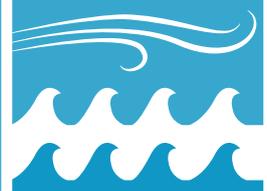


# NAP Costas

Plan Nacional de  
Adaptación Costera  
de Uruguay

Documento preparatorio

**Validación de los vientos de reanálisis  
para la generación de hindcasts de oleaje  
y nivel del mar en la costa uruguaya**



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

<u>Documento:</u>	IMFIA_CCURU1_d0001.v0.1_Vientos_y_niveles	
<u>Versión</u>	0.1 ( <b>BORRADOR</b> )	
<u>Fecha:</u>	31/05/2018	
<u>Autores:</u>	Rodrigo Alonso Michelle Jackson Pablo Santoro Sebastián Solari	IMFIA-FING-UdelaR IMFIA-FING-UdelaR IMFIA-FING-UdelaR IMFIA-FING-UdelaR
<u>Contraparte:</u>	Mónica Gómez Iñigo Losada Melisa Menendez Juan Ortiz	Cambio Climático MVOTMA IH Cantabria IH Cantabria IH Cantabria

---

## TABLA DE CONTENIDO

1	Validación de los vientos de reanálisis para la generación de hindcasts de oleaje y nivel de mar en la costa uruguaya .....	3
1.1	Introducción .....	3
1.2	Metodología .....	3
1.2.1	Datos disponibles .....	3
1.2.2	Consideraciones preliminares .....	5
1.2.3	Análisis realizados .....	6
1.3	Datos altimétricos: dominio 58-52W/38-32S. ....	7
1.4	Comparación entre distintas bases de datos. ....	11
1.5	Análisis de extremos en el Río de la Plata medio e interior .....	15
1.5.1	Río de la Plata Medio .....	15
1.5.2	Río de la Plata Interior .....	16
1.6	Verificación con mediciones in-situ .....	22
1.7	Conclusiones.....	22
2	Simulación retrospectiva de niveles.....	24
2.1	Introducción .....	24
2.2	Metodología .....	24
2.3	Información utilizada .....	26
2.3.1	Información batimétrica.....	26
2.3.2	Información meteorológica.....	26
2.3.3	Datos de caudales fluviales .....	27
2.3.4	Datos de niveles .....	27
2.4	Modelo hidrodinámico.....	31
2.4.1	Descripción del modelo.....	31
2.4.2	Dominio y malla de cálculo .....	34
2.4.3	Configuración del modelo .....	35
2.4.4	Condiciones de borde.....	36
2.4.5	Condición inicial .....	37
2.5	Resultados.....	37
2.5.1	Calibración.....	37
2.5.2	Validación .....	46
2.5.3	Síntesis.....	48
3	REFERENCIAS.....	50

---

4	Anexo: Hindcast de niveles .....	52
4.1	Modelo regional de marea del Atlántico Sur (AS tide) .....	52
4.1.1	Dominio y batimetría .....	52
4.1.2	Condiciones de borde.....	53
4.2	Corrección estadística de los resultados del modelo AS tide .....	55
4.2.1	Calibración.....	55
4.2.2	Ajuste.....	59

BORRADOR

---

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

## 1.1 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.

## 1.2 Metodología

### 1.2.1 Datos disponibles

#### 1.2.1.1 *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.

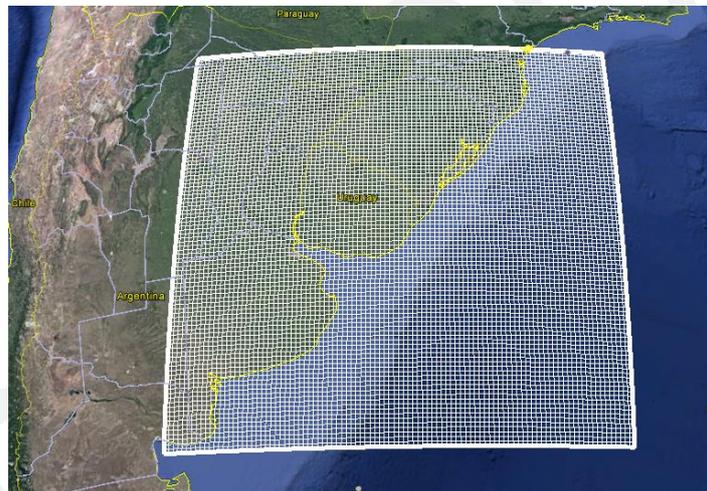
---

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  $0.3^\circ$  y  $0.2^\circ$  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 ( $0.5^\circ$  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**

#### 1.2.1.2 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 1.3.

#### 1.2.1.3 Datos medidos in situ

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

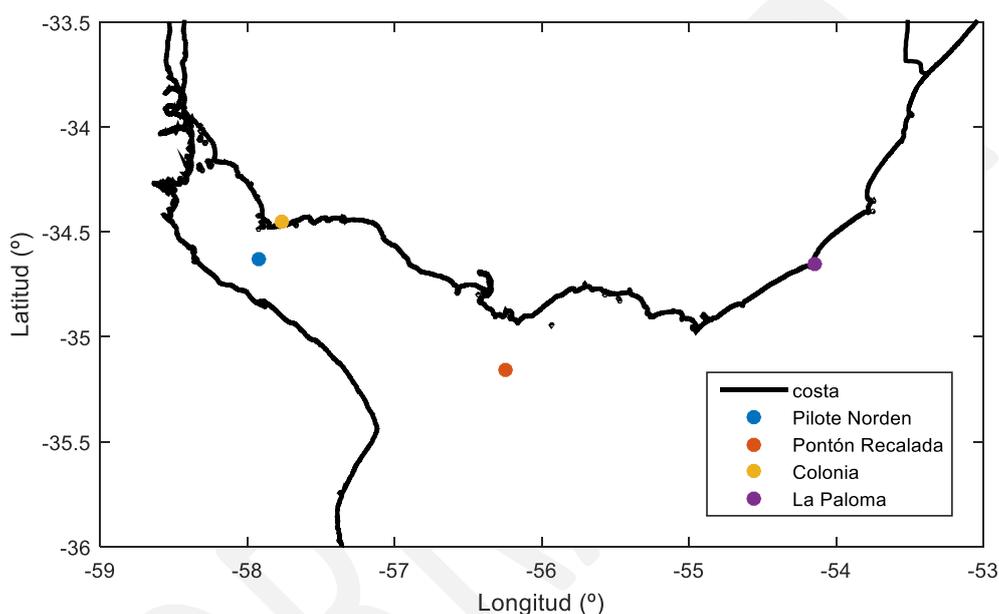
- Pilote Norden, ubicado en el Río de la Plata (coordenadas  $57.9196^\circ$  W,  $34.6278^\circ$  S).
- Pontón Recalada, ubicado en el Río de la Plata (coordenadas aproximadas  $56.25^\circ$  W,  $35.16^\circ$  S)
- Estación meteorológica de Colonia del Sacramento (coordenadas  $57.768^\circ$  W,  $34.452^\circ$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

### 1.2.2 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).

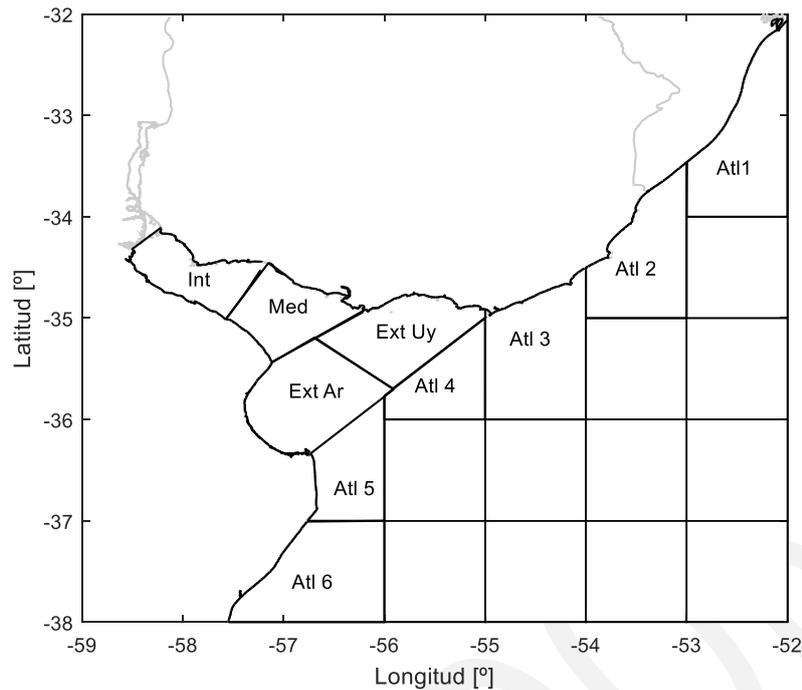


Figura 3.-División del dominio considerada en el análisis de los datos altimétricos.

### 1.2.3 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,

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

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

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

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

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  $\sigma^2$  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.

### 1.3 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  $\sim 10$  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.

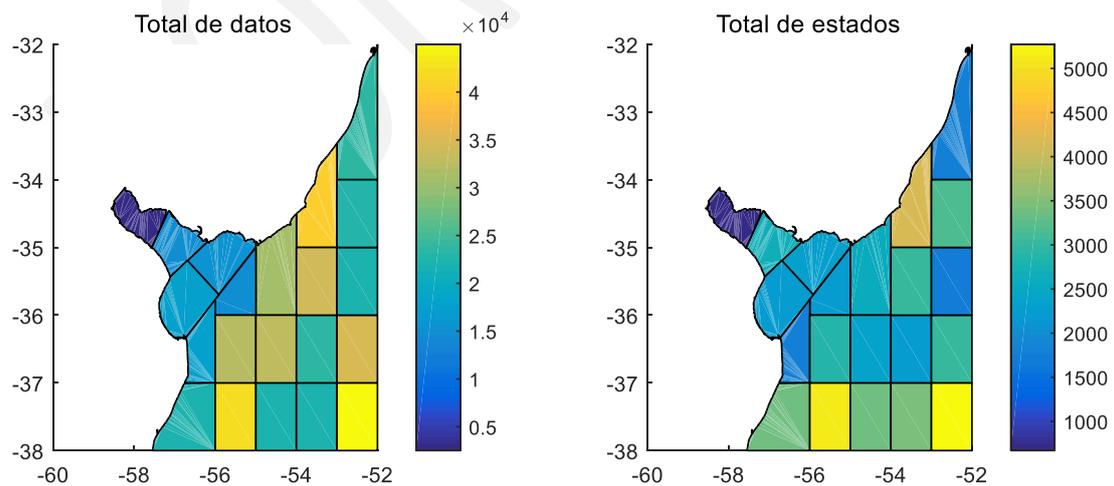


Figura 4.-Cantidad de datos altimétricos (izq.) y cantidad de estados registrados

**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	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	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	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	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	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	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	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	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	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 (AtI3)**

	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	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	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	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	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	3028
Jason2	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 (AtI2)**

	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	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	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	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	5097
Jason2	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	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	

#### 1.4 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  $0.5^\circ$  y paso temporal de 6h (CFSR coarse); reanálisis CFSR de resolución espacial  $0.3^\circ$  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.

