

Análisis de tendencias del nivel del mar para la costa central del golfo de México 1999-2018

Sea level trend analysis for the central coast of the Gulf of Mexico 1999-2018

Tapia Flores, K. M.,* Utrera Zárate, A.** y Tejeda Martínez, A.***

Recibido: 20/01/2022. Aprobado: 13/05/2022. Publicado: 24/06/2022.

Resumen. Hay consenso científico sobre un aumento en el nivel medio del mar global de alrededor de 0.20 metros durante el periodo 1901-2018 (IPCC, 2021). Este es global, pero no homogéneo, por lo que resultan relevantes los estudios a escalas menores. En este artículo se describe el análisis cuantitativo que se realizó para determinar el comportamiento actual y a futuro de la altura del nivel del mar en la costa central del golfo de México y determinar si presenta o no un aumento similar al reportado a escala global. Se busca determinar la naturaleza del comportamiento observado en el nivel del mar de la región.

Tomando como base metodológica el trabajo de Zavala-Hidalgo *et al.* (2011), fueron seleccionadas tres estaciones pertenecientes a la Red Mareográfica Nacional para caracterizar la marea en la costa central del gofo de México: Coatzacoalcos (18°09' N, -94°26' W); Frontera (18°32' N, -92°38' W) y Veracruz (19°12' N, -96°08' W). Se graficaron los ciclos diarios y anuales para determinar el comportamiento actual de la marea. Posteriormente, utilizando registros horarios, se construyeron gráficas de la evolución temporal para los años disponibles en cada serie de tiempo. A cada una de estas gráficas se le asoció una línea de tendencia que describía las variaciones de la marea con el tiempo y fue calculado un valor numérico para cada línea de tendencia junto a su incertidumbre asociada. Finalmente, haciendo uso de extrapolaciones se estimaron valores a

futuro para la altura del nivel del mar en la región. Estas predicciones fueron comparadas con las de otras bases para el análisis cualitativo.

Los primeros resultados obtenidos indican un comportamiento estable y constante de la marea en la costa central del golfo de México, con ciclos a escala diaria y anual bien definidos. La tendencia global del nivel del mar en esta región es de $-1.86 \text{ mm año}^{-1}$ para el periodo 1999 a 2018. La tendencia global para la primera década es 3.6 mm año^{-1} ; la tendencia global para la segunda década es $-1.26 \text{ mm año}^{-1}$. En el periodo 2000 a 2010, el nivel medio del mar en la costa central del golfo de México aumentó en un orden de 0.03 metros. En el periodo 2011 a 2018 se observa una disminución en el nivel del mar de aproximadamente de 0.008 metros. A través de las predicciones construidas con extrapolaciones se estimó un aumento a futuro de alrededor de 0.47 a 1.07 metros hacia 2200, considerando las tendencias de la primera década, y una disminución de 0.41 a 0.02 metros hacia 2200, tomando en cuenta las tendencias de la segunda década.

La tendencia global observada en el periodo 1999-2018 para la costa central del golfo de México corresponde a un descenso en la altura del nivel del mar en la región, pero sus efectos no han sido observados en el litoral centro del golfo de México. La primera década del periodo considerado presenta un aumento constante del nivel del mar

* Licenciatura en Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana. Lomas del Estadio s/n, Xalapa, Veracruz, 91090, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1602-7470>. Email: miriel.tapi@gmail.com. Autor de correspondencia.

** Instituto Oceanográfico del Golfo y Mar Caribe, Universidad Naval. Calle Xicotencatl s/n, Veracruz, Veracruz, 91700, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6282-4449>. Email: autreraz@gmail.com

*** Licenciatura en Ciencias Atmosféricas, Universidad Veracruzana. Lomas del Estadio s/n, Xalapa, Veracruz, 91090, México. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2513-3454>. Email: atejeda@uv.mx

hasta el 2010. A partir de 2011 el aumento es más lento y progresivo. La tendencia segmentada corregida de la primera década coincide con la tendencia media global establecida por el IPCC (2021). Las tendencias negativas no coinciden con ningún valor establecido por la literatura consultada. Las proyecciones de altura de nivel del mar subestiman el aumento respecto de las proyecciones asociadas a las RCP 2.6, 4.5 y 8.5.

Dos de las tres estaciones mareográficas utilizadas en este artículo cortan sus registros un año entero –2011– y reanudan los datos con valores inferiores al inicio del corte. En este trabajo no se determinó la naturaleza de este hueco en las series de tiempo, pero se conjetura que esté asociado a recalibraciones del instrumento. Se desconoce el grado de influencia que este corte en los registros tiene en los resultados presentados, aunque no se descarta una posible causalidad.

Palabras clave: altura del nivel del mar, golfo de México, tendencias del nivel del mar, ciclos de marea, predicciones del nivel del mar.

