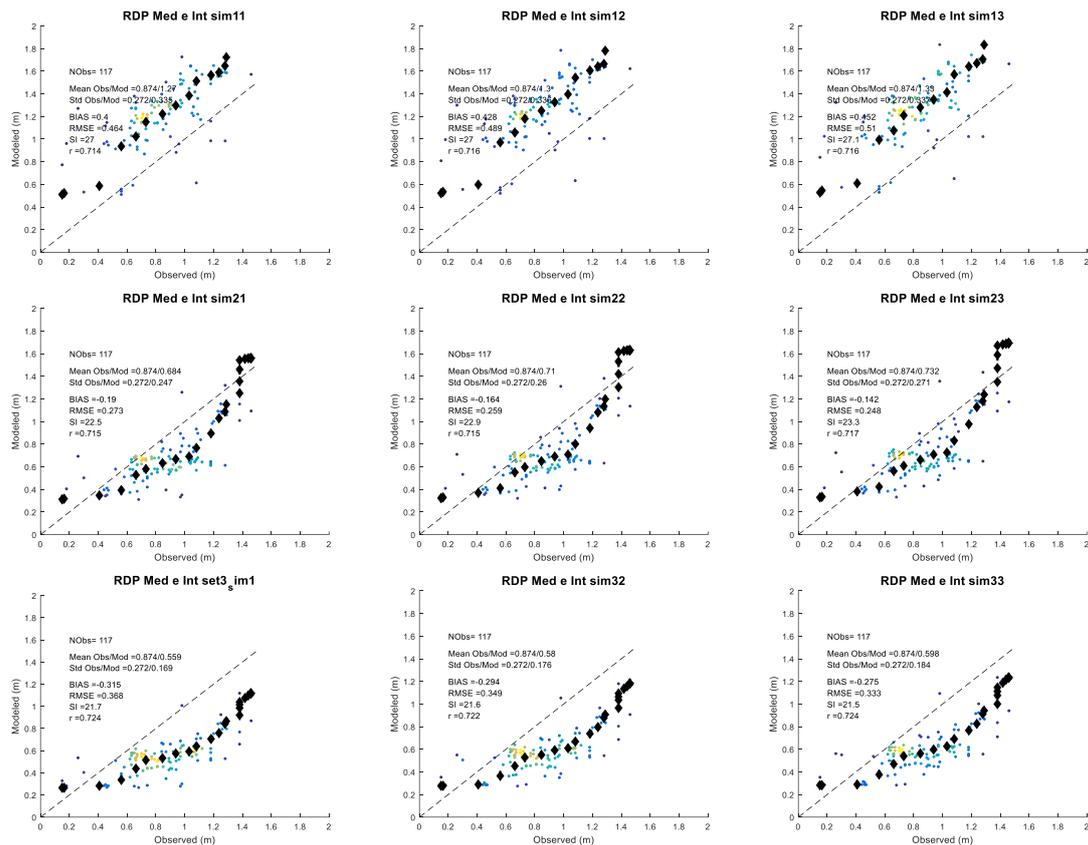


Figura 24.- Resultados obtenidos con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA en la región media e interior del Río de la Plata.

Tabla 5.- BIAS (m) obtenido en la región de la costa atlántica Atl2 con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m ² s ⁻³	-0.01	0.02	0.06
GAMMA = -0.03 m ² s ⁻³	-0.1	-0.11	-0.08
GAMMA = -0.067 m ² s ⁻³	-0.26	-0.23	-0.20

Tabla 6.- BIAS (m) obtenido en la región de la costa atlántica Atl3 con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m ² s ⁻³	0.02	0.06	0.10
GAMMA = -0.03 m ² s ⁻³	-0.07	-0.02	0.01
GAMMA = -0.067 m ² s ⁻³	-0.15	-0.11	-0.07

Tabla 7.- BIAS (m) obtenidos en el Río de la Plata exterior con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m ² s ⁻³	0.12	0.15	0.17
GAMMA = -0.03 m ² s ⁻³	-0.17	-0.14	-0.12
GAMMA = -0.067 m ² s ⁻³	-0.30	-0.27	-0.25

Tabla 8.- BIAS (m) obtenidos en el Río de la Plata medio e interior con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m ² s ⁻³	0.4	0.43	0.45
GAMMA = -0.03 m ² s ⁻³	-0.19	-0.16	-0.14
GAMMA = -0.067 m ² s ⁻³	-0.32	-0.29	-0.27

Tabla 9.- Índice de dispersión (SI) obtenido en la región de la costa atlántica Atl2 con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m ² s ⁻³	15.7	16	16.3
GAMMA = -0.03 m ² s ⁻³	15.2	15.3	15.6
GAMMA = -0.067 m ² s ⁻³	16	16	16.2

Tabla 10.- Índice de dispersión (SI) obtenido en la región de la costa atlántica Atl3 con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m ² s ⁻³	15.8	16.5	17.2
GAMMA = -0.03 m ² s ⁻³	15.1	15.7	16.4
GAMMA = -0.067 m ² s ⁻³	15.3	15.9	16.5

Tabla 11.- Índice de dispersión (SI) obtenidos en el Río de la Plata exterior con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m ² s ⁻³	39.6	40.3	40.9
GAMMA = -0.03 m ² s ⁻³	31.3	31.9	32
GAMMA = -0.067 m ² s ⁻³	31.8	32.2	32.6

Tabla 12.- Índice de dispersión (SI) obtenidos en el Río de la Plata medio e interior con las distintas combinaciones de BETAMAX y GAMMA consideradas.

	BETAMAX =1.43	BETAMAX =1.55	BETAMAX =1.66
GAMMA = 0 m ² s ⁻³	27	27	27.1
GAMMA = -0.03 m ² s ⁻³	22.5	22.9	23.3
GAMMA = -0.067 m ² s ⁻³	21.7	21.6	21.5

Se observa que los resultados obtenidos son muy sensibles al valor de GAMM. Esto pone de manifiesto el rol importante de la disipación por fondo en los procesos de transformación del oleaje en la zona de estudio, particularmente en lo que respecta al Río de la Plata. Por su parte, la sensibilidad ante el parámetro BETAMAX en los rangos considerados es menor.

Se fijó BETAMAX en 1.55 por presentar una mejor performance para los cuantiles altos y se procedió a ajustar GAMMA procurando anular el BIAS en las cuatro regiones. Esto se obtuvo por GAMMA = -0.012m²s⁻³. Los resultados finales para GAMMA=-0.012 m²s⁻³ y BETAMAX=1.55, para todo el 2002 y considerando todos los datos (i.e. sin aplicar el filtro de H_{smod} < 0.25m) se presentan en las Figuras 25 (regiones del Río de la Plata) y la Figura 26 (regiones del Atlántico).

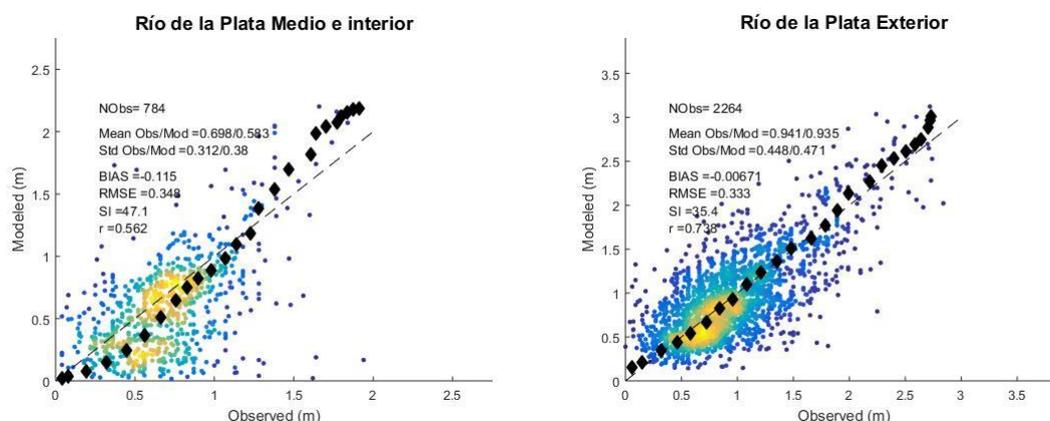


Figura 25.- Resultados obtenidos con BETAMAX=1.55 y GAMMA=-0.012m²s⁻³ en la regiones del Río de la Plata (zona media e interior gráfico de la izquierda y zona exterior gráfico de la derecha).