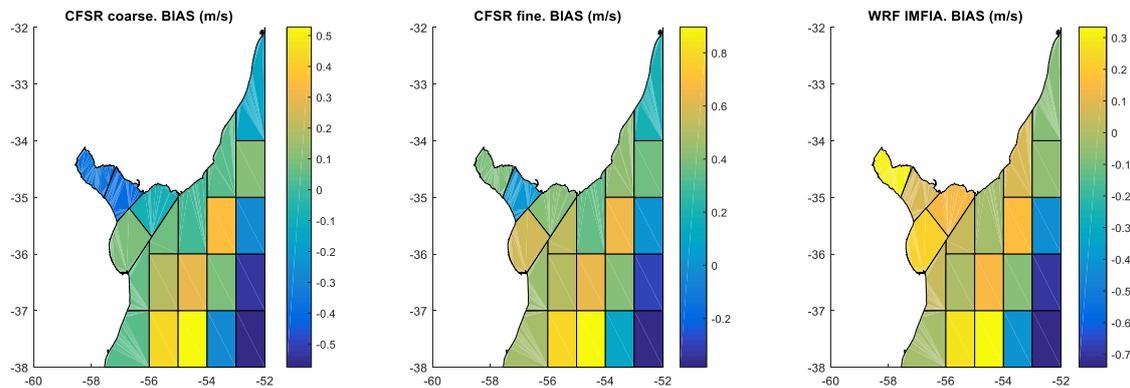


Figura 5.- Sesgo obtenido al comparar los distintos reanálisis con datos altimétricos.

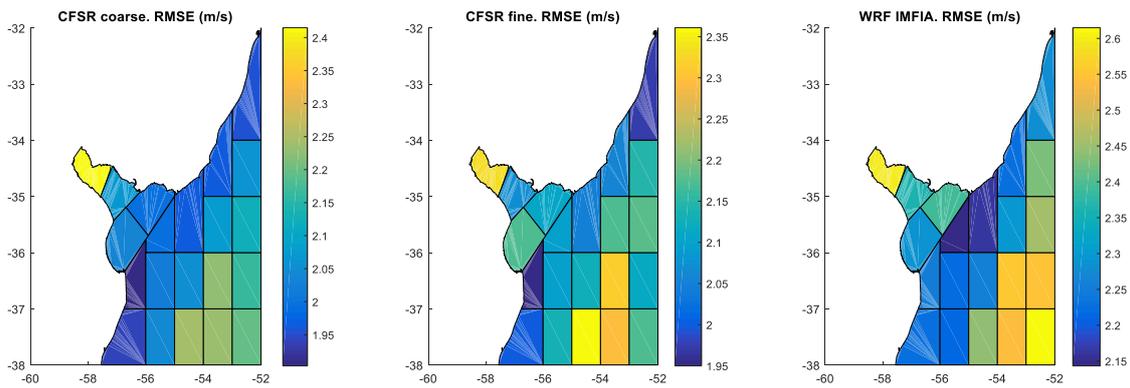


Figura 6.- Error medio cuadrático obtenido al comparar los distintos reanálisis con datos altimétricos.

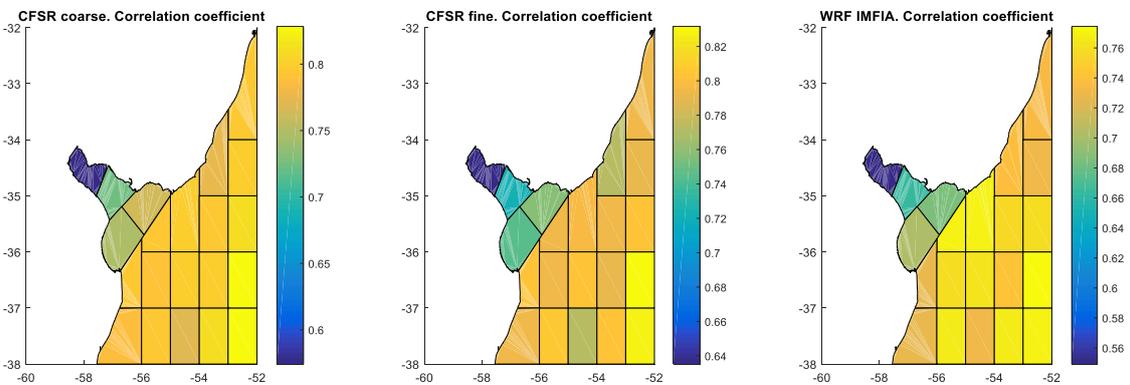


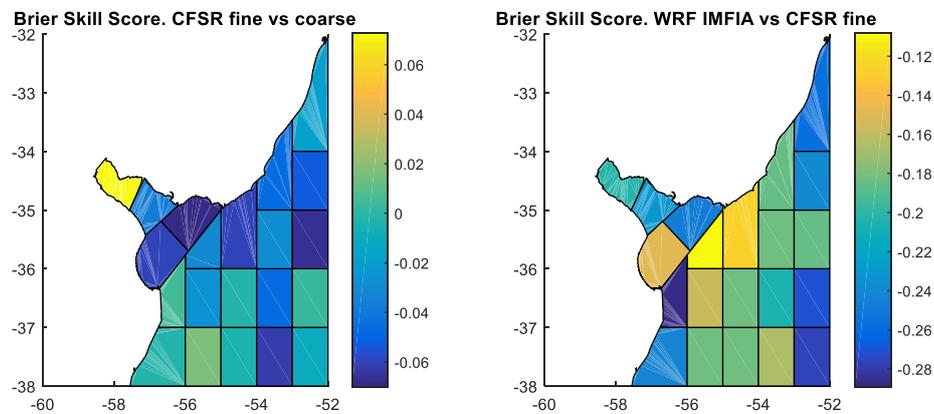
Figura 7.- Coeficiente de correlación obtenido al comparar los distintos reanálisis con datos altimétricos.

---

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.

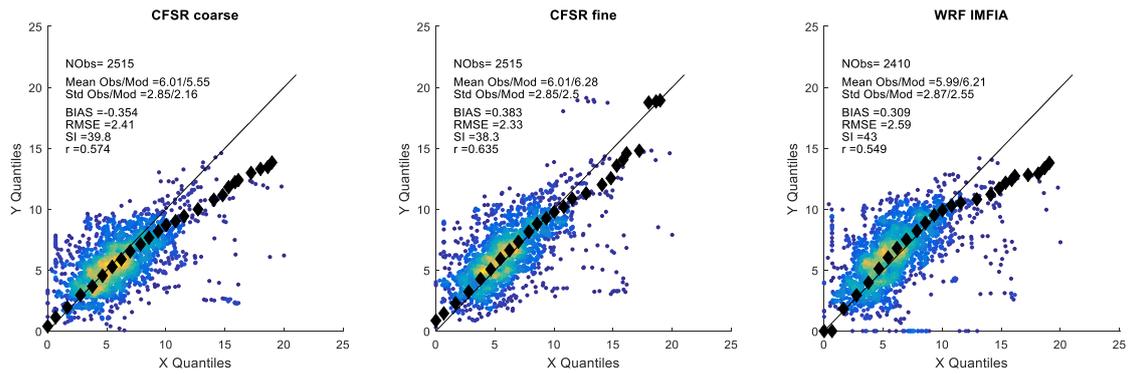


Figura 9.- Diagrama de dispersión, gráfico cuantil-cuantil y distintas medidas de error. Río de la Plata interior (Int).

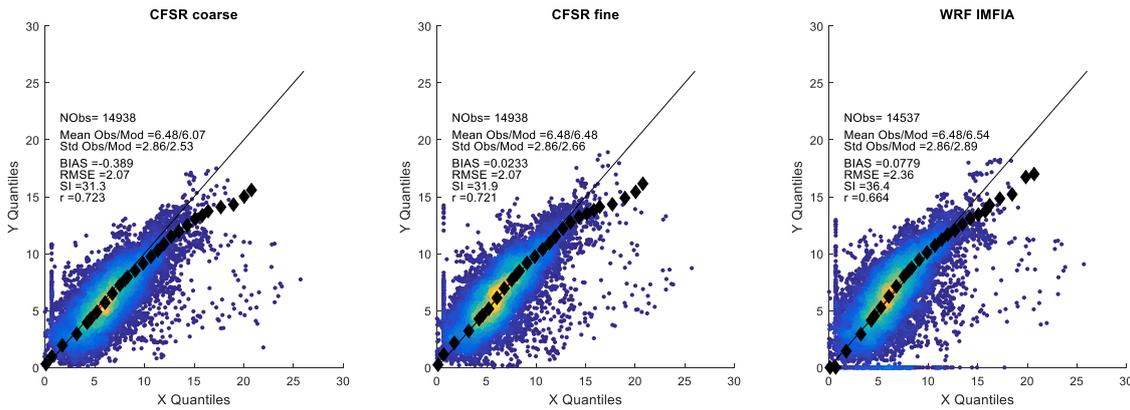


Figura 10.- Diagrama de dispersión, gráfico cuantil-cuantil y distintas medidas de error. Río de la Plata medio (Med).

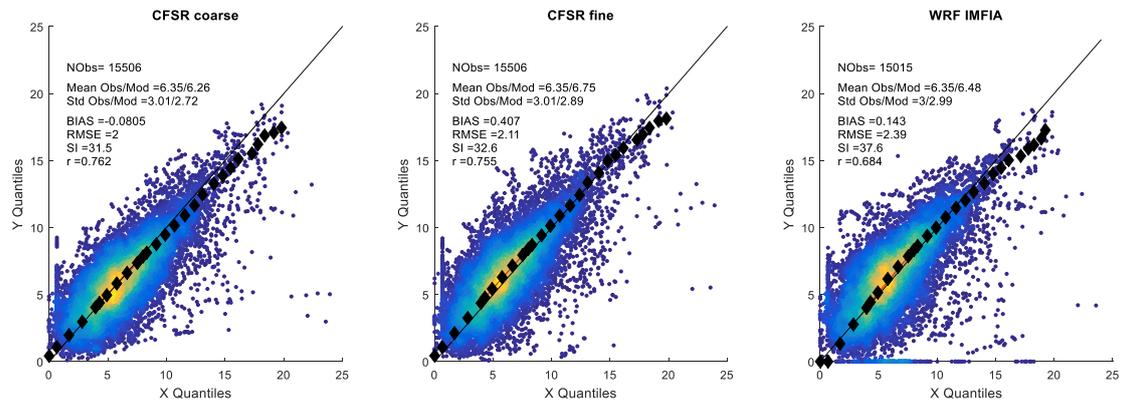
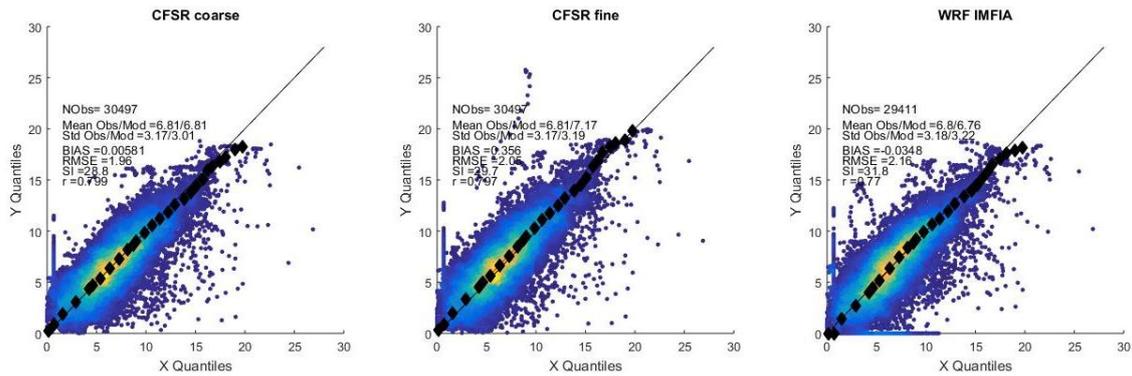
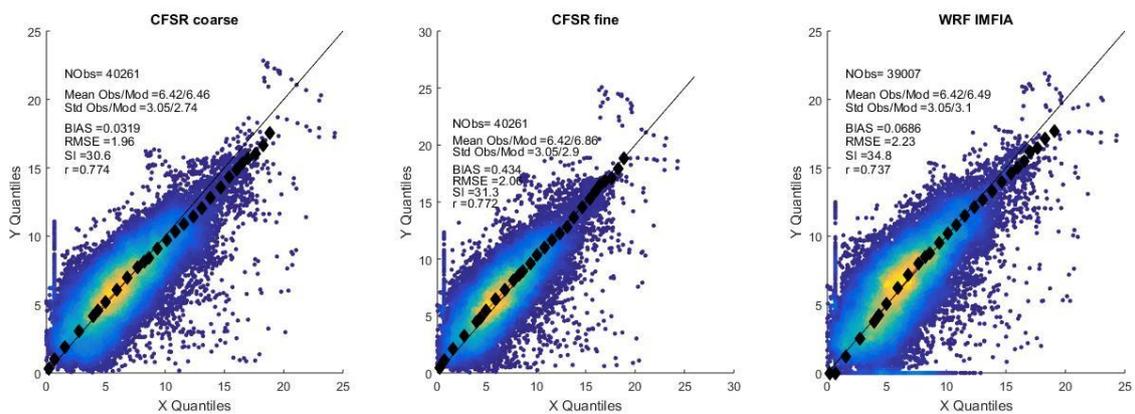


Figura 11.- Diagrama de dispersión, gráfico cuantil-cuantil y distintas medidas de error. Río de la Plata exterior (Ext\_Uy).



