

CARACTERIZACIÓN DEL OLEAJE EN EL ESTUARIO DE BAHÍA BLANCA PARA LA OBTENCIÓN DE ENERGÍA UNDIMOTRIZ

CHARACTERISATION OF THE WAVES IN THE BAHÍA BLANCA ESTUARY FOR WAVE ENERGY PRODUCTION

Laura Battaglia^{a,b}, Mario A. Storti^a, Lisandro M. Rojas^c y Franco E. Dotti^c

^a*Centro de Investigación de Métodos Computacionales (CIMEC) - UNL/CONICET
Predio CONICET Santa Fe, Colectora Ruta Nac 168, Km 472, Paraje El Pozo, Santa Fe, Argentina
e-mail: (lbattaglia,mario.storti)@cimec.unl.edu.ar - <http://www.cimec.santafe-conicet.gov.ar>*

^b*Grupo de Investigación en Métodos Numéricos en Ingeniería (GIMNI)
UTN Facultad Regional Santa Fe - Lavaise 610, Santa Fe, Argentina*

^c*Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada (GIMAP)
UTN Facultad Regional Bahía Blanca - 11 de Abril 461, Bahía Blanca, Buenos Aires, Argentina
gimap@frbb.utn.edu.ar, <http://www.frbb.utn.edu.ar>*

Palabras clave: elementos finitos, ecuaciones de Saint-Venant, oleaje, energía undimotriz, recolector pendular.

Resumen. El desarrollo de un convertidor pendular para recolectar energía undimotriz requiere la caracterización del oleaje en el sitio de implantación del dispositivo, específicamente en el Estuario de Bahía Blanca. A tal fin, se propone desarrollar un modelo de elementos finitos para resolver las ecuaciones de Saint-Venant combinadas con un modelo espectral de olas, aplicando los módulos Telemac2d y Tomawac del sistema Telemac-Mascaret (<https://www.opentelemac.org>), teniendo en cuenta la influencia de las mareas y el viento en la dinámica del estuario. Los resultados son validados con registros de mareas y oleaje en la zona de estudio, y se emplearán para estimar el rendimiento del dispositivo recolector. Las actividades se realizan de manera colaborativa entre el Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada, el el Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca y el Centro de Investigación en Métodos Computacionales.

Keywords: finite elements, Saint-Venant Equations, waves, wave energy, pendulum collector.

Abstract. The development of a pendulum collector for harvesting wave energy requires the characterisation of the waves at the site where the device is to be installed, specifically at the Bahía Blanca Estuary. To this end, a finite element model is proposed to solve the Saint-Venant equations, combined with a spectral wave model, applying the modules Telemac2d and Tomawac of the Telemac-Mascaret system (<https://www.opentelemac.org>), taking into account the influence of tides and wind on the estuary dynamics. The results are validated with tide and wave records in the study area and will be used to estimate the performance of the collecting device. The activities are carried out in a collaborative manner between the Grupo de Investigación en Multifísica Aplicada, the Consorcio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca and the Centro de Investigación en Métodos Computacionales

1. INTRODUCCIÓN

Se reporta el desarrollo del modelo de oleaje para estimación de capacidades de generación de energía undimotriz mediante un dispositivo montado en una boya ubicada en el canal de acceso al Puerto de Bahía Blanca. El dispositivo consiste en un recolector pendular para abastecimiento de balizas e instrumental en boyas del citado canal. El modelo de oleaje resulta insumo necesario para la estimación de la interacción fluido-estructura de las olas con la boya de soporte del generador, que es la etapa posterior de ejecución de las tareas.

Existen numerosas experiencias en la simulación numérica de la circulación en estuarios, como la de [Jia et al. \(2015\)](#), quienes estudian la interacción de olas y corrientes en un estuario dominado por la corriente de un río y las olas, estableciendo una relación entre la influencia de las olas y la estacionalidad. Por su parte, [Cardoso Guimaraes et al. \(2019\)](#) emplean un modelo de oleaje resuelto con el software Tomawac para estimar el potencial de energía de olas en la costa de Brasil, y validan con datos de oleaje en boyas de referencia. Trabajos similares en esa región son los de [Oleinik et al. \(2017a\)](#) y [Oleinik et al. \(2017b\)](#).

El estuario de Bahía Blanca, en la Fig. 1, ha sido estudiado por numerosos autores ([Perillo y Piccolo, 1991](#); [Melo, 2021](#); [Perillo y Piccolo, 2021](#)), estableciendo que las características dinámicas de la zona, tal que la circulación en el estuario está mayoritariamente dominada por las mareas, aunque la geomorfología compleja del estuario y los vientos prevalentes producen desviaciones importantes de la marea astronómica. En particular, [Perillo y Piccolo \(2021\)](#) la descripción física oceanográfica del Estuario de Bahía Blanca, incluyendo mediciones de velocidades en secciones transversales de ciertas secciones del Canal Principal de acceso al puerto. [Campuzano et al. \(2014\)](#) estudiaron numéricamente el régimen de mareas del estuario de Bahía Blanca, con énfasis en las componentes de marea significativas para el sistema.