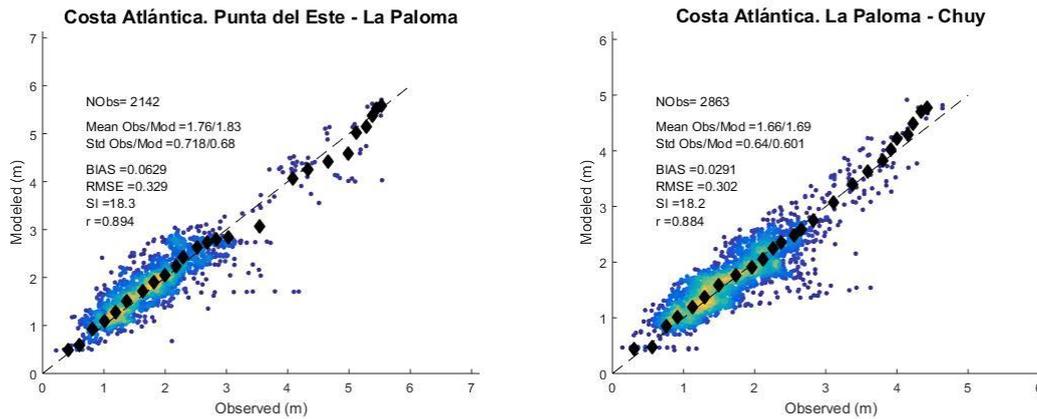


Figura 26.- Resultados obtenidos con $BETAMAX=1.55$ y $GAMMA=-0.012m^2s^{-3}$ en la regiones de la costa atlántica (Atl3 izquierda y Atl2 derecha).

4.4 Base de datos generada

Con la configuración del modelo descrita en los capítulos precedentes se simuló el período 1985 – 2016 generándose información de dos tipos. Por un lado, campos de los distintos parámetros que describen al oleaje definidos en las grillas de cálculo y por otro, espectros bidireccionales en los puntos que se indican en la Figura 27 y la Tabla 13.

Ambos tipos de información se presenta en archivos netcdf que contienen un mes de datos. En el caso de los campos, la nomenclatura del archivo es GNyyyyymm_VN.nc. En donde GN es el nombre de la grilla (i.e. Region32, localF12, costaF12); yyyyymm es la fecha (e.g. junio del 2000 = 200006) y VN es el nombre de la variable. Las variables que se brindan son: velocidad de la corriente (CUR, input del modelo), velocidad del viento (WND, input del modelo), nivel del mar (WLV, input del modelo), altura de ola significativa (HS, salida del modelo), períodos medios (T02, T01, T0m1, salidas del modelo), frecuencia pico (FP), dirección media (DM), dispersión direccional (SPR, salida del modelo) y dirección pico (DP, salida del modelo). En el caso de los espectros se almacenan por mes en archivos con la siguiente nomenclatura “ww3.yyyyyymm_spec.nc” en donde yyyyymm define el mes correspondiente.

Los puntos en donde se sacaron los espectros se agrupan en 6: A, B, C, D, E, F; y luego hay puntos singulares que se definieron debido a que hay registros de mediciones in-situ (HV, PB, GS, PQ2 y PT) o bien se los consideraron estratégicos (i.e. PN y ME). Dentro de cada grupo los puntos son numerados en sentido de este a oeste.

El grupo A comprende la costa Atlántica al este de Cabo Polonio e incluye 2 puntos en la costa de Brasil (A1 y A2). El grupo B comprende el resto de la costa Atlántica, i.e desde Punta del Este a Cabo Polonio. El grupo C comprende la costa del Río de la Plata Exterior. El grupo D abarca la costa del Río de la Plata medio comprendida entre Montevideo y la desembocadura del arroyo Cufre. El grupo E abarca la costa del Río de la Plata medio entre la desembocadura del arroyo Cufre y Colonia. Mientras que el grupo F abarca la costa del Río de la Plata superior (i.e. al oeste de Colonia).

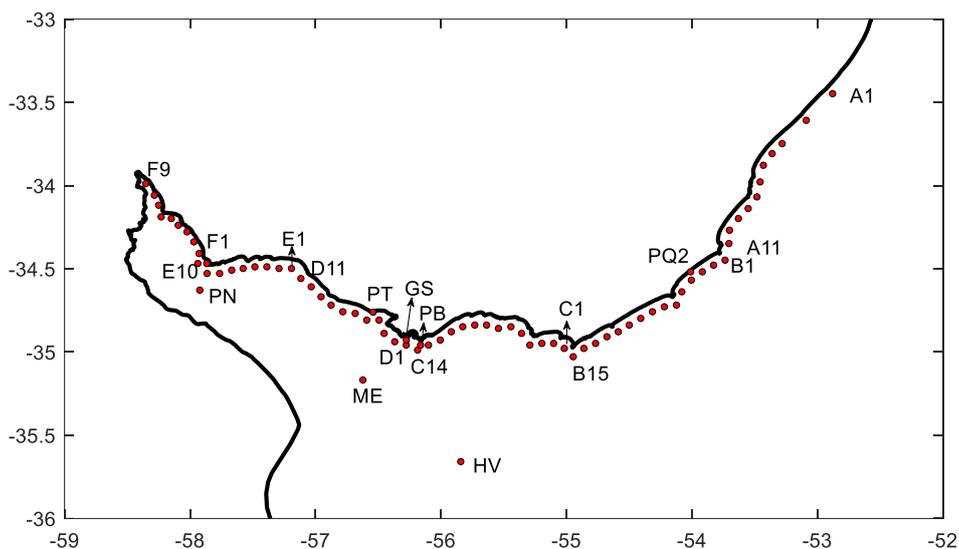


Figura 27.- Puntos en donde se generaron series temporales de espectros direccionales.

Tabla 21.- Coordenadas de los puntos en donde se sacaron los espectros.

A1	-52,876	-33,452	Costa de Brasil	D1	-56,274	-34,964	Montevideo
A2	-53,087	-33,609	Costa de Brasil	D2	-56,366	-34,940	
A3	-53,278	-33,751	Chuy	D3	-56,451	-34,891	
A4	-53,358	-33,811		D4	-56,491	-34,810	
A5	-53,428	-33,883		D5	-56,589	-34,812	
A6	-53,453	-33,975		D6	-56,681	-34,774	
A7	-53,479	-34,068		D7	-56,779	-34,755	
A8	-53,549	-34,136		D8	-56,873	-34,725	
A9	-53,627	-34,199		D9	-56,953	-34,673	
A10	-53,698	-34,270		D10	-57,032	-34,611	
A11	-53,702	-34,354	Valizas	D11	-57,114	-34,556	Cufré
B1	-53,733	-34,447	Cabo Polonio	E1	-57,189	-34,503	Cufré
B2	-53,825	-34,479		E2	-57,288	-34,497	
B3	-53,914	-34,524		E3	-57,385	-34,487	
B4	-54,001	-34,574	El Palenque	E4	-57,481	-34,493	
B5	-54,078	-34,636		E5	-57,574	-34,503	
B6	-54,121	-34,720	La Paloma	E6	-57,665	-34,508	
B7	-54,217	-34,726		E7	-57,762	-34,530	
B8	-54,312	-34,759		E8	-57,861	-34,533	
B9	-54,405	-34,795		E9	-57,935	-34,471	
B10	-54,497	-34,836		E10	-57,864	-34,473	Colonia
B11	-54,584	-34,882		F1	-57,925	-34,409	
B12	-54,675	-34,906		F2	-57,967	-34,343	
B13	-54,765	-34,949		F3	-58,021	-34,281	
B14	-54,859	-34,983		F4	-58,091	-34,244	
B15	-54,943	-35,033	Punta del Este	F5	-58,146	-34,197	
C1	-55,014	-34,978		F6	-58,227	-34,188	
C2	-55,099	-34,948		F7	-58,247	-34,116	
C3	-55,193	-34,949		F8	-58,281	-34,060	
C4	-55,289	-34,958	Piriápolis	F9	-58,349	-33,994	
C5	-55,355	-34,886		HV	-55,840	-35,660	Hidrovia
C6	-55,440	-34,852		PB	-56,160	-34,960	Punta Brava
C7	-55,539	-34,857		GS	-56,274	-34,930	Gas Sayago
C8	-55,634	-34,838		PQ2	-54,008	-34,520	ADCP Palenque
C9	-55,728	-34,836		PT	-56,538	-34,763	Punta Tigre
C10	-55,824	-34,847		PN	-57,920	-34,628	Pilote Norden
C11	-55,916	-34,885		ME	-56,620	-35,170	
C12	-56,003	-34,934					
C13	-56,097	-34,961					
C14	-56,184	-34,993	Montevideo.				

