

ESTUDIO DE LOS CAMBIOS REGISTRADOS EN LAS SUDESTADAS DEL RÍO DE LA PLATA EN UN ESCENARIO DE CAMBIO CLIMÁTICO

Maria Florencia de Azkue y Enrique Eduardo D'Onofrio

Email: florazkue@hotmail.com

Fecha de recepción: 25/09/2023

Fecha de aceptación: 22/10/2023

RESUMEN

El estuario del Río de la Plata se encuentra localizado en una de las regiones con más actividad ciclogénica del hemisferio sur. Este fenómeno se traduce en la ocurrencia de Sudestadas que afectan la Ciudad de Buenos Aires y sus alrededores. Las Sudestadas son eventos meteorológicos que se caracterizan por vientos fuertes del sudeste que pueden provocar lluvias intensas y aumentar el nivel del agua del estuario. Al tratarse de un fenómeno meteorológico el cambio climático puede influir en sus condiciones y patrones, por lo que en este trabajo nos abocamos a estudiar los cambios ocurridos en las Sudestadas registradas en la Ciudad de Buenos Aires a partir de una serie de alturas horarias del nivel del agua de 117 años de duración. Para detectar las posibles modificaciones en los patrones introducidas por los efectos de cambio climático se divide la serie en dos períodos: uno entre 1905 y 1962, y el otro entre 1965 y 2021, y se estudian las tendencias de las máximas alturas anuales observadas, las máximas alturas anuales de Sudestadas, la duración media anual de los eventos y la cantidad anual de eventos. Se encuentra que en todas las variables analizadas se acelera la tendencia al pasar del primer período al segundo, excepto en el caso de las máximas alturas de Sudestadas. Además, se realiza un estudio estacional y decenal de las mencionadas variables. Los resultados obtenidos permiten observar cambios significativos en los patrones de las Sudestadas.

Palabras clave: Sudestadas, cambio climático, onda de tormenta, nivel del río

ABSTRACT

The estuary of the Río de la Plata is located in one of the regions with more cyclonic activity in the southern hemisphere. This phenomenon leads to the development of Sudestadas that affect the city of Buenos Aires and its surroundings. Sudestadas are meteorological events characterized by strong southeasterly winds that can cause heavy rains and increase the water level in the estuary. Being a meteorological phenomenon, climate change can influence its conditions and patterns, so in this work we study the changes in the Sudestadas recorded in the city of Buenos Aires from a series of water level hourly heights of 117 years of length. In order to detect possible modifications in the patterns introduced by the effects of climate change, the series is divided into two periods: one between 1905 and 1962, and the other

between 1965 and 2021, and the trends of the maximum annual heights observed, the maximum annual heights of Sudestadas, the mean annual duration of the events and the annual number of events are studied. It is found that in all the variables analyzed the trend accelerates when passing from the first period to the second, except in the case of the maximum heights of Sudestadas. In addition, a seasonal and decadal study of the mentioned variables is carried out. The results obtained allow us to observe significant changes in the patterns of Sudestadas.

RESUMO

O estuário do Río de la Plata está localizado numa das regiões mais ciclónicas do hemisfério sul. Este fenómeno resulta na ocorrência de Sudestadas que afectam a cidade de Buenos Aires e os seus arredores. As Sudestadas são fenómenos meteorológicos caracterizados por fortes ventos de sudeste que podem provocar chuvas intensas e aumentar o nível da água no estuário. Sendo um fenómeno meteorológico, as alterações climáticas podem influenciar as suas condições e padrões, pelo que neste trabalho estudamos as alterações nas Sudestadas registadas na cidade de Buenos Aires a partir de uma série de alturas de água horárias com 117 anos de duração. Para detetar possíveis modificações nos padrões introduzidos pelos efeitos da mudança climática, a série é dividida em dois períodos: um entre 1905 e 1962, e outro entre 1965 e 2021, e são estudadas as tendências das alturas máximas anuais observadas, as alturas máximas anuais das Sudestadas, a duração média anual dos eventos e o número anual de eventos. Verifica-se que em todas as variáveis analisadas a tendência acelera do primeiro período para o segundo, exceto no caso das alturas máximas de Sudestadas. Para além disso, é feito um estudo sazonal e decadal destas variáveis. Os resultados obtidos permitem-nos observar alterações significativas nos padrões das Sudestadas.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático se manifiesta en distintos fenómenos naturales modificando sus comportamientos en relación con su severidad, su estacionalidad y su frecuencia de ocurrencia, principalmente. Esos cambios muchas veces tienen su correlato en las actividades que desarrollan las poblaciones. En particular las regiones costeras, incluyendo estuarios y deltas, se ven directamente afectadas por el impacto en el aumento del nivel medio del mar, y por la duración y la severidad de las ondas de tormenta –localmente conocidas como Sudestadas. Además, en los últimos años, el riesgo de inundaciones costeras ha aumentado principalmente debido al crecimiento demográfico y económico (Jongman et al., 2012, p.823). En ese sentido, el estuario del Río de la Plata (RdP), no solamente es la zona más desarrollada del sur de Sudamérica, sino también una de las regiones más ciclogénicas del hemisferio sur (Gan y Rao, 1991, p.1294), debido a las ondas troposféricas que se mueven a lo largo de las latitudes subtropicales del Pacífico Sur y las regiones sudamericanas, que fuerzan las ondas de tormenta. La ocurrencia de estos fenómenos produce marejadas e

