



Configuraciones de WAVEWATCH III® en formato hindcast

Nota Técnica SMN 2024-178

**Matias De Oto, Maximiliano Sacco, Federico Cutraro y Soledad
Osorez**

*Dirección de Productos de Modelación Ambiental y de Sensores Remotos
Dirección Nacional de Ciencia a Innovación en Productos y Servicios*

Agosto 2024

Información sobre Copyright

Este reporte ha sido producido por empleados del Servicio Meteorológico Nacional con el fin de documentar sus actividades de investigación y desarrollo. El presente trabajo ha tenido cierto nivel de revisión por otros miembros de la institución, pero ninguno de los resultados o juicios expresados aquí presuponen un aval implícito o explícito del Servicio Meteorológico Nacional.

La información aquí presentada puede ser reproducida a condición que la fuente sea adecuadamente citada.

Resumen

Como parte de los objetivos del proyecto PronoMAR, en este trabajo se realizaron una serie de análisis retrospectivos del oleaje entre agosto de 2023 y abril de 2024, empleando distintas configuraciones del modelo WAVEWATCH III ® (WW3). Este período se caracteriza por importantes desarrollos de sistemas extratropicales sobre y al este de la Plataforma Continental Argentina (PCA). Las configuraciones del WW3 incluyen diversas resoluciones en dominios regulares y un dominio esférico-multicelular. Con el objetivo de evaluar la escalabilidad de los resultados en función de los recursos computacionales disponibles en el Servicio Meteorológico Nacional, se realizaron pruebas en formato "one-way" y "two-way". Finalmente, el desempeño de estas simulaciones sobre la PCA se evaluó mediante observaciones de altura significativa de la ola obtenidas de altímetros satelitales.

Abstract

As part of the objectives of the PronoMAR project, this work presents a series of retrospective wave analyses conducted between August 2023 and April 2024 using various configurations of the WAVEWATCH III ® (WW3) model. This period is characterized by significant developments of extratropical systems over and east of the Argentine Continental Shelf (PCA). The WW3 configurations correspond to different resolutions of regular grids and a spherical-multicellular domain. To assess the scalability of the results based on the computational resources available at the National Meteorological Service, tests were conducted using both "one-way" and "two-way" nesting formats. Finally, the performance of these simulations over the PCA was evaluated using significant wave height observations from satellite altimeters.

Palabras clave: hindcast, WAVEWATCH III ®, olas, corrientes

Citar como:

De Oto, M., Sacco M., Cutraro F., Osorio S., 2024: Configuraciones de WAVEWATCH III® en formato hindcast. Nota Técnica SMN 2024-178.

1. INTRODUCCIÓN

En el marco del convenio PronoMAR¹, el Servicio Meteorológico Nacional (SMN) ha estado fortaleciendo sus capacidades en la implementación de modelos oceánicos de última generación. Hasta la fecha, el rol principal del SMN ha sido actuar como receptor de los productos generados por los investigadores del convenio. Entre estos productos se destacan: (i) el modelo numérico del nivel del mar SIMMAR (Dinápoli y otros, 2020a,d,c; 2021, 2023), que se basa en la física del modelo CROCO y está adaptado a la región de la Plataforma Continental Argentina (PCA); y (ii) el modelo regional de olas basado en WAVEWATCH III (WW3, The WAVEWATCH III ® Development Group, 2019). Aunque se ha avanzado significativamente en el conocimiento del nivel del mar, las ondas de tormenta y las corrientes integradas verticalmente, aún existen desafíos por superar en el modelado numérico de las olas. En esta Nota Técnica se implementan varias configuraciones de dominios para realizar simulaciones retrospectivas (hindcast) a partir de forzantes de viento históricos. El principal objetivo es evaluar la implementación de estas configuraciones en la computadora de alto rendimiento (HPC, por sus siglas en inglés) denominada 'Huayra Muyu' del SMN (en adelante HM). Secundariamente, se realiza una verificación de las simulaciones contra datos de altímetros que actualmente se encuentran operativos

2. CONFIGURACIONES

La **Tabla I** presenta las siete configuraciones de dominios propuestas para realizar los hindcasts de oleaje entre el 1 de agosto de 2023 y el 1 de abril de 2024 utilizando el modelo WW3, totalizando un conjunto de 245 simulaciones diarias. Además, la tabla muestra la discretización en direcciones del espectro (indicada entre paréntesis) y el uso de máscaras con celdas inactivas. Las configuraciones de tipo A están anidadas de forma 'two-way' (los subdominios impactan en los dominios más grandes) utilizando el programa **ww3_multi**, mientras que las configuraciones de tipo B y C están anidadas de forma 'one-way' (los subdominios no impactan en los dominios más grandes) mediante el programa **ww3_shel**.

Las configuraciones de tipo A y B emplean dominios regularmente estructurados, mientras que la configuración C utiliza un tipo esférico-multicelular (SMC). El dominio SMC es global y presenta tres niveles de resolución: 0.2°, 0.4° y 0.8°, con el máximo refinamiento alrededor de las líneas de costa, excepto en el Pasaje Drake, que cuenta con una resolución de 0.4°. Con excepción de las configuraciones A2 y B2, cedidas por investigadores del CIMA para realizar pruebas de viabilidad en HM, y la configuración C también cedida, el resto de los dominios de cada configuración se generaron mediante un código de generación automática desarrollado en el SMN (De Oto y otros, 2024).

¹ <https://www.cima.fcen.uba.ar/pm/>

Tabla I Distintas configuraciones con las cuales se ejecutó WW3.

Configuraciones	Características
A1	<p>Configuración de 3 dominios estructurados regularmente en latitud-longitud:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dominio Global 0.25° (24 direcciones) • Dominio Atlántico Sur 0.15° (24 direcciones) • Dominio Plataforma 0.05° (24 direcciones) <p>Anidados <i>two-way</i> ejecutados con el programa ww3_multi. Utilización de máscara con celdas inactivas (número 3)</p>
A2	<p>Configuración de 3 dominios estructurados en latitud-longitud:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dominio Hemisferio Sur 1° lat, 2° lon, (36 direcciones) • Dominio Atlántico Sur 0.5° (36 direcciones) • Dominio Plataforma 0.2° lon, 0.15° lat (36 direcciones) <p>Anidados <i>two-way</i> ejecutados con el programa ww3_multi</p>
A3	<p>Configuración de 3 dominios estructurados regularmente en latitud-longitud:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dominio Global 1° (36 direcciones) • Dominio Atlántico Sur 0.3° (36 direcciones) • Dominio Plataforma 0.1° (36 direcciones). En este dominio se encuentra enmascarado (nodo inactivo) el sector offshore. <p>Anidados <i>two-way</i> ejecutados con el programa ww3_multi</p>
B1	<p>Configuración de 2 dominios estructurados regularmente en latitud-longitud:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dominio Global 0.5° (36 direcciones) • Dominio Plataforma 0.1° (36 direcciones) <p>Anidados <i>one-way</i> ejecutados mediante el programa ww3_shel. Utilización de máscara con celdas inactivas (número 3)</p>
B2	<p>Configuración de 2 dominios estructurados en latitud-longitud:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dominio Hemisferio Sur 1° lat, 2° lon (36 direcciones) • Dominio Plataforma 0.2° lon, 0.15° lat (36 direcciones) <p>Anidados <i>two-way</i> ejecutados con el programa ww3_shel</p>
B3	<p>Configuración de 2 dominios estructurados regularmente en latitud-longitud:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Dominio Global 0.25° (24 direcciones) • Dominio Plataforma 0.05° (36 direcciones). En este dominio se encuentra enmascarado (nodo inactivo) el sector offshore <p>Anidados <i>two-way</i> ejecutados con el programa ww3_shel</p>
C	<p>Configuración de 1 dominio global no-estructurado (SMC) de 0.8°/0.4°/0.2°. Ejecutado mediante el programa ww3_shel</p>