4.5 Conclusiones y pasos futuros.

Se desarrolló un *hindcast* de oleaje que provee resultados a lo largo de toda la costa de Uruguay con una resolución espacial de 40'' (~1 km) y temporal de 1h. A su vez, todo el Río de la Plata medio e interior es también resuelto con 40'' de resolución mientras que el Río de la Plata exterior y la plataforma continental Atlántica es resuelta con una resolución espacial de 2' (~3 km).

El modelo de oleaje utilizado fue calibrado y validado con datos altimétricos de altura de ola significativa, mostrando una muy buena performance en el Atlántico. Si bien la performance desmejora en el Río de la Plata, esta se la considera aceptable y mejora significativamente los resultados antecedentes (Alonso et al. 2015), ya que se obtuvieron BIAS próximos a cero y curvas cuantil-cuantil que se ajustan a la recta identidad.

La calibración del modelo dejó en evidencia el rol clave de la disipación de energía por fricción de fondo entre los distintos procesos de transformación del oleaje que ocurren en el Río de la Plata. Este proceso fue modelado con la parametrización JONSWAP y el parámetro involucrado en la misma fue uno de los considerados en la calibración del modelo. Por lo tanto, se entiende que se lograron los mejores resultados posibles utilizando esta parametrización.

Las tareas futuras en el corto plazo consisten en realizar análisis comparativos de los resultados del *hindcast* con todos los registros de mediciones in-situ disponibles. Mientras que en el mediano plazo, se procurará mejorar los resultados en el Río de la Plata a partir de usar una parametrización de disipación por fondo más apropiada a las características del estuario, así como a partir de una mejora en los campos de viento forzante. Se entiende que estos son los dos motivos principales que explican la diferencia entre la performance obtenida en el Atlántico respecto a la obtenida en el Río de la Plata, ya que en el primero el viento está mejor representado por los datos CFSR y la disipación por fondo no tiene tanto peso relativo como en el estuario.

5 REFERENCIAS

- Alonso, R., Solari, S., & Teixeira, L. (2015). Wave energy resource assessment in Uruguay. *Energy*, 93. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.08.114>
- Alonso, R., Jackson, M., Santoro, P., Fossati, M., Solari, S., & Teixeira, L. (2017). Wave and tidal energy resource assessment in Uruguayan shelf seas. *Renewable Energy*, 114. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.074>
- Amante, C. and B.W. Eakins, 2009. ETOPO1 1 Arc-Minute Global Relief Model: Procedures, Data Sources and Analysis. NOAA Technical Memorandum NESDIS NGDC-24. National Geophysical Data Center, NOAA. doi:10.7289/V5C8276M [access date].
- Ardhuin, F., Rogers, E., Babanin, A., Filipot, J.-F., Magne, R., Roland, A., ... Collard, F. (2009). Semi-empirical dissipation source functions for ocean waves: Part I, definition, calibration and validation, (1). <https://doi.org/10.1175/2010JPO4324.1>
- Babanin, A. V., Chalikov, D., Young, I. R., & Savelyev, I. (2010). Numerical and laboratory investigation of breaking of steep two-dimensional waves in deep water. *Journal of Fluid Mechanics*, 644(February 2010), 433–463. <https://doi.org/10.1017/S002211200999245X>
- Babanin, A. V., & Haus, B. K. (2009). On the Existence of Water Turbulence Induced by Nonbreaking Surface Waves. *Journal of Physical Oceanography*, 39(10), 2675–2679. <https://doi.org/10.1175/2009JPO4202.1>
- Babanin, A. V. (2006). On a wave-induced turbulence and a wave-mixed upper ocean layer. *Geophysical Research Letters*, 33(20), 1–6. <https://doi.org/10.1029/2006GL027308>
- Babanin, A. V., Ganopolski, A., & Phillips, W. R. C. (2009). Wave-induced upper-ocean mixing in a climate model of intermediate complexity. *Ocean Modelling*, 29(3), 189–197. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.04.003>
- Briere, C., Abadie, S., Bretel, P., Lang, P. (2007). Assessment of TELEMAC system performances, a hydrodynamic case study of Anglet, France. *Coast Eng*, 54, pp. 345–56.
- Campos, R. M., & Alves, J. (2013). Estimating Extreme Waves in the South Atlantic Ocean Using Regional Frequency Analysis and Wave Model Hindcast Data, 2013.
- Chawla, A. and H. L. Tolman, 2007: Automated grid generation for WAVEWATCH III. Tech. Note 254, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, 71 pp.
- Dee, D. P., Uppala, S. M., Simmons, A. J., Berrisford, P., Poli, P., Kobayashi, S. (2011). The ERA-Interim reanalysis : configuration and performance of the data assimilation system, (April), 553–597. <https://doi.org/10.1002/qj.828>
- Filipot, J. F., & Ardhuin, F. (2012). A unified spectral parameterization for wave breaking: From the deep ocean to the surf zone. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 117(4), 1–19. <https://doi.org/10.1029/2011JC007784>
- Flather, R. (1976). Results from surge prediction model of the north-west european continental shelf for april, november and december 1973. Report 24, Institute of Oceanography (UK).

-
- Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (2013). A 3d hydrodynamic numerical model of the Río de la Plata and Montevideo's coastal zone, *Appl. Math. Modell.* 37, pp. 1310-1332.
- Franco, I. Gutierrez, A., y Cataldo, J. (2016). "Description of the behavior of wind speed monthly maximums using ARW-WRF". *Anais do MCSUL 2016 7a Conferencia Sul em Modelagem Computacional*, Rio Grande, Brasil
- Guillou, N., Chapalain, G. (2012). Modeling penetration of tide-influenced waves in Le Havre Harbor. *J Coast Res.* 28, pp.945–55.
- Hasselmann, K., T. P. Barnett, E. Bouws, H. Carlson, D. E. Cartwright, K. Enke, J. A. Ewing, H. Gienapp, D. E. Hasselmann, P. Kruseman, A. Meerburg, P. Müller, D. J. Olbers, K. Richter, W. Sell and H. Walden, 1973: Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Erganzungsheft zur Deutschen Hydrographischen Zeitschrift, Reihe A(8), 12, 95 pp*
- Hervouet, J.M. (2007). *Hydrodynamics of free surface flows: modelling with the finite element method*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester, UK.
- Huybrechts, N. , Villaret, C., Lyard, F. (2012). Optimized predictive 2D hydrodynamic model of the Gironde estuary (France), *J. Waterw. Port Coast. Ocean Eng.* 138 (4), pp. 312–322.
- Huybrechts, N., Villaret, C. (2013). Large scale morphodynamic modeling of the Gironde estuary, *Proc. Inst. Civ. Eng. Marit. Eng.* 166 (2), pp. 51-62.
- Jia, L., Wen, Y., Pan, S., Liu, J.T., Jiawei He (2015). Wave–current interaction in a river and wave dominant estuary: A seasonal contrast, *Applied Ocean Research*, Volume 52, pp. 151-166, ISSN 0141-1187, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apor.2015.06.004>.
- Jones, JE, Davies, AM (2008). Storm surge computations for the west coast of Britain using a finite element model (TELEMAC). *Ocean Dyn* 58, pp. 337–63.
- Leckler, F., Ardhuin, F., Filipot, J. F., & Mironov, A. (2013). Dissipation source terms and whitecap statistics. *Ocean Modelling*, 70, 62–74. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.03.007>
- Luo, J., Li, M., Sun, Z., O'Connor, B.A. (2013). Numerical modelling of hydrodynamics and sand transport in the tide-dominated coastal-to-estuarine region, *Mar. Geol.* 342, pp. 14-27.
- Piedra-Cueva, I. & Fossati, M. (2007). Residual currents and corridor of flow in the Río de la Plata. *Applied Mathematical Modelling*, 31, pp. 564-577.
- QGIS Development Team, 2009. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation. URL <http://qgis.osgeo.org>
- Queffeuilou P. & Croizé-Fillon D. (2013). Global altimeter SWH data set. IFREMER internal technical report.
- Saha, S., Moorthi, S.; Pan, H.-L.; Wu, X.; Wang, J. (2010). The NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol. 91, No. 8, pp. 1015-1058.