Abstract. The contributions of the thermal expansion of the ocean and the reduction of the glacier mass in the polar ice caps in the face of the increase in the global average surface temperature, generate an increase in the average sea level on

a global scale that particularly threatens human settlements in the areas coastal. Due to this, studies that characterize the behavior of sea level in particularly vulnerable regions are essential. In this work, the current and future behavior in the central coast of the Gulf of Mexico was evaluated, to determine if it presents an increase similar to that identified globally. Tidal data from three stations belonging to the Tidal Network of the Secretaría de Marina (Secretary of Navy) were analyzed: Coatzacoalcos, Frontera and Veracruz. Using annual mean data, time evolution graphs were constructed, to which a trend line was associated through the method of least squares. Finally, using extrapolations, predictions of the behavior of the sea level were built to observe and compare the development of this variable. The results show a negative average global trend in the region, with a magnitude of $-1.86 \text{ mm year}^{-1}$ considering the period from 1999 to 2018. The average increase included in the first decade of the period is 3.6 mm year^{-1} ; in the second decade a decrease of approximately $-1.26 \text{ mm year}^{-1}$ was observed. This negative behavior identified in the central coast of the Gulf of Mexico may be due to the influence of mesoscale meteorological events, continental vertical movements or episodes of the La Niña phenomenon.

Keywords: rise of sea level, Gulf of Mexico, sea level trends, tidal cycles, sea level predictions.

INTRODUCCIÓN

Los eventos hidrometeorológicos y climáticos son resultado de la interacción de más de una esfera en el planeta Tierra, además de los procesos dentro y fuera del mismo que también influyen en ellos, convirtiéndolos en fenómenos complejos. Para caracterizar climáticamente una región con series de tiempo meteorológicas, o estimar valores posteriores, es imprescindible considerar e identificar las interacciones climáticas entre el océano-continente con la atmósfera. De todas las interacciones con esta última, probablemente la más significativa sea precisamente la que se da entre océano y atmósfera. Encargado de proveer humedad, transportar momento, energía y almacenar calor, tanto en el propio océano como en la atmósfera, el océano cubre el 71% del planeta, desempeñando un papel clave en la mayoría de los fenómenos que ocurren en la atmósfera terrestre (IPCC, 2019).

Múltiples estudios se han dedicado a identificar los principales impactos que tiene el calentamiento global en las aguas oceánicas. Entre los efectos más importantes destacan el aumento de la temperatura

de la capa superficial, la acidificación del océano, la pérdida de cobertura de hielo Ártico y Antártico, el desbalance en el contenido de oxígeno en las profundidades, y el aumento en el nivel medio del mar en las zonas costeras del mundo (Cazenave y Cozannet, 2014). De todos los anteriores aspectos, la elevación-disminución en el nivel medio del mar es el efecto que representa la amenaza más preocupante y un peligro potencial para la población asentada en zonas costeras (McGranahan *et al.*, 2007).

Cuando hablamos del nivel del mar estamos refiriéndonos a la altura media de la superficie del océano entre la marea alta y la baja. Los cambios temporales en las mareas y el oleaje se promedian para determinar un nivel de agua estacionaria, y así identificar si el nivel del mar ha cambiado o lo ha hecho la altura del terreno sobre el nivel del mar (British Geological Survey, s.f.). A través de esta y otras variables oceanográficas, fue posible identificar tendencias –por lo general positivas– en el comportamiento de la altura oceánica a distintas escalas temporales y espaciales (IPCC, 2021).

Este aumento observado, a nivel local puede atribuirse a una miríada de fenómenos, desde movi-

mientos continentales, gestiones costeras, procesos termodinámicos, modificaciones de la orografía debido a la edificación de infraestructura, eventos hidrometeorológicos extremos, hasta la presencia o ausencia de El Niño. A nivel global existen distintas escalas temporales a través de las cuales diversos fenómenos pueden influir en el nivel medio del mar. Señalar categóricamente una sola causa resulta intrincado. Sin embargo, el IPCC (2021), en su más reciente informe de evaluación, considera altamente probable que desde 1971 la actividad humana sea la causa principal de esta elevación en el nivel medio del mar (IPCC, 2021).

Debido a movimientos de la superficie terrestre durante largos periodos, los cambios a escala local pueden ser observados a pesar de que la altura absoluta de los océanos no varíe o, en su defecto, los cambios pueden no ser identificados a pesar de que la altura varíe (British Geological Survey, s.f.).

En distintas regiones costeras alrededor del mundo se han realizado análisis de la evolución de la altura del nivel del mar, la mayoría de ellos detectando un incremento. White *et al.* (2014), en Australia, obtuvieron una tendencia de aumento de $1.6 \pm 0.2 \text{ mm año}^{-1}$ para el periodo 1966-2010; el estudio de Marcos y Tsimplis (2008), para Europa del sur, estableció una tendencia positiva de $1.5 \pm 0.1 \text{ mm año}^{-1}$ durante el siglo XX. Estudios como estos son considerados para calcular las tendencias medias globales, de allí la importancia de realizar análisis a escala regional o local en diversas partes del mundo.

