

# **Análisis de las diferencias entre la variación de la altura del agua obtenida mediante reflectometría GNSS con un teléfono celular, con la obtenida a través de un mareógrafo de presión tradicional**

Fernando Oreiro<sup>1,2</sup>, Mónica Fiore<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Servicio de Hidrografía Naval, Av. Montes de Oca 2124 (C1270ABV),

<sup>2</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Departamento de Agrimensura, Av. Las Heras 2214 (C1127AAR),

<sup>3</sup> Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería, Instituto de Geodesia y Geofísica Aplicadas, Av. Las Heras 2214 (C1127AAR),

**Abstract.** En este trabajo se realiza un análisis comparativo de las alturas del agua obtenidas con un teléfono celular convencional mediante reflectometría GNSS y las alturas registradas por un mareógrafo de presión tradicional del Servicio de Hidrografía Naval. Las mediciones se llevaron a cabo en el extremo del muelle del Club de Pescadores de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires durante un período superior a 15 meses. El 97.5% de las diferencias obtenidas se ubican entre  $\pm 0.10$  m y presentan un desvío estándar inferior a 0.05 m, con observaciones para más del 99% del período analizado. Los resultados muestran que las alturas del agua obtenidas pueden complementar a las registradas por los mareógrafos tradicionales.

**Keywords:** Reflectometría GNSS, Teléfono celular, Marea, Onda de Tormenta, Buenos Aires.

## 1 Introducción

Los mareógrafos son los equipos más utilizados para medir el nivel del mar. Estos instrumentos utilizan diferentes métodos para realizar la observación del nivel del agua a través de sensores que pueden estar en contacto directo con el agua y aquellos que no lo necesitan. La instalación y el mantenimiento de cualquier tipo de mareógrafo es costosa, sobre todo si se consideran los más de 5000 km de costa de la República Argentina.

Desde hace varios años la técnica de reflectometría interferométrica GNSS (GNSS-IR) es una alternativa más para obtener la variación de la altura del agua a través de mediciones GNSS utilizando antenas geodésicas (Larson et al., 2013a; Larson et al., 2013b, Logfren et al., 2014). Esta técnica aprovecha la interferencia entre la señal GNSS directa de los satélites y la misma señal reflejada sobre la superficie del agua para estimar la altura de esta superficie respecto del centro de fase de la antena, a través del observable signal-to-noise ratio (SNR). Varios autores determinaron con esta técnica el nivel del agua con un RMS o desvío estándar de entre 0.05 m y 0.12 m al comparar las alturas obtenidas con observaciones de mareógrafos cercanos (Larson et al., 2017; Logfren et al., 2014; Geremia-Nievinski et al., 2020).

La técnica GNSS-IR presenta hasta el momento algunas desventajas frente a los mareógrafos tradicionales, como no poder asegurar la misma precisión para cualquier ubicación en donde se utilice, o el alto costo que tienen las antenas GNSS geodésicas. Una posible solución a este último problema es utilizar antenas GNSS comerciales de bajo costo o antenas incluidas en equipos electrónicos (Strandberg, y Haas 2019; Williams et al., 2020; Fagundes et al., 2021). Sin embargo, para utilizar antenas comerciales, el usuario debe tener conocimientos de electrónica que le permitan ensamblar el sensor, así como programar la adquisición de los datos, su almacenamiento y transmisión, mientras que los dispositivos que ya disponen de antenas para almacenar las observaciones GNSS crudas, son los más costosos. Por otra parte, la mayoría de las observaciones realizadas hasta el momento con este tipo de antenas y dispositivos fueron por períodos de tiempo inferiores a un año.

En este trabajo se realiza un análisis comparativo de las alturas del agua obtenidas con un teléfono celular de bajo costo (TC) frente a la costa de la Ciudad de Buenos Aires, utilizando la técnica GNSS-IR para más de 15 meses de observaciones. Para esto, las alturas obtenidas con el TC se comparan con las alturas obtenidas del mareógrafo co-localizado del Servicio de Hidrografía Naval (SHN). Se comparan las ondas de tormenta, es decir las variaciones producidas por efectos meteorológicos, del período analizado y se evalúan las diferencias entre todas las observaciones buscando identificar tendencias en los valores extremos positivos y negativos.

