

EL AUMENTO DEL NIVEL MEDIO DEL RÍO DE LA PLATA Y SU IMPACTO EN LA EVOLUCIÓN DE LAS ONDAS DE TORMENTA NEGATIVAS

M. Florencia de Azkue¹, Enrique E. D'Onofrio²

maria.azkue@defensa.gob.ar

¹Servicio de Hidrografía Naval (SHN), Departamento Oceanografía

²Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería (FIUBA)

Palabras clave: calentamiento global, marea astronómica, cambio climático.

1) INTRODUCCIÓN

El Río de la Plata (RdP) es un estuario de poca profundidad, con orientación NNO-SSE, compartido por Argentina y Uruguay. El nivel del agua está determinado por la combinación de un régimen micro-mareal semidiurno con desigualdades diurnas (D'Onofrio et al., 2008) y una circulación forzada por el viento. Así pues, las condiciones meteorológicas pueden generar diferencias entre las alturas observadas y la marea astronómica. Estas anomalías son llamadas ondas de tormenta. Las anomalías positivas (ODTP) están asociadas a niveles más altos que la marea astronómica predicha y pueden generar inundaciones y anegamientos, mientras que las negativas (ODTN) corresponden a niveles más bajos y pueden afectar la navegación y el suministro de agua potable en la ciudad de Buenos Aires (Campetella et al., 2007; D'Onofrio et al., 2008, Dinápoli et al., 2024). Entre la marea astronómica, el aumento del nivel del mar y las ondas de tormenta pueden ocurrir interacciones fuertes; aunque la importancia de cada mecanismo de interacción es muy heterogénea según la ubicación considerada (Idier et al., 2019). Para las ODTP se encontró que el aumento del nivel medio del RdP no es el único factor ni el más importante que afecta sus variaciones (de Azkue y D'Onofrio, 2024). Es por ello que, en este trabajo, nos enfocamos en estudiar si dicho aumento afecta la evolución de las ODTN.

2) DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos de base utilizados en este trabajo corresponden a alturas horarias del estuario del RdP durante el período comprendido entre 1905 y 2024, con un intervalo de datos faltantes entre 1963 y 1965. Para obtener el nivel medio anual del río y su tendencia lineal, la serie de observaciones se divide en dos subconjuntos de datos. El primer subconjunto corresponde a las observaciones del período 1905-1962, y el segundo al período 1965-2024 (denominados P1 y P2, respectivamente). Esta distinción se basa en los cambios observados en el aumento del nivel medio del RdP, el cual ha acelerado su incremento, alrededor de 1960 (e.g., de Azkue y Fiore, 2021). Para calcular los eventos de ODTN, es necesario contar con una serie de residuos que consisten en la diferencia entre la altura observada y la marea astronómica. Así, se realizan análisis armónicos por mínimos cuadrados siguiendo la Ecuación 1

$$h(t) = Z_0 + \Delta Z \cdot t + \sum_{j=1}^n H_j f_j \cos((V + u)_j - g_j) \quad \text{Ecuación (1)}$$

donde el subíndice j se refiere a cada componente de marea, t corresponde al tiempo de cada observación, h es la altura observada, Z_0 es el nivel medio del río durante el período, ΔZ es la variación del nivel medio, H es la amplitud de las componentes, f es el factor nodal, $(v + u)$ es el argumento de equilibrio, y g corresponde a la época modificada. Para considerar posibles cambios y abordar el ciclo Metónico, se realizan análisis armónicos a las observaciones, dividiéndolas en períodos de 19 años (1905–1923, 1924–1942, 1965–1983, 1984–2002), de 20 años (1943–1962) y de 22 años (2003–2024). Las predicciones de la marea astronómica se estiman de dos maneras diferentes para cada período (P1 y P2). La primera considera: i) las constantes armónicas obtenidas en los períodos de 19/20/22 años, ii) el nivel medio del río durante el período, y iii) la variación lineal del nivel medio durante el período. La segunda sigue los mismos criterios que la primera, excepto que no considera la tendencia del nivel

