

# Modelado oceánico en el Servicio Meteorológico Nacional: Sensibilidad de configuraciones en simulación de olas

Matías De Oto<sup>1\*</sup>, Maximiliano Sacco<sup>1</sup>, Federico Cutraro<sup>1</sup>, and Soledad Osoreo<sup>1</sup>

1. Servicio Meteorológico Nacional, Av. Dorrego 4019, CABA, Argentina

**Resumen** Como parte del proyecto PronoMAr, se realizaron análisis retrospectivos del oleaje entre agosto de 2023 y abril de 2024 utilizando distintas configuraciones del modelo WAVEWATCH III®(WW3). Este período estuvo marcado por importantes sistemas extratropicales sobre y al este de la Plataforma Continental Argentina (PCA). Las configuraciones de WW3 incluyeron diversas resoluciones en retículas regulares y un dominio esférico-multicelular. Con el fin de evaluar la escalabilidad según los recursos computacionales disponibles en el Servicio Meteorológico Nacional, se realizaron pruebas en formato “one-way” y “two-way”. El desempeño en la PCA se evaluó mediante datos de altura significativa de ola obtenidos de altímetros satelitales.

**Palabras Claves** WAVEWATCH III®, hindcast, olas, corrientes

## 1. Introducción

En el marco del proyecto PronoMAr (Pronosticando el Mar Argentino), el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ha fortalecido sus capacidades en la implementación de modelos oceánicos de última generación, como el modelo regional Simulación Sistema para el Modelado del Mar Argentino – Plataforma Continental Argentina (SIMMAR-PCA, [1,2,3,4,5]) y el modelo de olas WAVEWATCH III®(WW3,[6]). Aunque se ha avanzado significativamente en el conocimiento de fenómenos como el nivel del mar, las ondas de tormenta y las corrientes integradas verticalmente, el modelado numérico de las olas sigue siendo un desafío crítico. Este desafío se ve amplificado por la falta de observaciones *in-situ* sistemáticas y periódicas de corrientes y olas en la vasta extensión de la Plataforma Continental Argentina (PCA). A pesar de ser un territorio marítimo extenso y estratégicamente importante, la ausencia de datos precisos dificulta los avances en la precisión de las simulaciones. Sin embargo, el proyecto PronoMAr marca el inicio de una nueva etapa, donde, a pesar de las limitaciones, se busca sentar las bases para futuros desarrollos en la modelización marina.

En este trabajo, se implementan diversas configuraciones de dominios para realizar simulaciones retrospectivas (hindcast) con el objetivo principal de evaluar su desempeño en la computadora de alto rendimiento ‘Huayra Muyu’ del

---

\* Autor correspondiente: mdeoto@smn.gob.ar

SMN (HPC). Asimismo, las simulaciones se verifican contra datos de altímetros satelitales actualmente operativos, con la esperanza de que este esfuerzo inicial abra el camino hacia una mejor comprensión y monitoreo de la dinámica oceánica en la región.

## 2. Configuración

Se utilizaron 7 configuraciones (Tabla 1) de dominios para los hindcast de oleaje entre agosto de 2023 y abril de 2024, totalizando 245 simulaciones diarias. Estas configuraciones incluyen dominios estructurados regularmente en latitud-longitud y un dominio esférico-multicelular (SMC). Las configuraciones A están anidadas de forma “two-way”, mientras que las configuraciones B y C utilizan un esquema “one-way”. En todas las configuraciones se utilizó una discretización del espacio de frecuencias de  $n=25$ , la discretización en el espacio de direcciones se muestra entre parentesis (ver Tabla 1).

Todas las configuraciones se implementaron utilizando la versión 7.14 de WW3[6] en un entorno GNU con un sistema de memoria distribuida, lo que es beneficioso para la gestión de los recursos del HPC[7]. En Material Auxiliar (ver Sección 6) se pueden consultar las tablas de los switches y programas que se compilaron y algunos parámetros básicos que definen la física del modelo WW3.