3. COMPILACIÓN

Todas las configuraciones se implementaron utilizando la versión 7.14 de WW3 (The WAVEWATCH III ® Development Group, 2019) en un entorno GNU paralelo en HM. La física del modelo WW3 se precompiló utilizando las opciones de switches detalladas en la **Tabla II**. Los primeros dos switches (DIST y MPI) indican que el programa se ejecuta en memoria distribuida, lo que es beneficioso para la gestión de los recursos del HPC (Tolman, 2002a).

Tabla II Switches en común que presentan todas las configuraciones.

DIST MPI ST4 STAB3 NL1 DB1 BT1 PR3 UQ FLX0 LN1 IC0 IS0 TR0 BS0 WNT1 WNX1 CRT1 CRX1 RWND REF1 NOGRB O0 O1 O2 O3 O4 O5 O6 O7
--

Los switches relacionados con la física del modelo y el post-procesamiento del forzante se describen brevemente en la Tabla III. 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).

Los switches seleccionados (Tabla II) y sus respectivos parámetros (Tabla IV) definidos en el archivo `namelist/input ww3_grid.nml` son de uso común en estudios globales y regionales. Estos parámetros están dentro de los rangos utilizados en el sistema operativo del SMN/SHN (Etala y otros, 2014).

Tabla III Descripción de los switches usados.

Switches	Características
ST4	Generación y disipación, Ardhuin et al. (2010)
STAB3	Considera el impacto de las rafagas bajo condiciones atmosféricas inestables, Abdalla and Bidlot (2002)
NL1	Aproximación de Interacción Discreta (DIA) para cuádrupletes, Hasselmann et al. (1985)
DB1	Rompimiento limitado por profundidad, Battjes y Janssen (1978)
BT1	Fricción del fondo JONSWAP, Hasselmann et al. (1973)
PR3 UQ	Esquema de propagación de tercer orden con la técnica de promediado de Tolman (2002a)
FLX0	Los flujos de cantidad de movimiento se incluyen en ST4
LN1	Inicio de crecimiento lineal, Cavaleri y Malanotte-Rizzoli (1981)
IC0	Bloqueo de hielo simple. El mar cubierto de hielo se considera "tierra"
IS0	Sin dispersión (scattering) por el hielo marino
TR0	No se utilizan interacciones de tríadas

BS0	Sin dispersión de fondo
WNT1	Interpolación lineal temporal de forzante viento
WNX1	Interpolación lineal espacial de forzante viento
CRT1	Interpolación lineal temporal de corrientes
CRX1	Interpolación lineal espacial de corrientes
RWND	Corrige la velocidad del viento respecto de la velocidad de la corriente
NOGRB	No se incluye el paquete GRIB

Tabla IV Parámetros asociados a los switches definidos en la Tabla II. Los parámetros en negrita se han ajustado de acuerdo con el dominio específico. 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), se eliminó el parámetro PTM de los dominios regionales. Para mayor detalle se recomienda ver el manual en <https://github.com/NOAA-EMC/WW3/tree/develop/manual>.

Inicio de crecimiento lineal, Cavaleri y Malanotte-Rizzoli (1981)	&SLN1	CLIN = 80.0, RFPM = 1.00, RFHF = 0.50
Generación y disipación, Arduin et al. (2010)	&SIN4	ZWND = 10.0, BETAMAX = 1.20 , SWELLF = 0.70, TAUWSHELTER = 1.0
Disipación semi-empírica	&SDS4	FXFM3 = 2.5, SDSC2 = -0.2200E-04, SDSCOS = 0.0, SDSDTH = 70.0
Aproximación de Interacción Discreta (DIA) para cuádrupletes, Hasselmann et al. (1985)	&SNL1	SNL1 LAMBDA = 0.250, NLPROP = 0.278E+08, KDCONV = 0.750, KDMIN = 0.500, SNLCS1 = 5.500, SNLCS2 = 0.833, SNLCS3 = -1.250
Fricción del fondo JONSWAP, Hasselmann et al. (1973)	&SBT1	GAMMA = -0.6700E-01
Rompimiento limitado por profundidad, Battjes y Janssen (1978)	&SDB1	BJALFA = 1.000, BJGAM = 0.730, BJFLAG = .TRUE.
Esquema de propagación de tercer orden con la técnica de promediado de Tolman (2002a)	&PRO3	CFLTm = 0.70, WDTMCG = 1.50, WDTMTH = 1.50
Conjunto de parámetros para switches misceláneos	&MISC	CICE0 = 0.25, CICE1 = 0.75, FLAGTR = 4, NOSW = 3, PTM = 2 , XP = 0.150
Parámetro relacionado con grillas SMC	&PSMC	LvSMC = 3

4. FORZANTES

4.1 Forzante atmosférico

El forzante atmosférico se extrajo del Climate Forecast System v.2 (CFSv2) proporcionado por el NCEI. El catálogo completo de simulaciones está disponible en NCEI² CFSv2³. Se utilizaron las simulaciones denominadas sflux que ofrecen un “first guess” de 9 horas de pronósticos basados en los cuatro análisis diarios de GDAS⁴ (00, 06, 12, 18Z). Esta característica de proporcionar pronósticos horarios a corto plazo a partir de análisis recientes diferencia significativamente a CFSv2 del reanálisis CFSR, que solo cubre hasta 2010.