En el reporte especial del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, 2019) sobre el océano y la criósfera, se estableció un valor medio de 0.16 metros de aumento en el nivel del mar global en el periodo de 1902 a 2015, y una tendencia global media de 3.6 mm año^{-1} de 2006 a 2015. De acuerdo con el sexto reporte de evaluación del IPCC (2021), se ha observado un aumento en el nivel medio del mar global de aproximadamente 0.20 metros durante el periodo de 1901 a 2018, y una tendencia actualizada del nivel medio del mar de 3.7 mm año^{-1} .

De conformidad con la evolución observada hasta el momento, se espera que la razón anual global aumente y continúe así durante los próxi-

mos siglos; algunos escenarios futuros estiman una elevación de entre 0.30 y 2 metros hacia 2200 dependiendo el manejo de emisiones de gases de efecto invernadero (IPCC, 2021).

En México los estudios de los cambios en el nivel medio del mar han empezado a surgir, cada uno con sus propios métodos, objetivos y diferentes bases de datos. Algo a tener en cuenta es que, al igual que la mayoría de los estudios a nivel global, a pesar de sus diferencias pragmáticas, los realizados en las zonas costeras del territorio mexicano concluyen una tendencia positiva con respecto al nivel del mar de la región, un resultado consistente con lo planteado por el IPCC (2019, 2021) y estudios anteriores.

Zavala-Hidalgo *et al.* (2011) analizaron el comportamiento del nivel del mar en las costas mexicanas a través de 16 estaciones pertenecientes al Servicio Mareográfico Nacional de la Universidad Nacional Autónoma de México. Utilizaron los promedios mensuales de las series más largas disponibles, y consideraron únicamente años completos de datos para evitar sesgos por variación estacional. Se identificó una tendencia positiva tanto en la cuenca del Pacífico como en la del golfo de México. De manera general, se estableció que la tendencia en los litorales Pacífico y Atlántico mexicanos es positiva, pero irregular.

Los eventos a escala regional influyen también en los datos utilizados para construir las tendencias y eso complica la caracterización de una tendencia única, aunque se pueden rescatar patrones para cada región costera del país: Ruíz-Ramírez *et al.* (2014) encontraron que el nivel del mar en México aumenta de manera global; el litoral del golfo y el Pacífico aumentan a una razón mayor (3.8 y 3.5 mm año^{-1} , respectivamente), mientras que el Caribe mexicano tiene una razón de aumento menor (1.6 mm año^{-1}) respecto a la media global considerada en el estudio.

OBJETIVOS

El presente artículo es de escala local, pues se limita a la costa central del golfo de México. En principio se espera que sus resultados concuerden

con lo reportado por la literatura sobre tendencias de nivel del mar a distintas escalas. Por tanto, el objetivo central es comparar las tendencias recientes del nivel del mar en esta región con los valores encontrados por Zavala-Hidalgo *et al.* (2011) y Ruíz-Ramírez *et al.* (2014) para las costas mexicanas y, a su vez, con la media global reportada por el IPCC (2019, 2021).

Para una región costera, las anomalías en sus aguas adyacentes impactarán y presentarán riesgos variados. Factores como la topografía, la extensión de la llanura costera y la infraestructura determinarán en gran medida qué efecto del calentamiento global en el océano representa el mayor riesgo y ante lo cual se encuentra más vulnerable. Conde Álvarez y Palma Grayeb (2006) afirman que el aumento en el nivel medio del mar representa un riesgo importante para los asentamientos humanos ubicados en el litoral del golfo de México, dada su vulnerabilidad a inundaciones y marejadas, entre otras respuestas. El análisis y caracterización de la llanura efectiva, así como una evaluación de las zonas más vulnerables y los estudios de análisis de datos mareográficos, son fundamentales para los estados costeros. Es necesario comprender la raíz del problema utilizando una metodología confiable para la toma de decisiones, pues desastres de origen natural pueden determinar la distribución de la población (Rodríguez Villafuerte. 2006; Gómez Villerías *et al.*, 2022). Mediante la planificación costera se ahorrarían pérdidas y daños en sectores como el energético, y resulta necesaria para el acomodo pertinente de viviendas y manejo de riesgos.

En este contexto, como se dijo anteriormente, se seleccionó el litoral del golfo de México como región de estudio para verificar si en esta región costera se presentan los efectos del calentamiento global señalados por el IPCC (2021) y encontrados para las costas mexicanas en trabajos previos (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2011; Ruíz-Ramírez *et al.*, 2014).