inundaciones en la zona superior del estuario (D'Onofrio et al., 1999, p.1681; Santoro et al., 2013, p.51; Dinápoli et al., 2017, p.2), aunque pueden ser producidas por otras condiciones meteorológicas que conducen a vientos fuertes y/o persistentes del este y sudeste (Escobar et al., 2004, p.1160). Las ondas de tormenta son más severas cuanto más intenso es el viento, cuanto menor es la profundidad y en tanto la dirección del viento es perpendicular a la costa. Esas tres condiciones tienen lugar en el estuario del RdP. Allí los vientos del cuadrante SE, con intensidades de alrededor de 50km/h son frecuentes, como ya se explicó, por lo que la orientación del estuario –NNO-SSE– implica que no sólo se eleve el nivel del río por efecto de la acumulación del agua, sino que la empuja hacia la costa, generando más presión en la descarga de los desagües pluviales y arroyos que atraviesan la ciudad y desembocan en el estuario de la RdP. También es fácil de observar siguiendo la batimetría en la Figura 1 el bajío que tiene lugar en el estuario interior. Según Nabel et al. (2008) los anegamientos en la Ciudad de Buenos Aires constituyen el problema ambiental de origen natural más severo de la región, y los daños que ocasionan, en la infraestructura de servicios, las vías de comunicación y las actividades económicas, producen un fuerte impacto en la población. Un futuro sustentable para las zonas costeras depende de nuestra capacidad para llevar a cabo un monitoreo sistemático centrado en los fenómenos que afectan a estas zonas a diferentes escalas espaciotemporales, dentro de los cuales se incluye la onda de tormenta (Laignel et al., 2023). Con tal fin este trabajo se enfoca en describir la evolución de las Sudestadas que tuvieron lugar entre 1905 y 2021 en la Ciudad de Buenos Aires. Nos interesa saber si a lo largo del tiempo estudiado, atravesado por los efectos del cambio climático, las Sudestadas han cambiado su frecuencia de ocurrencia, si se han vuelto más severas, como afirman varios autores, y si han visto alterada su duración. A tal fin dividimos los resultados en dos períodos– uno entre 1905 y 1962, y otro entre 1965 y 2021– y los comparamos entre ellos. También nos preguntamos si han sufrido modificaciones estacionales y decenales. Creemos que este análisis servirá de base para construir herramientas destinadas al diseño de obras de infraestructura y la implementación de medidas no estructurales y políticas de prevención. Asimismo, nos permitirá vislumbrar algunos efectos a nivel local del cambio climático global, con la consecuente toma de conciencia.



Figura 1.- El estuario del RdP. D'Onofrio et al. (2002).

DATOS Y METODOLOGÍA

Los datos de base utilizados en este trabajo corresponden a las alturas horarias del RdP en el período comprendido entre 1905 y 2021. Las observaciones de las alturas fueron realizadas con un mareógrafo operado por el Ministerio de Obras Públicas en la desembocadura del Riachuelo –Semáforo del Riachuelo– entre 1905 y 1959, y con otro operado por el Servicio de Hidrografía Naval en el barrio de Palermo –Club de Pescadores, estación Palermo–, 9 km al norte del Riachuelo, entre 1957 y 2021, con tres años de superposición (1957-1959). La costa entre ambas estaciones no presenta diferencias morfológicas y la marea observada en ambas estaciones presenta características similares por lo que resultan comparables (D'Onofrio et al., 2008). Los niveles de ambos mareógrafos están referenciados al cero o datum del Riachuelo, que pasa a 0,531 m por debajo del cero del Instituto Geográfico Nacional. El cero del Riachuelo fue establecido prácticamente en coincidencia con el nivel de las bajamares astronómicas más bajas (Dirección Nacional de Control de Puertos y Vías Navegables, 2022). La serie final de alturas, entre 1905 y 2021 comprende 117 años, con un intervalo de datos faltantes entre los años 1963 y 1964.

La serie temporal de alturas observadas en cualquier estación mareográfica está formada fundamentalmente por tres componentes: nivel medio, marea astronómica y onda de tormenta. Un método para obtener la onda de tormenta es restar a las alturas observadas la marea astronómica. Para calcular esta última primero se realiza un análisis armónico

mediante cuadrados mínimos (Pugh et al., 2014) siguiendo la Ecuación 1, que permite obtener las amplitudes y fases (épocas) de las ondas que componen a la marea astronómica.

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

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, 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. Esta metodología, tiene en cuenta las posibles variaciones lineales del nivel medio del mar agregando la recta: $Z_0 + \Delta Z \cdot t$ y además se obtienen directamente las constantes armónicas (H y g) (D'Onofrio et al., 2016). Los argumentos de equilibrio y los factores nodales se calculan considerando las nuevas escalas de tiempo presentadas por Cartwright (1985). El cálculo de errores de las amplitudes y épocas de las componentes incluidas en los análisis armónicos se realiza a partir de la matriz varianza-covarianza, que surge de la metodología empleada en los análisis armónicos.

Las componentes a incluir se eligen siguiendo el criterio de Rayleigh (Pugh, 1987, Schureman 1988), resultando un total de 134 ondas componentes. Esta cantidad de ondas permite considerar un amplio rango de frecuencias y alcanzar resultados más precisos en las predicciones de marea.