La **Figura 1** muestra un catálogo parcial de los pronósticos iniciados con el análisis de las 00Z del 1 de noviembre de 2023, destacando con una flecha roja el pronóstico a 5 horas de CFSv2. A partir de estos pronósticos, se reconstruyó una serie temporal horaria para forzar el modelo WW3. Existen varias combinaciones posibles para esta reconstrucción, y se sugiere utilizar los pronósticos más cercanos a los análisis (ver **Tabla V**). De cada archivo, se seleccionaron las siguientes variables: (i) la componente zonal y (ii) meridional del viento a 10 m, (iii) la concentración de hielo, (iv) la temperatura del aire a 2 m (ver **Fig. 2**) y (v) la temperatura de la superficie (no mostrada). Estas variables se presentan en una retícula gaussiana con una resolución aproximada de 20 km. Para una correcta lectura por parte del modelo WW3, se realizó previamente un preprocesamiento en el cual (i) se convirtió la retícula a una malla regular de 0.2° y (ii) se calculó la diferencia denominada *diffT* entre la temperatura del aire a 2 m y la temperatura de la superficie.

cdas1.t00z.sfluxgrbf07.grib2.md5	63.0 bytes	2023-11-05T11:12:34.890Z
cdas1.t00z.sfluxgrbf07.grib2	56.19 Mbytes	2023-11-04T21:45:25.883Z
cdas1.t00z.sfluxgrbf06.inv	6.425 Kbytes	2023-11-05T11:12:33.586Z
cdas1.t00z.sfluxgrbf06.grib2.md5	63.0 bytes	2023-11-05T11:12:33.499Z
cdas1.t00z.sfluxgrbf06.grib2	57.12 Mbytes	2023-11-04T21:43:17.138Z
cdas1.t00z.sfluxgrbf05.inv	6.425 Kbytes	2023-11-05T11:12:32.053Z
cdas1.t00z.sfluxgrbf05.grib2.md5	63.0 bytes	2023-11-05T11:12:31.999Z
cdas1.t00z.sfluxgrbf05.grib2	56.79 Mbytes	2023-11-04T21:42:48.240Z
cdas1.t00z.sfluxgrbf04.inv	6.425 Kbytes	2023-11-05T11:12:30.022Z

Fig. 1 Captura de pantalla del catálogo parcial de las salidas de sflux de CFSv2 que brinda NCEI. En rojo el archivo correspondiente al pronóstico de 5 horas (step 5) comenzando con el análisis de las 00Z del 1 de noviembre de 2023. Fuente: https://www.ncei.noaa.gov/thredds/catalog/model-cfs_v2_anl_6h_fluxf/2023/202311/20231101/catalog.html

² National Centers for Environmental Information (NCEI)

³ <https://www.ncei.noaa.gov/thredds/catalog/model/cfs.html>

⁴ Global Data Assimilation System

Tabla V Combinación de pronósticos a corto plazo extraídos de la salida sflux de CFSv2 para generar una serie horaria para forzar un hindcast de WW3.

```

cdas1.t00z.sfluxgrbf00.grib2 (00Z - first guess)
  cdas1.t00z.sfluxgrbf01.grib2 (01Z - "forecast analysis")
  cdas1.t00z.sfluxgrbf02.grib2 (02Z - "forecast analysis")
  cdas1.t00z.sfluxgrbf03.grib2 (03Z - "forecast analysis")
  cdas1.t00z.sfluxgrbf04.grib2 (04Z - "forecast analysis")
  cdas1.t00z.sfluxgrbf05.grib2 (05Z - "forecast analysis")
cdas1.t06z.sfluxgrbf00.grib2 (06Z - first guess)
  cdas1.t06z.sfluxgrbf01.grib2 (07Z - "forecast analysis")
  cdas1.t06z.sfluxgrbf02.grib2 (08Z - "forecast analysis")
  cdas1.t06z.sfluxgrbf03.grib2 (09Z - "forecast analysis")
  cdas1.t06z.sfluxgrbf04.grib2 (10Z - "forecast analysis")
  cdas1.t06z.sfluxgrbf05.grib2 (11Z - "forecast analysis")
cdas1.t12z.sfluxgrbf00.grib2 (12Z - first guess)
  cdas1.t12z.sfluxgrbf01.grib2 (13Z - "forecast analysis")
  cdas1.t12z.sfluxgrbf02.grib2 (14Z - "forecast analysis")
  cdas1.t12z.sfluxgrbf03.grib2 (15Z - "forecast analysis")
  cdas1.t12z.sfluxgrbf04.grib2 (16Z - "forecast analysis")
  cdas1.t12z.sfluxgrbf05.grib2 (17Z - "forecast analysis")
cdas1.t18z.sfluxgrbf00.grib2 (18Z - first guess)
  cdas1.t18z.sfluxgrbf01.grib2 (19Z - "forecast analysis")
  cdas1.t18z.sfluxgrbf02.grib2 (20Z - "forecast analysis")
  cdas1.t18z.sfluxgrbf03.grib2 (21Z - "forecast analysis")
  cdas1.t18z.sfluxgrbf04.grib2 (22Z - "forecast analysis")
  cdas1.t18z.sfluxgrbf05.grib2 (23Z - "forecast analysis")

```

US National Weather Service - NCEP
2022-11-29 12Z

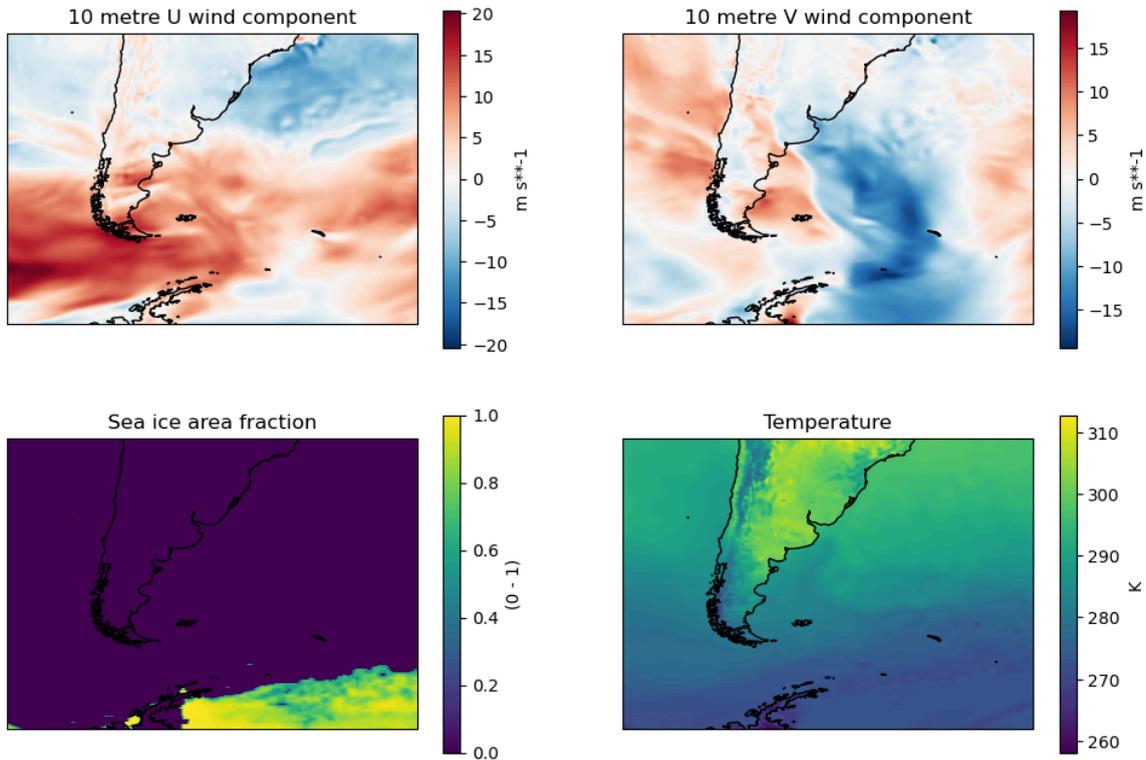


Fig. 2 Vista parcial de algunos de los campos globales relevantes para el forzamiento del hindcast de olas, componente de viento zonal (panel superior izquierdo) y meridional (panel superior derecho) a 10 m, fracción del área de hielo marino (panel inferior izquierdo), temperatura del aire a 2 m (panel inferior derecho) correspondientes a las 12Z del día 29 de Noviembre de 2022.