A través del cálculo de ciclos diarios, ciclos anuales y la construcción de series de tiempo de valores medios anuales, se caracterizó el comportamiento a pequeña escala temporal del nivel del mar. A través de estimaciones futuras se caracterizó

el comportamiento a gran escala temporal del nivel del mar en la región. Los resultados numéricos se muestran también en forma gráfica para facilitar la visualización e identificación de patrones o anomalías encontradas.

MATERIALES Y MÉTODOS

Empleando el mismo procedimiento utilizado por Zavala-Hidalgo *et al.* (2011), en el presente artículo, con el objetivo de describir cuantitativamente el comportamiento del nivel medio del mar en el litoral del golfo de México, se analizaron datos mareográficos horarios de tres estaciones de la Red Mareográfica Nacional de la Secretaría de Marina. Este artículo se realizó con los registros horarios históricos de tres estaciones instaladas en el litoral del golfo: Coatzacoalcos, Veracruz (18°09' N, -94°26' W); Frontera, Tabasco (18°32' N, -92°38' W); y Veracruz, Veracruz (19°12' N, -96°08' W) (Figura 1), con el objetivo de describir cuantitativamente el comportamiento del nivel medio del mar en el litoral del golfo de México. Debe aclararse que los datos mareográficos empleados no consideran los cambios geofísicos que pueden influir en las mediciones de la altura relativa del nivel del mar.

Para estimar valores de tendencias del nivel del mar en el litoral del golfo de México, primero se caracterizó la marea –a través de ciclos diarios y anuales–. Adicionalmente, se utilizaron los valores de tendencia calculados para construir, a través de extrapolaciones, gráficas del comportamiento a futuro de nivel del mar para el próximo siglo. Estas gráficas fueron comparadas con otras fuentes y son discutidas al final.

Para los tres sitios fueron construidas series de evolución temporal para los años disponibles en cada base (1999 a 2018 en Frontera, y 2000 a 2018 en Coatzacoalcos y Veracruz), promediando los valores para un mismo año en cada estación –bases de valores medios anuales–. De manera general, las estaciones presentan porcentajes relativamente altos de datos faltantes, especialmente la estación de Coatzacoalcos, con solo 55% de datos disponibles. Frontera fue la estación con más información y la única en presentar un año completo de datos. Los

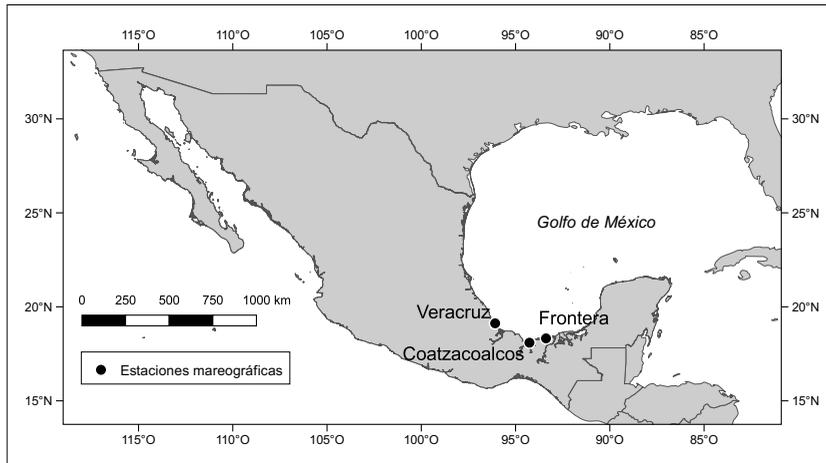


Figura 1. Localización de las estaciones que definen la región “Costa central del golfo de México”.

años con nulos datos disponibles no fueron considerados para el cálculo de las tendencias.

Una variación respecto a la metodología de Zavala-Hidalgo *et al.* (2011) es el análisis de auto-correlación para las bases de datos de valores medios anuales. La Figura 2 muestra la función de auto-correlación para valores medios anuales. Se observa un comportamiento semi-cíclico que no se alcanza a completar porque la longitud de la serie solo abarca 18 años. Se trabajó con los datos bajo esta premisa.

Posteriormente, a cada serie de evolución temporal se le ajustó una línea de tendencia a través del método de regresión lineal por mínimos cuadrados.

Para cada valor de tendencia fue calculado un intervalo de incertidumbre, definida al igual que en el trabajo de Zavala-Hidalgo *et al.* (2011) como el producto del valor crítico y el error típico (ET):

$$ET = \frac{\sigma}{\sqrt{|n|}} \quad (1)$$

Donde σ es la desviación estándar y n el tamaño de la serie de datos horarios. El valor crítico se calculó con un nivel de significancia de 0.01 (1%) y con $n-2$ grados de libertad. Los cálculos descritos, así como todos los productos presentados en este artículo fueron realizados con apoyo del software Rstudio (Rstudio, 2018).