-
- Saha, S., Moorthi, S., Wu, X., Wang, J., Nadiga, S., Tripp, P., ... Becker, E. (2014). The NCEP climate forecast system version 2. *Journal of Climate*, 27(6), 2185–2208. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-12-00823.1>
- Santoro, P., Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (2013). Study of the meteorological tide in the Río de la Plata, *Cont. Shelf Res.*, 60, pp. 51-63.
- Sathish Kumar, S., Balaji, R. (2015). Effect of bottom friction on tidal hydrodynamics along Gulf of Khambhat, India. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 154, 129.
- Stopa, J. E., & Cheung, K. F. (2014). Intercomparison of wind and wave data from the ECMWF Reanalysis Interim and the NCEP Climate Forecast System Reanalysis. *Ocean Modelling*, 75, 65–83. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2013.12.006>.
- Stopa, J. E., Ardhuin, F., Babanin, A., & Zieger, S. (2016). Comparison and validation of physical wave parameterizations in spectral wave models. *Ocean Modelling*, 103(July), 2–17. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.09.003>
- Taylor, K. E. (2001). Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 106, No. D7, April 2001, pp. 7183-7192.
- Uppala, S. M., Kållberg, P. W., Simmons, A. J., Andrae, U., da Costa Bechtold, V., Fiorino, M., ... Woollen, J. (2005). The ERA-40 re-analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 131(612), 2961–3012. <https://doi.org/10.1256/qj.04.176>
- Wessel, P. and W. Smith, 1996: A global self-consistent hierarchical high resolution shoreline database. *J. Geophys. Res.*, 101(B4), 8741 { 8743.
- Winterfeldt J, Geyer B, Weisse R (2011) “Using QuikSCAT in the added value assessment of dynamically downscaled wind speed”. *Int J Climatol* Vol. 31 pp:1028–1039
- WW3DG, The WAVEWATCH III® Development Group (2016). “User manual and system documentation of WAVEWATCH III ® version 5.16”. Tech. Note 329, NOAA/NWS/NCEP/MMAB, College Park, MD, USA, 326 pp. + Appendices.
- Zieger, S., Babanin, A. V., Erick Rogers, W., & Young, I. R. (2015). Observation-based source terms in the third-generation wave model WAVEWATCH. *Ocean Modelling*, 96(August 2016), 2–25. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2015.07.014>

6 ANEXO I: GENERACIÓN DE SERIES DE CAUDALES FLUVIALES

6.1 Análisis hidrológico

Se realizó un análisis hidrológico sobre todas las cuencas hidrográficas costeras de Uruguay cuya superficie supere los 150 Km². En ese sentido, se identifican 18 cuencas de ríos o arroyos y 5 cuencas afluentes a lagunas costeras (Tabla 1). Se recopiló información sobre textura de los suelos a efectos de caracterizar la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo para cada cuenca. Esta información cubre todo el país y se dispone a escala 1:40.000 (Crisci et al. 2015; Molfino 2009). Se determinó el tiempo de concentración de las cuencas en base a la formulación de Ramser y Kirpich utilizando la pendiente por velocidad del cauce principal.

Tabla 1

Nombre Cuenca	Nº Cuenca	Area (km2)	Tc (hs)	AD suelo (mm)
Arroyo_Carrasco	1	203	15	107
Arroyo_Chuy	2	338	15	122
Arroyo_De_Las_Vacas	3	740	30	138
Arroyo_Las_Viboras	4	495	20	134
Arroyo_Luis_Pereira	5	430	22	124
Arroyo_Maldonado	6	1494	31	82
Arroyo_Pando	7	841	27	105
Arroyo_Pantanososo	8	374	18	104
Arroyo_Pavon	9	505	25	106
Arroyo_Riachuelo	10	169	11	114
Arroyo_San_Gregorio	11	174	10	142
Arroyo_San_Pedro	12	158	10	121
Arroyo_Sauce	13	290	13	116
Arroyo_Solis_Chico	14	641	23	99
Arroyo_Solis_Grande	15	1340	37	88
Laguna_Castillos	16	1377	11	101
Laguna_Garzon	18	557	17	89
Laguna_Joselgnacio	19	712	22	75
Laguna_Rocha	20	1215	20	86
Rio_Rosario	21	1845	33	105
Rio_San_Juan	22	1551	28	114
Rio_SanJose	23	3570	54	109
Rio_SantaLucia	24	9198	87	98

En todas las cuencas se recopiló información de precipitación diaria de los pluviómetros con influencia correspondientes para el período 1981-2011. La precipitación diaria media en cada una de las cuencas se determinó en base a la metodología de Thiessen (Chow 1994).

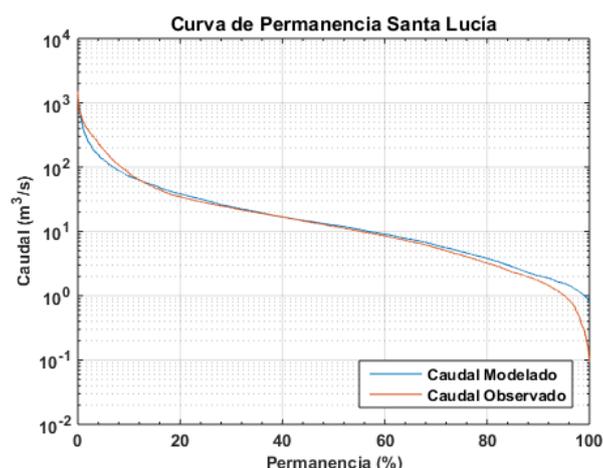
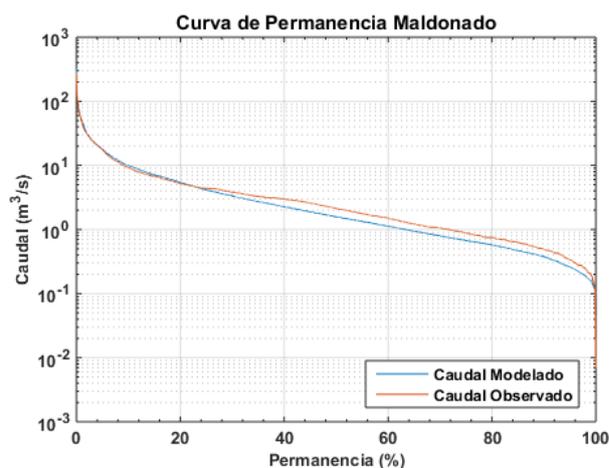
Se implementó en cada una de las cuencas identificadas el modelo hidrológico a paso diario GR4J (Perrin et al. 2003), cuya aplicación satisfactoria en cuencas de Uruguay ya fuera verificada en Chreties et al. (2017) y Narbondo et al. (2018). Estos trabajos han permitido regionalizar para

las cuencas de Uruguay los parámetros del modelo, lo que permite su aplicación en cuencas no aforadas.

Para la aplicación del modelo hidrológico diario, se utilizaron datos de evapotranspiración potencial obtenidos en las estaciones de INIA en el periodo 1982-2011, datos de precipitación del periodo 1981-2011 y los parámetros calculados anteriormente. De esta manera se obtuvo en cada una de las cuencas, la serie de caudales diarios para el período 1982-2011, asociada a la serie de precipitación media diaria y evapotranspiración para el período común de datos (1982-2011).

A efectos de verificar la confiabilidad del modelo hidrológico para este trabajo, se comparan los resultados obtenidos en 3 subcuencas de las cuencas en las cuales se implementó el modelo: arroyo Maldonado, arroyo San Carlos y río Santa Lucía (cuenca de cabecera). Las dos primeras subcuencas corresponden a la cuenca del arroyo Maldonado y la última a la cuenca del río Santa Lucía. A continuación se muestran los coeficientes de Nash-Sutcliffe (NS), de correlación (R2) y el Index of Agreement (d) obtenidos para dichas cuencas. Vale aclarar que se comparan los caudales medidos con los simulados en periodos mayores a 2 años entre los años 2001-2010. Por otro lado se muestran las curvas de permanencia para las cuencas del Maldonado y del Santa Lucía para el período 1982-2011.