[Pescio et al. \(2012\)](#) estiman la ola extrema en la zona exterior del estuario, mediante estadística de extremos sobre simulaciones numéricas. Para ello, se implementó un modelo SWAN ([The SWAN team, 2023](#)) para simulaciones a 35 años, con forzante de vientos de NCEP/NCAR. El área de estudio es muy pequeña entre Monte Hermoso y Punta Alta. Indican que el estuario de Bahía Blanca, de acuerdo a la clasificación morfológica de Fairbridge, es un estuario de planicie costera, por ser de relieve bajo y con una planicie en forma embudo. [Álvarez et al. \(2016\)](#) desarrollan un modelo un poco más al sur de Bahía Blanca, y usan datos de modelos de viento.

Otros modelos han sido desarrollados para distintos sectores de la Costa Atlántica de Argentina, como [Pescio et al. \(2016\)](#), que estudia la validez de los modelos de viento NCEP/NCAR en contraste con mediciones locales en la plataforma patagónica, o [Echevarría et al. \(2016\)](#), quienes hacen estudios empleando SWAN ([The SWAN team, 2023](#)) a lo largo de la costa de la Pcia. de Buenos Aires.

En este artículo se resumen los estudios iniciales para estimar las características del oleaje en el estuario de Bahía Blanca. Para ello, se introduce una descripción del área de estudio y fuentes de información, y luego se describen las ecuaciones que gobiernan los fenómenos a analizar. Por último, se describe el modelo, se presentan los resultados preliminares del caso y se resumen las conclusiones obtenidas.

2. ECUACIONES DE GOBIERNO

2.1. Ecuaciones de Saint Venant

El código Telemac-2D ([Telemac-Mascaret, 2023](#)) resuelve las ecuaciones de Saint-Venant, que comprenden una ecuación de continuidad y dos ecuaciones de momentum, correspondientes a las direcciones del plano en el que se estudia el problema ([Hervouet, 2007](#)). La ecuación



Figura 1: Mapa del estuario de Bahía Blanca. Fuente: [OpenStreetMap contributors \(2023\)](#).

de continuidad está dada de la siguiente forma,

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla h + h \nabla \cdot \mathbf{u} = S_h \quad (1)$$

en la cual la profundidad de agua es h , el vector de velocidad horizontal es $\mathbf{u} = [u \ v]^T$, con u, v las componentes de velocidad en x e y , respectivamente, y S_h es un término fuente. Las ecuaciones de momentum en dirección x e y son

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} &= -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h \nu_t \nabla u) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} &= -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \nabla \cdot (h \nu_t \nabla v) \end{aligned} \quad (2)$$

donde g es la aceleración de la gravedad, Z es la elevación ν_t es un coeficiente de difusión de momentum y S_x, S_y son componentes horizontales de términos fuente en los cuales se incluyen efectos del viento, fricción de fondo, fuerza de Coriolis u otros.

2.2. Modelo de olas

La ecuación de evolución del espectro direccional de la acción del oleaje puede escribirse como

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial(\dot{x}N)}{\partial x} + \frac{\partial(\dot{y}N)}{\partial y} + \frac{\partial(\dot{k}_x N)}{\partial k_x} + \frac{\partial(\dot{k}_y N)}{\partial k_y} = \mathbf{Q}(x, y, k_x, k_y, t) \quad (3)$$

donde $N = N(\mathbf{x}, \mathbf{k}, t) = N(x, y, k_x, k_y, t)$ es el espectro de acción de olas, siendo \mathbf{x} el vector posición, $\mathbf{k} = [k_x, k_y] = [k \sin(\theta), k \cos(\theta)]$ el vector de número de onda y θ la dirección de propagación de ola. El término fuente \mathbf{Q} comprende términos fuente (o sumidero) que permiten considerar fenómenos como el de tracciones producidas por el viento, refracción, *white-capping*, disipación por fricción del viento, entre otros.

3. MODELO NUMÉRICO

3.1. Definición del área y teselado

Los datos geográficos y batimétricos del área a estudiar se analizaron empleando [QGIS.org](https://qgis.org) (2023), accediendo a bases de datos tales como [OpenStreetMap contributors](https://openstreetmap.org) (2023) para los mapas y divisiones políticas, y [GEBCO Compilation Group](https://gebcobathymetry.org) (2023) para la batimetría, Fig 2.