Si bien las constantes armónicas se denominan así porque su valor no se modifica con el tiempo, es sabido que, factores como el cambio del nivel medio del mar, cambios en la descarga de ríos o cambios termohalinos pueden alterar el valor de dichas constantes (e.g Santamaria-Aguilar et al., 2017, Luz Clara et al., 2014). Para considerar estos posibles cambios en un ciclo metónico se realizan los análisis armónicos a las observaciones, dividiéndolas en 5 períodos de 19 años (1905-1923, 1924-1942, 1965-1983, 1984-2002, 2003-2021) y 1 de 20 años (1943-1962). Es decir que se obtienen 6 conjuntos de constantes armónicas que son utilizados para hacer predicciones y restarlas a las observaciones. De esta manera se obtienen los residuos a partir de los cuales se determinan los eventos de Sudestada. Con el fin de comparar las Sudestadas ocurridas en el primer tramo del registro de observaciones con el segundo, se divide a la serie de residuos en dos períodos. Uno que abarca de 1905 a 1962 (P1), y el otro que abarca desde 1965 hasta 2021 (P2). Cabe mencionar que alrededor de 1960 se observa un quiebre en la curva de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, marcando una mayor aceleración en las emisiones entre períodos, y por lo tanto un crecimiento en las concentraciones de dichos gases. Estos gases son los responsables en gran parte del calentamiento global, por lo que los fenómenos hallados en uno y otro período estarán embebidos de los efectos derivados de dicho calentamiento y del cambio climático mencionados previamente.

No todos los residuos corresponden a eventos de Sudestadas. Para que lo sean deben satisfacer los siguientes criterios: i) nunca deben caer por debajo de 0,30 m, ii) el mayor residuo del evento debe ser mayor o igual a 1,60 m., y iii) los eventos deben durar al menos 6 horas. El valor de 0,30 m fijado como umbral para los eventos de Sudestadas se adoptó porque, en condiciones de calma meteorológica, puede existir una diferencia entre las alturas observadas y la marea astronómica del orden de $\pm 0,10$ m. Así, para garantizar que los residuos elegidos corresponden a Sudestadas, el valor del umbral adoptado es de tres veces

la diferencia mencionada. Con respecto al valor de 1,60 m se adoptó ya que, cuando se combina con una altura de marea cercana al nivel medio del agua (aproximadamente 0,79 m por encima del cero del Riachuelo) durante una marea semidiurna creciente, conduce a niveles que pueden aproximarse a los de alerta de la Ciudad de Buenos Aires y sus alrededores (D'Onofrio et al., 2008). Y también para asegurar que realmente es un evento de Sudestada y no registros de alturas anómalas (outliers) se elige una duración mínima de al menos 6 horas.

Una vez determinados los eventos, se calculan las tendencias anuales de las series temporales para el período P1 y P2, de las siguientes variables: cantidad de eventos, duración media, altura observada máxima y altura máxima de las sudestadas.

Por otro lado, se analizan esas mismas variables de manera decenal y estacional para ambos períodos.

Finalmente se aplica la teoría de valores extremos para cuantificar la posibilidad o el período de retorno de los grandes acontecimientos, a las series de alturas máximas observadas durante eventos de Sudestadas. Para este trabajo se decide utilizar el modelo BM (Bloque-Máxima)-GEV (Valores Extremos Generalizados en inglés), ya que, se disponen de 117 años de alturas máximas anuales. Para su aplicación los datos se dividen en periodos del mismo tamaño (bloques) que no se solapan y de cada uno se elige el valor máximo (altura máxima observada en nuestro caso). Es importante aclarar que, si bien no hay alturas horarias para 1963 y 1964 se conservan los máximos mensuales y por lo tanto se puede obtener una serie ininterrumpida del período completo entre 1905 y 2021. Para analizar la bondad de la estimación realizada con el modelo GEV, se usan los métodos gráficos de probabilidades (PP-Plot) y el de cuantiles (QQ-Plot) que permiten comparar las distribuciones empíricas y teóricas

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Tendencias anuales

En las Figuras 2 y 3 está graficada la cantidad anual de Sudestadas ocurridas en los períodos P1 y P2 respectivamente, y su tendencia lineal. Es llamativo apreciar cómo la tendencia aumenta en un orden de magnitud al pasar del período P1 (0.029 eventos/año) al P2 (0.1574 eventos/año), donde precisamente los efectos del cambio climático se manifiestan a nivel global. Para hacernos una idea más clara de la implicancia de esta aceleración, basta resaltar que, si al período P1 le toma aproximadamente 34 años aumentar en una unidad la cantidad de eventos anuales, en el período P2 ese tiempo se reduce a algo más de 6 años. Esta aceleración entre períodos la podemos vincular, por un lado, con el aumento del nivel medio del río (e.g de Azkue et al. 2021, Piecuch, 2023), generado a su vez por el calentamiento global que se traduce en la dilatación térmica del agua y el derretimiento de los hielos continentales (Vitousek et al., 2017). Pero también en el caso del RdP el aumento de su nivel medio se ve forzado por los cambios en la descarga de los ríos Paraná y Uruguay –principales afluentes del RdP–, aportando un porcentaje significativo en la tendencia (Piecuch, 2023). Ahora bien, dado que dicho aumento se duplica en el segundo período respecto del primero, el incremento de un orden de magnitud en la cantidad de eventos debe estar siendo modelado,

además, por factores climáticos y de circulación atmosférica a gran escala (e.g Fox-Kemper et al., 2021).