	R2	NS	d
Maldonado	0.87	0.74	0.79
San Carlos	0.88	0.76	0.81
Santa Lucía	0.87	0.71	0.79



6.2 Productos generados

Los anexos de resultados/productos de este trabajo se listan a continuación, con sus respectivas aclaraciones:

- 1) Base de datos de precipitación diaria para cada cuenca en el período 1981-2011, incluyendo los datos diarios de todos los pluviómetros con influencia en cada cuenca, así como la serie diaria de precipitación media en la cuenca. Aclaraciones: registros de precipitación medidos en mm, los datos no tienen procesamiento previo, están en formato de presentación del Instituto Uruguayo de Meteorología (INUMET), datos faltantes se representa con -999, traza significa registro menor a 0.1 mm; cada hoja del archivo corresponde a una cuenca, la última columna de cada hoja corresponde a la precipitación media en la cuenca, las cuencas con un solo pluviómetro de influencia no tienen esta última columna. (Archivo Precipitación.xls).
- 2) Serie histórica diaria de caudales simulados mediante el modelo GR4J en cada una de las cuencas identificadas para el período 1982-2011. Aclaraciones: Datos de caudal en m³/s, cada hoja corresponde a una cuenca, las cuencas fueron numeradas del 1 al 24, en la última hoja del archivo se presentan las características principales de cada cuenca y su correspondiente código. (Archivo Caudal.xls)

7 ANEXO II: HINDCAST DE NIVELES

7.1 Modelo regional de marea del Atlántico Sur (ASTide)

Las ondas de marea relevantes para la hidrodinámica en todo el Río de la Plata y la zona de Montevideo fueron generadas utilizando un modelo regional del Atlántico Sur desarrollado en el IMFIA denominando ASTide (Fossati et al., 2014). El modelo numérico MOHID ha sido desarrollado en el Instituto Superior Técnico - Maretec de Portugal y describe el flujo en diversos tipos de cuerpos de agua. Es un modelo de flujo a superficie libre tridimensional baroclínico basado en las ecuaciones de Navier-Stokes con las aproximaciones de Boussinesq e hidrostática. La malla tridimensional está formulada con una aproximación de volúmenes finitos con la posibilidad de utilizar coordenada vertical sigma que permite una buena simulación de los efectos topográficos. En su versión actual el MOHID está subdividido en módulos, cada uno contiene determinada información e interactúa con los demás a través de flujos de información (Martins, Leitao, Silva, & Neves, 2000). El ASTide utiliza la versión bidimensional del modelo MOHID. Se resumen a continuación las principales características de dicha implementación y luego se presenta un ajuste estadístico de los resultados del modelo ASTide a los efectos de mejorar su calidad para ser utilizados como condición de borde para el modelo del Río de la Plata.

7.1.1 Dominio y batimetría

El dominio de cálculo y la batimetría del modelo ASTide se presenta en la Figura 59. La batimetría del área de interés fue generada a partir de datos batimétricos digitalizados extraídos del GEBCO (General Bathymetric Chart of the Ocean) para la zona del dominio exterior al Río de la Plata, y a partir de una carta batimétrica del proyecto FREPLATA y de una serie de datos de batimetría provistos por el Servicio de Hidrografía Naval de la Argentina (SHN) para la zona del Río de la Plata. Se consideró 1m de profundidad mínima. Por otro lado, para representar la línea de costa de la región de estudio se utilizaron datos extraídos del NOAA/NGDC Marine Geology and Geophysics Division. Tanto los datos batimétricos como la línea de costa originales fueron posteriormente procesados a través de filtros y algunas correcciones manuales.

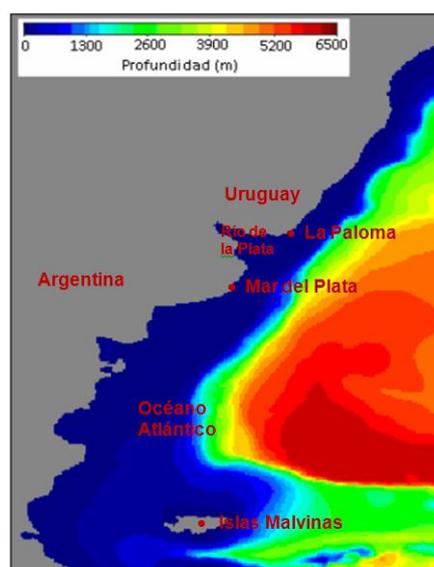


Figura 59: Dominio y batimetría del modelo ASTide (panel izquierdo); ubicación de los puntos en la frontera oceánica donde se impone condición de borde de nivel proveniente del ASTide (panel derecho).

7.1.2 Condiciones de borde

En la superficie libre los flujos convectivos de cantidad de movimiento, salinidad y temperatura son nulos. Esta condición se impone directamente en las ecuaciones considerando que el flujo vertical en las celdas superficiales es cero. Por otro lado, el flujo difusivo de cantidad de movimiento se impone explícitamente en la capa superficial a través de la tensión de corte debida al viento, la cual es calculada a partir de la Ec. 6. Siendo C_D el coeficiente de arrastre, ρ_a la densidad del aire y \vec{W} la velocidad del viento a 10m sobre la superficie libre. El coeficiente de arrastre puede definirse como un valor constante o ser calculado a partir de la formulación de Large & Ponds (Ec. 7) que relaciona linealmente dicho coeficiente con la intensidad del viento.

$$\vec{\tau}_w = C_D \rho_a \vec{W} |\vec{W}| \quad \text{Ec. 6}$$

$$C_D = 0,44 + 0,63 |\vec{W}| \quad \text{Ec. 7}$$

Los datos de vientos y presiones se extrajeron de los reanálisis del National Centers for Environmental Prediction de USA, NCEP-CFSR (Saha et. al., 2010) de 6 hs de resolución temporal y 0.5º de resolución espacial. Se utiliza la formulación de Large & Ponds para determinar la tensión de corte del viento.

Los flujos difusivos de temperatura y salinidad también se imponen nulos en la superficie libre.

También en el fondo la condición de borde impuesta para los flujos advectivos es que sean nulos. El flujo difusivo de cantidad de movimiento por la cara inferior de las celdas de fondo se impone como una tensión de corte que se calcula por una ley cuadrática en función de la velocidad V de la celda de fondo y el coeficiente drag de fondo C_f (Ec. 8). Este último puede calcularse a partir del número de Manning n de acuerdo a la Ec. 9, donde h es la profundidad local y g la aceleración de la gravedad. Se utilizó una rugosidad de fondo definida a partir del número de Manning igual a 0,005. Los flujos difusivos de temperatura y salinidad en el fondo son nulos.

$$\vec{\tau}_w = C_f \vec{V} |\vec{V}| \quad \text{Ec. 8}$$

$$C_f = \frac{2gn^2}{h^{1/3}} \quad \text{Ec. 9}$$

Las fronteras laterales abiertas se introducen como forma de limitar el dominio de cálculo a la región de interés. En estas fronteras deben imponerse valores de las variables de cálculo de forma de garantizar que la información correspondiente a lo que sucede fuera del dominio ingrese a la zona de cálculo y deben permitir que las ondas del interior del dominio se propaguen a través de las mismas y que el fluido pase libremente por éstas. La condición de nivel se utiliza en las fronteras influenciadas por la marea, la de caudal para representar la descarga de afluentes, y también se pueden imponer velocidades, temperaturas, salinidad, etc. Por otro lado, el MOHID permite usar el esquema de relajación Blumberg-Kantha como condición de borde en la frontera abierta (Ec. 10), la cual se encarga de transmitir la información de un modelo global a un modelo regional.

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} + c n \nabla \eta = \frac{\eta_{ref} - \eta}{T_{lag}} \quad \text{Ec. 10}$$

Donde η es el nivel de la superficie libre calculado con el modelo, η_{ref} es el nivel de la superficie libre impuesto por la solución de referencia, c es la velocidad de fase de la onda y T_{lag} el tiempo de relajación. Se utilizó la condición de relajación Blumberg-Kantha en las fronteras abiertas con tiempo de relajación de 100 s en aguas profundas, 1000 s en aguas poco profundas y transición lineal.

La condición de borde de la frontera oceánica fue utilizada para imponer el efecto de la marea astronómica sobre el dominio de cálculo, para lo cual se calculó la elevación de la superficie libre en celda por medio de la frontera oceánica (102 celdas en la frontera Sur y 152 en la Este, totalizando 254 celdas del borde) a partir de la superposición de 13 componentes armónicas de la marea: M2, N2, S2, K2, 2N2, O1, Q1, K1, P1, Mf, Mm, Mtm, MSqm. Los valores de las amplitudes y fases de estas componentes de la marea astronómica se extraen de la solución del atlas global de Mareas FES2004 (Lyard et al, 2006).