4.2 Corrientes integradas

El principal objetivo de incluir las corrientes integradas en las configuraciones (ver Tabla I) es analizar el costo computacional asociado a su incorporación. Por ejemplo, las corrientes de marea, que pueden superar el 1 m/s en la PCA, presentan un reto significativo para garantizar la estabilidad numérica bajo la condición de convergencia CFL. No obstante, este estudio es pionero en la incorporación de corrientes integradas de alta variabilidad en la simulación regional de olas, un forzante generalmente no considerado en las simulaciones globales.

Las corrientes integradas utilizadas provienen del ensamble de pronósticos del Modelo para la Simulación de la Onda de Tormenta (MSOT), una versión previa del actual modelo barotrópico regional SIMMAR (Dinapoli y otros, 2020a, 2020b, 2020c; 2021, 2023) que se ejecuta en HM. MSOT abarca gran parte de la PCA y utiliza una grilla no estructurada de tipo Arakawa-C, con resoluciones que varían desde 15 km en los bordes de la PCA (isobata de 200 m) hasta 5 km cerca de la costa. MSOT se compone de un conjunto de 20 miembros que generan pronósticos horarios a 48 horas, ejecutados en el ciclo de las 00Z, por lo que no se trata de un hindcast. Estas características requieren un preprocesamiento específico para la ingesta de

datos en WW3, que incluye (i) la conversión de la retícula a una malla regular de $1/8^\circ$ y (ii) la concatenación de pronósticos cada 24 horas. Cabe destacar que, por el momento, estas simulaciones no están disponibles para el público.

El diseño de MSOT 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 como HYCOM⁵. Para ilustrar este hecho, el panel A de la **Figura 3** muestra las corrientes integradas (líneas de corriente, en nudos) obtenidas con HYCOM (panel izquierdo) y MSOT (panel derecho) en una zona cercana a Pinamar, Buenos Aires, a las 4:00 UTC del 20 de enero de 2024. Nótese la diferencia en dirección en las corrientes, hecho que se observa con mayor claridad en el panel B, en donde MSOT (panel derecho) a diferencia de HYCOM (panel izquierdo) reproduce el régimen de marea semidiurna mixta característico de la región.

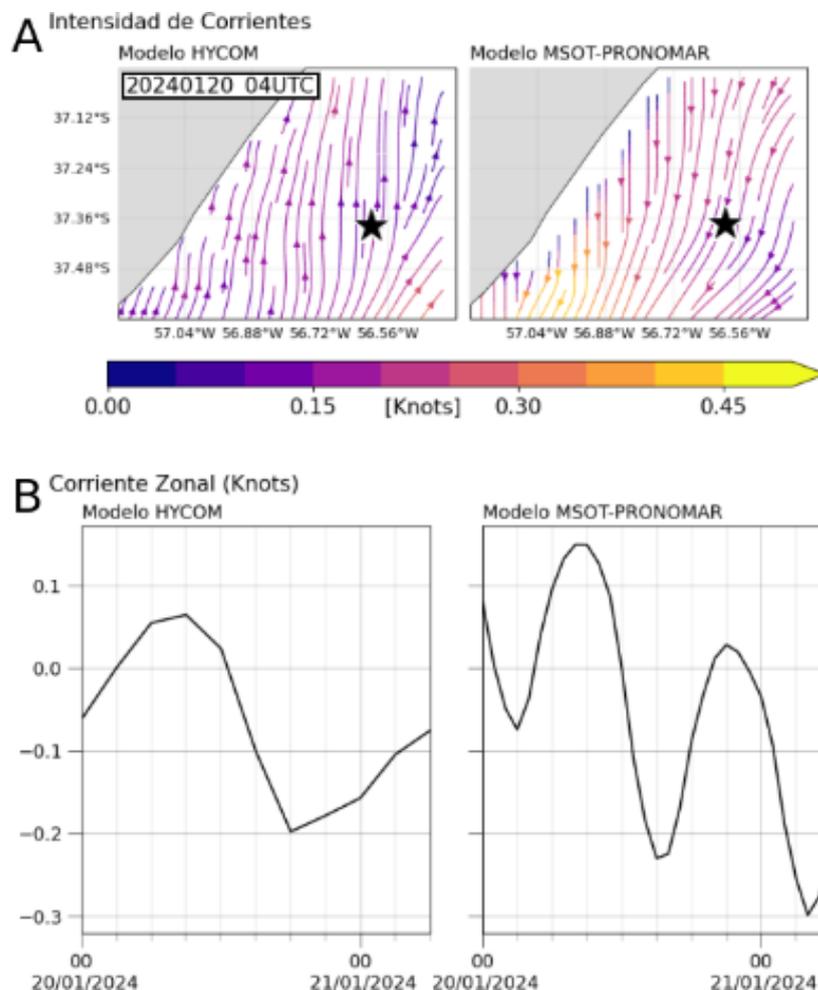


Fig. 3 Panel A. Campo regional de líneas de corrientes (nudos) en las proximidades de Pinamar, Provincia de Buenos Aires para las 4UTC del 20 de enero del 2024 para el modelo global HYCOM (panel izquierdo) y para el miembro 1 de MSOT (panel derecho). Panel B. Serie temporal de corriente zonal (nudos) para HYCOM (panel izquierdo) y MSOT (panel derecho) en el punto marcado con una estrella en el panel A.

⁵ <https://nomads.ncep.noaa.gov/pub/data/nccf/com/navo/prod/>

5. EJECUCIÓN Y DESEMPEÑO TEMPORAL

Tomando como referencia el trabajo de Tolman (2002a), la **Figura 4** muestra la curva de tiempo en función del número de procesadores que se utilizaron en la configuración A1 (ver Tabla I). 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 de HM 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 segundos. (18 minutos). 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.