**Tabla 1.** Configuraciones de hindcasts de oleaje. Entre paréntesis las direcciones espectrales

Configuración	Descripción	Esquema de anidamiento
A1	3 dominios regulares: Global 0.25°, Atlántico Sur 0.15°, Plataforma 0.05° (24)	Two-way (ww3_multi)
A2	3 dominios: Hemisferio Sur 1°, Atlántico Sur 0.5°, Plataforma 0.2° lon, 0.15° lat (36)	Two-way (ww3_multi)
A3	3 dominios regulares: Global 1°, Atlántico Sur 0.3°, Plataforma 0.1° (36)	Two-way (ww3_multi)
B1	2 dominios regulares: Global 0.5°, Plataforma 0.1° (36)	One-way (ww3_shel)
B2	2 dominios: Hemisferio Sur 1° lat, 2° lon, Plataforma 0.2° lon, 0.15° lat (36)	One-way (ww3_shel)
B3	2 dominios regulares: Global 0.25°, Plataforma 0.05° (36)	One-way (ww3_shel)
C	1 dominio SMC: 0.8°/0.4°/0.2° (36)	One-way (ww3_shel)

### 3. Forzantes

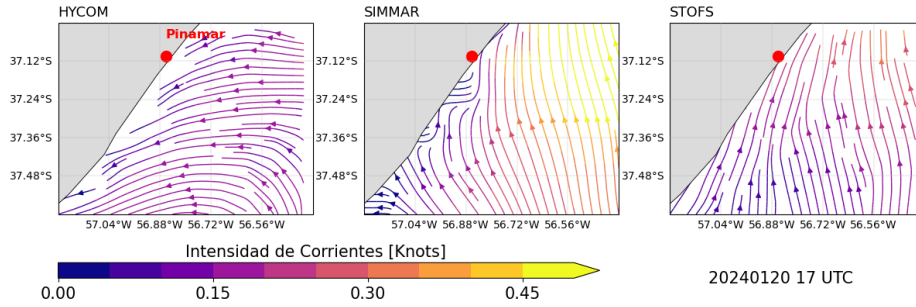
#### 3.1. Forzante Atmosférico

La física implementada en WW3 requiere del campo de viento zonal y meridional a 10 m y la concentración de hielo. Además, como una medida de la estabilidad de la columna de aire, se utiliza la diferencia entre la temperatura a 2 m y la de superficie. Todas estas variables fueron extraídas del hindcast denominado Climate Forecast System v.2 (CFSv2). El catálogo se encuentra disponible en NCEI-CFSv2 (<https://www.ncei.noaa.gov/thredds/catalog/model/cfs.html>).

#### 3.2. Corrientes

Las corrientes de marea en la PCA presentan un reto significativo para garantizar la estabilidad numérica bajo la condición de convergencia CFL. Esto se debe a que las mismas pueden superar el  $1 \text{ m/s}$  en algunas regiones como por ejemplo los Golfos Norpatagónicos[8]. En este sentido, el objetivo de incluir las corrientes como forzante es el análisis del costo computacional que las mismas implican.

Se incluyeron las corrientes integradas verticalmente obtenidas de los pronósticos de la versión previa de SIMMAR-PCA[1,2,3,4,5]. SIMMAR-PCA es un ensamble regional barotrópico adaptado a la PCA y que, actualmente, se está ejecutando de forma pre-operativa en el HPC del SMN. El diseño de SIMMAR-PCA se centra en representar los aspectos dinámicos más importantes de la PCA, como el efecto de la marea en las corrientes inducidas por el viento y la descarga continental, elementos que suelen estar subrepresentados en modelos globales.



**Figura 1.** Campo regional de líneas de corrientes (nudos) en las proximidades de Pinamar para las 17 UTC del 20 de enero del 2024 para el modelo global HYCOM-Navy (panel izquierdo), para el miembro 1 de SIMMAR-PCA (panel central) y para el sistema STOfS (panel derecho)

La Figura 1 expone el elevado rango de incertidumbre en la determinación del campo de corrientes oceánicas (líneas de corriente, en nudos). En el panel izquierdo se muestra el modelo global HYCOM-Navy, en el panel central al sistema regional SIMMAR-PCA, y en el panel derecho, el sistema STOfS. El campo de corrientes graficado es cercano a la ciudad de Pinamar a las 17 UTC del 20 de enero de 2024. A diferencia de HYCOM-Navy, los sistemas SIMMAR-PCA y STOfS logran reproducir el régimen de marea semidiurna mixta característico de la región (no se muestra). No obstante, la diferencia entre SIMMAR-PCA y STOfS, en principio, radica en el gran tamaño de este último lo que dificulta el manejo de información en tiempos operativos.