En lo que refiere al paso de tiempo de cálculo se consideró $dt = 180$ s. Para la parametrización de la turbulencia se utilizó la formulación de Smagorinsky con coeficiente igual a 0,1 para el cálculo de la viscosidad horizontal y una viscosidad vertical constante igual a 0,001. Además se utilizó un filtro bi-harmónico de coeficiente $1e9$. El filtro bi-harmónico es un término adicional que se agrega en el flujo horizontal turbulento viscoso que filtra las oscilaciones de alta frecuencia en un modelo numérico de advección-difusión.

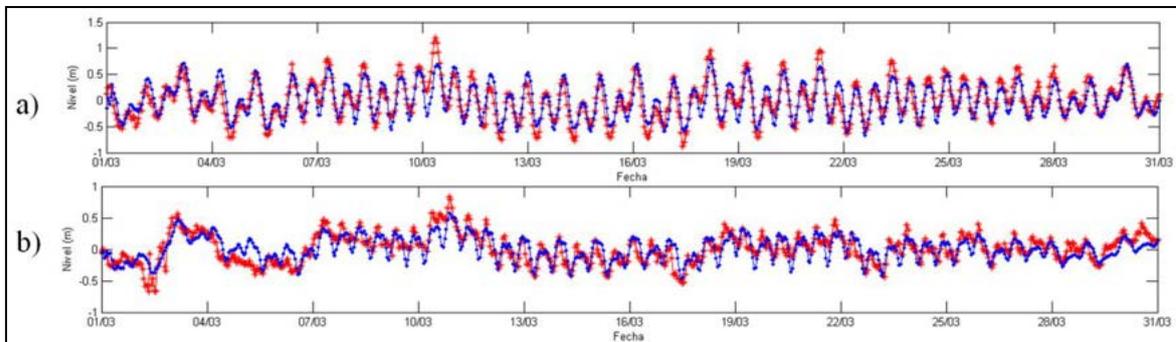


Figura 60: Comparación resultados del modelo ASTide con mediciones de nivel para marzo 2004 en a) Mar del Plata y b) La Paloma (rojo: mediciones, azul: modelo).

El modelo fue ajustado en proyectos previos (Fossati et al., 2014) para reproducir correctamente las ondas que ingresan al Río de la Plata. A modo de ejemplo se presenta en la Figura 60 la comparación entre niveles medidos y obtenidos con el modelo regional ASTide en Mar del Plata y en la Paloma, donde se observa la correcta representación del modelo.

En el apartado siguiente se presenta una corrección estadística de los resultados del modelo ASTide a los efectos de mejorar su calidad para ser utilizados como condición de borde del modelo del Río de la Plata.

7.2 Corrección estadística de los resultados del modelo ASTide

En esta sección se describe el proceso de calibración de los datos de nivel modelados con el modelo ASTide en Mar del Plata a partir de datos medidos en estaciones de Mar del Plata. La calibración se realiza para los datos modelados que luego se ingresan como condición de borde al modelo del Río de la Plata.

Se tienen datos medidos horarios en Mar del Plata en periodos comprendidos entre 1987 hasta el año 2017. Para realizar la calibración se trabaja con la oscilación respecto al nivel medio y no con el nivel medio total, debido a inconsistencias observadas sobre el nivel de referencia respecto al cual estaban tomadas las medidas.

En la Tabla 22 se muestra la cantidad de datos horarios medidos faltantes, desviación estándar de datos medidos y modelados, coeficiente de correlación y RMSE entre datos medidos y modelados con el modelo ASTide para cada año.

Tabla 22- Información de datos medidos horarios en Mar del Plata.

	Datos faltantes	Desviación estándar medidos	Desviación estándar modelo	Coefficiente de correlación	RMSE
1987	8016	0.42	0.37	0.89	0.20
1991	6555	0.39	0.36	0.92	0.16
1992	7341	0.39	0.36	0.92	0.16
1993	3627	0.43	0.35	0.88	0.21
1997	3671	0.44	0.36	0.88	0.21
2000	7344	0.40	0.35	0.90	0.18
2002	8076	0.40	0.36	0.88	0.20
2003	5856	0.43	0.37	0.90	0.19
2004	1619	0.44	0.36	0.89	0.20
2005	723	0.44	0.36	0.88	0.21
2006	2479	0.44	0.36	0.76	0.29
2007	7296	0.44	0.36	0.91	0.19
2008	3	0.43	0.36	0.90	0.19
2009	7935	0.39	0.37	0.89	0.19
2010	1996	0.44	0.37	0.91	0.19
2011	46	0.43	0.36	0.90	0.19
2012	0	0.43	0.36	0.90	0.19
2013	204	0.42	0.35	0.90	0.19
2014	0	0.41	0.35	0.91	0.17
2015	911	0.44	0.35	0.90	0.19

7.2.1 Calibración

El método utilizado para calibrar los niveles es el de calibración por cuantiles. Los niveles pueden descomponerse de diferentes formas en las componentes que lo conforman. De esta forma se

decide probar descomponiendo los niveles y calibrando de diferentes maneras para determinar cuál arroja el mejor resultado.

Desde la Tabla 23 a la Tabla 29 se muestran los resultados obtenidos de RMSE y coeficiente de correlación para los diferentes métodos analizados. En este punto no se hace un énfasis particular en lograr el mejor ajuste para cada caso, sino que solo se define el método.

Se tiene:

$$Nivel\ total = MA + MMX\ días + MM24\ horas$$

Donde:

$$MMX\ días = \frac{Nivel\ total}{x\ días}$$

$$MM24\ horas = \frac{Nivel\ total - MMX}{24\ horas}$$

Y se calcula la marea astronómica como:

$$MA = Nivel\ total - MMX\ días - MM24\ horas$$

En la tabla x se muestran los resultados obtenidos para el método 1. En este caso se calibra directamente con la oscilación total, sin separar en componentes.

Tabla 23- RMSE y coeficiente de correlación entre datos medidos y modelados y datos medidos y modelados calibrados según método 1.

Método 1				
	RMSE		Correlación	
	Modelado	Modelado Calibrado	Modelado	Modelado Calibrado
Serie completa	0.188	0.191	0.900	0.901

En la tabla x se muestran los resultados obtenidos para el método 2. En este caso se calibra solamente la media móvil de 24 horas y se reconstruye la serie.

Tabla 24- RMSE y coeficiente de correlación entre datos medidos y modelados y datos medidos y modelados calibrados según método 2.

Método 2				
	RMSE		Correlación	
	Modelado	Modelado Calibrado	Modelado	Modelado Calibrado
MM24	0.129	0.114	0.900	0.901
Serie completa	0.188	0.174	0.900	0.915

En la tabla x se muestra el resultado obtenido para el método 3. En este caso se descompone el nivel en 3 componentes: media móvil semanal, media móvil 24 horas y marea astronómica. El método calibra en dos pasos. Se separa la media móvil semanal, se calibra la misma y se

reconstruye la serie. Una vez reconstruida la serie se separa la media móvil de 24 horas, se calibra la misma y se reconstruye la serie.

Tabla 25- RMSE y coeficiente de correlación entre datos medidos y modelados y datos medidos y modelados calibrados según método 3.

Método 3				
	RMSE		Correlación	
	Modelado	Modelado Calibrado	Modelado	Modelado Calibrado
Paso 1	0.188	0.185	0.900	0.903
Paso 2	0.188	0.184	0.900	0.904

En la tabla x se muestra el resultado obtenido para el método 4. En este caso la calibración se realiza descomponiendo el nivel en la media móvil de 5 días, media móvil de 24 horas y marea astronómica. Se calibra por separado cada una de las componentes y luego se reconstruye la serie. Se muestra el resultado para el caso de marea astronómica calibrada individualmente y no calibrada individualmente. El resultado mejora al no calibrar la marea astronómica individualmente.

Tabla 26- RMSE y coeficiente de correlación entre datos medidos y modelados y datos medidos y modelados calibrados según método 4.

Método 4				
	RMSE		Correlación	
	Modelado	Modelado Calibrado	Modelado	Modelado Calibrado
MM 5 días	0.095	0.090	0.858	0.855
MM24	0.078	0.064	0.932	0.932
MA	0.126	0.127	0.930	0.931
Serie completa	0.188	0.177	0.900	0.913
Serie completa sin modificar MA	0.188	0.176	0.900	0.913

En la tabla x se muestra el resultado obtenido para el método 5. En este caso la calibración se realiza descomponiendo el nivel en la media móvil de 6 días, media móvil de 24 horas y marea astronómica. Como en el método anterior se calibra por separado cada una de las componentes y luego se reconstruye la serie. Se muestra el resultado para el caso de marea astronómica calibrada individualmente y no calibrada individualmente. Se observa nuevamente que el resultado mejora al no calibrar la marea astronómica individualmente.