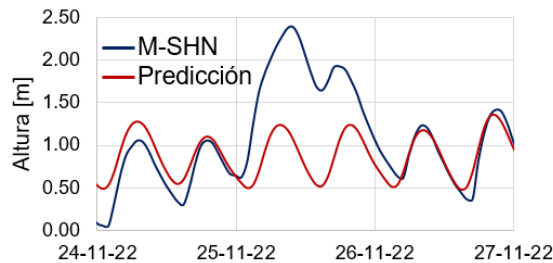
## 2 Zona de estudio

Las mediciones GNSS-IR fueron realizadas en el extremo del muelle del Club de Pescadores de la Ciudad de Buenos Aires donde se ubica el mareógrafo del SHN (M-SHN), en la costa del Río de la Plata (Fig. 1). El TC se ubicó en la terraza de la construcción que resguarda al mareógrafo, sobre una torre meteorológica, a aproximadamente 3 m del suelo de la terraza.



**Fig. 1.** Ubicación del teléfono celular (TC) y del mareógrafo del Servicio de Hidrografía Naval (SHN) frente a la costa del Río de la Plata. En el panel derecho se destaca con un recuadro verde la caja plástica que contiene al TC sobre la torre meteorológica.

La ubicación donde se realizaron las mediciones presenta una marea astronómica con una amplitud media de 0.58 m (SHN, 2024), con frecuentes ondas de tormenta que pueden llegar a superar los 3 m de amplitud (D'Onofrio et al., 2008). El mareógrafo del SHN es un mareógrafo de presión que se encuentra ubicado dentro de un tubo que filtra el efecto de las olas, y mide simultáneamente la presión atmosférica para aplicar la corrección correspondiente, obteniendo niveles del agua cada 15 minutos. La serie de altura del agua fue remuestreada cada 5 minutos aplicando un spline cubico, para realizar la comparación con los niveles del agua calculados con el TC. La Figura 2 muestra la variación de la altura del agua medida por el mareógrafo del SHN junto con la predicción de marea astronómica, para el período 24/11/2022 – 27/11/2022, en donde ocurrió un evento de onda de tormenta que elevó el nivel del agua 1.36 m por encima de la predicción.



**Fig. 2.** Altura del agua observada por el mareógrafo del SHN (azul) y predicción (rojo).

### 3 Datos y Métodos

El TC que se utiliza para la obtención del SNR es el BGH Joy Smart AXS II D (2015), que cuenta con un procesador MT6582 Quad de 1.3GHz, 16 GB de almacenamiento interno, 2 GB de memoria RAM, identifica y procesa las señales de las constelaciones GPS, GLONASS y BEIDOU, y utiliza el sistema operativo Android 4.4.2. El TC se instaló dentro de una caja plástica hermética (Fig. 1) sobre la torre meteorológica, y la alimentación eléctrica se realizó a través de un transformador de 12V a 5V con conexión USB ubicado dentro de la caja, que recibe alimentación de una batería de 12V conectada a la red eléctrica continua. La batería permite extender las mediciones durante aproximadamente un día cuando se corta la energía eléctrica de red.

El período de comparación de las observaciones del mareógrafo y el TC inicia el 10/03/2022 00:00 y termina el 25/06/2023 23:55, cubriendo más de 15 meses de observaciones. El TC almacenó datos cada 1 segundo para los satélites de las constelaciones GPS, GLONASS y BEIDOU. En el período de análisis ocurrieron 3 episodios durante los cuales no se obtuvieron observaciones, de aproximadamente un día de duración. Estos cortes ocurrieron entre los reinicios automáticos que efectúa el TC diariamente a las 08:45, que se realizan para evitar desmontar el dispositivo en los casos en que el software que almacena los datos no funcione adecuadamente. Además de estos cortes, durante el procesamiento se identificó un período mayor a 3 horas que presentaba escasa cantidad de reflexiones, lo que no permitió obtener alturas del agua. La Tabla 1 muestra las fechas iniciales y la duración de los períodos mayores a 3 horas en los que no se pudieron obtener alturas del agua. Debido al método de procesamiento aplicado, la información de altura del agua obtenida 60 minutos antes y después de cada período sin observaciones se debe eliminar. De esta forma, de los 473 días que conforman el período de análisis, el sistema estuvo en funcionamiento el 99.1% del tiempo.