Figura 2- Número de eventos anual de Sudestadas y su tendencia lineal (línea roja) ocurridas en el período P1 (1905-1962)



Figura 3- Número de eventos anual de Sudestadas y su tendencia lineal (línea roja) ocurridas en el período P2 (1965-2021)

Los resultados obtenidos para ambos períodos en relación a la altura observada máxima anual y su tendencia, se presentan en las Figuras 4 y 5. Nuevamente en esta variable se encuentra una aceleración positiva al pasar del primer período P1, al período P2. Más aún, el signo de la tendencia se revierte. Pasa de -0.0004 m/año a 0.0026 m/año. La tendencia encontrada para el período P2 es análoga a la encontrada por de Azkue, (2023) para el nivel medio del estuario del RdP en ese mismo período (0.0023 m/año), por lo que las máximas alturas observadas podrían ser explicadas directamente por el aumento del nivel medio del río. Eso no ocurre en el período P1, pues mientras las máximas alturas observadas detentan una tendencia negativa

(Figura 2), la del nivel medio del río resulta positiva (0.0011 m/año, de Azkue, (2023)). Es decir que entonces las máximas alturas observadas durante el P1 están siendo modeladas también por un forzante atmosférico.



Figura 4- Alturas de las máximas observaciones anuales y su tendencia lineal (línea roja) correspondientes al período P1 (1905-1962)



Figura 5- Alturas de las máximas observaciones anuales y su tendencia lineal (línea roja) correspondientes al período P2 (1965-2021)

Cuando analizamos las máximas alturas anuales de las Sudestadas, los resultados nos enseñan que la tendencia de esta variable se desacelera cuando se compara el período P1 con el P2. De 0.0014 m/año pasa a no tener tendencia, ya que el valor es muy cercano a cero y del orden del error inherente al cálculo. En este caso, el patrón entre períodos es contrario al encontrado para la cantidad de eventos anuales y la mayor altura observada. Es interesante porque uno esperaría que las variaciones forzadas por el cambio climático deberían traducirse en un crecimiento en la altura de las Sudestadas, y esto no ocurre. Este comportamiento puede

deberse a las interacciones existentes entre la marea astronómica, los eventos de onda de tormenta y el nivel medio del río (e.g Idier et al., 2019). En este caso la marea astronómica estaría amortiguando el impacto del crecimiento del nivel medio y los efectos meteorológicos sobre la columna de agua. Recordemos que la metodología aplicada para obtener las constantes armónicas para el cálculo de la marea astronómica justamente considera posibles variaciones en el valor de dichas constantes en períodos de 19 años. En este trabajo no se analiza dicho cambio ya que excede los objetivos del mismo.



Figura 6- Altura de la máxima Sudestada anual y su tendencia lineal (línea roja) durante el período P1 (1905-1962)



Figura 7- Altura de la máxima Sudestada anual y su tendencia lineal (línea roja) durante el período P2 (1965-2021)

También se analiza el comportamiento de la duración media anual de los eventos de Sudestada y se encuentra que mientras durante el período P1 la tendencia es negativa, es decir que los eventos tienden a durar 0.0342 h/año menos, en el período P2, de acuerdo con su

tendencia, las Sudestadas acrecientan su duración promedio 0.0348 h/año. Entonces nuevamente estamos frente a una aceleración en el pasaje de P1 a P2 lo que, como ya se dijo, se relaciona con los efectos del cambio climático en el estuario.

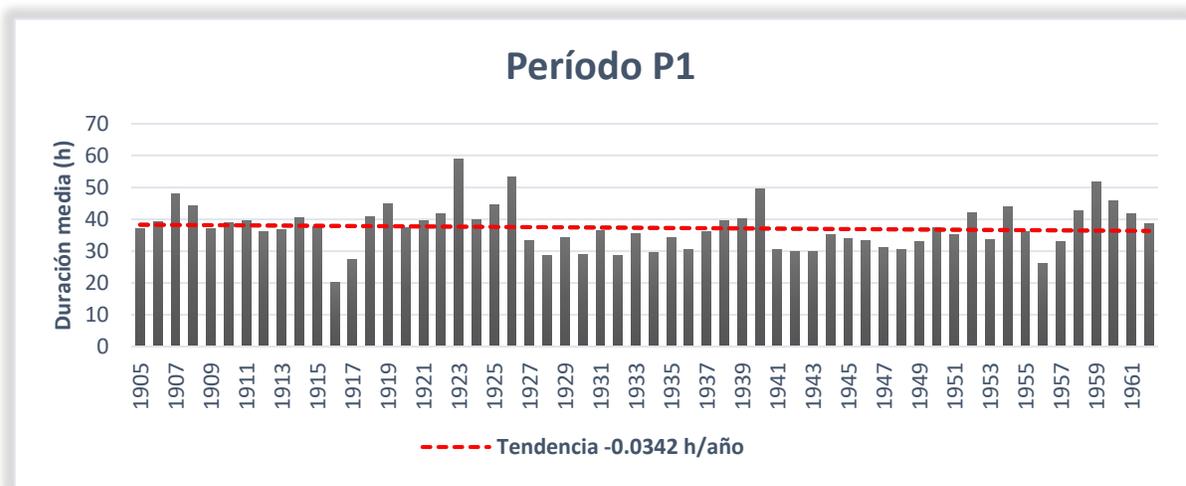


Figura 8- Duración media anual de las Sudestadas y su tendencia lineal (línea roja) durante el período P1 (1905-1962)



Figura 9- Duración media anual de las Sudestadas y su tendencia lineal (línea roja) durante el período P2 (1965-2021)

Así es que, excepto la altura máxima anual de las Sudestadas, todas las demás variables mostraron una aceleración entre el período P1 y el P2. Este comportamiento es análogo al de la curva de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera considerada en esos períodos (Figura 10), por lo que era de esperar encontrar Sudestadas de manera más frecuente y de mayor severidad. La severidad de los eventos en este caso está dada por su duración más que por su altura, ya que se vio que ésta no contiene tendencia en el período P2. Como el forzante de las Sudestadas es principalmente el viento del cuadrante sudeste, pero además

éstas se desarrollan sobre el nivel medio del río, es una combinación de la variabilidad de estos factores la que genera los cambios encontrados.