La Fig. 2 incluye, además del área (tentativa) delimitada para el análisis, las posiciones de boyas y la ubicación de la torre mareográfica. Hay otras boyas del sistema de Estaciones de Monitoreo Ambiental Costero (EMAC, 2024), que incluyen la torre mareográfica y registran variables ambientales. En particular, se emplearán variables medidas en la torre mareográfica y en la boya de referencia para comparar con los resultados numéricos.

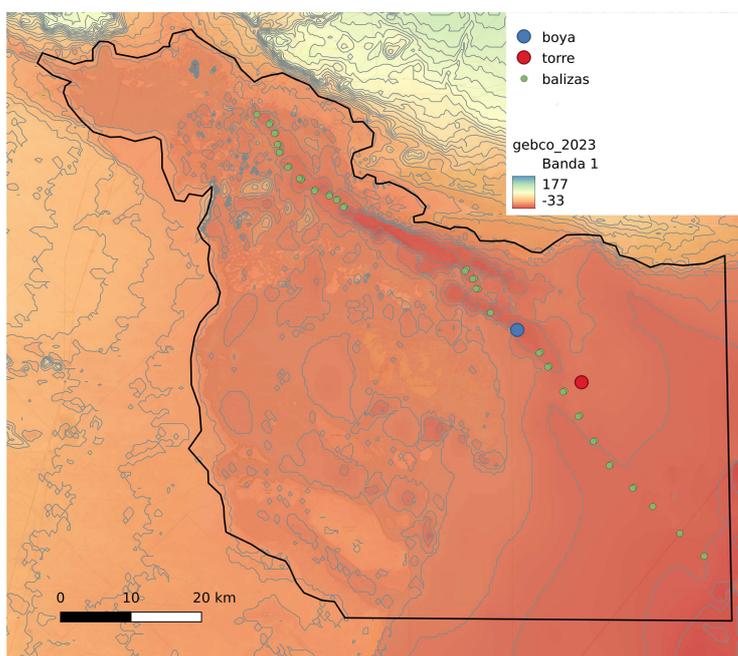


Figura 2: Mapa del estuario de Bahía Blanca con batimetría y curvas de nivel. Posiciones de boyas (verde), boya en posición de referencia (azul) y torre mareográfica (rojo). Fuentes: [OpenStreetMap contributors](https://openstreetmap.org) (2023); [GEBCO Compilation Group](https://gebcobathymetry.org) (2023); [Consortio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca](https://www.gestorpuerto.com.ar) (2024).

La malla de elementos finitos triangulares cuenta con 2562 nodos y 4866 elementos, de tamaño uniforme, y se encuentra representada en la Fig. 3. No se realizó análisis de sensibilidad de malla.

3.2. Condiciones de borde e iniciales

Para la solución de las ecuaciones de Saint Venant, se aplican condiciones de borde en el lateral derecho y en el borde inferior, rectos, correspondiente a las fronteras marinas, véase la Fig. 2. Estas condiciones vienen dadas por el régimen de mareas, en términos de profundidades y de componentes de velocidad oeste-este y sur-norte, con las fases correspondientes. En una primera instancia, se consideraron únicamente las nueve componentes de marea identificadas como principales por [Campuzano et al. \(2014\)](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2014.05.014). Luego, se emplearon 31 de las 34 componentes del modelo FES2014 ([Lyard et al., 2021](https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.107888)) correspondientes al sitio, interpoladas en los nodos del contorno.

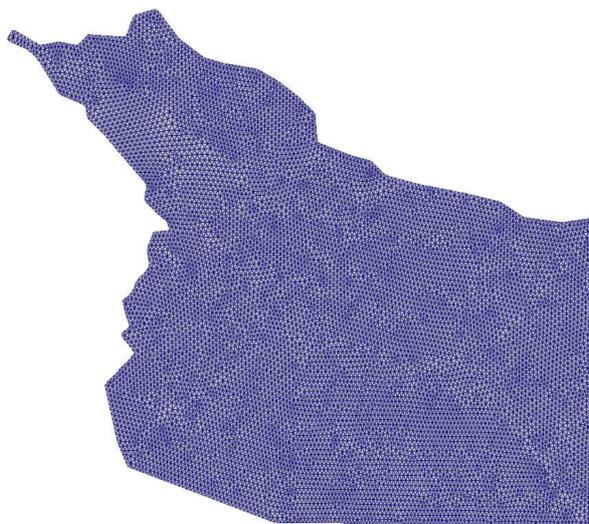


Figura 3: Malla de elementos finitos para los modelos de Telemac-2D y Tomawac.