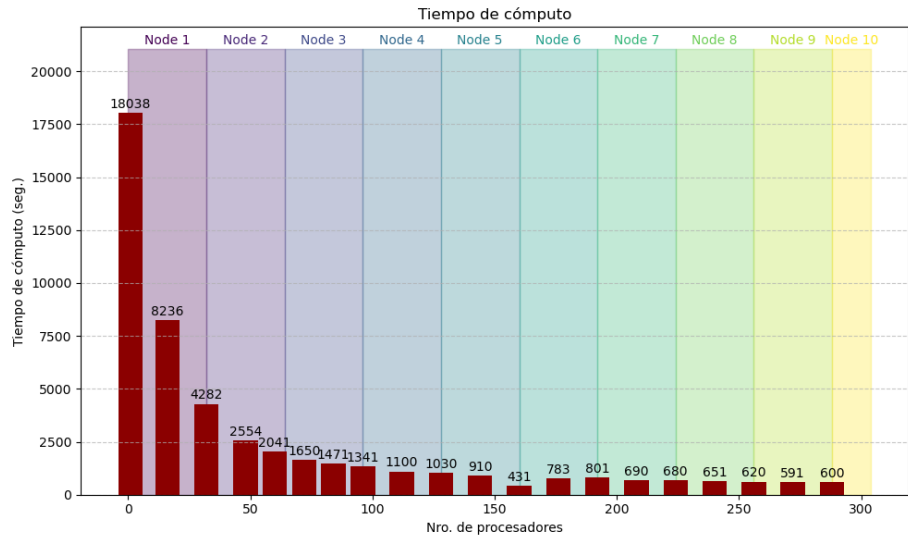
## 4. Resultados

### 4.1. De la simulación

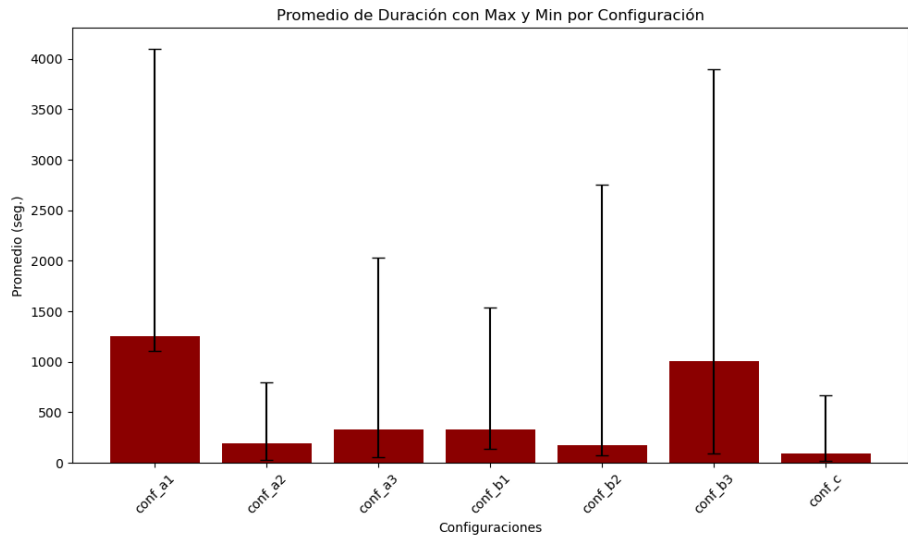
La Figura 2 muestra la curva de tiempo en función del número de procesadores que se utilizaron en la configuración A1 (ver Tabla 1). Los tiempos fueron ejecutados en base a la simulación de 24 h desde las 00Z hasta las 23Z del 28 de noviembre de 2023. Nótese que cada nodo del HPC presenta 32 procesadores y que si bien el mínimo temporal se logra con 6 nodos, el decaimiento exponencial en el tiempo de cómputo se logra con 4 nodos en aproximadamente 1100 seg. (18 min.). Consideramos que la utilización de 4 nodos (128 procesadores) es la de mayor desempeño entre tiempo empleado y recurso utilizado. Téngase presente que este resultado podría variar en función de las configuraciones, la aquí mostrada es la de mayor costo computacional dada su mayor resolución.