Fecha inicial	Duración [min]
6/5/2023 08:55	1510
9/10/2022 08:50	1505
28/11/2022 08:50	1505
4/3/2023 08:05	640

**Tabla 1.** Fecha inicial y duración, en minutos, de los períodos en los que no se pudieron obtener alturas del agua.

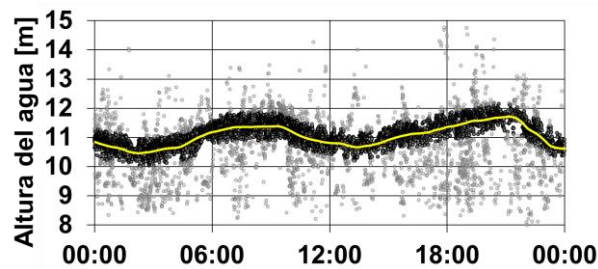
Para el almacenamiento de las observaciones cada 1 segundo en el TC se desarrolló una aplicación que almacena, en archivos horarios, los datos necesarios para el cálculo de la altura del reflector (fecha, hora, satélite y SNR), junto con los datos adicionales latitud, longitud, altura, ángulo de elevación y azimut. Cuando se

completa una hora de observaciones, la aplicación comprime automáticamente el archivo y lo sube a una carpeta compartida en internet para poder acceder a la información sin necesidad de acceder al TC físicamente. Una vez descargados los archivos con los observables SNR, se aplica la metodología de cálculo para obtener la variación de la altura del agua propuesta por Oreiro y Fiore (2024). Para ello, en primer lugar, se obtiene la elevación y azimut de cada satélite observado utilizando las efemérides de cada constelación (Noll, 2010; Dach et al. 2022) y se filtran los datos de los satélites que no devuelven reflexiones de la superficie del agua. Luego, a partir de los ángulos de elevación calculados, se aplica la corrección atmosférica propuesta por Bennett (1982), y utilizando el observable SNR se calculan las reflexiones para cada satélite con el periodograma de Lomb-Scargle. Oreiro y Fiore (2024) obtuvieron que los resultados más precisos para el cálculo de las reflexiones se obtienen separando las observaciones de cada satélite en bloques de datos cada 20 minutos, con una diferencia de tiempo entre bloques de 1 minuto. Finalmente, se ajusta una curva a las regiones de máxima densidad de reflexiones utilizando el método de suavizado Locally Weighted Scatterplot Smoothing (LOWESS). Siguiendo la recomendación de los autores, para LOWESS se utiliza un intervalo de 70 minutos, y se aplica recursivamente el método de ajuste filtrando reflexiones que se alejan de la zona de máxima densidad. Para obtener la serie de alturas del agua cada 5 minutos referidas aproximadamente al Plano de Reducción de Sondajes (PRS), al cual están referidas las alturas del mareógrafo del SHN, se utiliza la constante 12 m. A este valor, que surge a partir de una nivelación geométrica, se le restan los valores calculados de la curva ajustada de reflexiones para todo el período de análisis.

La comparación entre las alturas del agua del TC y el M-SHN se realiza en diferentes etapas. En primer lugar, se calcula la constante para referir las alturas obtenidas con el TC al PRS, haciendo coincidir el promedio de las alturas observadas del TC con el promedio de las alturas observadas por M-SHN. Este acoplamiento entre series se aplica debido a que la corrección atmosférica implementada no elimina completamente el sesgo de las reflexiones (Oreiro y Fiore, 2024) y, además, no se dispone de información de la ubicación del centro de fase de la antena del TC. Utilizando las series referidas al PRS se comparan los niveles medios mensuales de las dos series para el período de análisis. Luego, se calculan los eventos de Ondas de Tormenta (ODT) positivos, que se definen como las variaciones de la altura del agua respecto de la predicción de marea astronómica, que son generadas por efectos meteorológicos. Para definir el comienzo y finalización de cada evento, se utilizan los criterios propuestos por D'Onofrio et al. (2008), en donde se indica que la diferencia entre la altura del agua observada y la predicción astronómica debe ser mayor a 0.30 m durante al menos 6 horas consecutivas. En este trabajo, se determina, además, que un evento de ODT positivo debe tener una altura observada de al menos 1.60 m. Se comparan los eventos calculados entre el TC y el M-SHN y se analiza el comportamiento de las diferencias máximas y mínimas entre las series en función de la altura del agua observada.