Debido al escaso caudal de los ríos que desaguan en el estuario, los aportes correspondientes no son considerados en el modelo numérico. Los mayores aportes, que corresponden al río Sauce Chico y al arroyo Napostá Grande, siendo los caudales medios anuales del orden de los $5,80 \text{ m}^3/\text{s}$ y $2,70 \text{ m}^3/\text{s}$, respectivamente (Campuzano et al., 2014; Perillo y Piccolo, 1991), muy inferiores a los flujos originados por las mareas. Para las ecuaciones de aguas poco profundas, se empleó una ley de fricción tipo Manning, con un coeficiente $n = 0,02$.

Si bien existen bases de datos de viento extendidas, como la de NCEP-NCAR (2024), se priorizó el uso de registros locales. Específicamente, se tomaron datos de dirección e intensidad de viento de la boya denominada “Puerto de Bahía Blanca Exterior”, indicada en azul en la Fig. 2. La instrumentación de la boya permite el registro de una serie de parámetros, publicados en línea para valores diarios en [este enlace](#). A través del CGPBB, se accedió al registro en mayores períodos de tiempo, particularmente para el elegido para la simulación numérica, tal que sobre el dominio se determinó un campo de velocidades con componentes en x e y variables en el tiempo.

Las condiciones iniciales corresponden a una posición de superficie libre para una profundidad de $1,93 \text{ m}$ medida en la torre mareográfica indicada en la Fig. 2, tomada de Campuzano et al. (2014). En el caso de la solución del problema de olas, se adoptó una altura significativa de olas de 1 m en las fronteras oceánicas.

3.3. Parámetros de ejecución

El problema se resolvió acoplando en cada paso de tiempo una instancia de Telemac-2D y otra de Tomawac. Se simularon 5 días, con un paso de tiempo de $0,5 \text{ s}$, a partir del las 0hs del 01 de enero de 2023.

En el problema de aguas poco profundas, la solución se obtuvo con triángulos lineales para velocidad y presión, con *streamline upwind Petrov-Galerkin* (SUPG) activado para las velocidades, y corrección sobre la ecuación de continuidad.

En el problema de propagación de olas, se activaron términos fuentes de viento y la disipación por fricción de fondo. Se emplea un espectro direccional de frecuencia mínima 0.08 Hz y relación entre frecuencias consecutivas de 1.10 , para 24 frecuencias y 12 direcciones.

Los análisis se hicieron en un servidor de cómputo, Intel 12th Gen Core i9-12900KF, con

24 procesadores y 128Gb de RAM, empleando 8 procesadores y aproximadamente 14hs de cómputo.

4. RESULTADOS

Los resultados obtenidos, de caracter preliminar, se dividen entre los resultados del modelo hidrodinámico de Telemac-2d y los de caracterización de oleaje de Tomawac.

Los resultados obtenidos mediante Telemac-2d muestran en general concordancia con el régimen de mareas del estuario. En la Fig. 4 se comparan las profundidades medidas en la Torre Mareográfica y las calculadas mediante Telemac-2d. En ella, se aprecia concordancia en fase con los registros medidos, aunque no hay acuerdo sustancial en las magnitudes, especialmente en pleamar. Las diferencias pueden deberse a parámetros tales como factores meteorológicos parcialmente contemplados, coeficientes de fricción variados, o no uniformidad de niveles de referencia.

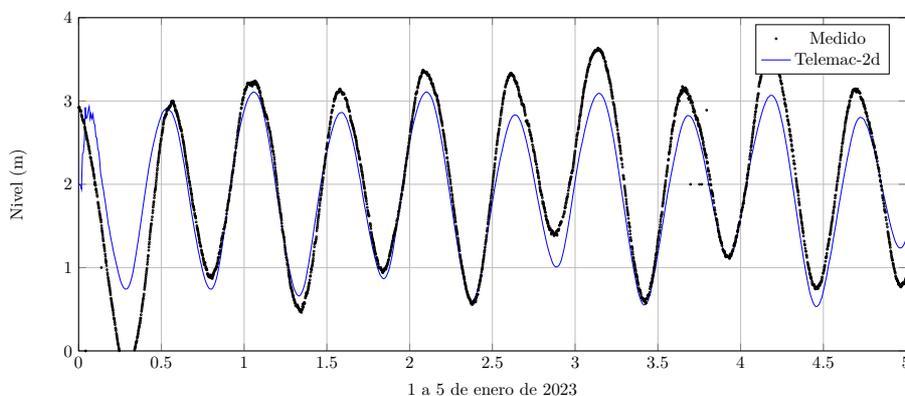


Figura 4: Niveles medidos y calculados en la Torre Mareográfica.