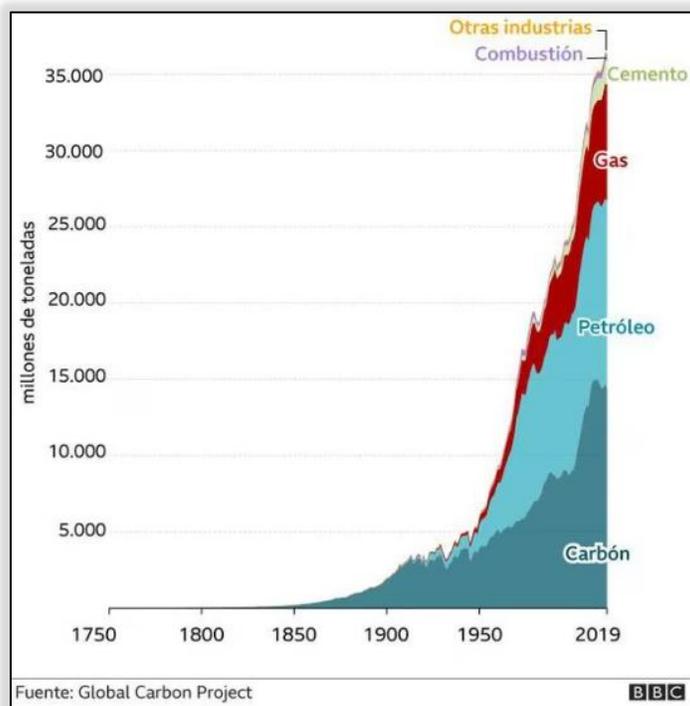


Figura 10- Curva de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera. Fuente: Global Carbon Project BBC (<https://www.bbc.com/mundo/noticias-59013521>)

Análisis estacional y decenal

Los resultados del análisis estacional de las variables estudiadas nos permiten encontrar algunos patrones interesantes. El primero se observa en la Figura 11, donde se ha graficado la cantidad de eventos de Sudestada del período P1 y del período P2 de acuerdo con la estación del año en que han tenido lugar. Se ve que tanto en verano como en otoño los valores se mantienen constantes entre períodos. Diferente es para la primavera principalmente, y el invierno, donde se observa un aumento de casos en el período P2, respecto del P1. Así es que la tendencia encontrada en la cantidad anual de sudestadas en el período P2 (Figura 3) responde a lo ocurrido en las primaveras y los inviernos del período P2.

Además, se destaca el verano como la estación modal, seguida de la primavera, luego el otoño y finalmente el invierno con la menor cantidad de Sudestadas.

La Figura 12, en la que se ven los eventos de Sudestada no solamente por estación sino también a través de los años del período completo de estudio (1905-2021) nos permite apreciar que las primaveras responsables del aumento en un orden de magnitud de la cantidad de Sudestadas, son principalmente las de los últimos años, y algunas de los años noventa. También en esa figura es fácil reconocer al verano como la estación con mayor cantidad de eventos en ambos períodos (P1 y P2). Los colores grises corresponden a estaciones sin

eventos (sucede por elegir una cota mínima del evento), mientras que el color azul corresponde a los años 1963 y 1964 donde no se dispone de información.

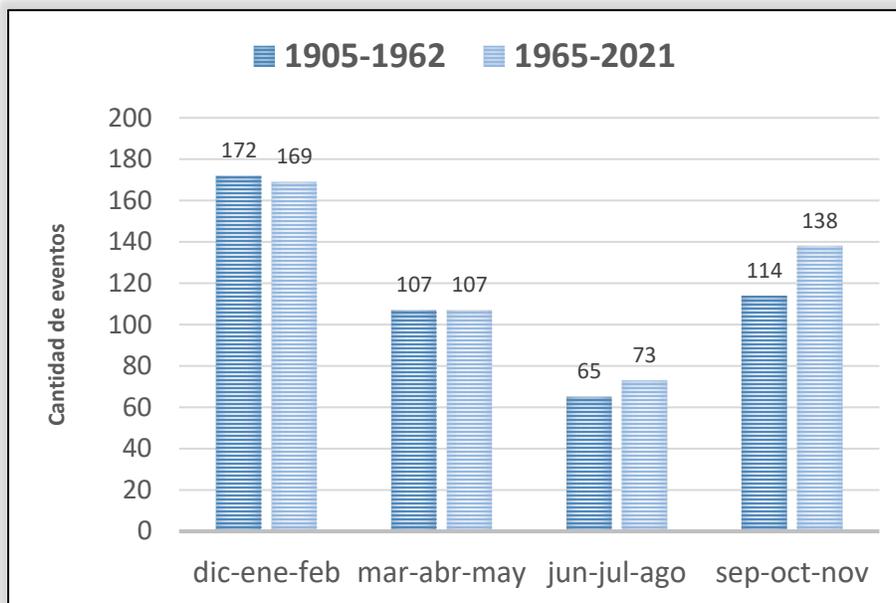


Figura 11- Cantidad de eventos por estación del año, para los períodos P1 (azul oscuro) y P2 (azul claro)