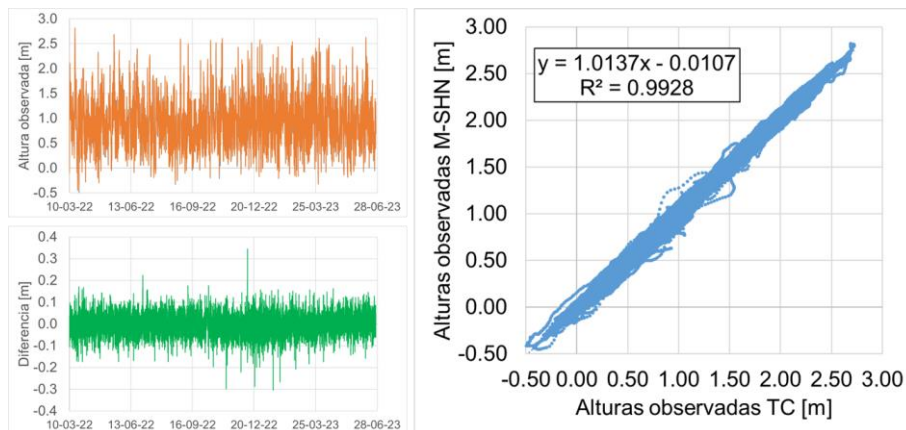
## 4 Resultados

La Figura 3 muestra un ejemplo del ajuste final de la curva de altura del agua calculada a partir de las reflexiones obtenidas con el SNR del TC. En la figura se muestran las reflexiones descartadas y las utilizadas para el cálculo, junto con la curva final ajustada utilizando LOWESS.



**Fig. 3.** Curva de altura del agua (amarillo) calculada a partir de las reflexiones seleccionadas (negro). En gris se muestran las reflexiones descartadas para el cálculo.

El promedio de las alturas observadas del M-SHN fue de 0.936 m para todo el período de análisis. Este valor se utiliza para ajustar la serie del TC, obteniendo que la constante que se debe aplicar para referir las reflexiones al PRS es 12.20 m. La Figura 4 muestra las series de alturas del agua obtenidas con el M-SHN y el TC ajustado, junto con las diferencias entre las mismas, de las cuales se obtiene un desvío estándar de 0.043 m, y valores máximo y mínimo de 0.35 m y -0.30 m. En la Figura 4, también se muestra la ecuación de la recta de regresión y el coeficiente de determinación entre las series.



**Fig. 4.** Izq. arriba: Series de altura del agua observada, M-SHN (naranja), TC (celeste), Izq. abajo: Diferencia de altura del agua observada entre las series (M-SHN – TC). Derecha: alturas observadas M-SHN en función de las alturas observadas TC.

La Figura 5 muestra los niveles medios mensuales obtenidos para las series de M-SHN y TC. En esta figura se observa que los valores máximo y mínimo del período analizado son 1.04 m y 0.77 m respectivamente, mientras que las diferencias máxima y mínima entre los niveles medios mensuales calculados son 0.015 m y -0.009 m, y el desvío estándar es 0.006 m.

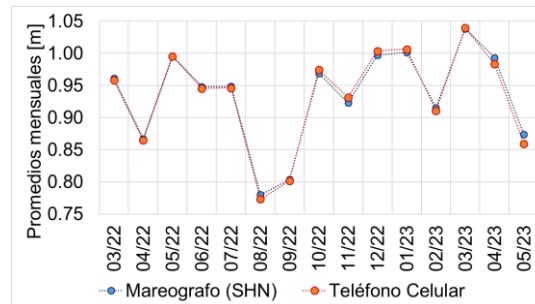


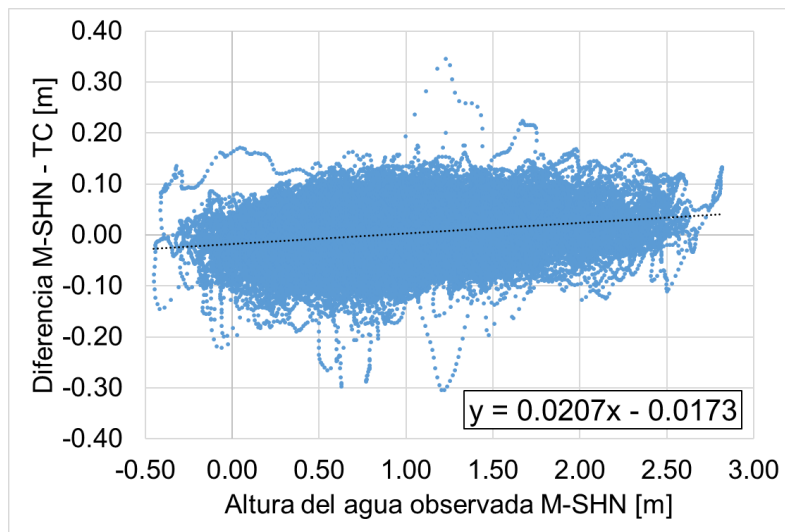
Fig. 5. Niveles medios mensuales de las series M-SHN y TC.