**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<sub>fine</sub> (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.

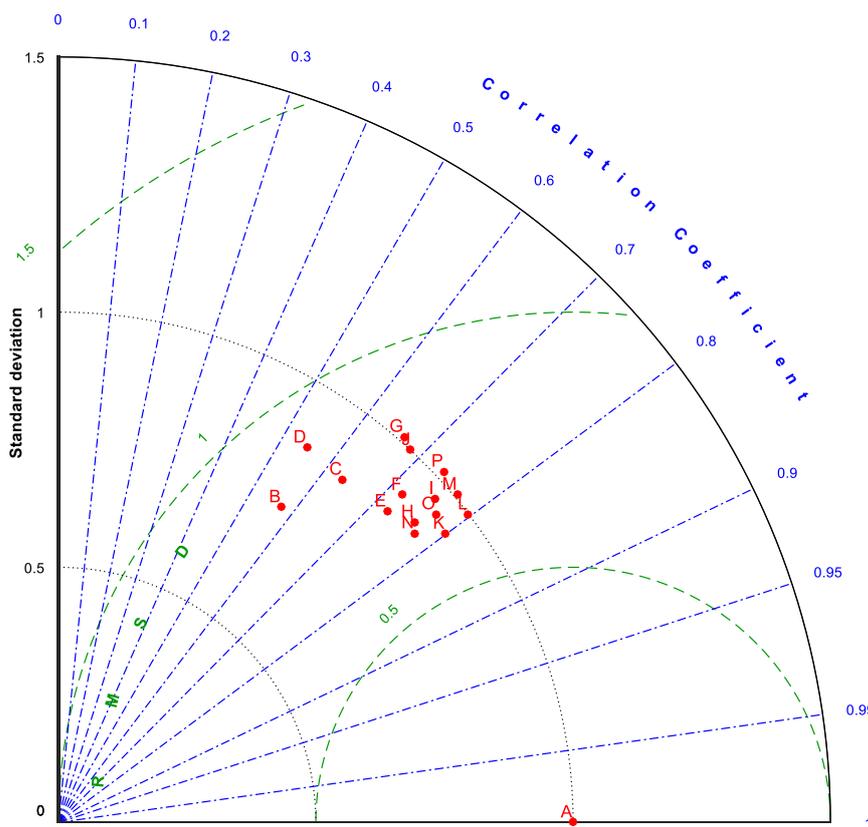


Figura 14.- Diagrama de Taylor normalizado. A corresponde a los datos altimétricos. B (CFSR<sub>coarse</sub>), C(CFSR<sub>fine</sub>) y D (WRF-IMFIA) corresponden al Río de la Plata interior (Int). E (CFSR<sub>coarse</sub>), F(CFSR<sub>fine</sub>) y G (WRF-IMFIA) corresponden al Río de la Plata medio (Med). H (CFSR<sub>coarse</sub>), I(CFSR<sub>fine</sub>) y J (WRF-IMFIA) corresponden al Río de la Plata exterior. K (CFSR<sub>coarse</sub>), L(CFSR<sub>fine</sub>) y M (WRF-IMFIA) corresponden a la costa atlántica (Atl3). N(CFSR<sub>coarse</sub>), O(CFSR<sub>fine</sub>) y P (WRF-IMFIA) corresponden a la costa atlántica (Atl2).

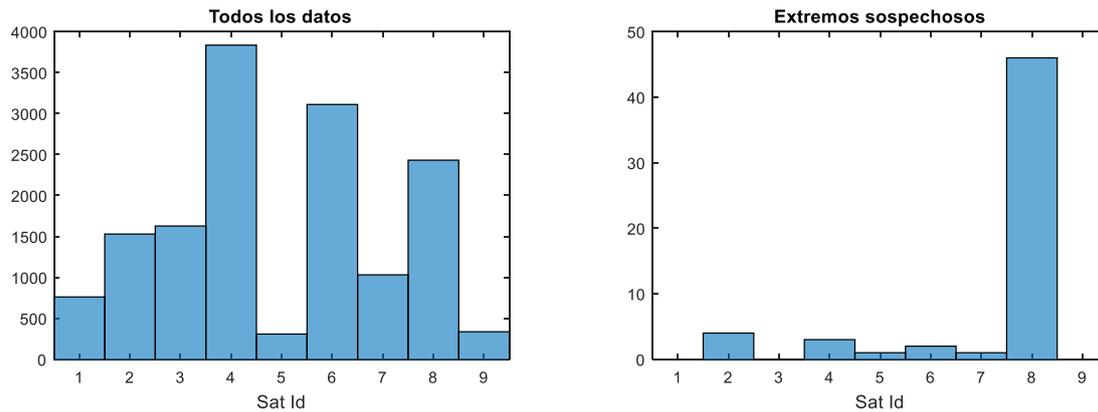
## 1.5 Análisis de extremos en el Río de la Plata medio e interior

### 1.5.1 Río de la Plata Medio

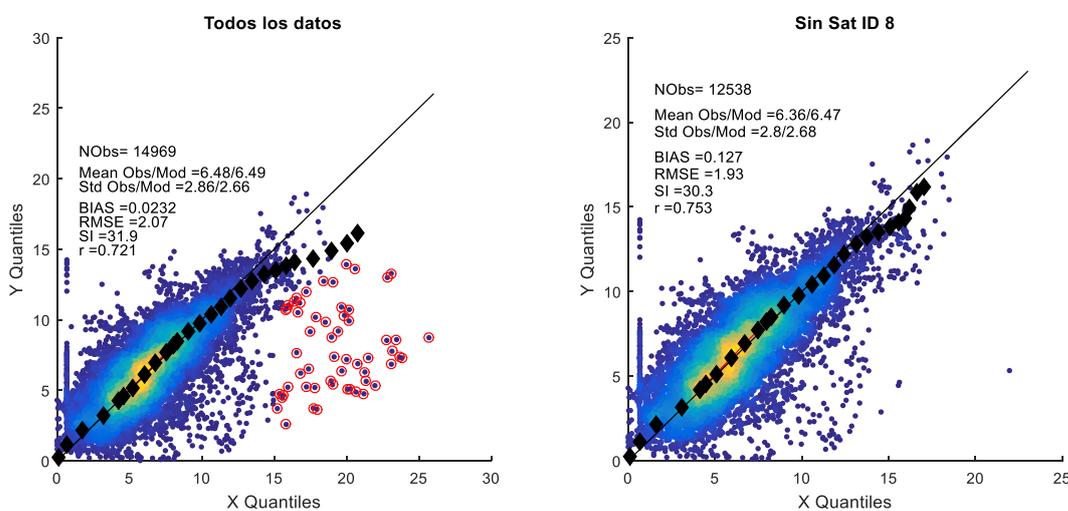
Inicialmente se identificaron los eventos a los que se denominó extremos sospechosos. En el caso del Río de la Plata Medio fueron definidos como aquellos eventos en que la velocidad de viento medida de forma altimétrica es mayor a 15 m/s y la diferencia con el dato de reanálisis es mayor al 25 %. Estos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

### 1.5.2 Río de la Plata Interior.

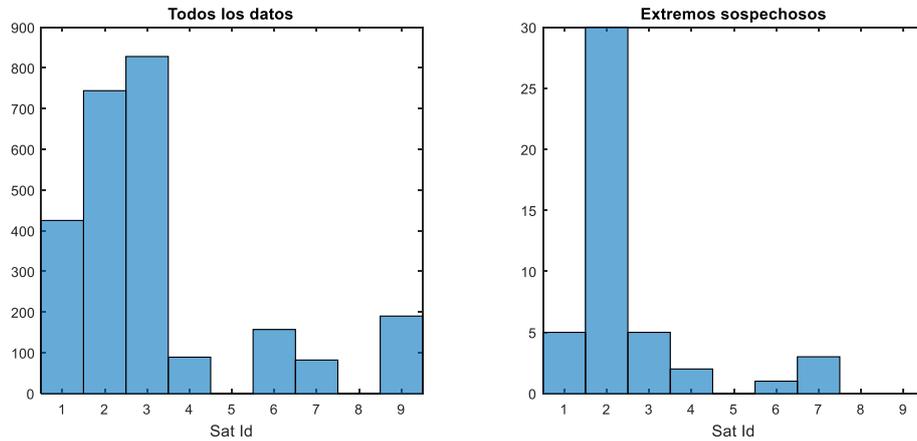
Se realiza el mismo análisis para los datos del Río de la Plata interior pero modificando el umbral de velocidad para definir los eventos sospechosos a 12 m/s. Los resultados se presentan en las figuras 15 y 16.

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.