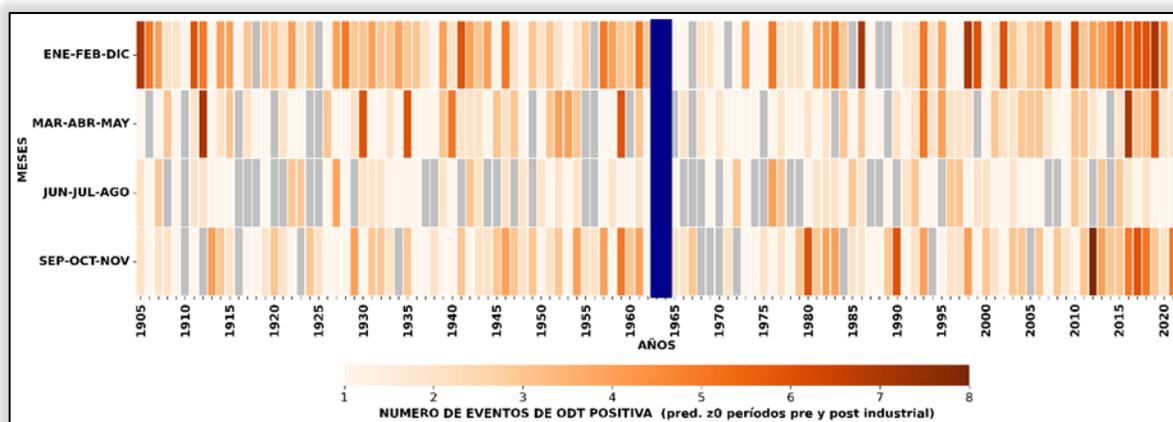


Figura 12- Distribución estacional en función de los años de la cantidad de eventos de Sudestadas entre 1905 y 2021. Los colores grises corresponden a estaciones sin eventos mientras que el color azul corresponde a los años 1963 y 1964 donde no se dispone de información.

Del estudio decenal, los resultados más sobresalientes son los encontrados para la cantidad de eventos de Sudestadas. En la Figura 13 se observa que el número de Sudestadas ocurridas en la última década del análisis (2012-2021) es más del doble del correspondiente a la primera década (1903-1912). Y también se ve el salto que tiene lugar entre la penúltima y la última década, siendo entonces los últimos 10 años los principales responsables de la tendencia encontrada en la cantidad de sudestadas del período P2.

Por otro lado, es importante aclarar que la década 1965-1971 tiene una brecha de dos años de datos faltantes, por lo que el número anómalo allí registrado se debe a que la información es incompleta en ese período.

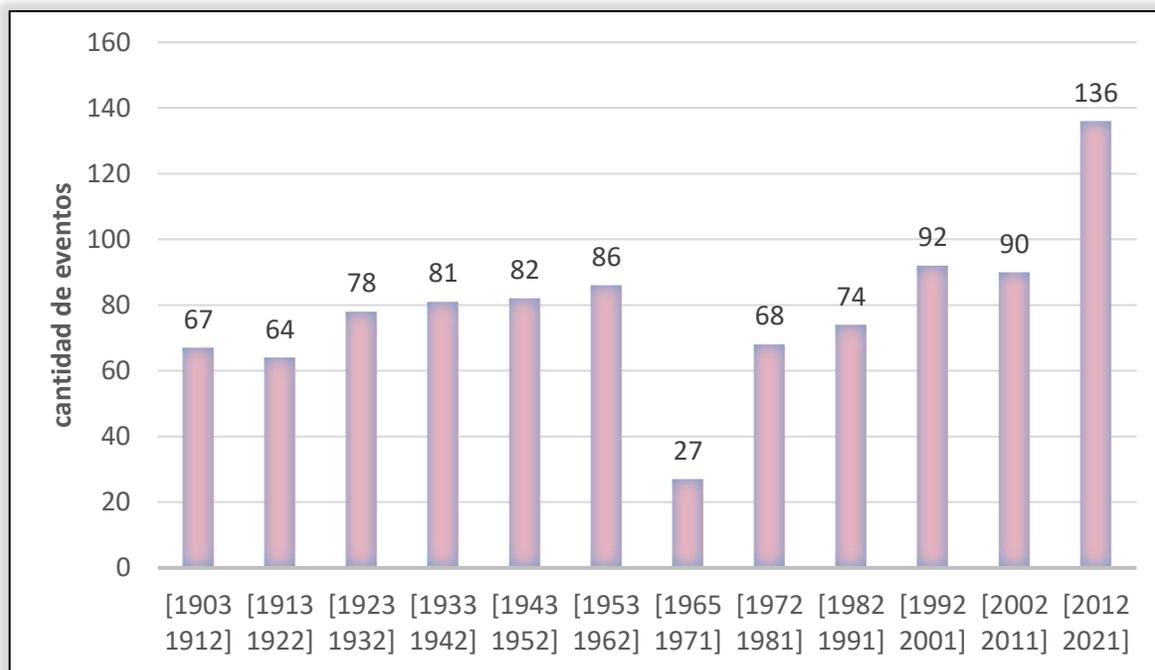


Figura 13- Cantidad decenal de eventos de Sudestadas para el período 1905-2021. La década 1965-1971 contiene una brecha de dos años de datos faltantes.