La Figura 3 presenta el tiempo de ejecución promedio de una simulación de 24 horas utilizando 128 procesadores para cada una de las 7 configuraciones. El tiempo de ejecución promedio se computó promediando las 245 simulaciones diarias. En las configuraciones anidadas “two way” es el tiempo total de todo el procesamiento, en las “one way” es la suma del tiempo en cada dominio con excepción de la configuración C que corresponde al tiempo de la simulación global. Como se observa, la simulación A1 es la mas costosa en términos de tiempo de ejecución dada su resolución. Por otra parte, el formato “two-way” en la configuración A2 es levemente más eficiente temporalmente que su par B2 en “one-way”. La configuración C ó SMC resultó ser la de mayor velocidad.

La Figura 4 muestra como se divide el tiempo de ejecución para las distintas etapas de la simulación de la configuración A1. Se observa que luego de la ejecución propia del modelo (“main processor”) que consume un 83.4 % del tiempo de cómputo, la etapa de mayor consumo la tienen la generación e interpolación del forzante (“forcing\_fields”) y su escritura en archivo netCDF (“netcdf\_output\_fields”). En particular, la interpolación del forzante involucra la conversión de la retícula original a una regular y la ejecución del programa ww3\_prnc. No se han tenido en cuenta el cómputo del tiempo de descarga ni la regionalización de los forzantes. La etapa de escritura de puntos de espectro (“netcdf\_output\_points”) no es relevante dado que en la simulación se escriben únicamente 3 salidas espectrales (no se muestran). El resto de los procesos/etapas en su conjunto no



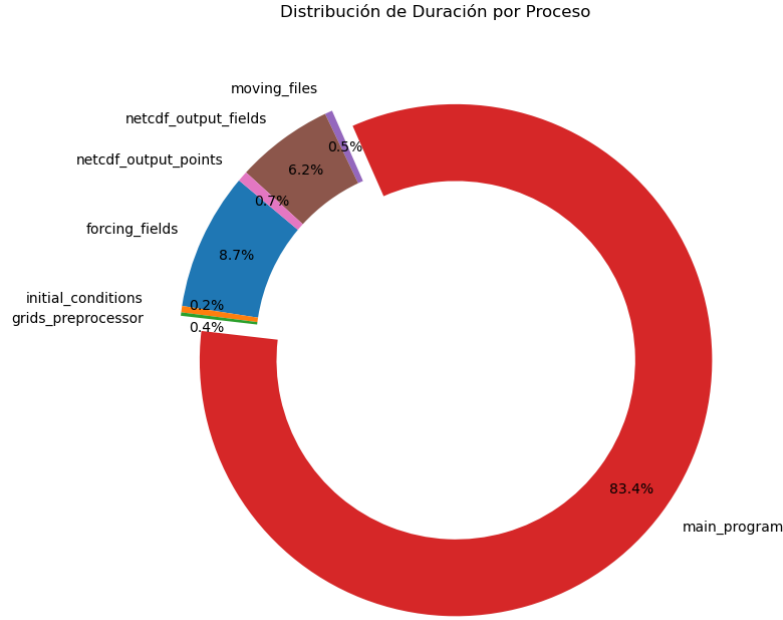
**Figura 2.** Tiempo de cómputo promedio (barras, seg.) de una simulación de 24 h para la configuración A1 en función de la cantidad de procesadores/nodos.



**Figura 3.** Tiempo de ejecución promedio (barras, seg.) y extremos (barbas) de una simulación de 24 h para las distintas configuraciones utilizando 128 procesadores/ 4 nodos.

superan el 2% de la totalidad del tiempo de cómputo. Cabe mencionar que el

único proceso que se encuentra en versión de memoria distribuida es la ejecución del modelo (“main processor”), el resto utiliza sólo 1 procesador.