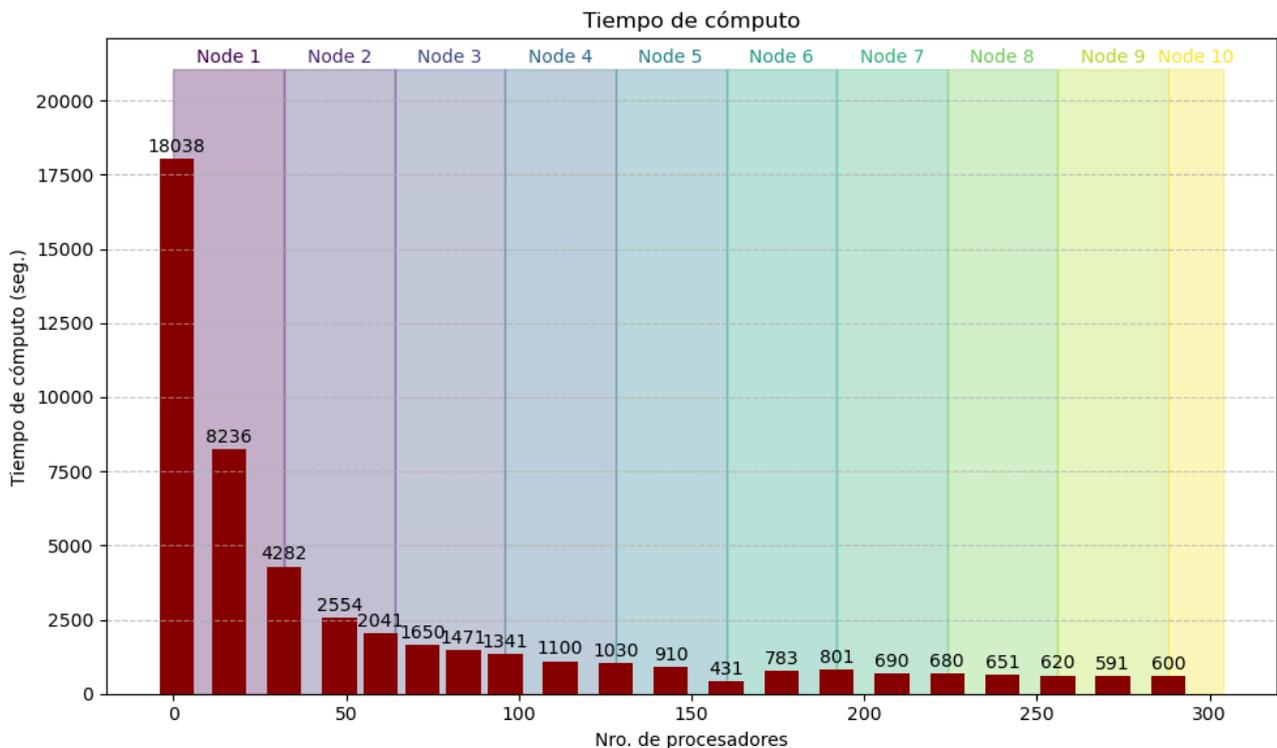


Fig. 4 Tiempo de cómputo promedio (barras, seg.) de una simulación de 24 h para la configuración A1 en función de la cantidad de procesadores/nodos.

La **Figura 5** presenta, para cada configuración, el tiempo de ejecución promedio de una simulación de 24 horas utilizando 128 procesadores. El tiempo de ejecución se computó como el promedio de las 245 simulaciones diarias en el periodo de hindcast. 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 del único dominio que es el global.

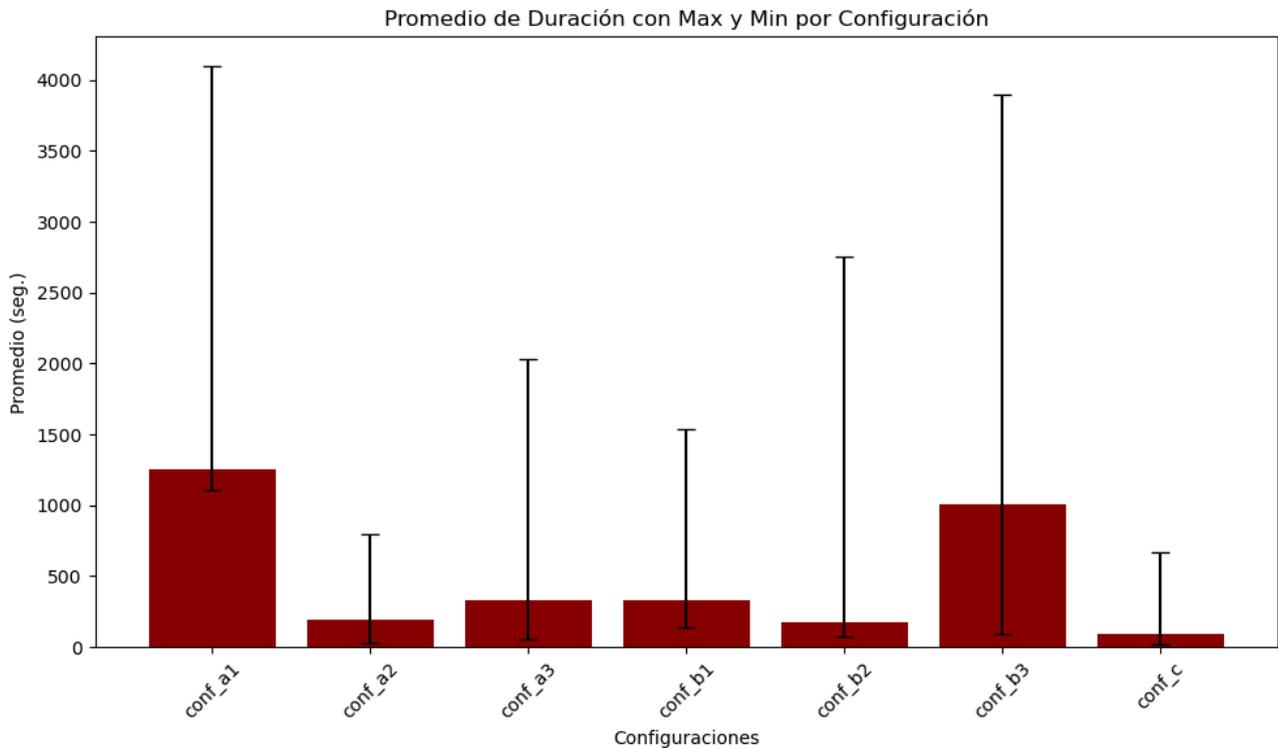


Fig. 5 Tiempo de ejecución promedio (barras, seg.) y extremos (barbas) de una simulación de 24 h para las distintas configuraciones utilizando 128 procesadores/ 4 nodos.

En la **Figura 6** se 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 del forzante, de no-estructuradas a regulares y la ejecución del programa *ww3_prc*. 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 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 solo 1 procesador.