La Fig. 5 presenta la magnitud de velocidades (izq.) y la profundidad (der.) en el dominio, en el instante correspondiente al inicio del día 2 de enero. En ellas se aprecia que la mayor circulación se produce a lo largo del canal de acceso, tanto por la magnitud de la velocidad como por la profundidad del cauce en esa zona. Asimismo, se aprecian sectores emergidos, donde la profundidad es nula o muy pequeña. Las velocidades máximas en condición de marea alta son coincidentes con las determinadas por [Campuzano et al. \(2014\)](#).

El modelo de olas muestra resultados también concordantes con la batimetría del estuario. En la Fig. 6 se presentan la frecuencia media de olas (izq.) y la altura de olas (der.) para el inicio del día 2 de enero de 2023. Al igual que en el modelo hidrodinámico, se ven zonas emergidas en las que la altura de olas es insignificante.

En cuanto a la caracterización de las olas, se extraen las curvas de frecuencia (Fig. 7) y de altura de ola (Fig. 9) en la posición correspondiente a la boya marcada en azul en la Fig. 2. La media de las frecuencias calculadas mediante el modelo de olas es de 0.62 Hz, mientras que la altura media de las olas es de 0.75 m. La frecuencia de olas calculada (Fig. 7) muestra diferencias con la registrada en la boya de referencia (Fig. 8) especialmente en los menores valores; no obstante, el comportamiento en general acompaña en ambos casos a las variaciones de la marea. En relación a la amplitud de las olas, los registros numéricos de la Fig. 9 son mucho más regulares y asociados a la amplitud de mareas que los registrados en la boya, Fig. 10. La magnitud de las mayores alturas, del orden de 1.20 m, coincide, aunque las menores amplitudes son sensiblemente menores en los registros in situ. Esto se debe a que, como se aprecia en la

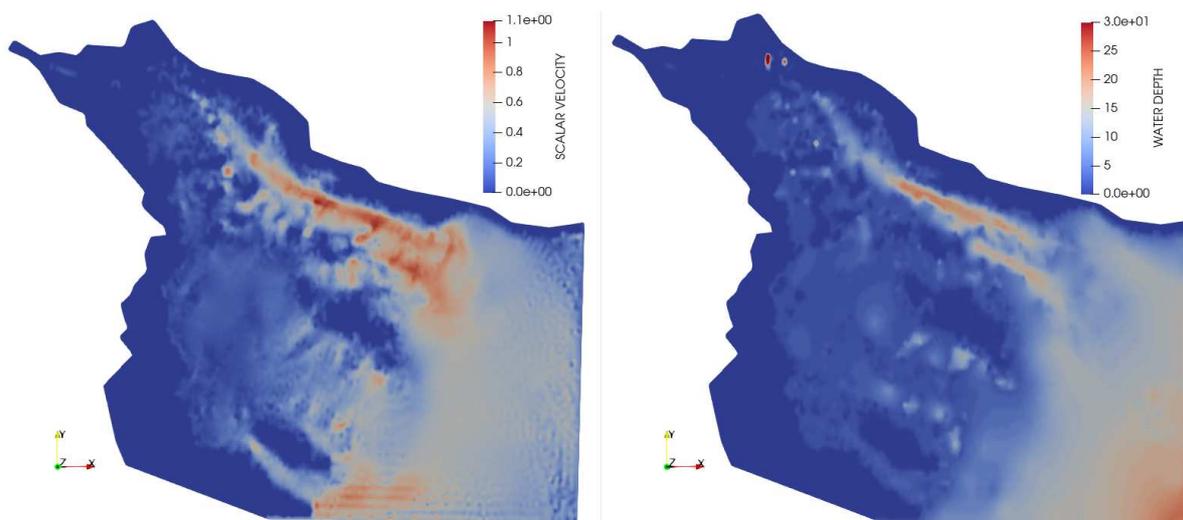


Figura 5: Resultados del modelo hidrodinámico. Magnitud de velocidad (izq.) y profundidad (der.) para las 0hs del día 2 de enero de 2023.