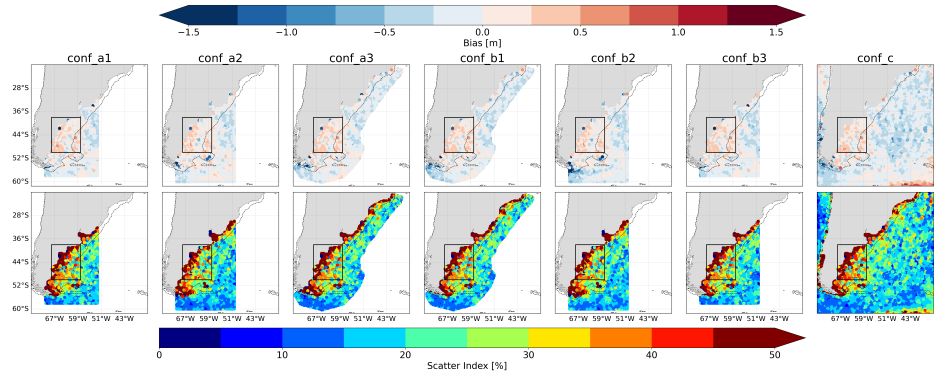


**Figura 4.** Distribución (%) del tiempo de ejecución promedio de cada proceso en la simulación de 24 h de la configuración A1.

#### 4.2. De la verificación

La Figura 5 muestra los campos regionales de bias (paneles superiores) y scatter-index (SI, paneles inferiores) de la altura significativa de la ola (SWH), en bins de  $0.25^\circ$ , para las 7 configuraciones. El SI es un parámetro similar al RMSE, pero normalizado por la media y de mayor utilidad en estadísticas de olas (ver [10]). Se observa que todas las configuraciones sobrestiman (tonalidades rojas) el error y dispersión de la SWH respecto de un compendio de observaciones de altímetros proveniente de los satélites Jason-3, Saral, Sentinel-6 y SWOT sobre la PCA (ver información satelital en [9]). Por el contrario, se observa una subestimación (tonalidades azules) de dichos parámetros hacia mar abierto.

La Tabla 2 muestra los estadísticos promediados sobre el norte de la PCA (ver rectángulo en Fig. 5). En términos promedios, particularmente en el SI, se observa que los resultados se encuentran fuera del rango de valores reportados a nivel regional, que oscilan entre el 10-15 % [10]. Cabe destacar que en [10] el



**Figura 5.** Campos regionales de bias (superior) y scatter-index (inferior) para las 7 configuraciones abordadas en este trabajo (ver títulos). Los rectángulos demarcan el área que se consideró como PCA.

periodo utilizado fue el año 2021 mientras que el dominio regional abarcaba el área de plataforma del modelo Austral-WW3 ([11]).

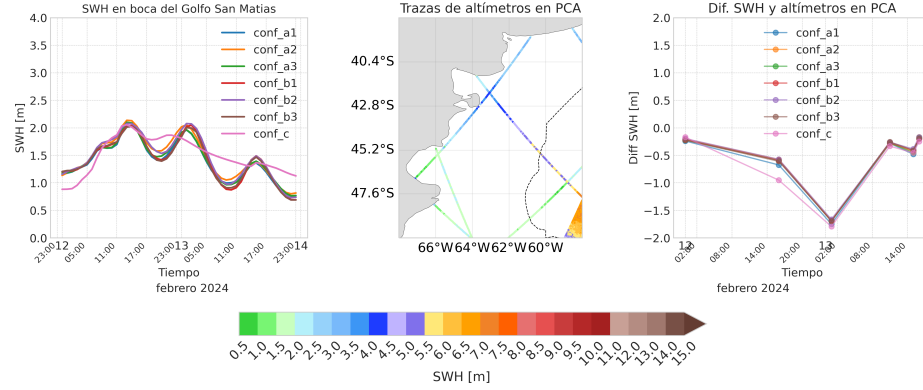
**Tabla 2.** Promedio espacial de bias y scatter-index sobre el norte de la PCA (ver rectángulos en Fig. 5)

	conf_a1	conf_a2	conf_a3	conf_b1	conf_b2	conf_b2	conf.c
<b>bias</b>	0.09	0.11	0.11	0.1	0.11	0.1	0.08
<b>rmsd</b>	0.56	0.56	0.56	0.57	0.57	0.56	0.58
<b>nrmse</b>	14.0	13.6	14.6	14.6	13.7	14.0	14.1
<b>SI</b>	35.7	35.8	35.7	35.9	36.0	35.7	37.9
<b>HH</b>	46.4	43.4	46.4	46.7	43.7	46.7	45.7
<b>counts</b>	1433.6	1434.7	1433.2	1433.2	1437.7	1437.7	1434.7

La validación puntual (Fig. 6) para las 7 configuraciones se realizó durante una tormenta que se desarrolló entre los días 12 y 13 de febrero de 2024 sobre el norte de la PCA. El panel izquierdo muestra el crecimiento de SWH para un punto situado en la boca del Golfo San Matías (GSM). El panel derecho muestra el promedio de la diferencia de SWH entre configuraciones y altímetros sobre la PCA (ver recuadro en panel medio).