medio del río. A partir de estas cuatro series de predicciones, se obtienen series de residuos para estimar las ODTN, restando de las observaciones la serie de predicciones en cada caso. Las series de residuos que conservan la variación del nivel medio del río en ambos períodos corresponden a un escenario realista, mientras que las del escenario hipotético son las que no la consideran. No todos los residuos obtenidos corresponden a ODTN. Los eventos deben cumplir con los siguientes criterios: i) nunca deben ser superiores a -0.30 m, ii) el residuo mínimo del evento debe ser menor o igual a -1.20 m, y iii) los eventos deben tener una duración mínima de seis horas. Una vez determinados los eventos, se estiman las tendencias anuales de las series temporales de las siguientes variables: número anual de eventos, duración mínima anual, duración media anual, altura mínima observada anual y mínima ODTN anual. Para ello, primero se aplica un filtro de Savitzky-Golay y luego se obtiene la tendencia mediante un ajuste lineal por mínimos cuadrados estimando el coeficiente de Pearson (r). El mismo tratamiento se aplica para obtener la tendencia del nivel medio del río en P1 y P2. Además, se realiza un estudio estacional de los eventos en ambos períodos en el escenario realista.

3) RESULTADOS Y DISCUSIONES

El valor obtenido de la tendencia anual del nivel medio del río para el P2, de 2.5 mm/año, resulta ser más del doble que el del P1, de 1.1 mm/año. La Tabla 1 muestra las tendencias de las variables de ODTN analizadas y los valores del coeficiente de Pearson (r). Las celdas verdes resaltan los valores de $r > 0.5$. Solamente el número de eventos en ambos escenarios y períodos, y la duración media en el P1 superan dicho umbral, por lo que el resto de las variables pueden considerarse sin una tendencia significativa.

El número de eventos registra tendencia negativa en el escenario realista, y disminuye al pasar de P1 a P2, lo cual sería un comportamiento afín al aumento del nivel medio. Sin embargo, mientras el nivel medio se duplica, la disminución del número de eventos no llega a esa proporción. Además, el número de eventos también registra tendencia negativa en el escenario hipotético donde la tendencia del nivel medio no fue considerada, y en el P2 al cambiar de escenario se mantiene el valor constante, por lo que los cambios en esta variable no pueden ser explicados únicamente por el aumento del nivel medio del río.

Variable	Período	Escenario Hipotético	r (Hipotético)	Escenario Realista	r (Realista)
Número de eventos [evento/año]	p1	-0.0337	0.7131	-0.0476	0.8085
	p2	-0.0508	0.862	-0.0508	0.8344
Observación mínima [m/año]	p1	-	-	0.0045	0.431
	p2	-	-	0.0016	0.2276
ODTN mínima [m/año]	p1	0.0023	0.2486	0.0025	0.2657
	p2	0.0037	0.4327	0.0032	0.4064
Duración máxima [h/año]	p1	-0.0956	0.2647	-0.0623	0.2308
	p2	-0.016	0.1597	0.0129	0.139
Duración media [h/año]	p1	-0.0743	0.5018	-0.0612	0.5602
	p2	-0.0216	0.4565	-0.0065	0.2629

Tabla I- Tendencias de las variables de ODTN y sus respectivos coeficientes de Pearson (r)

La tendencia de la duración media del P1, muestra que los eventos tienden a durar menos en ambos escenarios, pero si el comportamiento siguiera al aumento del nivel medio, en P2 debería registrarse una tendencia menor que en P1, y ocurre lo contrario. Así es que tampoco el aumento del nivel del río está modulando directamente la duración de los eventos.

En la Figura 2 se presentan los resultados de los análisis estacionales de ambos períodos, del número de eventos, de la observación mínima, de la ODTN mínima y mínima media, y de la duración máxima y media.