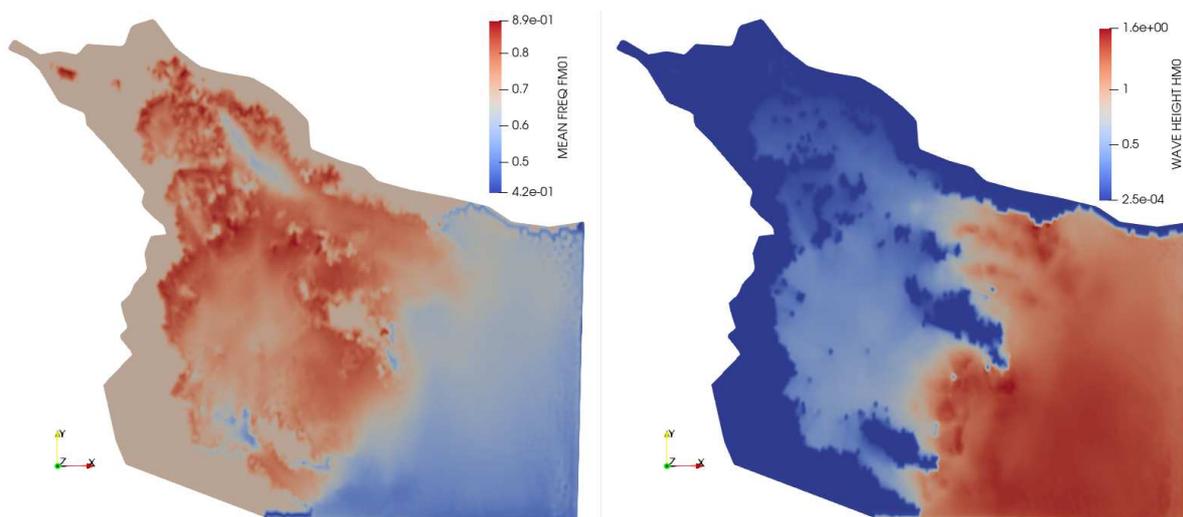


Figura 6: Resultados del modelo de olas. Frecuencia media (izq.) y altura de olas (der.) para las 0hs del día 2 de enero de 2023.

Fig. 11, los picos de amplitudes medidos coinciden con mayores registros en las velocidades de viento, en particular en dirección norte-sur.

5. CONCLUSIONES

Se resolvió un caso inicial para el estuario de Bahía Blanca, considerando los efectos de las mareas y el viento. Los resultados obtenidos reproducen en buena medida la hidrodinámica del estuario. No obstante, es preciso realizar un estudio paramétrico para determinar la influencia de algunos coeficientes, como el de Manning, o la consideración de factores meteorológicos, específicamente el viento, con mayor precisión.

Se obtuvieron mapas de alturas de olas y frecuencias para la zona, y en particular en la posición de la boya de referencia. Las magnitudes determinadas son del orden de las estimadas para la zona, a pesar de lo cual será necesario implementar mejoras en el modelo, con el propósito de mejorar la calidad de los resultados.

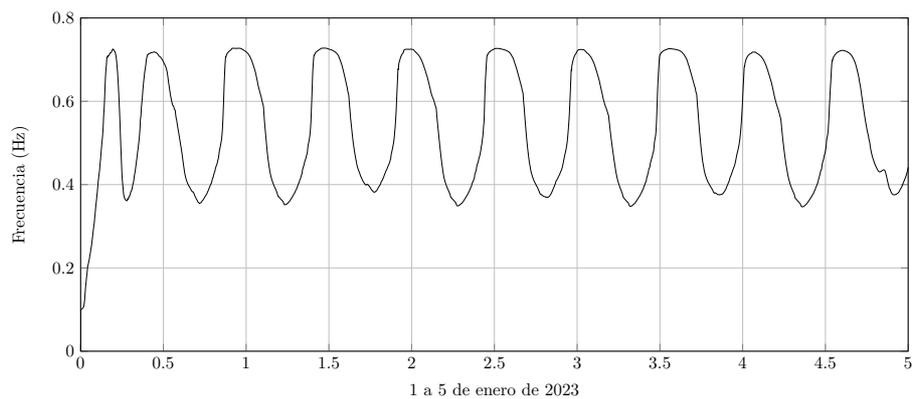


Figura 7: Frecuencia media de olas en la boya de referencia, calculada con Tomawac.

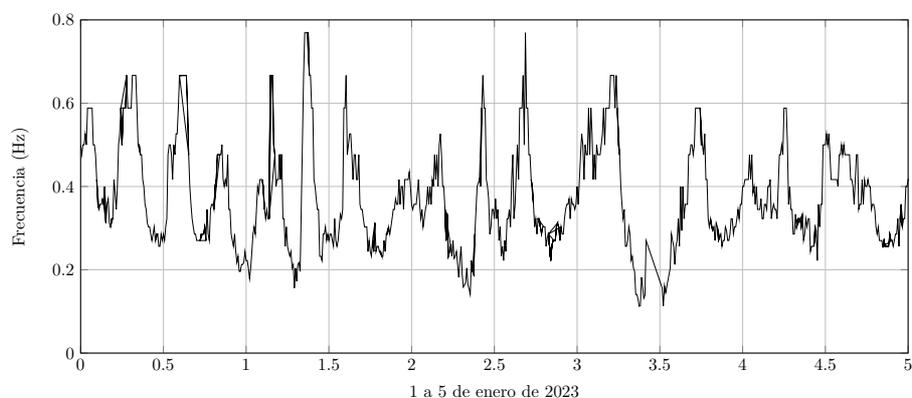


Figura 8: Frecuencia media de olas medida en la boya de referencia.