## 5. Discusiones y Conclusiones

En el marco del proyecto PronoMAr, con el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) como entidad receptora, se han logrado avances significativos en la modelización de olas mediante el uso del modelo WAVEWATCH III®(WW3). Este



**Figura 6.** Panel izquierdo: Altura significativa de ola (SWH) modelada con diferentes configuraciones (ver etiquetas) en la entrada del GSM, posición  $-41.56^\circ$  y  $296.32^\circ$ . Panel central: SWH en las trayectorias altimétricas sobre la PCA (ver rectángulo en Fig. 5). Panel derecho: Diferencia promedio de SWH entre las configuraciones (ver etiquetas) y las trayectorias de los altímetros en el norte de la PCA (ver panel central).

trabajo evalúa 7 tipos de configuraciones de dominios para determinar su escalabilidad en relación con los recursos computacionales en el sistema de computación de alto rendimiento (HPC) del SMN. Se implementó una compilación de WW3 utilizando un entorno GNU con un sistema de memoria distribuida, lo que permitió una asignación eficiente de procesadores para las simulaciones. La incorporación de forzantes de corrientes y configuraciones de mayor resolución espacial demostró ser viable en el SMN. Se encontró que el equilibrio óptimo entre minimización del tiempo de cómputo y asignación de recursos del HPC se alcanza con 128 procesadores, equivalentes a 4 nodos.

Los resultados indican que la configuración A2 “two-way” es levemente más eficiente temporalmente que su par B2 “one-way”. La configuración C mostró tiempos de cómputo prometedores y merece una exploración adicional. Sin embargo, en todas las configuraciones, las observaciones de altura significativa de las ola (SWH) obtenidas de altímetros revelaron sobrestimaciones sobre el norte de la Plataforma Continental Argentina (PCA) y subestimaciones en mar abierto. Este hecho se revirtió para un episodio puntual de tormenta en el norte de la PCA en donde predominó la subestimación de la SWH. Este caso puntual revela un desafío significativo para la calibración del pronóstico de olas en la PCA y una necesidad de contar con observaciones *in-situ*. En futuros trabajos se abordará el desarrollo de un pronóstico de olas en la PCA y, aprovechando estos resultados, se avanzará en la implementación de un modelo de dispersión marino.

**Agradecimientos.** Expresamos nuestro agradecimiento a la Dra. Paula Etala por la significativa orientación que nos brindó, las cuales han sido determinantes



para guiar los próximos pasos de esta investigación, a pesar de que ya no se encuentra vinculada a nuestra institución.