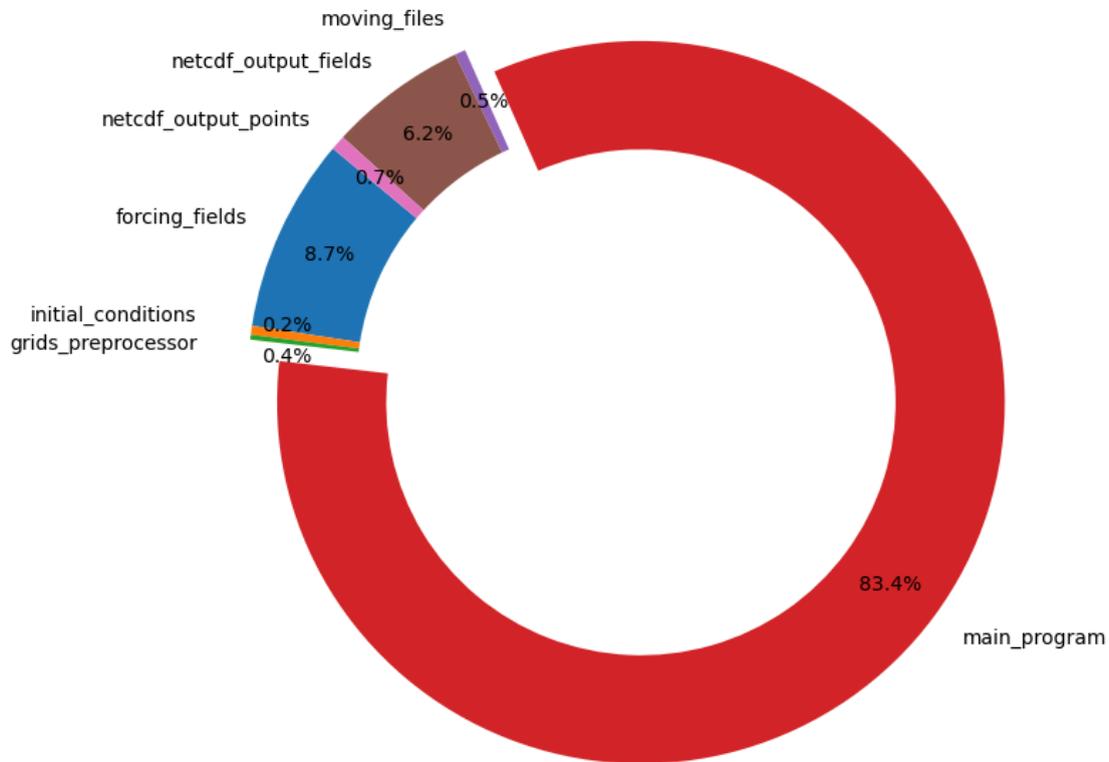


Fig. 6 Distribución (en porcentaje) del tiempo de ejecución promedio de cada proceso en la simulación de 24 h de la configuración A1.

6. VALIDACIÓN

6.1 Validación general

Se utilizaron observaciones remotas de altura significativa de la ola (SWH, por sus siglas en inglés) provenientes de los satélites Jason-3, Sentinel-6, Saral y SWOT (ver características en De Oto y otros, 2022). Para todas las validaciones, se consideró el dominio de mayor resolución para cada configuración, con excepción de la configuración C, que únicamente dispone de un solo dominio (ver Tabla I). No obstante, en la sección de “Figuras Suplementarias” se muestran las validaciones con los dominios de menor resolución.

La **Figura 7** muestra los campos regionales de bias (paneles superiores) y scatter-index (SI, paneles inferiores) de SWH, en bins de 0.25° , para las siete configuraciones. El SI es un parámetro similar al RMSE, pero normalizado por la media (en porcentajes) y de mayor utilidad en estadísticas de olas (ver De Oto y otros, 2023). Se observa que todas las configuraciones sobreestiman el error y dispersión de la SWH respecto de las observaciones de altímetros sobre la PCA (tonalidades rojas). Por el contrario, se observa una subestimación de estos parámetros hacia mar abierto (tonalidades azules). Esta misma figura (Fig. A1) pero para los dominios de menor resolución se presenta en la sección de Figuras Auxiliares.

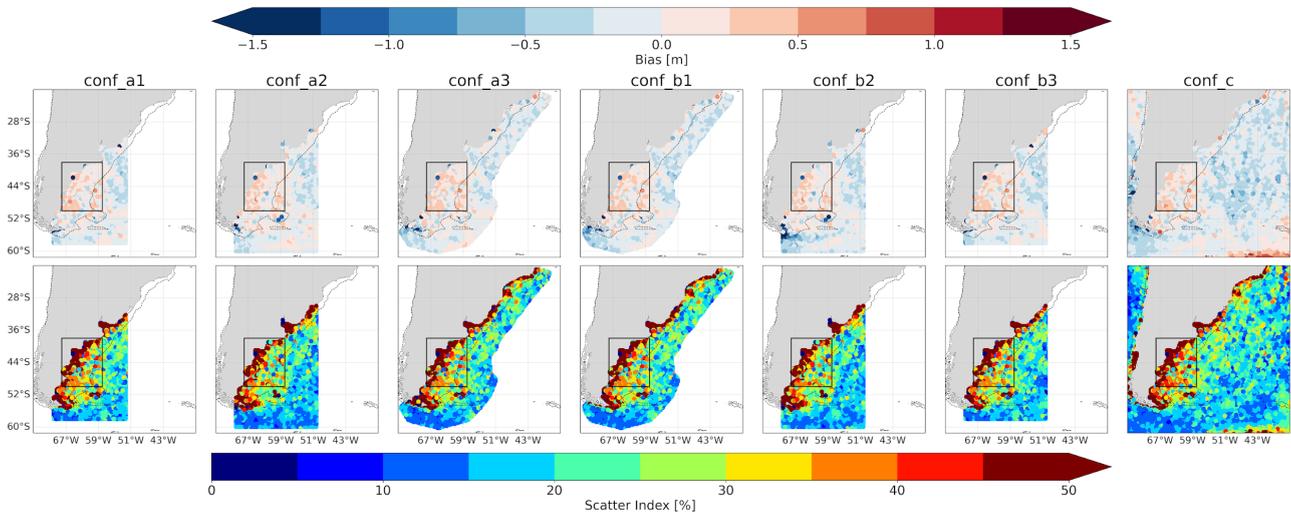


Fig. 7 Campos regionales de bias (superior) y scatter-index (inferior) para las 7 configuraciones abordadas en este trabajo (ver títulos). Los rectángulos demarcan el área que se consideró como PCA.

La Tabla VI muestra los estadísticos promediados sobre la PCA, considerada como el área acotada entre las latitudes -50° y -38° y las longitudes 292° y 302° (ver rectángulo en Fig. 7). En términos promedios, particularmente en el SI, se observa que los resultados se encuentran fuera del rango de valores reportado para la región de estudio en modelos operativos regionales y globales, que oscila entre el 10-15% (De Oto y otros, 2023). Cabe destacar que en De Oto y otros (2023) el periodo utilizado fue el año 2021 mientras que el dominio abarcaba el área de plataforma del modelo Austral-WW3 (Etala y otros, 2014). Esta misma tabla (Tabla A1) pero para los dominios de menor resolución se presenta en la sección de Figuras Auxiliares.