Los resultados proveen la información necesaria para generar las condiciones de borde variables en posteriores análisis de interacción boya-olas mediante métodos numéricos, que permitirá estimar el potencial de generación para el recolector pendular en desarrollo, en tanto se implementen las calibraciones necesarias en los modelos hidrodinámicos y de olas.

AGRADECIMIENTOS

Para la realización del trabajo se emplearon además los recursos GNU-Octave, BlueKenue, PyTelTools y Salome. Las actividades recibieron financiamiento a través del proyecto FONAR-SEC PE-TRA 24/2021 de la Agencia de I+D+i (Argentina). Los autores agradecen además a CONICET, UTN-FRSF y al Consorcio General del Puerto de Bahía Blanca.

REFERENCIAS

- Álvarez E., Zanella J., Pescio A., y Dragani W. An estimation of the effect of a possible wind speed increase on the ocean mixed layer depth at the northern patagonian continental shelf. *Regional Studies in Marine Science*, 6:87–95, 2016. ISSN 2352-4855. doi:10.1016/j.rsma.2016.03.004.
- Campuzano F.J., Pierini J.O., Leitão P.C., Gómez E.A., y Neves R.J. Characterisation of the bahía blanca estuary by data analysis and numerical modelling. *Journal of Marine Systems*, 129:415–424, 2014. ISSN 0924-7963. doi:10.1016/j.jmarsys.2013.09.001.
- Cardoso Guimaraes R., Oleinik P.H., de Paula Kirinus E., Vasconcellos Lopes B., Beloti Trombetta T., y Correa Marques W. An overview of the Brazilian continental shelf wave energy

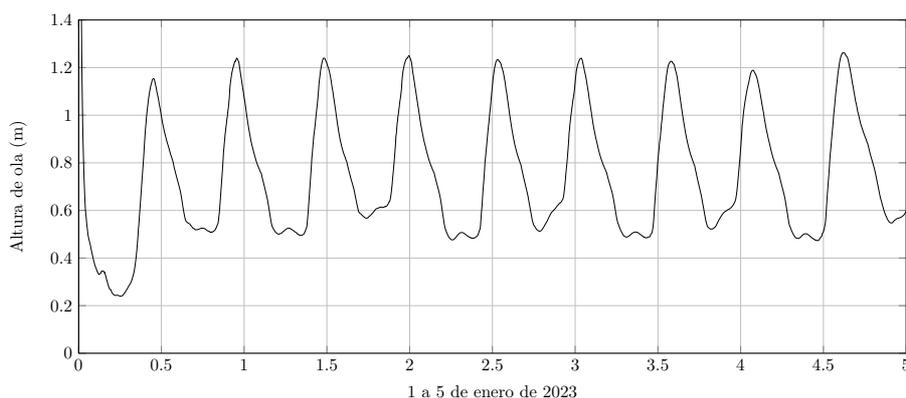


Figura 9: Altura de olas en la boya de referencia, calculada con Tomawac.

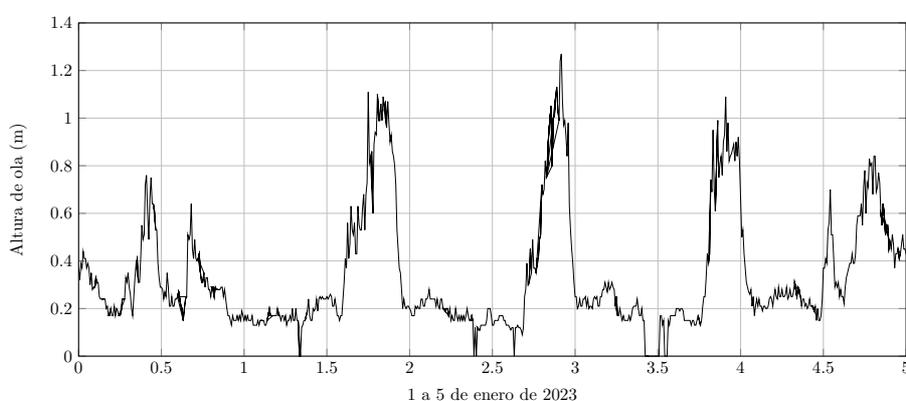


Figura 10: Altura de olas medidas en la boya de referencia.

potential. *Regional Studies in Marine Science*, 25:100446, 2019. ISSN 2352-4855. doi: 10.1016/j.rsma.2018.100446.

Consortio de Gestión del Puerto de Bahía Blanca. Condiciones del Balizamiento. <https://puertobahia blanca.com/>, 2024.

Echevarría E.R., Dragani W.C., y Wörner S. A comprehensive study about alongshore wave energy flux in the coast of buenos aires, argentina. *Journal of Coastal Conservation*, 23:435–443, 2016. doi:10.1007/s11852-018-0673-2.