## Referencias

1. Dinápoli, M.G., Simionato, C.G. y Moreira, D. (2020a). Model Sensitivity during Extreme Positive and Negative Surges in the Río de la Plata Estuary: Highlighting the Need for an Appropriate Hindcast/Forecast System. *Weather and Forecasting*, Volume 35, pp. 1097-1112. DOI: 10.1175/WAF-D-19-0171.1.
2. Dinápoli, M.G., Simionato, C.G. y Moreira, D. (2020c). Development and validation of a storm surge forecasting/hindcasting modelling system for the extensive Río de la Plata Estuary and its adjacent Continental Shelf. *Natural Hazards*. <https://doi.org/10.1007/s11069-020-04079-5>.
3. Dinápoli, M.G., Simionato, C.G. y Moreira, D. (2020d). Nonlinear interaction between the tide and the storm surge with the current due to the flow of the tributary rivers in the tidal freshwater zone of the Río de la Plata. *Estuaries and Coasts*. <https://doi.org/10.1007/s12237-020-00844-8>.
4. Dinápoli, M.G., Simionato, C.G. y Moreira, D. (2021). Development and evaluation of an ensemble forecast/hindcast system for storm surges at the Río de la Plata Estuary. *QJR Meteorol Soc.* 2021; 147: 557-572. <https://doi.org/10.1002/qj.3933>.
5. Dinápoli, M. G., Ruiz, J.J., Simionato, C. G., y Berden, G. (2023). Improving the short-range forecast of storm surges in the southwestern Atlantic continental shelf using 4DEnSRF data assimilation, *QJR Meteorol Soc*, 149(755), 2333–2347. <https://doi.org/10.1002/qj.4509>.
6. The WAVEWATCH III® Development Group 2019. User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 6.07.
7. Tolman, H. L., 2002a: Distributed memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. *Parallel Comput.*, 28, 35–52.
8. Tonini, M. H., and Palma, E. D. (2017). Tidal dynamics on the North Patagonian Argentinean gulfs. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 189, 115-130.
9. De Oto, M., Y. García Skabar y L. Vidal, 2022: Sobre el estado del arte en el sensoramiento satelital utilizado para el monitoreo de variables meteorológicas sobre la superficie oceánica. *Nota Técnica SMN 2022-128*. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/1991>.
10. De Oto, M., García Skabar Y., Cutraro F., Sacco M, Etala P., 2023: Utilización de Información Satelital en Tiempo Cercano al Real para la Comparación de Pronósticos Marinos. *Nota Técnica SMN 2023-143*. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/2505>.
11. Etala, P., S. Alonso, D. Souto, C. Romero y P. Echevarría, 2014: Progreso en el modelo de pronóstico de olas hasta un mosaico global multiescala. *Meteorológica Vol. 39, No. 2*, 37-48.

## 6. Material Auxiliar: Tablas

A continuación, el Tabla 3 detalla los switches y programas utilizados, mientras que el Tabla 4 precisa los parámetros. Es importante señalar que la configuración C requiere switches adicionales, como SMC y RTD, este último

relacionado con el "polo rotado". Los switches que comienzan con la letra 'O' son opcionales y se añadieron para obtener un mayor detalle en las salidas por pantalla. Para una comprensión más profunda de los switches generales, se recomienda consultar el manual del modelo (The WAVEWATCH III® Development Group, 2019).

**Tabla 3.** Switches en común que presentan todas las configuraciones.

Switches	Programas
DIST MPI ST4 STAB3 NL1 DB1 BT1	ww3_grid ww3_strt ww3_prnc ww3_bound
PR3 UQ FLX0 LN1 IC0 IS0 TR0 BS0	ww3_multi ww3_ounf ww3_ounp
WNT1 WNX1 CRT1 CRX1 RWND REF1	
NOGRB O0 O1 O2 O3 O4 O5 O6 O7	

**Tabla 4.** Parámetros asociados a los switches definidos en el Tabla 3. Para los procesos de generación y disipación (SIN4), se utilizaron los valores BETAMAX=1.2 y TAUWSHELTER=1.0 para el dominio global, y BETAMAX=1.4 y TAUWSHELTER=0.5 para los dominios regionales. En cuanto a los parámetros misceláneos (MISC). Para mayor detalle se recomienda ver el manual en <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/tree/develop/manual>.

Sección	Parámetros
<b>SLN1</b>	CLIN = 80.0, RFPM = 1.00, RFHF = 0.50
<b>SIN4</b>	ZWND = 10.0, BETAMAX = 1.20, SWELLF = 0.70, TAUWSHELTER = 1.0
<b>SDS4</b>	FXFM3 = 2.5, SDSC2 = -0.2200E-04, SDSCOS = 0.0, SDSDTH = 70.0
<b>SNL1</b>	LAMBDA = 0.250, NLPROP = 0.278E+08, KDCONV = 0.750, KDMIN = 0.500, SNLCS1 = 5.500, SNLCS2 = 0.833, SNLCS3 = -1.250
<b>SBT1</b>	GAMMA = -0.6700E-01
<b>SDB1</b>	BJALFA = 1.000, BJGAM = 0.730, BJFLAG = .TRUE.
<b>PRO3</b>	CFLTM = 0.70, WDTHCG = 1.50, WDTHTH = 1.50
<b>MISC</b>	CICE0 = 0.25, CICE1 = 0.75, FLAGTR = 4, NOSW = 3, PTM = 2, XP = 0.150
<b>PSMC</b>	LvSMC = 3