Tabla 27- RMSE y coeficiente de correlación entre datos medidos y modelados y datos medidos y modelados calibrados según método 5.

Método 3				
	RMSE		Correlación	
	Modelado	Modelado Calibrado	Modelado	Modelado Calibrado

MM 6 días	0.091	0.087	0.847	0.845
MM24	0.082	0.068	0.929	0.930
MA	0.129	0.129	0.929	0.930
Serie completa	0.188	0.175	0.900	0.915
Serie completa sin modificar MA	0.188	0.174	0.900	0.914

En la tabla x se muestra el resultado obtenido para el método 6. En este caso la calibración se realiza descomponiendo el nivel en la media móvil semanal, media móvil de 24 horas y marea astronómica. Se calibra por separado cada una de las componentes y luego se reconstruye la serie. Se muestra el resultado para el caso de marea astronómica calibrada individualmente y no calibrada individualmente. Se observa nuevamente que el resultado mejora al no calibrar la marea astronómica individualmente.

Tabla 28- RMSE y coeficiente de correlación entre datos medidos y modelados y datos medidos y modelados calibrados según método 6.

Método 6				
	RMSE		Correlación	
	Modelado	Modelado Calibrado	Modelado	Modelado Calibrado
MM 7 días	0.087	0.085	0.836	0.834
MM24	0.086	0.072	0.929	0.929
MA	0.126	0.127	0.929	0.930
Serie completa	0.188	0.177	0.900	0.913
Serie completa sin modificar MA	0.188	0.175	0.900	0.913

En la tabla x se muestra el resultado obtenido para el método 7. En este caso la calibración se realiza descomponiendo el nivel en la media móvil 8 días, media móvil de 24 horas y marea astronómica. Se calibra por separado cada una de las componentes y luego se reconstruye la serie. Se muestra el resultado para el caso de marea astronómica calibrada individualmente y no calibrada individualmente. Se observa que el resultado no cambia notoriamente al calibrar la marea astronómica individualmente.

Tabla 29- RMSE y coeficiente de correlación entre datos medidos y modelados y datos medidos y modelados calibrados según método 7.

Método 7				
	RMSE		Correlación	
	Modelado	Modelado Calibrado	Modelado	Modelado Calibrado
MM 8 días	0.084	0.084	0.824	0.820
MM24	0.091	0.075	0.929	0.929
MA	0.127	0.128	0.929	0.930
Serie completa	0.188	0.175	0.900	0.914
Serie completa sin modificar MA	0.188	0.175	0.900	0.914

A través del proceso iterativo se determina que el mejor ajuste entre datos medidos y modelados se alcanza ajustando por separado la media móvil de 6 días, la media móvil de 24 horas, y sin ajustar la marea astronómica (tabla x).

7.2.2 Ajuste

Una vez definido el método se calibra buscando el mejor ajuste. Se utilizan los datos correspondientes a los años desde el 2002 al 2012 inclusive (54421 datos) para calibrar mientras que los datos correspondientes a los años desde 2013 al 2015 inclusive (21967 datos) se utilizan para verificar.

Según el método elegido, se descompone la oscilación en la media móvil de 6 días, media móvil de 24 horas y marea astronómica. Se calibran la media móvil de 6 días y la media móvil de 24 horas individualmente y luego se reconstruye la serie.

7.2.2.1 Calibración de la media móvil 6 días

En la Figura 61 se muestra el gráfico de la media móvil de 6 días modelada vs la medida, en azul la recta X=Y.

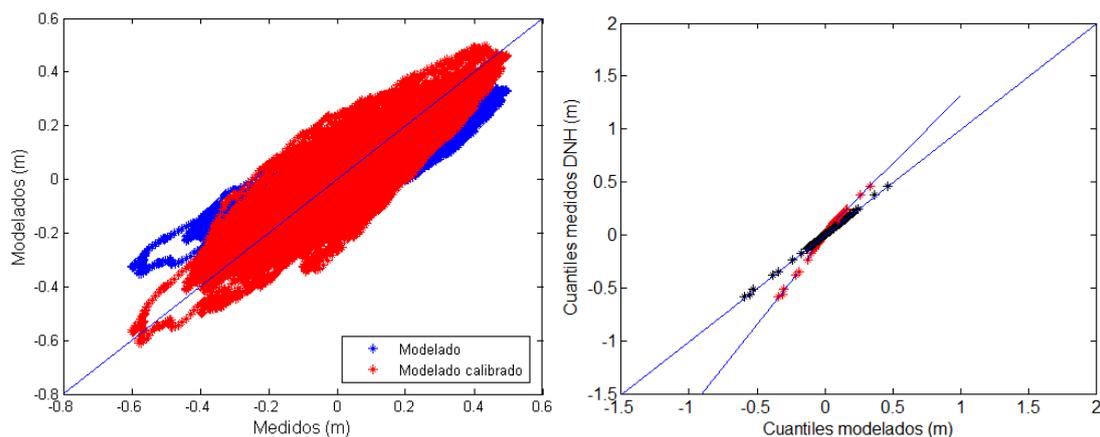


Figura 61- Media móvil de 6 días modelada vs media móvil de 6 días medida (Azul) (Panel Izquierdo). Cuantiles no calibrados (rojo), ajuste de cuantiles (azul) y cuantiles calibrados (negro) (Panel derecho).

Se determina ajustar los cuantiles con tres funciones diferentes. Una función que ajusta hasta el cuantil 0.01, otra función que va desde los cuantiles mayores al 0.01 hasta el cuantil 0.845 y otra función para los cuantiles mayores al 0.845.

Se llega entonces al ajuste:

$$f(x) = \begin{cases} 1.597x - 0.04802 & x < -0.127 \\ 6699x^6 - 2147x^5 - 498.3x^4 + 27.8x^3 + 2.7x^2 + 1.5x - 0.0034, & -0.127 \leq x < 0.089 \\ 1.29x + 0.032, & x \geq 0.089 \end{cases}$$

En la Tabla 30 se muestra el RMSE para la serie de la media móvil 6 días modelada y para la calibrada, así como la correlación para la misma modelada y modelada calibrada.

Tabla 30- RMSE y coeficiente de correlación entre media móvil 6 días medida y modelada y media móvil 6 días medida y modelada calibrada para el periodo de calibración.

	RMSE		Correlación	
	Modelado	Modelado Calibrado	Modelado	Modelado Calibrado
MM 6 días	0.082	0.076	0.859	0.862

En la Figura 61 (panel izquierdo) se muestra el gráfico de la media móvil de 6 días modelada calibrada vs la medida en rojo, al contrastarla con los datos no calibrados se observa una mejora respecto a la recta de 45°. En la Figura 61 (panel derecho) se muestran en rojo los cuantiles no calibrados, en azul el mejor ajuste y en negro los cuantiles calibrados. Se observa un buen ajuste de los polinomios a los cuantiles no calibrados, lo cual se confirma observando que los cuantiles calibrados se posicionan en la recta de 45 grados.

7.2.2.2 Calibración de la media móvil 24 horas

En la Figura 62 (panel izquierdo) se muestra el gráfico de la media móvil 24 horas modelada vs la medida, en azul la recta X=Y.

Se determina ajustar los cuantiles con tres funciones diferentes. Una función que ajusta hasta el cuantil 0.005, otra función que va desde los cuantiles mayores al 0.005 hasta el cuantil 0.845 y otra función para los cuantiles mayores al 0.845.

Se llega entonces al ajuste:

$$f(x) = \begin{cases} 1.2x - 0.128 & x < -0.305 \\ 3.8x^4 + 0.08x^3 - 0.195x^2 + 1.5x - 0.0006, & -0.305 \leq x < 0.126 \\ 1.36x + 0.033, & x \geq 0.126 \end{cases}$$

En la (panel izquierdo) se muestra el gráfico de la media móvil de 24 horas días modelada calibrada vs la medida en rojo, en los datos calibrados se observa una notoria mejora respecto a la recta X=Y. En la Figura 62 (panel derecho) se muestran en rojo los cuantiles no calibrados, en azul el mejor ajuste y en negro los cuantiles calibrados.

Tabla 31- RMSE y coeficiente de correlación entre media móvil 24 horas medida y modelada y media móvil 24 horas medida y modelada calibrada para el periodo de calibración.