Tabla VI Promedio espacial de bias y scatter-index sobre la PCA considerada como el área comprendida entre las latitudes -50° y -38° y las longitudes 292° y 302° (ver rectángulos en Fig. 7).

	conf_a1	conf_a2	conf_a3	conf_b1	conf_b2	conf_b3	conf_c
bias	0.09	0.11	0.11	0.1	0.11	0.1	0.08
rmsd	0.56	0.56	0.56	0.57	0.57	0.56	0.58
nrmse	14.0	13.6	14.6	14.6	13.7	14.0	14.1
SI	35.7	35.8	35.7	35.9	36.0	35.7	37.9
HH	46.4	43.4	46.4	46.7	43.7	46.4	45.7
counts	1433.6	1434.7	1433.2	1433.2	1434.7	1433.6	1437.7

6.2 Validación puntual

Para las distintas configuraciones (ver Tabla I), el panel izquierdo de la Figura 8 muestra el crecimiento de SWH para un punto situado en la boca del Golfo San Matías (GSM) durante una tormenta que se desarrolló entre los días 12 y 13 de febrero de 2024 sobre la PCA⁶. El panel derecho muestra el promedio de la diferencia de SWH entre configuraciones y altímetros sobre la PCA (ver recuadro en panel medio). Se consideró como la boca del GSM la posición -41.56° y 296.32° , mientras que para la PCA se consideró la misma región tomada en la sección 6.1.

Las corrientes integradas verticalmente impactan en la altura significativa de las olas (SWH), generando una oscilación semidiurna en la boca del GSM (panel izquierdo). Esta oscilación no se observa en la configuración C, ya que el dominio global no incluye corrientes de alta resolución. Del mismo modo, no se detecta en los dominios de menor resolución de las configuraciones 'one-way' (grupo b), como se ilustra en la Fig. A2 de la sección Figuras Auxiliares. En esta región, las corrientes de marea pueden superar el 1 m/s (Tonini et al., 2017); sin embargo, su influencia sobre el oleaje aún no ha sido estudiada y no se dispone de observaciones directas mediante olígrafos. La validación con los datos de altímetros (panel derecho) muestra que el modelo subestima los valores de SWH, lo que contrasta significativamente con la validación general, donde predominaba la sobreestimación (ver Sección 6.1). A pesar de la variedad de configuraciones empleadas, todas han mostrado un comportamiento similar, tanto en la boca del GSM como en el promedio sobre la PCA.

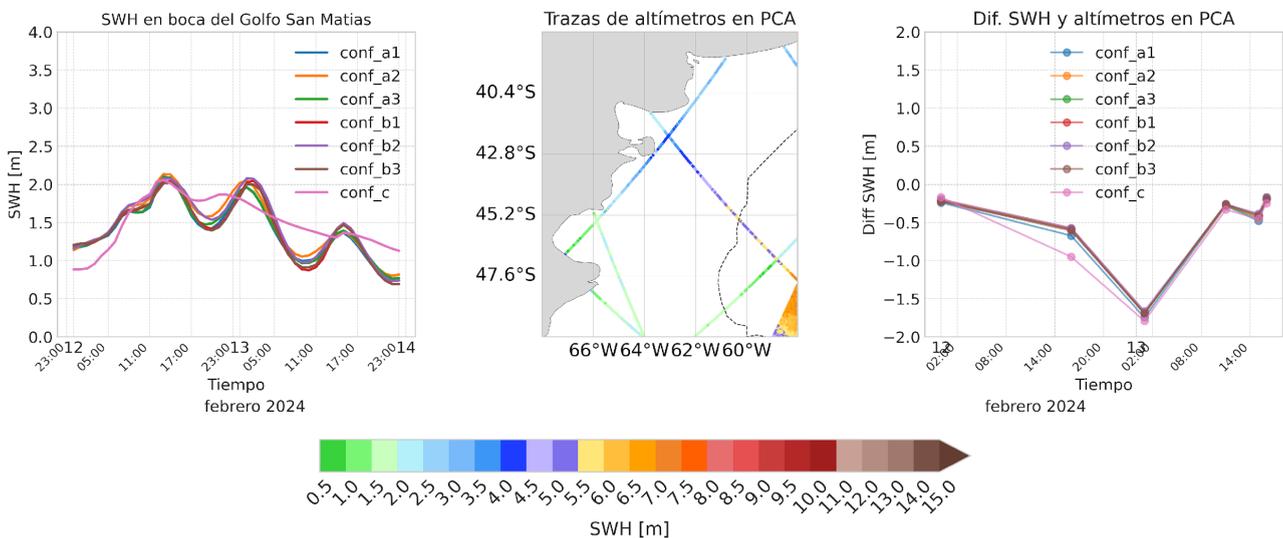


Fig. 8 Panel izquierdo: SWH modelada por las distintas configuraciones (ver etiquetas) en la boca del GSM, posición -41.56° y 296.32° . Panel central: SWH en las trazas de altimétricas sobre el norte de la PCA (rectángulo en Fig. 7). Panel derecho: Diferencia promedio de SWH entre configuraciones (ver etiquetas) y las trazas de altímetros en PCA (panel medio).

6

<https://www.rionegro.com.ar/sociedad/video-mareas-extraordinarias-en-las-grutas-genero-destrozo-s-y-autos-atrapados-por-el-mar-3413033/>

7. 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). Esta nota técnica evalúa diversas configuraciones del WW3 para determinar su escalabilidad en relación con los recursos computacionales del SMN. Se implementó una compilación de WW3 con 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 en el sistema de computación de alto rendimiento (HPC) se alcanza con 128 procesadores, equivalentes a 4 nodos.

Los resultados indican que la configuración B2 “one-way” es ligeramente menos eficiente en términos de tiempo de procesamiento comparada con la configuración A2 “two-way”. La configuración C mostró tiempos de cómputo prometedores y merece una exploración adicional. Sin embargo, las observaciones de altura significativa de las olas obtenidas de altímetros revelaron sobreestimaciones en la Plataforma Continental Argentina (PCA) y subestimaciones en mar abierto en todas las configuraciones. El análisis de un episodio de tormenta mostró subestimaciones específicas en el norte de la PCA, presentando un desafío significativo para la calibración del pronóstico de olas, lo cual será abordado en futuros trabajos.

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 este desarrollo, a pesar de que ya no se encuentra vinculada a nuestra institución.