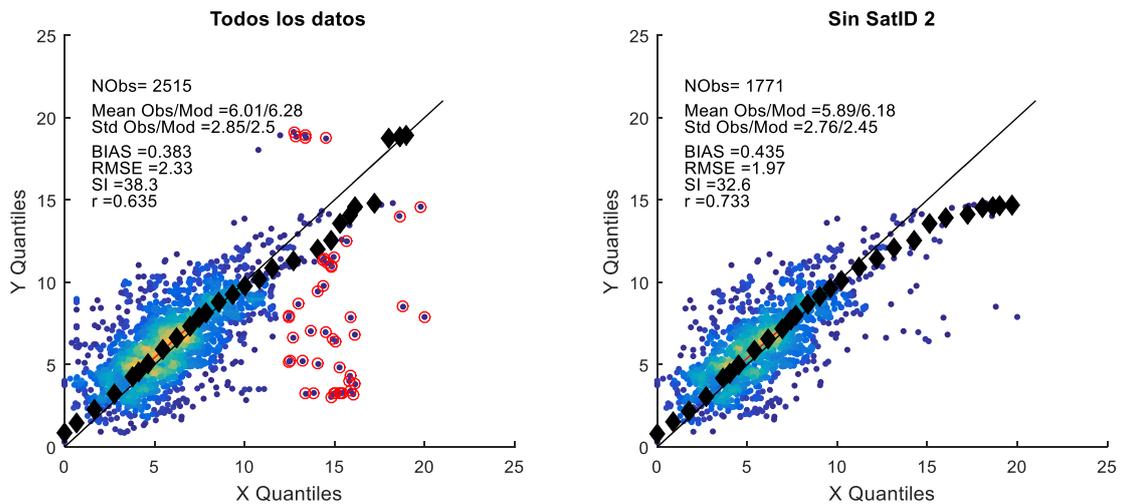
Se hace notar que son pocos datos los responsables de apartar el ajuste, y muchos de ellos pertenecen a un mismo estado. A modo de ejemplo en la Figura 17 se identifican eventos correspondientes a un mismo estado, tanto en el diagrama de dispersión como en su localización geográfica. Una primera observación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

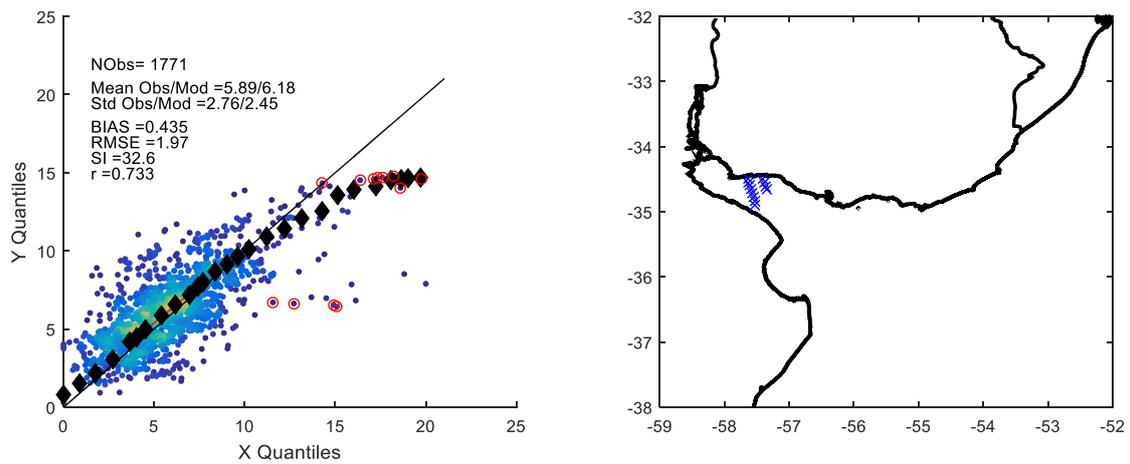
del viento y altura de ola significativa ( $H_s$ ) registrada por el altímetro y la velocidad del viento estimada por el reanálisis. Estos eventos fueron analizados individualmente contrastando las series temporales en el entorno de estos estados, de los dos puntos del reanálisis que se indican en la 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.)



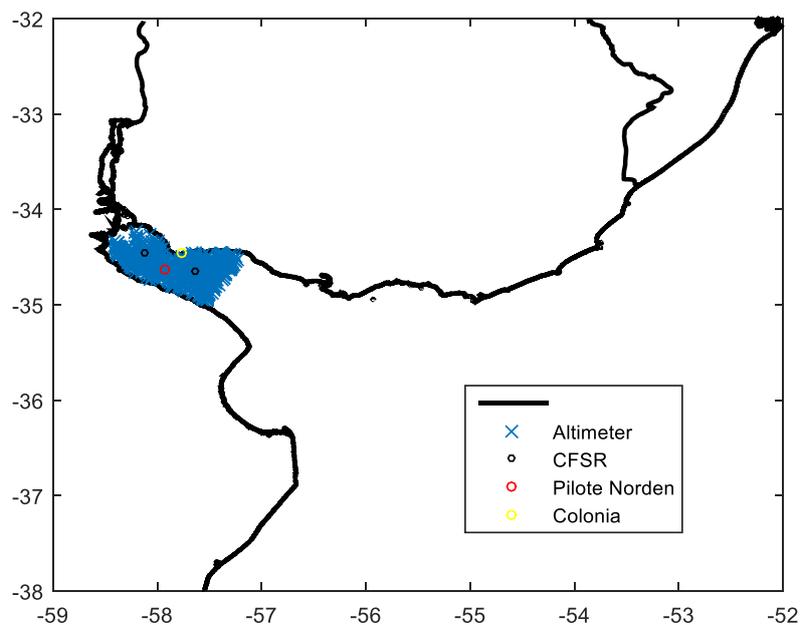
**Figura 18.-** Diagramas de dispersión y distintas métricas de error. Río de la Plata interior. Todos los datos (izq.) Sin los registros del satélite 2 (der.).



**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	$V_{\text{altimétrica}} \text{ (m/s)}$	$V_{\text{cfsr}} \text{ (m/s)}$	$H_s \text{ (m)}$	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.

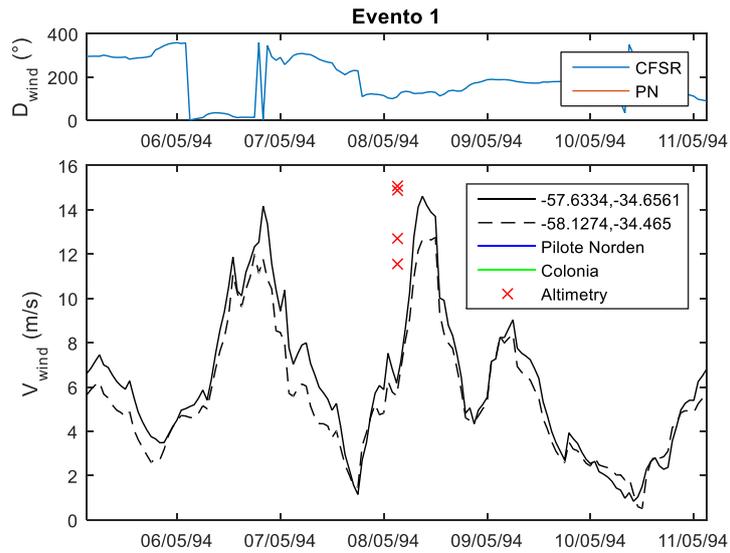


Figura 21.-Estado 1. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

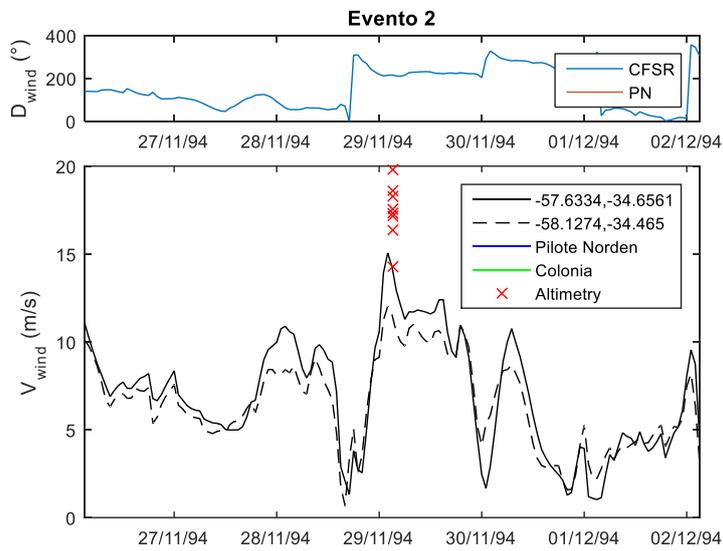


Figura 22.- Estado 2. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

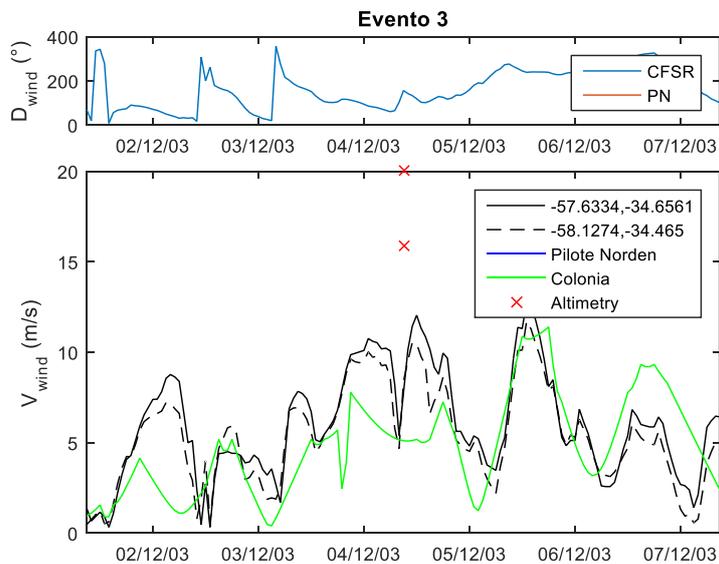


Figura 23.- Estado 3. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

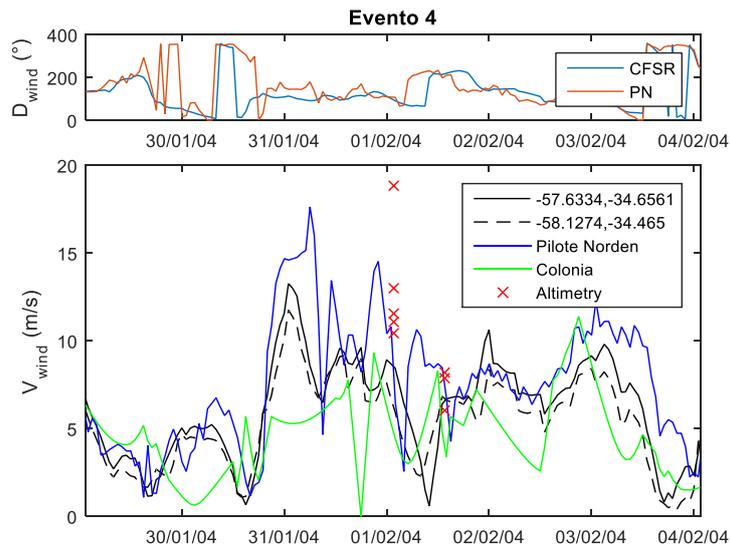


Figura 24.- Estado 4. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

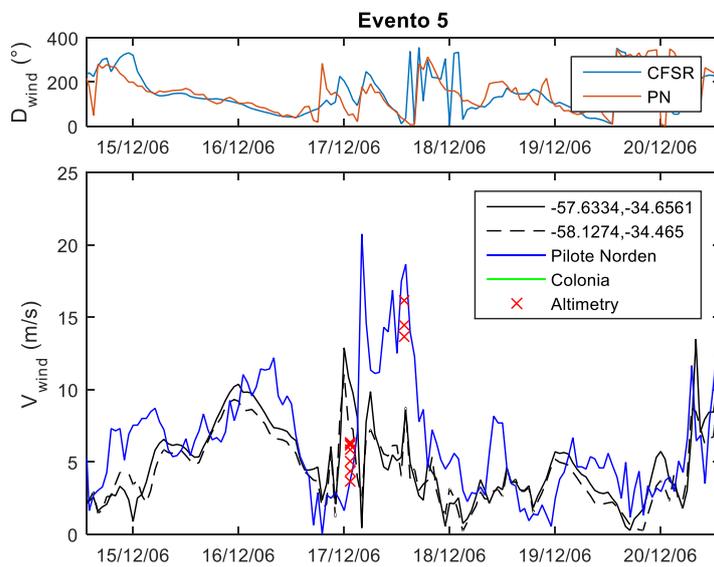


Figura 25.- Estado 5. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).