Al presentarse años enteros con falta de datos, en este estudio se calcularon tres tipos de tendencias distintas: la tendencia global, que considera

a las series de tiempo como un solo segmento, la tendencia segmentada que se calcula para cada periodo ininterrumpido de datos y la tendencia corregida, que considera la serie completa tras la imputación de los datos faltantes. Para la imputación fue utilizado el valor medio de la estación correspondiente. Esta sustitución se hizo siguiendo el procedimiento utilizado por la Secretaría de Marina en los cálculos para los calendarios de predicción de marea (CECOPROD, comunicación personal, 6 de enero de 2022).

De acuerdo al glosario del IPCC (2013), una predicción es el resultado de un intento de obtener –a partir de un estado particular del sistema– una estimación de la evolución real de la variable en el futuro. En este trabajo usando extrapolaciones basadas en las tendencias segmentadas calculadas para cada sitio, se estimó a futuro el nivel del mar mediante gráficas de predicciones para la costa central del golfo de México hasta el año 2200. El mismo glosario establece el término ‘pronóstico’ como sinónimo en este contexto.

Dichas gráficas fueron comparadas con las predicciones de nivel del mar construidas por el Climate Central (2020), correspondientes a los escenarios de las RCP 2.6, 4.5 y 8.5. Para las gráficas que se incluyen en la sección de resultados, las líneas de predicción de las RCP están basadas en el percentil 50 de cada escenario de emisiones.

Las estimaciones de nivel del mar relacionadas con las RCP 2.6, 4.5 y 8.5 calculadas por el

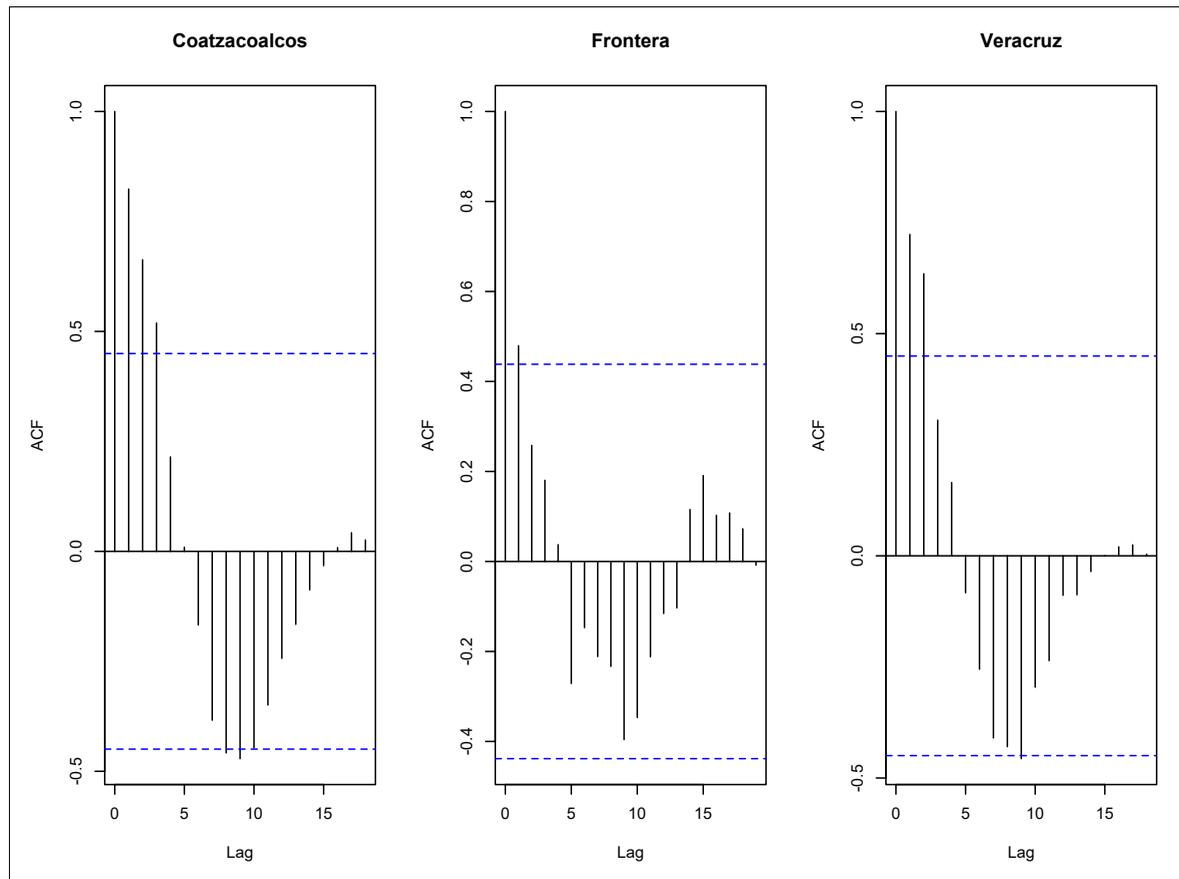


Figura 2. Función de auto correlación (eje Y) para las bases de datos de valores medios anuales (eje X).