EMAC. Estaciones de Monitoreo Ambiental Costero. <http://emac.criba.edu.ar/>, 2024.

GEBCO Compilation Group. GEBCO 2023 Grid. doi:10.5285/f98b053b-0cbc-6c23-e053-6c86abc0af7b, 2023.

Hervouet J.M. *Hydrodynamics of Free Surface Flows*. Wiley, 2007.

Jia L., Wen Y., Pan S., Liu J.T., y He J. Wave–current interaction in a river and wave dominant estuary: A seasonal contrast. *Applied Ocean Research*, 52:151–166, 2015. ISSN 0141-1187. doi:10.1016/j.apor.2015.06.004.

Lyard F.H., Allain D.J., Cancet M., Carrère L., y Picot N. FES2014 global ocean tide atlas: design and performance. *Ocean Science*, 17(3):615–649, 2021. doi:10.5194/os-17-615-2021.

Melo W.D. *Geography of the Bahía Blanca Estuary*, páginas 17–29. Springer International Publishing, Cham, 2021. ISBN 978-3-030-66486-2. doi:10.1007/978-3-030-66486-2_2.

NCEP-NCAR. NCEP-NCAR Reanalysis 1 data. <https://psl.noaa.gov>, 2024.

Oleinik P.H., Marques W.C., y Kirinus E.d.P. Estimate of the wave climate on the most energetic locations of the south-southeastern brazilian shelf. *Defect and Diffusion Forum*, 370:130–

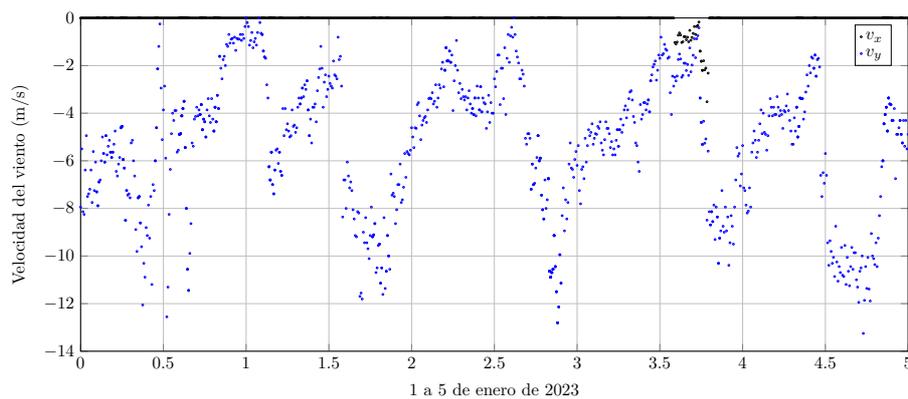


Figura 11: Velocidades de viento este-oeste (v_x) y norte-sur (v_y) registrados en la boya de referencia.

140, 2017a. doi:10.4028/www.scientific.net/DDF.370.130.

Oleinik P.H., Marques W.C., y Kirinus E.d.P. Evaluation of the seasonal pattern of wind-driven waves on the south-southeastern brazilian shelf. *Defect and Diffusion Forum*, 370:141–151, 2017b. doi:10.4028/www.scientific.net/DDF.370.141.

OpenStreetMap contributors. Planet dump retrieved from <https://planet.osm.org> . <https://www.openstreetmap.org>, 2023.

Perillo G.M.E. y Piccolo M.C. Tidal Response in the Bahia Blanca Estuary, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 7(2):437–449, 1991. ISSN 07490208, 15515036.

Perillo G.M.E. y Piccolo M.C. *Physical Oceanography of the Bahía Blanca Estuary*, páginas 31–49. Springer International Publishing, Cham, 2021. ISBN 978-3-030-66486-2. doi:10.1007/978-3-030-66486-2_3.

Pescio A.E., Martin P.B., y Dragani W.C. Altura de ola extrema en la zona exterior del estuario de bahía blanca, provincia de buenos aires, argentina. En *1er Encuentro de Investigadores en Formación de Recursos Hídricos IFRH2012*. Instituto Nacional del Agua, Ezeiza, Buenos Aires, 2012.

Pescio A.E., Martin P.B., y Dragani W.C. Wind speed trends over the southwestern atlantic ocean, between 33° and 50°s. *International Journal of Climatology*, 36(1):501–507, 2016. doi:10.1002/joc.4348.

QGIS.org. QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.org>, 2023.

Telemac-Mascaret. The TELEMAC-MASCARET modelling system. <https://www.opentelemac.org>, 2023.

The SWAN team. *USER MANUAL SWAN Cycle III version 41.45A*. Delft University of Technology, 2023.