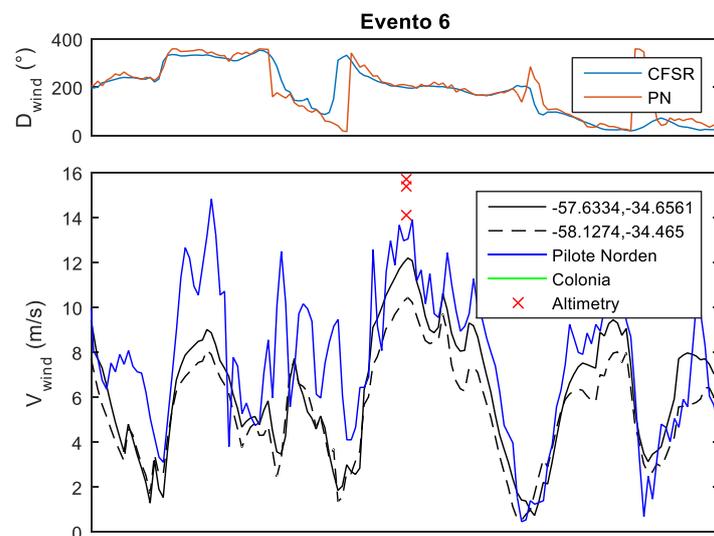
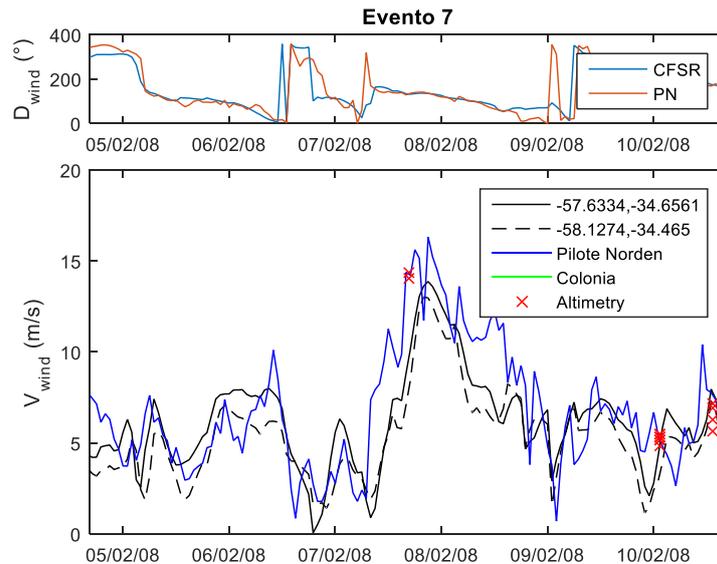


Figura 26.- Estado 6. Series temporales de velocidad del viento (abajo) y dirección (arriba).



**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.

## 1.6 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.

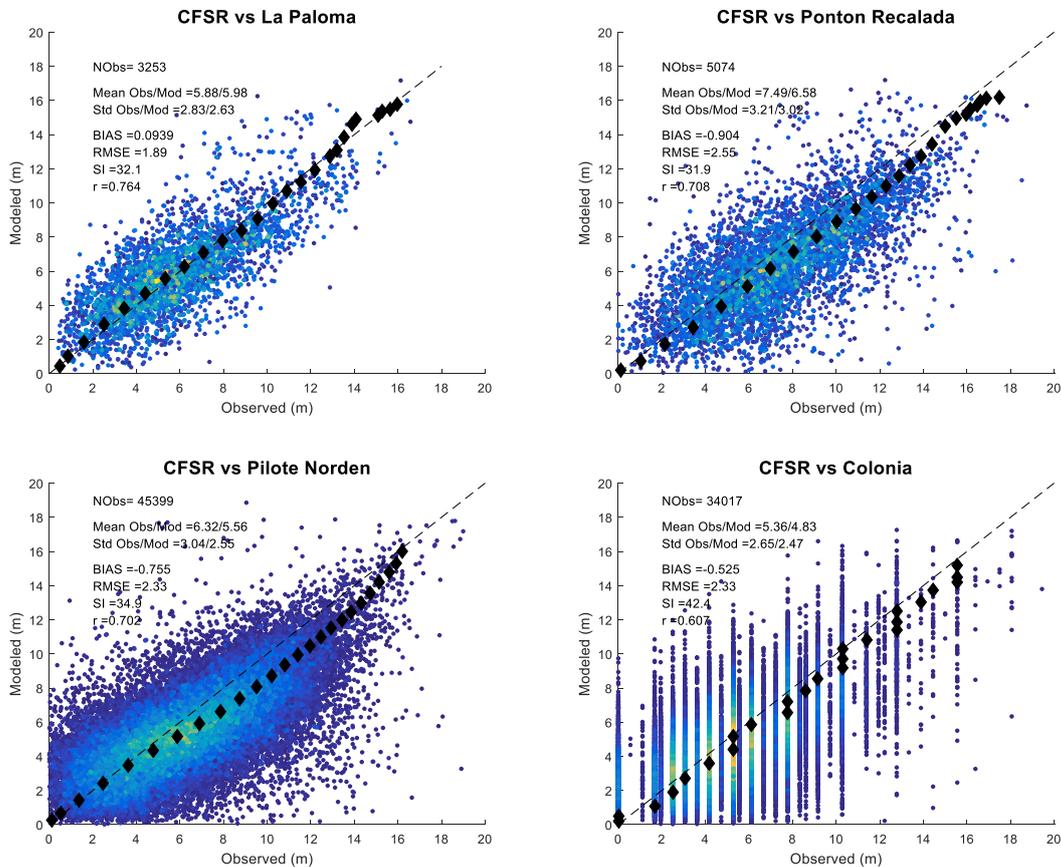


Figura 28. Comparación CFSR<sub>fine</sub> y las mediciones in-situ disponibles.

## 1.7 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.

---

## 2 SIMULACIÓN RETROSPECTIVA DE NIVELES

### 2.1 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.

### 2.2 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](http://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.

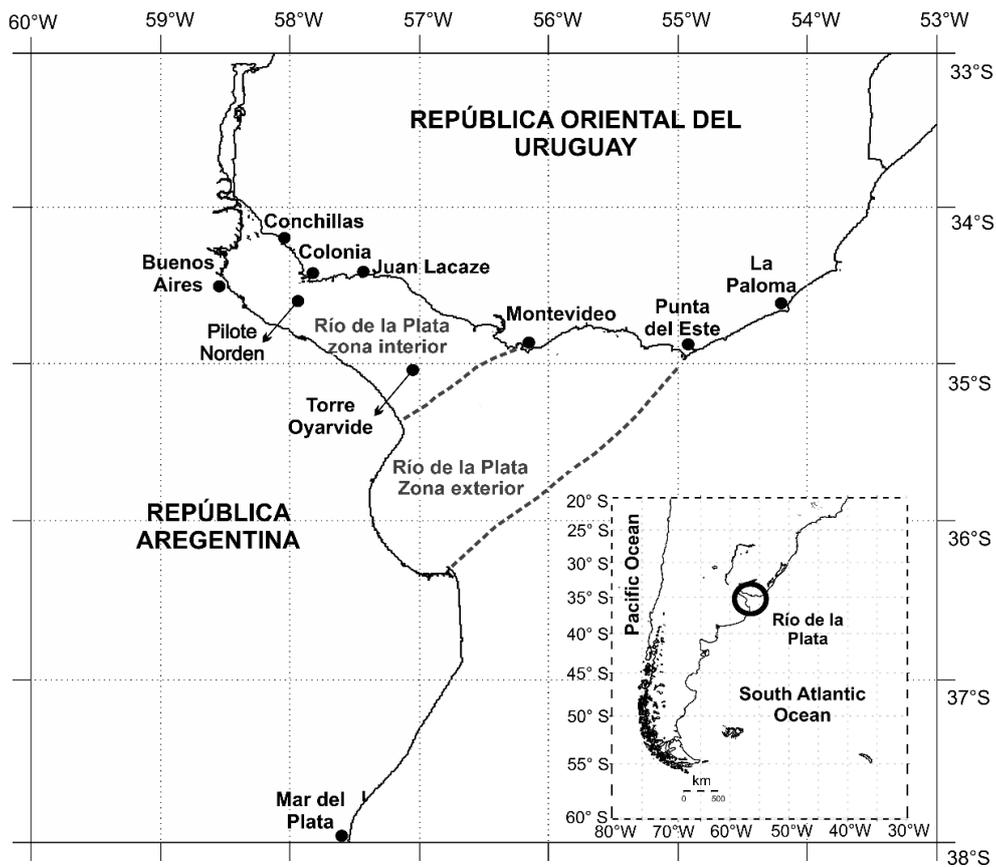


Figura 29: Río de la Plata y estaciones de medición de niveles utilizadas en este trabajo.

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:

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

Ecuación 1

siendo  $\rho_{agua}$  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 de la columna de agua. Se consideraron configuraciones con número de Manning uniforme en todo el dominio, 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,  $\rho_{aire}$  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.

## **2.3 Información utilizada**

### **2.3.1 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.

### **2.3.2 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  $0.312^{\circ} \times 0.312^{\circ}$ .

### 2.3.3 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).

### 2.3.4 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				

---

## 2.4 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](http://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.

### 2.4.1 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.

#### 2.4.2 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 Uruguay 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.

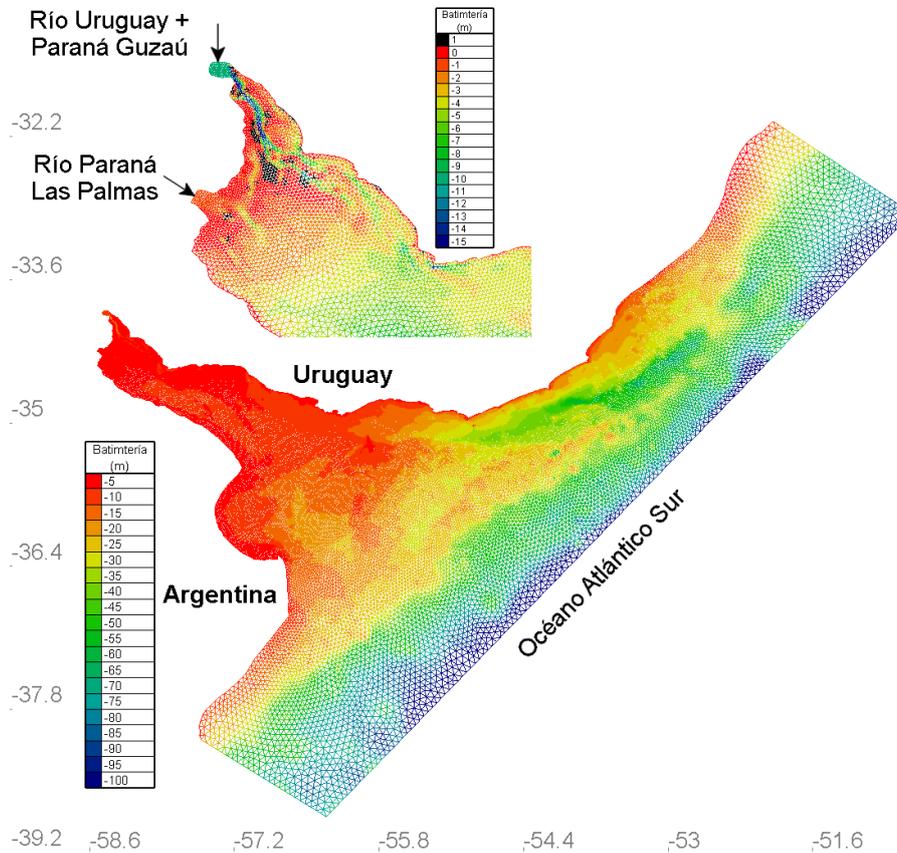


Figura 30: Malla de cálculo y batimetría.