	RMSE		Correlación	
	Modelado	Modelado Calibrado	Modelado	Modelado Calibrado
MM 6 días	0.089	0.072	0.934	0.934

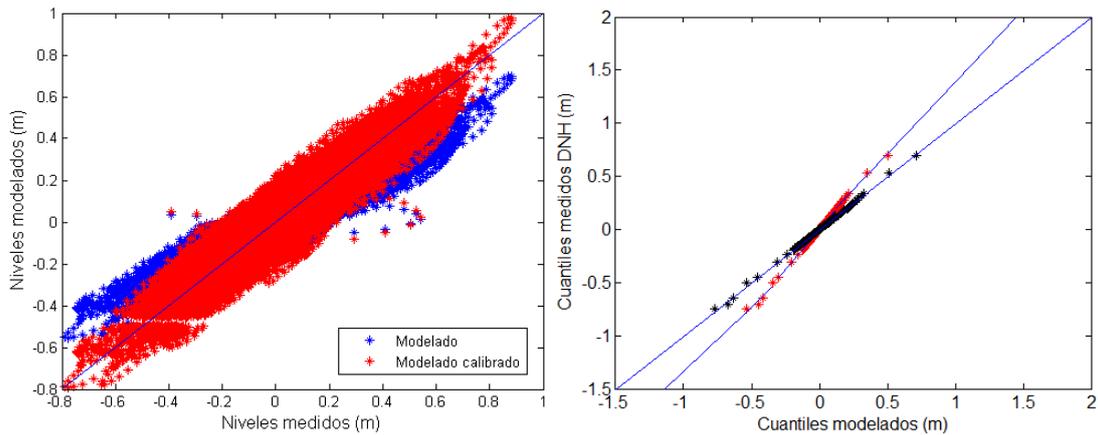


Figura 62- Media móvil de 24 horas modelada vs media móvil de 24 horas medida (Azul) (Panel Izquierdo). Cuantiles no calibrados (rojo), ajuste de cuantiles (azul) y cuantiles calibrados (negro) (Panel derecho).

7.2.2.3 Resultados de la calibración y la verificación

En la Tabla 32 se muestra el RMSE y la correlación entre el modelo y el modelo calibrado con las medidas, para la media móvil de 6 días, la media móvil de 24 horas y la serie reconstruida para el caso de los datos de calibración. Se observa una disminución de 1,5 cm en el CRMSE y un aumento de 0.014 en la correlación.

En la Figura 63 (panel izquierdo) se muestran los datos modelados vs los datos medidos sin calibrar (azul) y calibrados (rojo) correspondientes al periodo de calibración. Se observa una mejoría respecto a la recta X=Y.

Tabla 32- RMSE y correlación para el período de calibración.

Calibración	2002-2012			
Cantidad de datos comparados	54421			
	RMSE		Correlación	
	Modelado	Modelado Calibrado	Modelado	Modelado Calibrado
MM 6 días	0.082	0.076	0.859	0.862
MM24	0.089	0.072	0.934	0.934
Serie completa sin modificar MA	0.192	0.177	0.898	0.913
Diferencia entre calibrado y no calibrado	0.015		0.014	

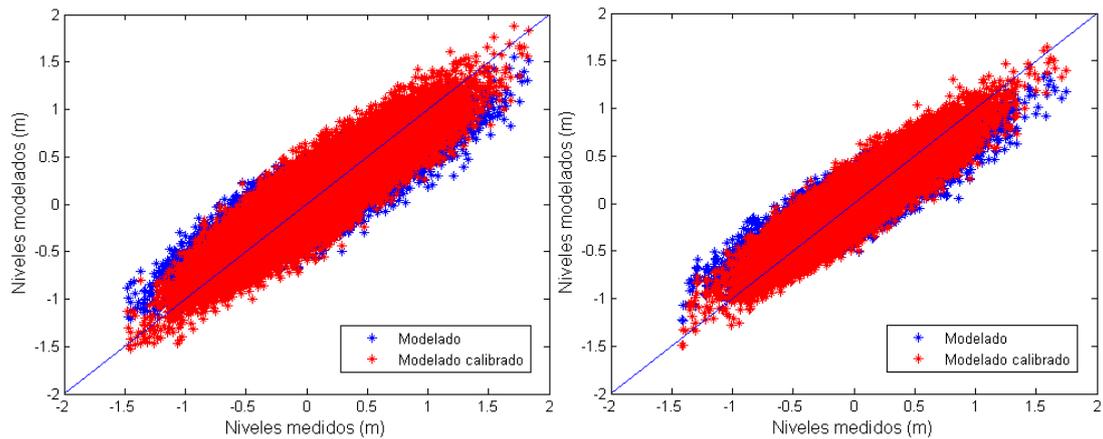


Figura 63- Datos medidos vs datos modelados (azul) y modelados calibrados (rojo), para el periodo de calibración (Panel izquierdo) y periodo de verificación (Panel derecho).

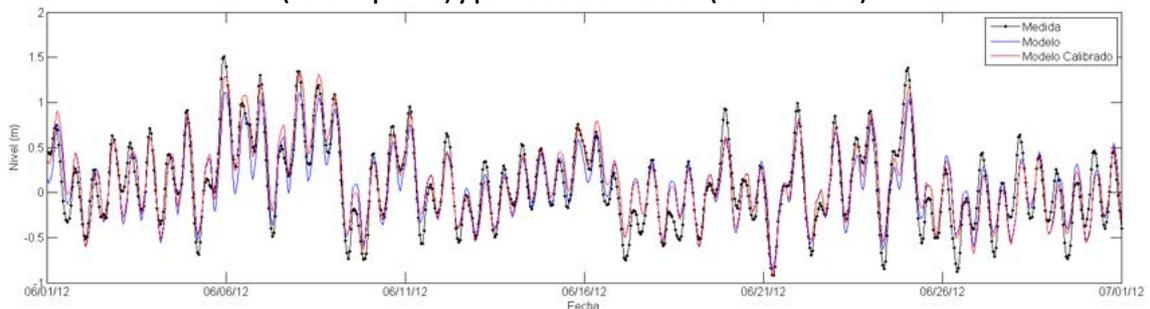


Figura 64- Serie temporal de datos de nivel medidos (negro), modelados (azul), y modelados calibrados (rojo) durante el mes de Junio de 2012 (Calibración).

En la Tabla 33 se muestra el CRMSE y la correlación entre el modelo y el modelo calibrado con las medidas, para la media móvil de 6 días, la media móvil de 24 horas y la serie reconstruida para el caso de los datos de verificación. Se observa una disminución de 1,7 cm en el CRMSE y un aumento de 0.015 en la correlación.

En la Figura 65 (panel derecho) se muestran los datos modelados vs los datos medidos sin calibrar (azul) y calibrados (rojo) correspondientes al periodo de verificación. Se observa que se mantiene la mejoría respecto a la recta X=Y para los datos de verificación.

Tabla 33- RMSE y correlación para el periodo de verificación.

Verificación	2013-2015			
Cantidad de datos comparados	21967			
	RMSE		Correlación	
	Modelado	Modelado Calibrado	Modelado	Modelado Calibrado
MM 6 días	0.077	0.073	0.847	0.851
MM24	0.091	0.072	0.933	0.932
Serie completa sin modificar MA	0.182	0.166	0.905	0.920
Diferencia entre calibrado y no calibrado	0.017		0.015	

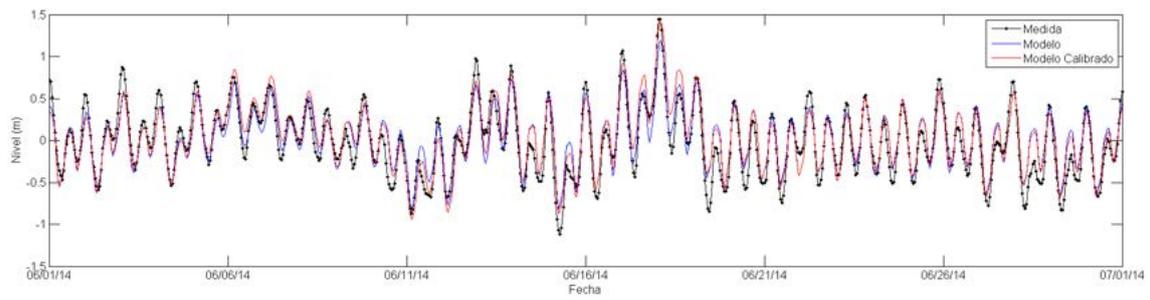


Figura 65- Serie temporal de datos de nivel medidos (negro), modelados (azul), y modelados calibrados (rojo) durante el mes de Junio de 2014 (Verificación).