Climate Central (2020) toman como base principal el trabajo de Kopp *et al.* (2014) y Kopp *et al.* (2017); estos resultados también consideran las predicciones globales del IPCC y, en algunos casos, investigaciones recientes de la inestabilidad potencial de la cubierta de hielo en la Antártica (DeConto y Pollard, 2016). Los escenarios de contaminación por emisión de gases de efecto invernadero comprenden los casos de “contaminación desenfrenada” (técnicamente RCP 8.5), “reducción moderada de concentraciones” (RCP 4.5) y “reducción extrema de concentraciones” (RCP 2.6), esta última suposición representa un máximo en las emisiones cerca del año 2020 seguido de un declive pronunciado cercano al cero para 2070 (Climate Central, 2020). Se utilizaron las estimaciones de este servidor por la disponibili-

dad en los datos, la coincidencia en las locaciones utilizadas en este trabajo y la solidez de sus referencias.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los primeros resultados gráficos obtenidos fueron los ciclos diarios y anuales de marea en cada estación, los cuales sirvieron para caracterizar en un primer momento el comportamiento del nivel del mar en la costa central del golfo de México.

Se promediaron todos los valores disponibles en las series cuyo indicador de hora fuera igual para obtener el comportamiento medio diario para cada sitio (Figura 3 a, b y c). De manera similar se promediaron todos los valores disponibles en

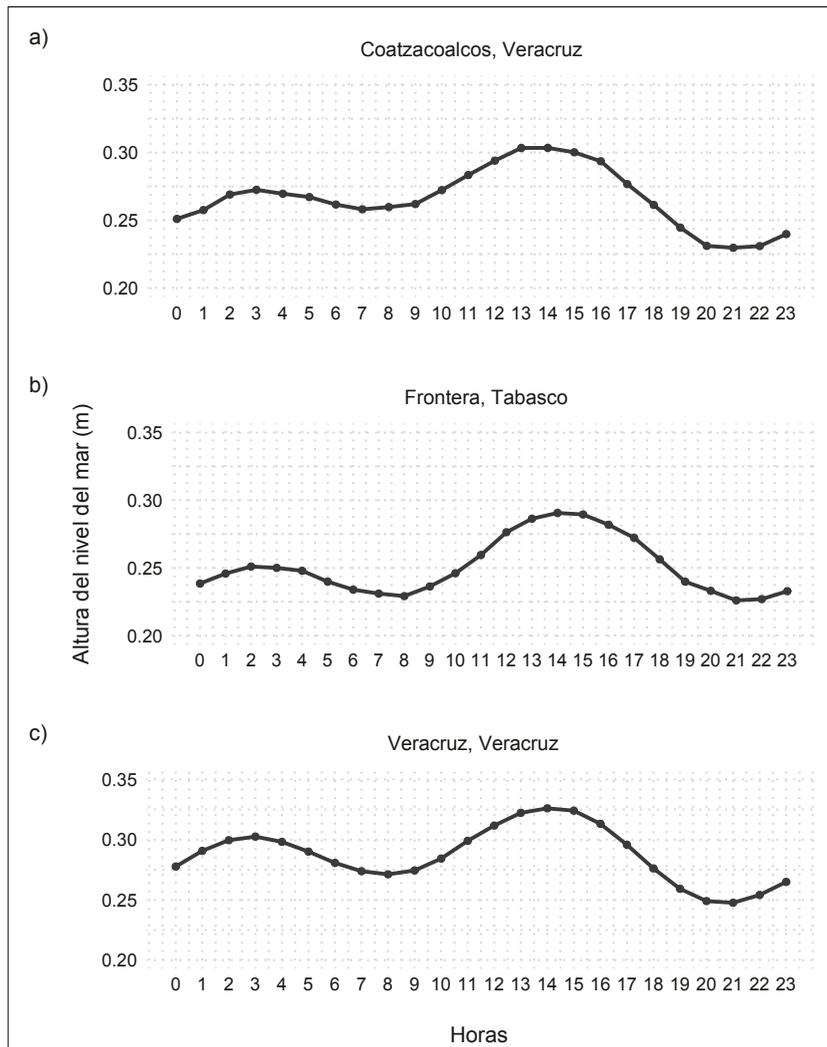


Figura 3. Caracterización de ciclos diarios en a) Coatzacoalcos, b) Frontera y c) Veracruz.

las series cuyo indicador de mes fuera igual para obtener el comportamiento medio anual en cada sitio (Figura 4 a, b y c).