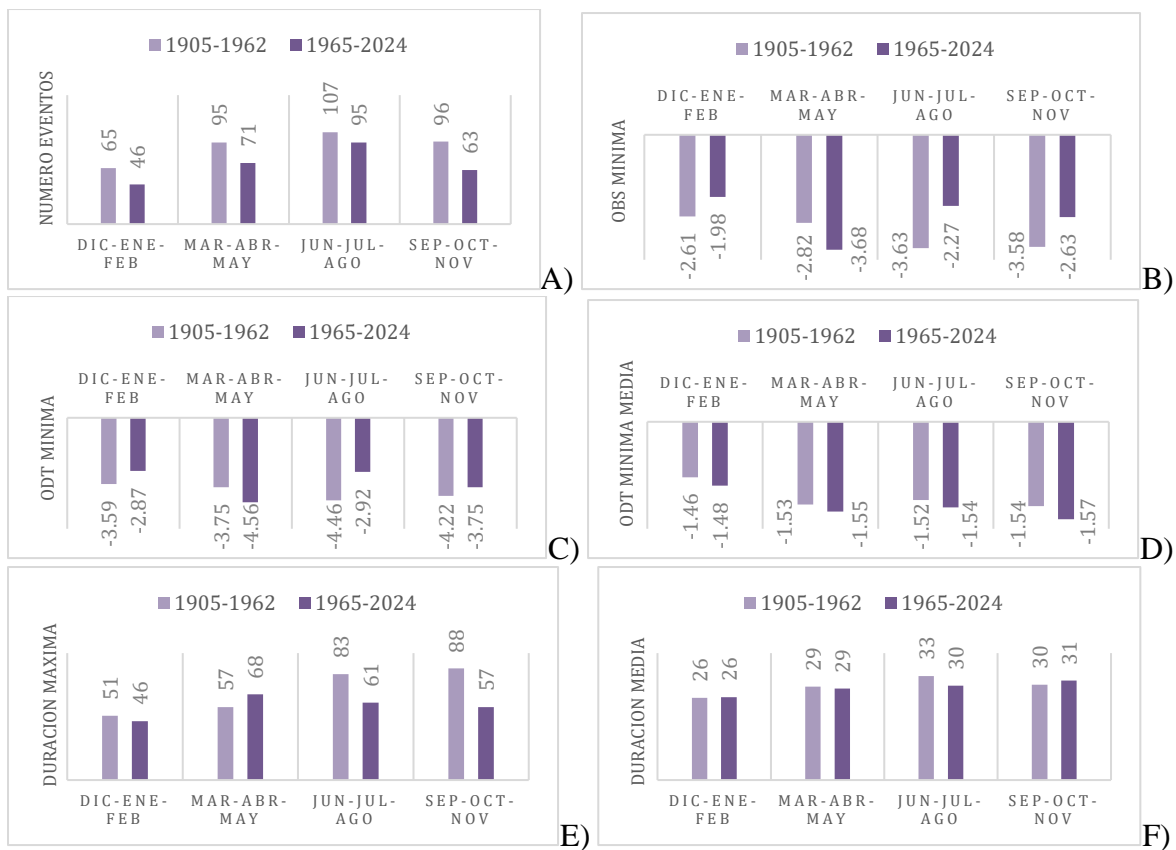


Figura 2- Análisis estacional para P1 y P2 en el escenario realista de A) número de eventos, B) observación mínima, C) ODTN mínima, D) ODTN mínima media, E) duración máxima y F) duración media.

El análisis estacional de las ODTN tampoco revela una relación evidente con el comportamiento del aumento del nivel del río entre períodos, si bien el número de eventos disminuye de P1 a P2 en todas las estaciones del año. Por su parte, vemos que son los inviernos los que concentran la mayor cantidad de ODTN, en contraposición con el verano que registra la mínima. Se presenta un aumento en la altura mínima observada al pasar de P1 a P2 en todas las estaciones, excepto en el otoño donde las observaciones tienen menores valores en P2. Lo mismo ocurre con la ODTN mínima, que aumenta su altura en todas las estaciones entre períodos, excepto en el otoño. Sin embargo, los valores medios de la ODTN son menores en P2 para todas las estaciones. La duración máxima resulta mayor en P1 para todas las estaciones, excepto en los otoños, si bien los valores medios resultan similares en cada estación del año.

REFERENCIAS

- Campetella, C.M., D'Onofrio, E., Cerne, S.B., Fiore, M.E. y Possia, N.E., 2007:** Negative storm surges in the port of Buenos Aires. *International Journal of Climatology*, 27, 1091–1101.
- de Azkue, M. F. y D'Onofrio, E. E., 2024:** Contributions of rising mean river level of the Río de la Plata estuary on recorded changes in positive storm surges. *Ocean and Coastal Research*, 72, e24055.
- de Azkue, M. F. y Fiore, M. M. E., 2021:** Análisis de la tendencia relativa del nivel medio del Río de la Plata entre 1905 y 2020. *Terra Mundus*, 8(1), 1-12.
- Dinápoli, M. G., Simionato, C. G., Alonso, G., Bodnariuk, N., y Saurral, R., 2024:** Negative storm surges in the Río de la Plata Estuary: mechanisms, variability, trends and linkage with the Continental Shelf dynamics. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 305, 108844.
- D'Onofrio, E.E., Fiore, y M.M.E., Pousa, J.L., 2008:** Changes in the regime of storm surges at Buenos Aires, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 24, 260–265.
- Idier, D., Bertin, X., Thompson, P. y Pickering, M. D., 2019:** Interactions between mean sea level, tide, surge, waves and flooding: mechanisms and contributions to sea level variations at the coast. *Survey Geophysics*, 40, 1603– 1630.