Períodos de retorno

Finalmente se muestran los resultados obtenidos al estudiar los períodos de retorno de las máximas alturas observadas para el periodo completo de estudio (1905-2021), en la Figura 14. Allí están graficados los períodos de retorno de alturas extremas del nivel del RdP hasta 500 años, con sus intervalos de confianza. Resulta interesante ver que el valor medio de las observaciones máximas que corresponde a 3,12 m se asocia con un tiempo de recurrencia que tiende a cero. Es decir que este valor se espera que sea frecuente.

Por su parte, la mayor altura registrada en todo el período –4,44 m en el año 1940– tiene un tiempo de recurrencia de 240 años. Dicho tiempo es 25 años menor que el obtenido por D’Onofrio et al. (1999), debido a que la serie temporal utilizada en este trabajo es más larga

y contiene los últimos años donde los efectos del cambio climático son más acentuados. Es importante aclarar que los cálculos realizados son análogos en ambos trabajos.

BUENOS AIRES 1905-2021

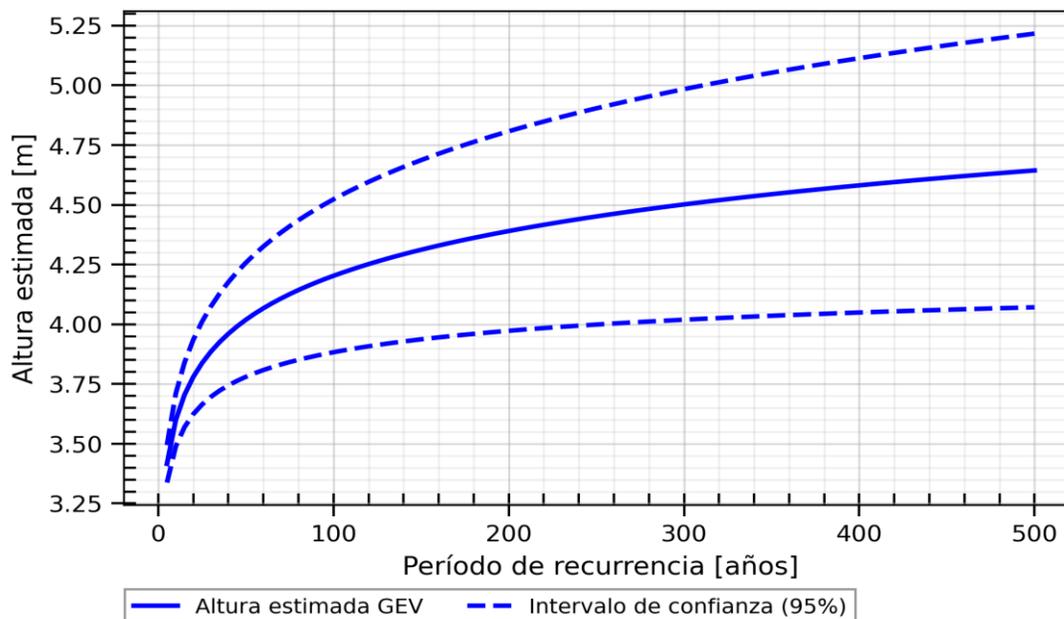


Figura 14- Períodos de retorno de alturas de nivel del río para la Ciudad de Buenos Aires y sus intervalos de confianza, hasta 500 años, obtenidos mediante el modelo BM-GEV.

CONCLUSIONES

El cambio climático es un fenómeno a nivel global que tiene consecuencias a nivel local, y el estuario del RdP no es una excepción. Queda claro que no es un discurso, o una frase hecha. Las variaciones encontradas en este trabajo al analizar las Sudestadas en el pasaje de un período al otro son muestra de ello. Vimos que los eventos que afectan la Ciudad de Buenos Aires se están haciendo más severos. No es debido a que las alturas máximas de estos eventos estén aumentando, ya que se observó que no se registra tendencia en el último período estudiado. Pero sí están ocurriendo con mucha más frecuencia –en las primaveras principalmente– que años anteriores, y este crecimiento en el número de eventos se aleja de la tendencia encontrada para el nivel medio del río y las otras variables analizadas. Además, las Sudestadas están durando más horas en promedio cada año.

Frente a este escenario no solamente es indispensable la toma de conciencia y la participación activa con acciones concretas en lo individual, sino también a nivel gubernamental. A nivel individual, si reducimos nuestro consumo y cambiamos algunos hábitos por otros basados en la sustentabilidad vamos a estar contribuyendo a desacelerar o desactivar –en el mejor de los casos– los efectos que acompañan al cambio climático que vimos están presentes en nuestra actualidad y en nuestro medioambiente local. A nivel gubernamental, teniendo en cuenta que existe parte de la población de la Ciudad de Buenos Aires que sufre las inundaciones forzadas

por las Sudestadas, resulta mandatorio ubicar el foco en esa población a la hora de la planificación y la toma de decisiones en materia de obras hidráulicas de infraestructura como así también en medidas no estructurales. Estas medidas y decisiones por lo tanto deben ajustarse a los cambios que están teniendo lugar actualmente y las tendencias encontradas para resultar útiles y efectivos. Por lo tanto, la adaptación y la mitigación del cambio climático son importantes para abordar estos desafíos.