### 2.4.3 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.

#### 2.4.4 Condiciones de borde

##### 2.4.4.1 *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.

##### 2.4.4.2 *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.

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

##### 2.4.4.4 *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.

### 2.4.5 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.

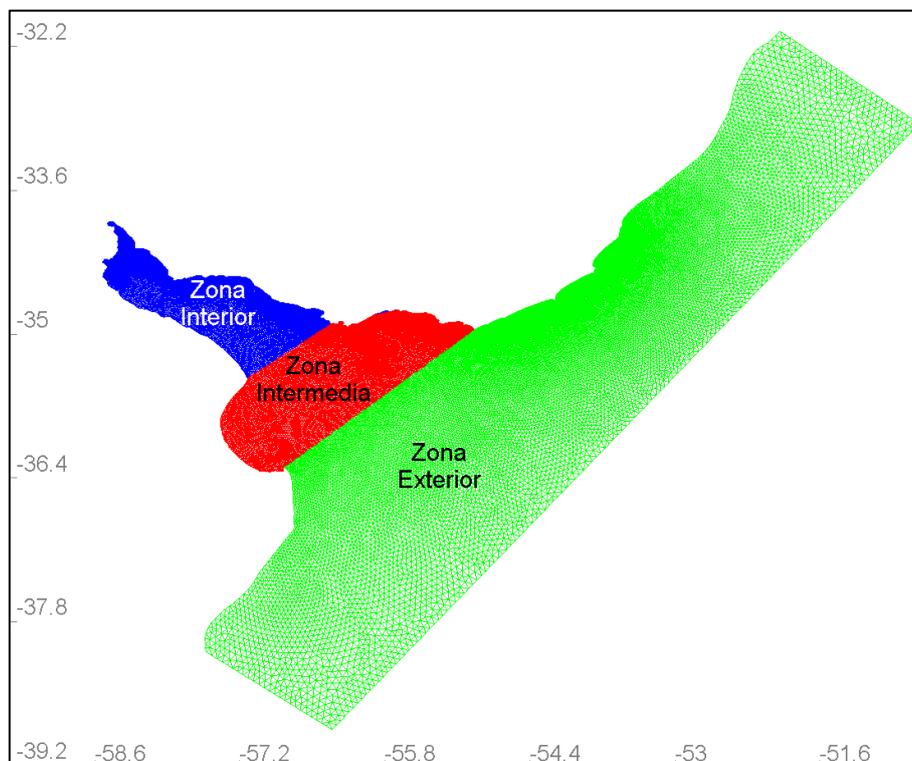
## 2.5 **Resultados**

### 2.5.1 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.

#### 2.5.1.1 *C<sub>d</sub> Fijo*

Se realizaron simulaciones con  $C_d$  fijo variando dicho coeficiente entre  $0.75 \text{ E-}6$  y  $4 \text{ E-}6$  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

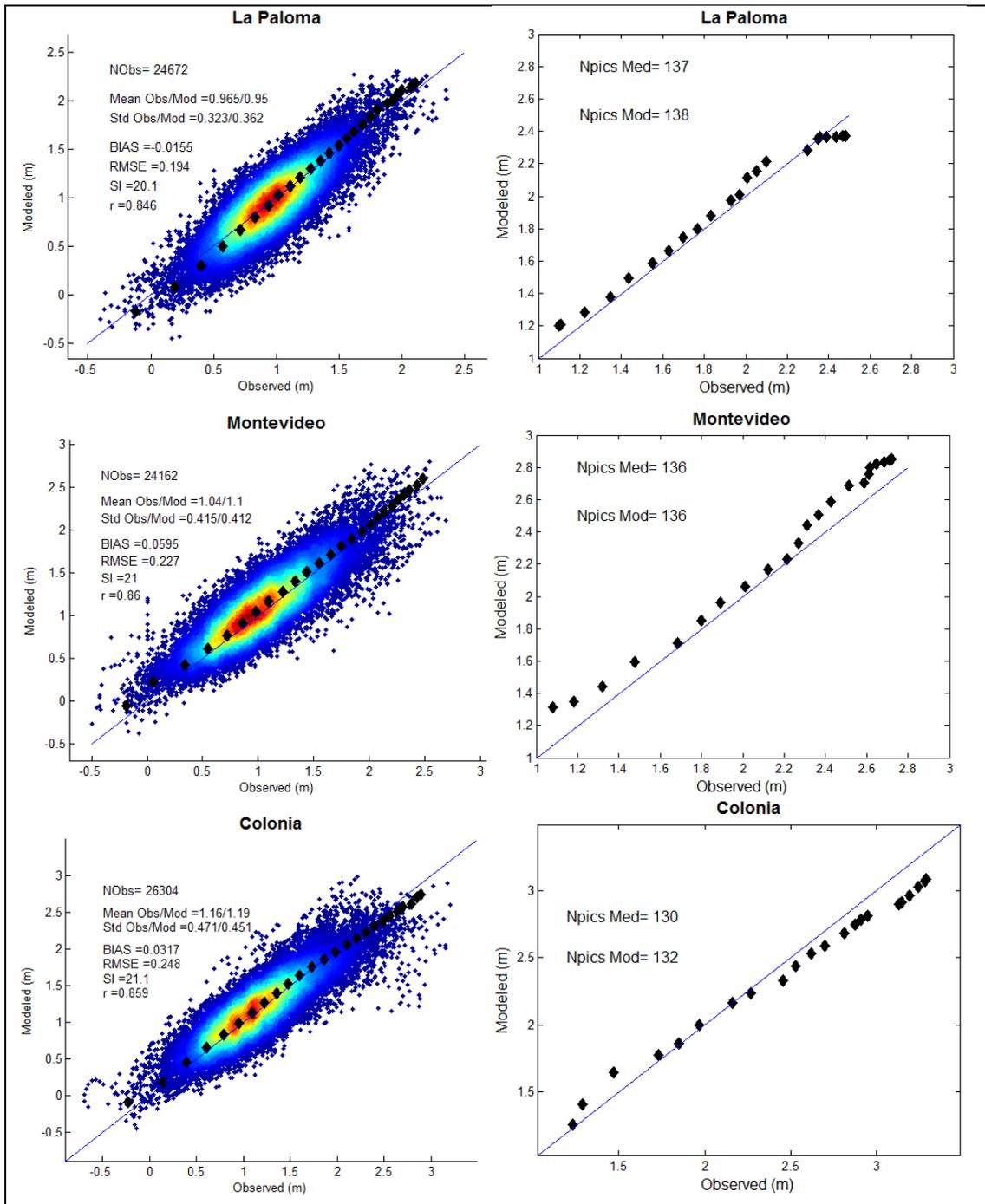
**Tabla 15- Suma de BIAS y RMSE de las estaciones de La Paloma, Montevideo y Colonia, obtenido para las simulaciones con Cd variable.**

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  $45^\circ$  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  $45^\circ$  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.

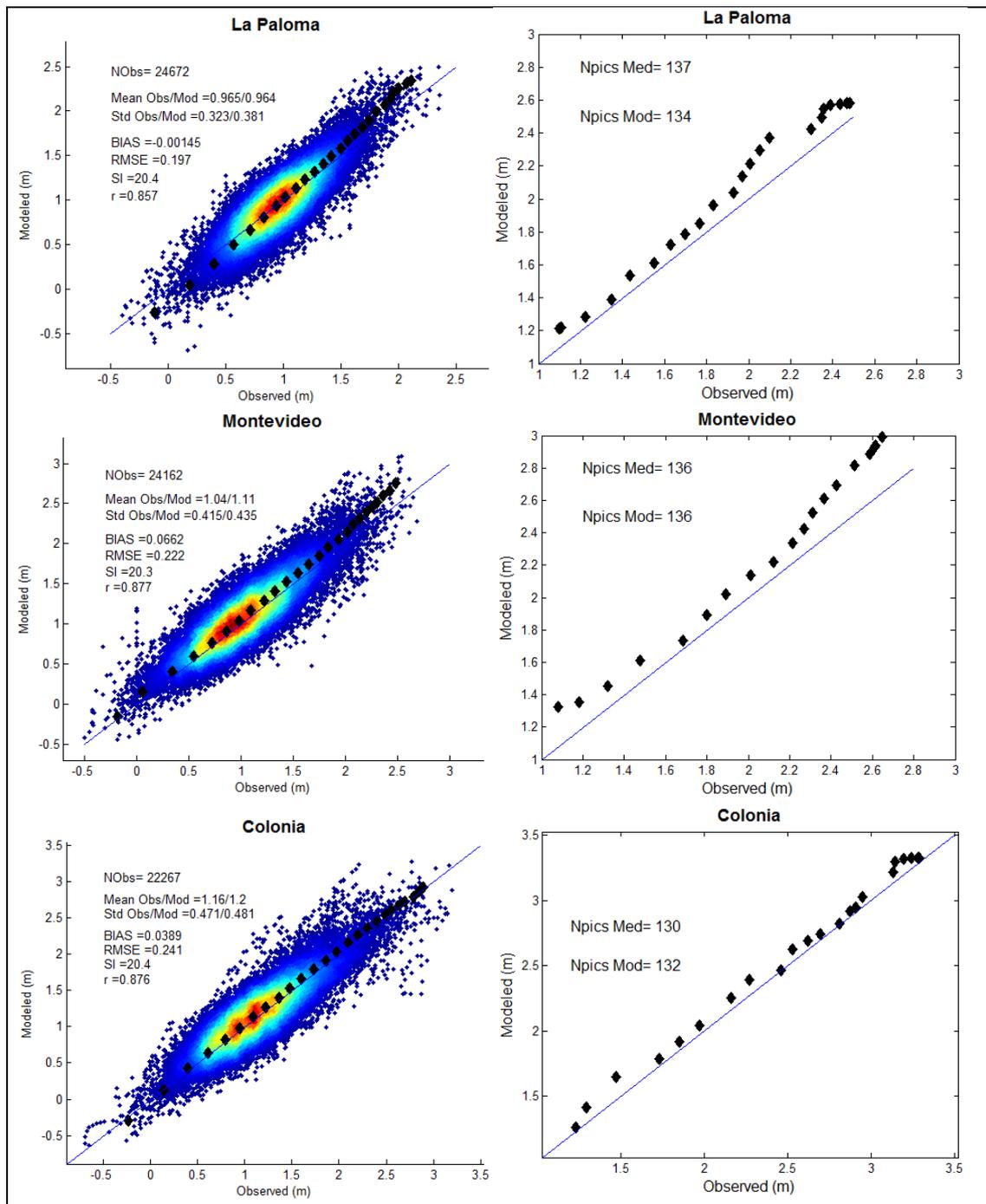
### 2.5.1.2 Cd Variable

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 gráfico 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 gráfico 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.