Se calculan y se comparan los eventos de ODT positiva para cada serie. Se obtuvieron 108 eventos para el período de análisis, luego de emparejar las ODT de cada serie debido a diferencias originadas porque el máximo del evento no alcanza la cota preestablecida en una de las series, o porque un único evento de ODT de una serie es identificado en la otra como dos eventos independientes. Se incorporaron como eventos a los casos que no cumplen estrictamente con los requisitos establecidos en una serie, pero si lo hacen en la otra, y se unifican los eventos que figuran como dos eventos en una serie y como un solo evento en la otra. Cabe destacar que los eventos corregidos representan menos de 5% del total analizado. La Tabla 2 muestra los promedios, máximos, mínimos y desvíos estándar de las diferencias de las fechas de inicio y finalización, de la duración del evento, del máximo de la altura observada y del promedio de las alturas observadas para las ODT. Las diferencias encontradas entre los eventos de ODT muestran que, en promedio, las fechas de inicio y finalización se encuentran 11 minutos desplazadas en tiempo, comenzando y terminando más tarde las que pertenecen a la serie TC. Además, la diferencia promedio de la duración de eventos es de solo 6 minutos, y la altura máxima y el promedio de alturas observadas presentan diferencias inferiores a 0.03 m.

Diferencias (M-SHN – TC) entre eventos de ODT positiva identificados					
	Fecha de inicio	Fecha de finalización	Duración	Altura máx. obs.	Prom. de alturas obs.
<b>Promedio</b>	<b>-8 min</b>	<b>-13 min</b>	<b>6 min</b>	<b>0.028 m</b>	<b>0.016 m</b>
Mínimo	-215 min	-360 min	-245 min	-0.052 m	-0.157 m
Máximo	65 min	235 min	365 min	0.117 m	0.276 m
Desv. Est.	35 min	68 min	80 min	0.037 m	0.047 m

Tabla 2. Resumen de las diferencias (SHN-M – TC) encontradas entre los eventos de onda de tormenta positiva de cada serie.

La Figura 6 muestra las diferencias entre las series en función de la altura del agua observada en M-SHN. Utilizando esta información se obtiene la recta de regresión, que muestra una pendiente positiva de 0.021 junto a una ordenada al origen de -0.017 m. Estos valores indican que las menores alturas observadas, alrededor de -0.50 m, tienden a obtener una diferencia media en torno a -0.03 m, mientras que las mayores alturas observadas, 2.75 m, tienden a obtener una diferencia media en torno a +0.04 m, variando en forma lineal el incremento de la diferencia en función de la altura.



**Fig. 6.** Diferencia de alturas del agua observada M-SHN – TC en función de la altura del agua observada en M-SHN. En el recuadro se muestra la ecuación de la recta de regresión.

## 5 Discusión y Conclusiones

La serie de altura del agua obtenida con el teléfono celular de bajo costo representa adecuadamente a la altura del agua frente a la costa de la Ciudad de Buenos Aires para el período analizado. La comparación realizada con las alturas observadas del mareógrafo del SHN mostraron un desvío estándar de las diferencias inferior a 0.05 m, ubicando al 97.5% de estas diferencias por debajo de  $\pm 0.10$  m. Por otra parte, las fechas en donde se produjeron las diferencias mayores a  $\pm 0.20$  m pueden identificarse en la Figura 4, correspondiendo las mismas a 8 eventos puntuales. El coeficiente de determinación de 0.993 obtenido entre las series, y la pendiente de la recta de regresión cercana a 1 muestran el buen ajuste que existe entre las alturas observadas por M-SHN y las calculadas por TC. El desvío estándar obtenido de la serie de altura del agua utilizando el TC se ubica por debajo de la tolerancia establecida por la Organización Hidrográfica Internacional para levantamientos hidrográficos (OHI, 2005).