REFERENCIAS

- Cartwright, D.E. (1985). Tidal prediction and modern time scales. *International Hydrographic Review*, LXII (1), 127-138.
- D'Onofrio, E., Fiore, M.M.E., Romero, S. (1999). Return periods of extreme water levels estimated for some vulnerable areas of Buenos Aires. *Continental Shelf Research*, 19, 1681-1693.
- D'Onofrio E.E., Fiore M.E., Valladares J. (2002). Mareas e inundaciones en la Ciudad de Buenos Aires. *Ciencia Hoy*, Vol. 12, N°67, Febrero/Marzo, 38-45
- D'Onofrio E.E., Fiore M.E., Pousa J.L. (2008). Changes in the regime of storm surges in Buenos Aires, Argentina. *Journal of Coastal Research*, 24,1A, 260-265.
- D'Onofrio E.E., Oreiro F.A., Grismeyer W.H., Fiore M.M. E. (2016). Predicciones precisas de marea astronómica calculadas a partir de altimetría satelital y observaciones costeras para la zona de Isla Grande de Tierra del Fuego, Islas de los Estados y Canal de Beagle. *GEOACTA*, 40(2), 60-75.
- Dirección Nacional de Control de Puertos y Vías Navegables. (19 de octubre de 2022). *Boletín Fluvial*.
https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2018/04/boletin_fluvial_42_22.pdf
- 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.
- de Azkue, M.F. (2023). *Evolución y caracterización de las ondas de tormenta positivas registradas en el Río de la Plata entre 1905 y 2021 desde una mirada física y antrópica*. Tesis de Maestría en Estudios Ambientales, Universidad de Ciencias Empresariales y Sociales, Buenos Aires, Argentina.
- Dinapoli, M. G., Simionato, C. G., Moreira, D. (2017). Model sensitivity for the prediction of extreme sea level events at a wide and fast-flowing estuary: the case of the Río de la Plata. *Natural Hazards and Earth System Sciences Discussions*, 1-18.
- Escobar, G., Vargas, W., Bischoff, S. (2004). Wind tides in the Rio de la Plata estuary: meteorological conditions. *International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society*, 24(9), 1159-1169.

- Fox-Kemper, B., Hewitt, H.T., Xiao, C., Aðalgeirsdóttir, G., Drijfhout, S.S., Edwards, T.L., Golledge, N.R., Hemer, M., Kopp, R.E., Krinner, G., Mix, A., Notz, D., Nowicki, S., Nurhati, I.S., Ruiz, L., Sallée, J.-B., Slangen, A.B.A., Yu, Y. (2021). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. En V. Masson-Delmotte, , Zhai, P. Pirani A., Connors S.L., Péan C., Berger S., Caud N., Chen Y., Goldfarb L., Gomis M.I, Huang M., Leitzell K., Lonnoy E., Matthews J.B.R., Maycock T.K., Waterfeld T., Yelekçi O., Yu R., Zhou B. (Eds.), *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press (págs. 1211–1362). <https://doi.org/10.1017/9781009157896.011>.
- Gan, A.P., Rao, B.V. (1991). Surface cyclogenesis over South America. *Monthly Weather Review*, 119, 1293-1302.
- Idier, D., Bertin, X., Thompson, P., 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. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09549-5>.
- Jongman, B., Ward, P. J., Aerts, J. C. J. H. (2012). Global exposure to river and coastal flooding: long-term trends and changes. *Global Environmental Change*, 22, 823–835.
- Laignel, B., Vignudelli, S., Almar, R., Becker, M., Bentamy A., Beneviste, J., Birol, F., Frappart, F., Idier, D., Salameh, E., Passaro, M., Menende, M., Simard, M., Turki, E. I., Verpoorter, C. (2023). Observation of the coastal areas, estuaries and deltas from space. *Surveys in Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s10712-022-09757-6>
- Luz Clara, M., Simionato, C. G., D’Onofrio, E., Fiore, M., Moreira, D. (2014). Variability of tidal constants in the Río de La Plata estuary associated to the natural cycles of the runoff. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 148, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.07.002>
- Nabel, P.E, Caretti, M., Becerra Serial, R. (2008). Incidencia de aspectos naturales y antropicos en los anegamientos de la ciudad de Buenos Aires. *Revista Museo Argentino de Ciencias Naturales*, 10(1), 37-53
- Piecuch, C.G. (2023). River effects on sea-level rise in the Río de la Plata estuary during the past century. *Ocean Science*, 19, 57–75. doi:10.5194/os-19-57-2023
- Pugh, D. T. (1987). *Tides, Surges and Mean Sea-Level*. John Wiley & Sons Ltd.
- Pugh, D.T, y Woodworth, P. (2014). *Sea-level science: Understanding tides, surges, tsunamis and mean sea-level changes*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139235778>.
- Santamaria-Aguilar, S., Schuerch, M., Vafeidis, A.T., Carretero, S.C. (2017) Long-term trends and variability of water levels and tides in Buenos Aires and Mar del Plata, Argentina. *Frontiers in Marine Science*, 4:380. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00380>

- Santoro, P. E., Fossati, M., Piedra-Cueva, I. (2013). Study of the meteorological tide in the Río de la Plata. *Continental Shelf Research*, 60, 51-63.
- Schureman, P. (1988) *Manual of Harmonic Analysis and prediction of tides*. United States Department of Commerce, Coast and Geodetic Survey.
- Vitousek, S., Barnard, P. L., Fletcher, C. H., Frazer, N., Eroksom, L., Storlazzi C. D. (2017). Doubling of coastal flooding frequency within decades due to sea-level rise. *Scientific Reports*, 7:1399. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-01362-7>