### 2.5.1.3 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**

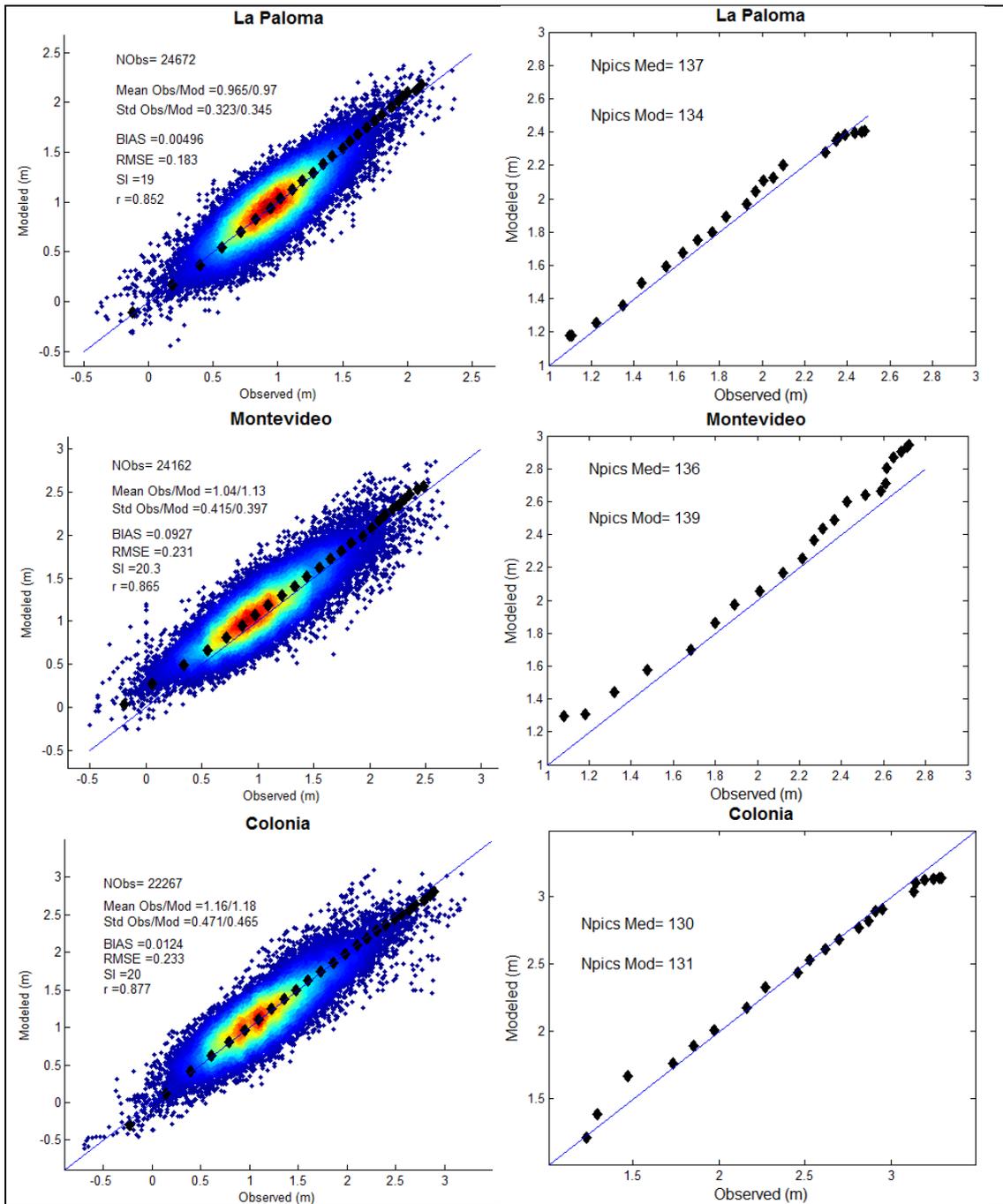
Simulaciones con n variable en el dominio						
	1	2	3	4	5	6
n interior	0.009	0.009	0.009	0.007	0.007	0.007
n intermedio	0.01	0.009	0.015	0.015	0.0125	0.0175
n exterior	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015	0.015

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 <sub>d</sub>	Coeficiente de mayoración para C <sub>d</sub>
Zona interior	0.007	Variable (Flather, 1976)	1
Zona intermedia	0.015		
Zona exterior	0.015		

### 2.5.2 Validación

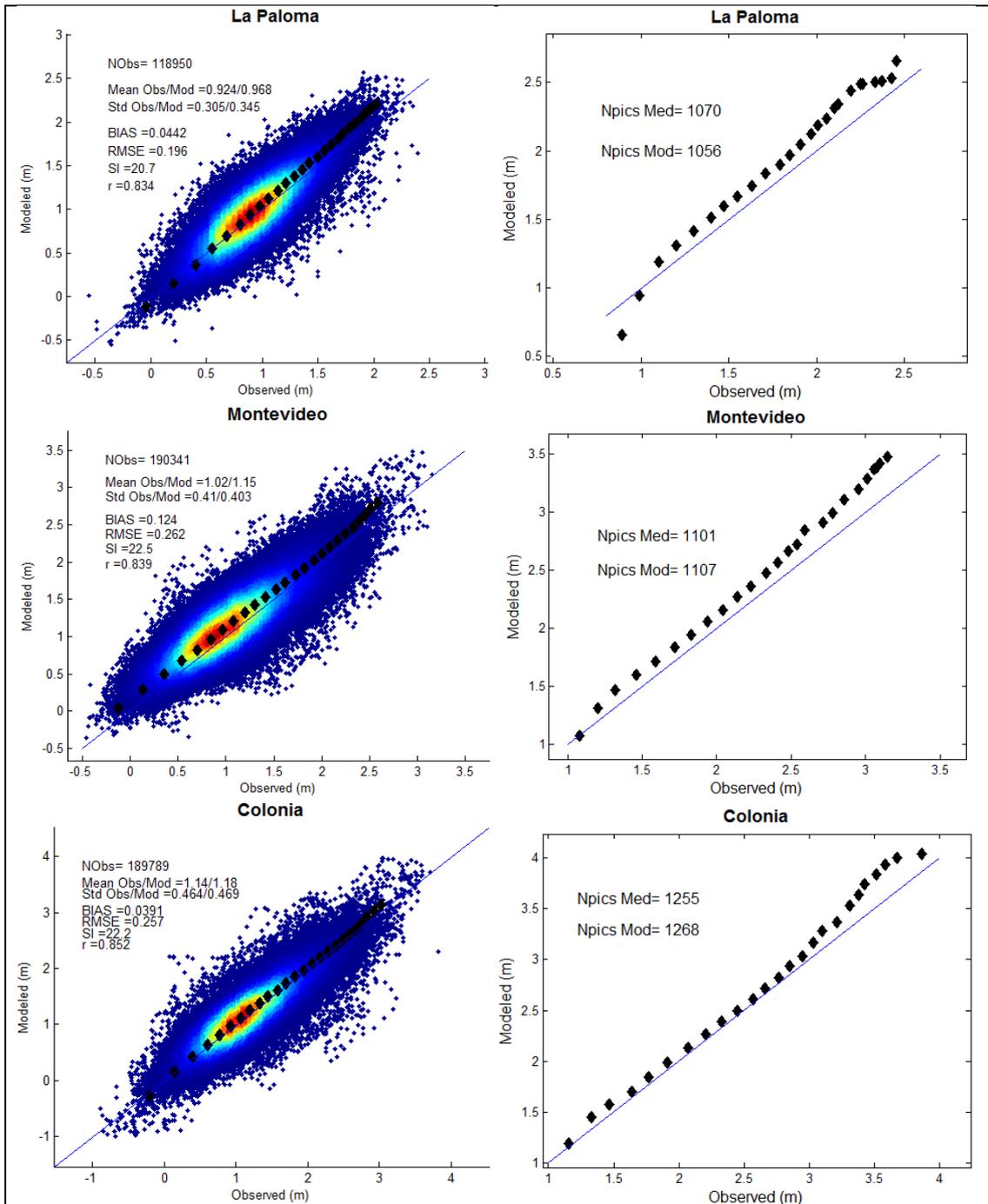
La validación del modelo se realiza comparando todos los datos medidos exceptuando los utilizados para calibrar. En la Tabla 19 se presentan los resultados del BIAS y del RMSE para las estaciones utilizadas para calibrar.

**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.

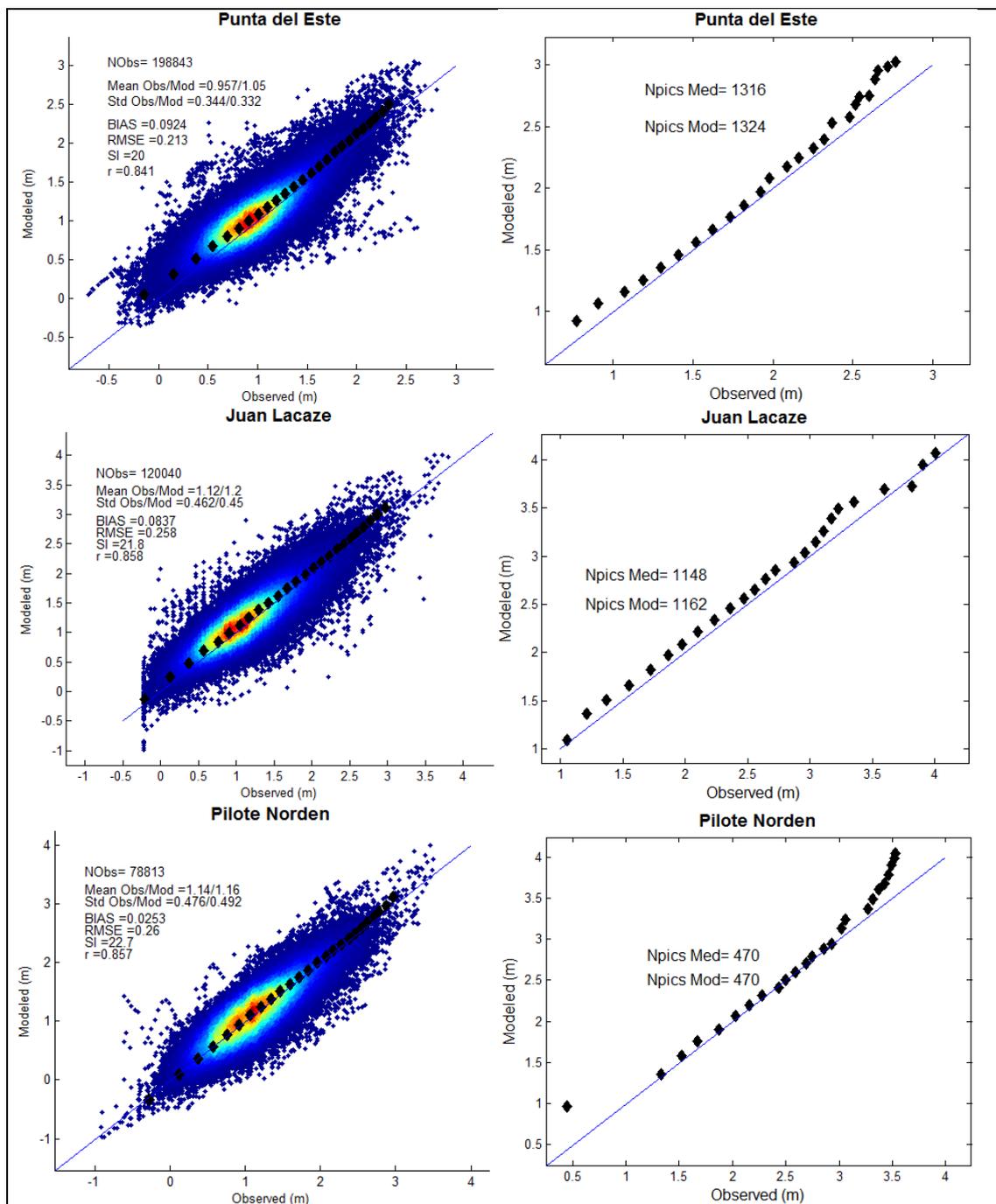


Figura 36: Gráficos de dispersión y cuantil-cuantil en las estaciones Punta del Este, Juan Lacaze y Pilote Norden para el período de validación.

### 2.5.3 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 Uruguaya 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.

---

### 3 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>
- 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.
- 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>
- 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.
- 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.
- 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.