8. FIGURAS AUXILIARES

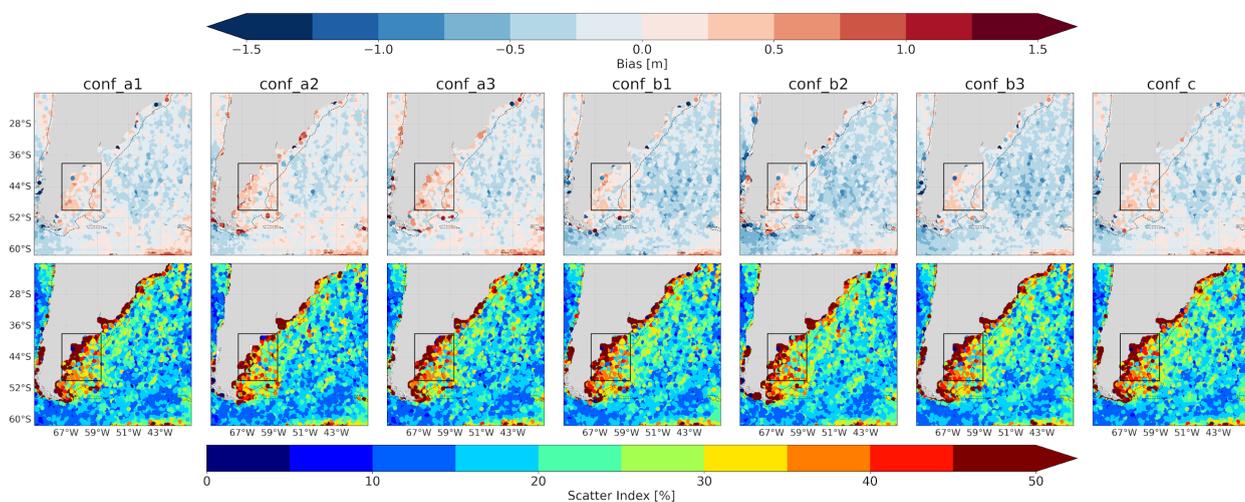


Fig. A1 Ídem Fig. 7 pero para los dominios de menor resolución.

Tabla AI Ídem Tabla VI pero para los dominios de menor resolución.

	conf_a1	conf_a2	conf_a3	conf_b1	conf_b2	conf_b3	conf_c
bias	0.09	0.13	0.12	0.03	0.04	-0.0	0.08
rmsd	0.57	0.59	0.58	0.57	0.6	0.57	0.58
nrmse	13.8	13.7	14.2	14.3	14.1	13.8	14.1
SI	36.7	33.2	35.1	36.6	35.4	36.7	37.9
HH	45.8	39.8	43.0	45.7	45.7	45.6	45.7
counts	1430.4	1461.9	1454.0	1445.7	1444.7	1430.9	1437.7

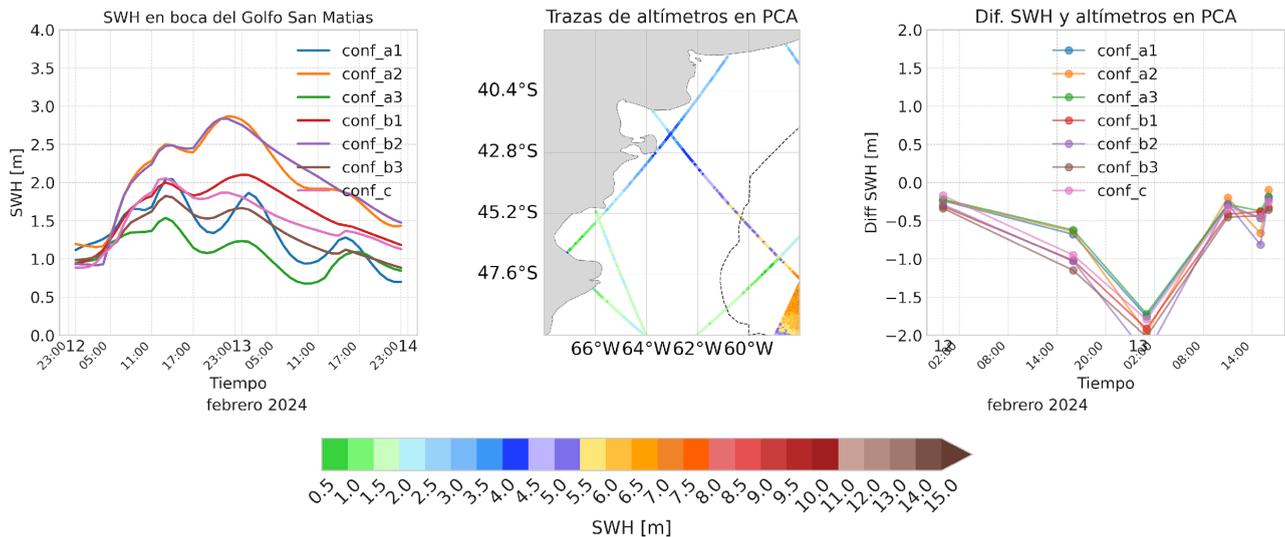


Fig. A2. Ídem Fig. 8 pero para los dominios de menor resolución.

9. REFERENCIAS

De Oto, M., García Skabar, Y. y Etala P., 2024: Generación automática de dominios regulares para la ejecución del modelo de olas WAVEWATCH III ®. Nota Técnica SMN 2024-172. <http://hdl.handle.net/20.500.12160/2775>.

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>.

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>.

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.

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>.

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>.

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>

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>.

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.

The WAVEWATCH III® Development Group 2019. User manual and system documentation of WAVEWATCH III (R) version 6.07.

Tolman, H. L., 2002a: Distributed memory concepts in the wave model WAVEWATCH III. *Parallel Comput.*, 28, 35—52.

Tonini, M. H., & Palma, E. D. (2017). Tidal dynamics on the North Patagonian Argentinean gulfs. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 189, 115-130.

Instrucciones para publicar Notas Técnicas

En el SMN existieron y existen una importante cantidad de publicaciones periódicas dedicadas a informar a usuarios distintos aspectos de las actividades del servicio, en general asociados con observaciones o pronósticos meteorológicos.

Existe no obstante abundante material escrito de carácter técnico que no tiene un vehículo de comunicación adecuado ya que no se acomoda a las publicaciones arriba mencionadas ni es apropiado para revistas científicas. Este material, sin embargo, es fundamental para plasmar las actividades y desarrollos de la institución y que esta dé cuenta de su producción técnica. Es importante que las actividades de la institución puedan ser comprendidas con solo acercarse a sus diferentes publicaciones y la longitud de los documentos no debe ser un limitante.

Los interesados en transformar sus trabajos en Notas Técnicas pueden comunicarse con Ramón de Elía (rdelia@smn.gob.ar), Luciano Vidal (lvidal@smn.gob.ar) o Martin Rugna (mrugna@smn.gob.ar) de la Dirección Nacional de Ciencia e Innovación en Productos y Servicios, para obtener la plantilla WORD que sirve de modelo para la escritura de la Nota Técnica. Una vez armado el documento deben enviarlo en formato PDF a los correos antes mencionados. Antes del envío final los autores deben informarse del número de serie que le corresponde a su trabajo e incluirlo en la portada.

La versión digital de la Nota Técnica quedará publicada en el Repositorio Digital del Servicio Meteorológico Nacional. Cualquier consulta o duda al respecto, comunicarse con Melisa Acevedo (macevedo@smn.gob.ar).