Como se describió antes, los resultados de este artículo incluyen tres tendencias distintas. Para simplificar esta sección, solo se incluyen los resultados gráficos de las tendencias una vez realizada la imputación de datos faltantes.

La Figura 5 (a, b y c) representa las series de tiempo corregidas y las tendencias globales asociadas a ellas. La Figura 6 (a, b y c) muestra las tendencias segmentadas corregidas para la costa central del golfo de México. Estas últimas comprenden los periodos de 2000 a 2010 en Coatzacoalcos y

Veracruz, 1999 a 2010 en Frontera y 2011 a 2018 en las tres estaciones.

Frontera destaca como la única serie de tiempo sin discontinuidades, sin embargo, se calculó igualmente una tendencia segmentada y segmentada corregida para el periodo 2011-2018, que incluye al único periodo ininterrumpido común en los tres sitios: 2012-2018. La Tabla 1 contiene los valores numéricos de las tendencias con su incertidumbre asociada.

Finalmente, utilizando las tendencias cuyo comportamiento coincide con los resultados de Zavala-Hidalgo *et al.* (2011), a través de una extrapolación, se calcularon valores de altura de

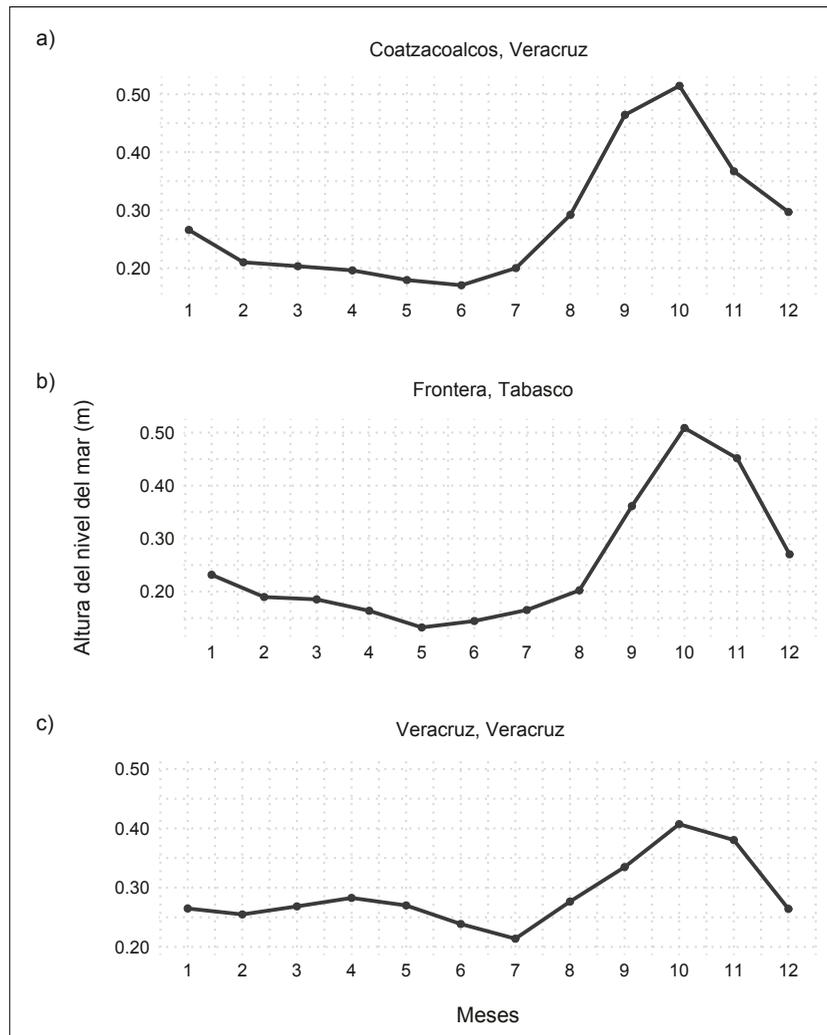


Figura 4 Caracterización de ciclos anuales en a) Coatzacoalcos, b) Frontera y c) Veracruz.

nivel del mar estimados para el próximo siglo. Se compararon gráficamente estos datos con predicciones disponibles en el portal de Climate Central (2020) para encontrar similitudes o disparidades y desarrollar discusión. Las Figuras 7, 8 y 9 ilustran el comportamiento de cada predicción para diferentes escenarios de emisiones, contra las predicciones calculadas en este trabajo. Los datos disponibles en Climate Central (2020) incluían predicciones para Coatzacoalcos, pero no para Frontera ni para Veracruz, por lo cual estas dos últimas estaciones fueron comparadas con sitios aledaños: Ciudad del Carmen ($18^{\circ}38' N$, $-91^{\circ}50' W$) y Alvarado ($18^{\circ}46' N$, $-95^{\circ} 46' W$) respectivamente.