- 
- 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>.
- 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>
- 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

---

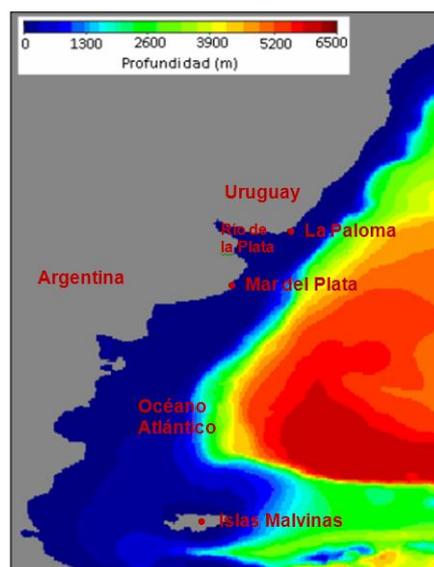
## 4 ANEXO: HINDCAST DE NIVELES

### 4.1 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.

#### 4.1.1 Dominio y batimetría

El dominio de cálculo y la batimetría del modelo ASTide se presenta en la Figura 37. 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 37:** 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).

---

#### 4.1.2 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,  $\rho_a$  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  $n$  igual a 0,005. Los flujos difusivos de temperatura y salinidad en el fondo son nulos.

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

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

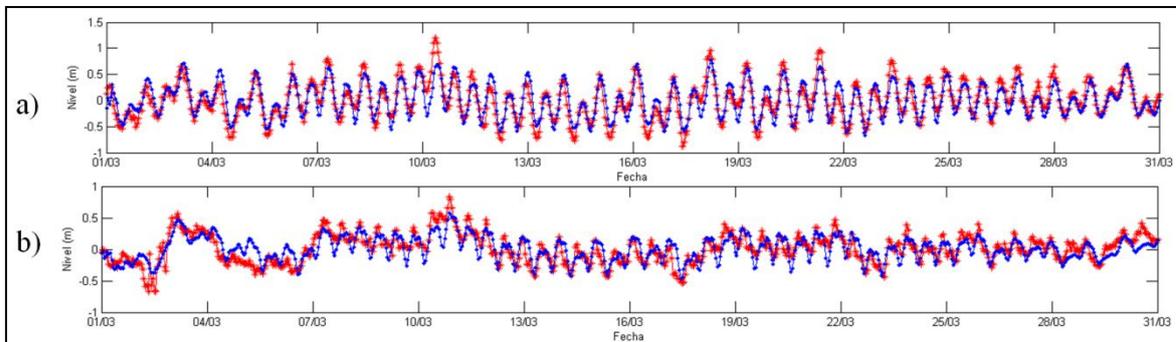
Las fronteras laterales abiertas se introducen como forma de limitar el dominio de cálculo a la región de interés. En estas fronteras deben imponerse valores de las variables de cálculo de forma de garantizar que la información correspondiente a lo que sucede fuera del dominio ingrese a la zona de cálculo 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  $\eta$  es el nivel de la superficie libre calculado con el modelo,  $\eta_{ref}$  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 38: 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 38 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.

---

## 4.2 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 20 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 20- Información de datos medidos horarios en Mar del Plata.*

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

### 4.2.1 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 21 a la Tabla 27 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:

$$MMX\ días = \frac{\text{Nivel total}}{\text{Nivel total}} \times \text{días}$$

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

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 21- 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 22- 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 23- 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 24- 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 25- 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 26- 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 27- 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).

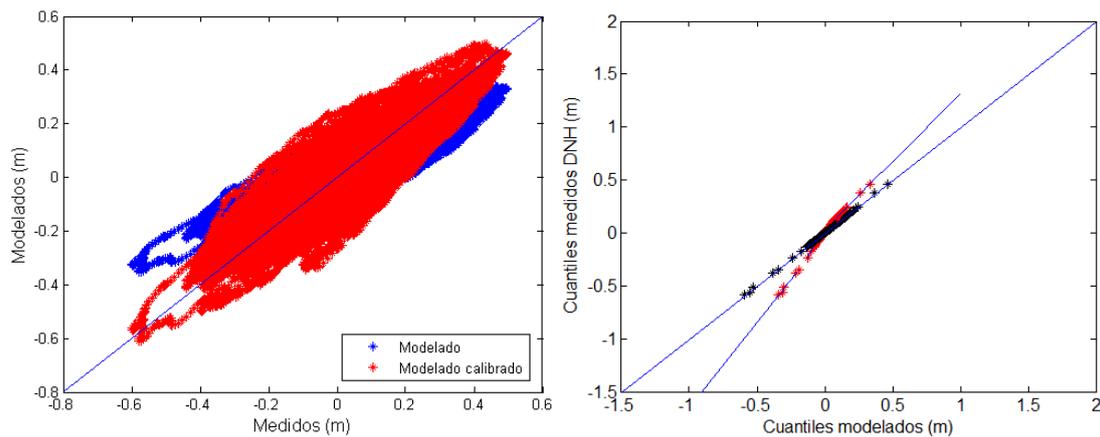
#### 4.2.2 Ajuste

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.

##### 4.2.2.1 Calibración de la media móvil 6 días

En la Figura 39 se muestra el gráfico de la media móvil de 6 días modelada vs la medida, en azul la recta X=Y.



**Figura 39- 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 28 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 28- 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 39 (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 39 (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.

#### 4.2.2.2 Calibración de la media móvil 24 horas

En la Figura 40 (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.

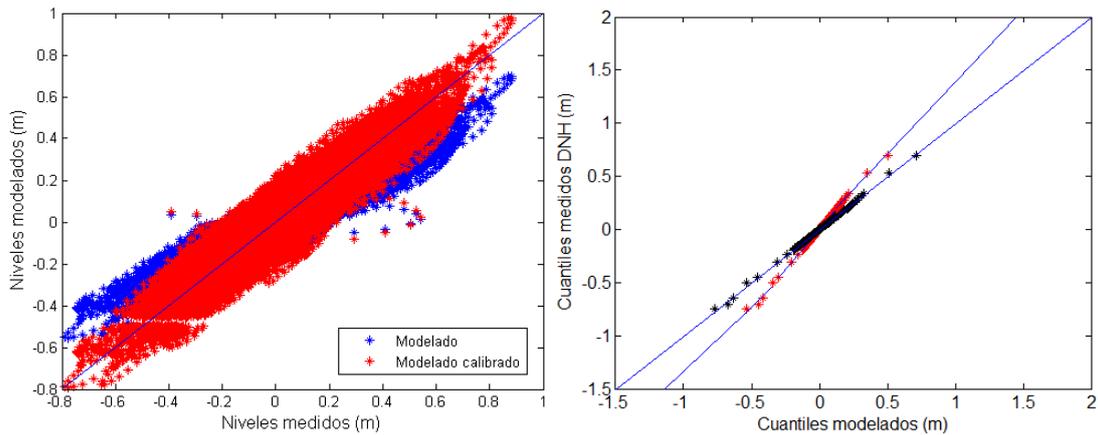
Se llega entonces al ajuste:

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

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 40 (panel derecho) se muestran en rojo los cuantiles no calibrados, en azul el mejor ajuste y en negro los cuantiles calibrados.

**Tabla 29- 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 40- 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).**

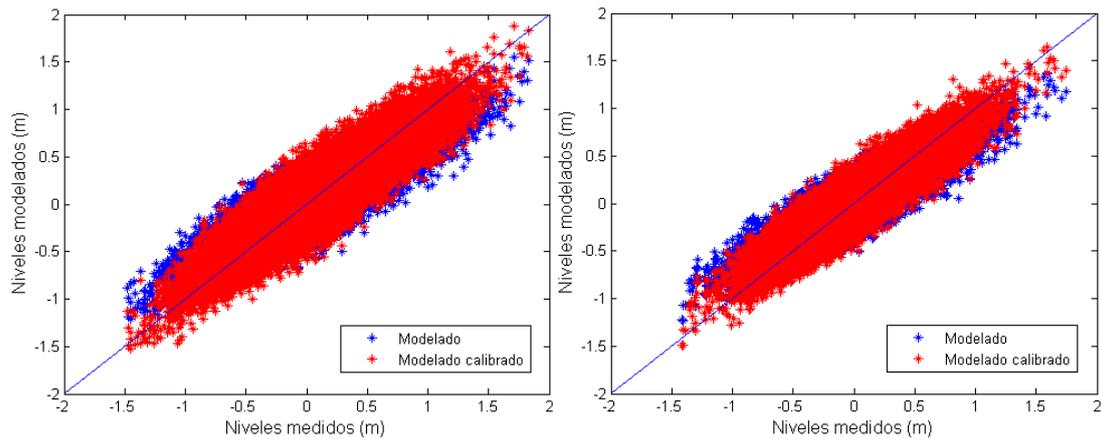
#### 4.2.2.3 Resultados de la calibración y la verificación

En la Tabla 30 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.

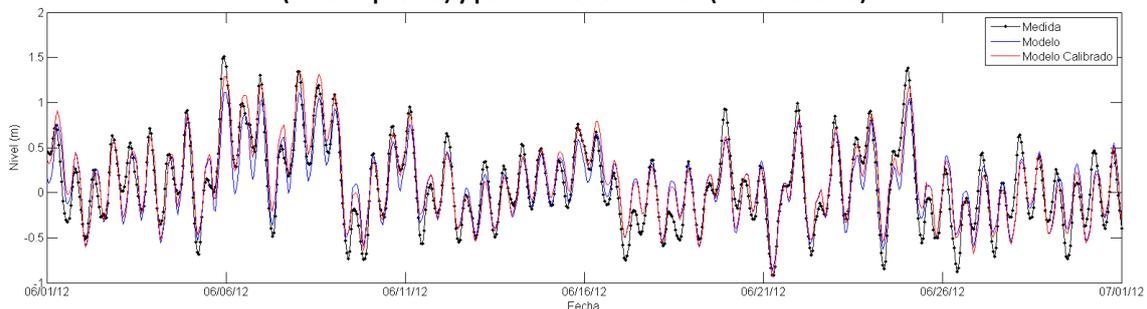
En la Figura 41 (panel izquierdo) se muestran los datos modelados vs los datos medidos sin calibrar (azul) y calibrados (rojo) correspondientes al periodo de calibración. Se observa una mejoría respecto a la recta X=Y.

**Tabla 30- 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 41- Datos medidos vs datos modelados (azul) y modelados calibrados (rojo), para el periodo de calibración (Panel izquierdo) y periodo de verificación (Panel derecho).**



**Figura 42- 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 31 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 43 (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 31- 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	

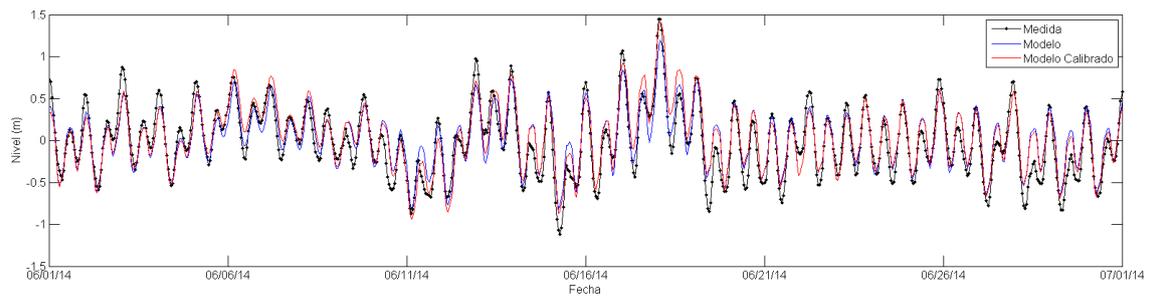


Figura 43- Serie temporal de datos de nivel medidos (negro), modelados (azul), y modelados calibrados (rojo) durante el mes de Junio de 2014 (Verificación).