El desvío estándar de las diferencias de los niveles medios mensuales entre las series M-SHN y TC fue inferior a 0.007 m, representando menos del 10% de la diferencia promedio entre meses consecutivos encontrada en la zona de estudio. Más del 95% de los eventos de ODT fueron identificados correctamente por el TC, con promedios de las diferencias en la duración de los eventos de 6 minutos y de las alturas máximas y promedio observadas inferiores a 0.03 m.

El análisis de las diferencias entre las series en función de la altura del agua observada en M-SHN mostró una leve tendencia positiva. Esta tendencia puede estar asociada al método de medición o al ajuste utilizado para obtener la variación de altura del agua a partir del SNR. Este resultado puede interpretarse también como una sobreestimación de las menores alturas observadas (mayores alturas en las reflexiones), y una subestimación de las mayores alturas observadas (menores alturas en las reflexiones). Si bien la tendencia es pequeña, se continuará trabajando para identificar su origen, para posteriormente eliminarla, de forma de mejorar la representación de la variación de la altura del agua con el TC.

Los resultados encontrados sugieren que la medición de la altura del agua a través de un TC mediante la metodología GNSS-IR puede utilizarse no solo como un complemento para los mareógrafos tradicionales, sino que, en casos particulares en donde la instalación y mantenimiento de estos equipos puede resultar compleja o costosa, pueden utilizarse como el sensor principal.

## Referencias

1. Bennett, G.G. (1982). The calculation of astronomical refraction in marine navigation. *The Journal of Navigation*, 35(2), 255-259.
2. Dach, R., et al. (2022). Center for Orbit Determination in Europe (CODE) Analysis Center Technical Report 2022. IGS Central Bureau, 45.
3. D'Onofrio, E. E., Fiore, M. M., & Pousa, J. L. (2008). Changes in the regime of storm surges at Buenos Aires, Argentina. *Journal of Coastal Research*, (24), 260-265.
4. Fagundes, M.A.R., Mendonça-Tinti, I., Iescheck, A.L., Akos, D.M., Geremia-Nievinski, F. (2021). An open-source low-cost sensor for SNR-based GNSS reflectometry: Design and long-term validation towards sea-level altimetry. *GPS Solutions*, 25(2), 73.
5. Geremia-Nievinski, F., Hobiger, T., Haas, R., Liu, W., Strandberg, J., Tabibi, S., Vey, S., Wickert, J., Williams, S. (2020). SNR-based GNSS reflectometry for coastal sea-level altimetry: results from the first IAG inter-comparison campaign. *Journal of geodesy*, 94(8), 70.
6. Larson K.M., Löfgren J.S., Haas R. (2013a) Coastal sea level measurements using a single geodetic GPS receiver. *Advances in space research*, 51(8), 1301–1310. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2012.04.017>.
7. Larson K.M., Ray R.D., Nievinski F.G., Freymueller J.T. (2013b) The accidental tide gauge: a GPS reflection case study from Kachemak Bay, Alaska. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 10(5), 1200–1204. <https://doi.org/10.1109/LGRS.2012.2236075>
8. Larson K.M., Ray R.D., Williams S.D.P. (2017) A 10-year comparison of water levels measured with a geodetic GPS receiver versus a conventional tide gauge. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 34(2), 295-307. <https://doi.org/10.1175/JTECH-D-16-0101.1>.
9. Löfgren, J.S., Haas, R., Scherneck, H.G. (2014). Sea level time series and ocean tide analysis from multipath signals at five GPS sites in different parts of the world. *Journal of Geodynamics*, 80, 66-80.
10. Noll, C.E. (2010). The crustal dynamics data information system: A resource to support scientific analysis using space geodesy. *Advances in Space Research*, 45(12), 1421-1440.
11. OHI (2005), Manual on Hydrography, publication C-13. International Hydrographic Bureau, Monaco.
12. Oreiro, F. A., & Fiore, M. M. E. (2024). Water level measurement with a low-cost smartphone using GNSS-IR: an over 2-year study case in Buenos Aires, Argentina. *GPS Solutions*, 28(4), 163.
13. SHN (2024), Tablas de Marea, H-610, Servicio de Hidrografia Naval, Buenos Aires, Argentina, 448 pp.
14. Strandberg, J., Haas, R. (2019). Can we measure sea level with a tablet computer? *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 17(11), 1876-1878.
15. Williams, S.D., Bell, P.S., McCann, D.L., Cooke, R., Sams, C. (2020). Demonstrating the potential of low-cost GPS units for the remote measurement of tides and water levels using interferometric reflectometry. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 37(10), 1925-1935.