A continuación, se discuten brevemente –por escala temporal– los resultados más sobresalientes del estudio.

Ciclos diarios y anuales

El comportamiento medio diario y anual de las estaciones, así como las tendencias corregidas representa el comportamiento actual del nivel del mar en la costa central del golfo de México. El periodo de referencia comprende 19 años, y se puede apreciar un comportamiento muy definido a lo largo del día (Figura 3) y a lo largo del año (Figura 4). De esto se sigue que, en la región, el nivel del mar se ha comportado hasta la fecha de

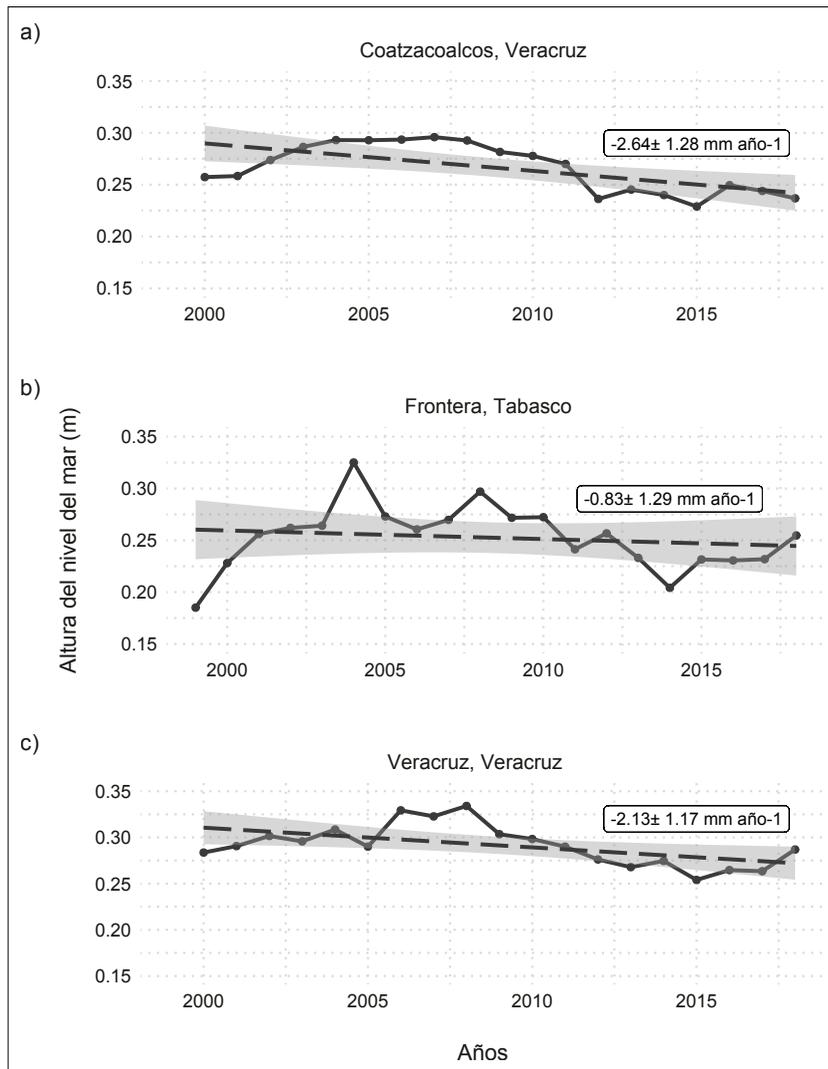


Figura 5. Evolución temporal de nivel del mar con tendencia global corregida en a) Coatzacoalcos, b) Frontera y c) Veracruz..

Tabla 1. Tendencias globales y segmentadas corregidas para estaciones en la costa central del golfo de México.

| Años analizados | Periodo | Tendencia Coatzacoalcos | Tendencia Veracruz | Años analizados | Periodo | Tendencia Frontera |
|-----------------|-----------|--------------------------------------|--------------------------------------|-----------------|------------|--------------------------------------|
| 19 | 2000/2018 | $-2.64 \pm 1.28 \text{ mm año}^{-1}$ | $-2.13 \pm 1.17 \text{ mm año}^{-1}$ | 20 | 1999/ 2018 | $-0.83 \pm 1.29 \text{ mm año}^{-1}$ |
| 11 | 2000/2010 | $2.46 \pm 1.78 \text{ mm año}^{-1}$ | $2.70 \pm 1.75 \text{ mm año}^{-1}$ | 12 | 1999/ 2010 | $5.64 \pm 1.67 \text{ mm año}^{-1}$ |
| 8 | 2011/2018 | $-2.28 \pm 1.75 \text{ mm año}^{-1}$ | $-1.39 \pm 1.68 \text{ mm año}^{-1}$ | 8 | 2011/ 2018 | $-0.13 \pm 2.03 \text{ mm año}^{-1}$ |

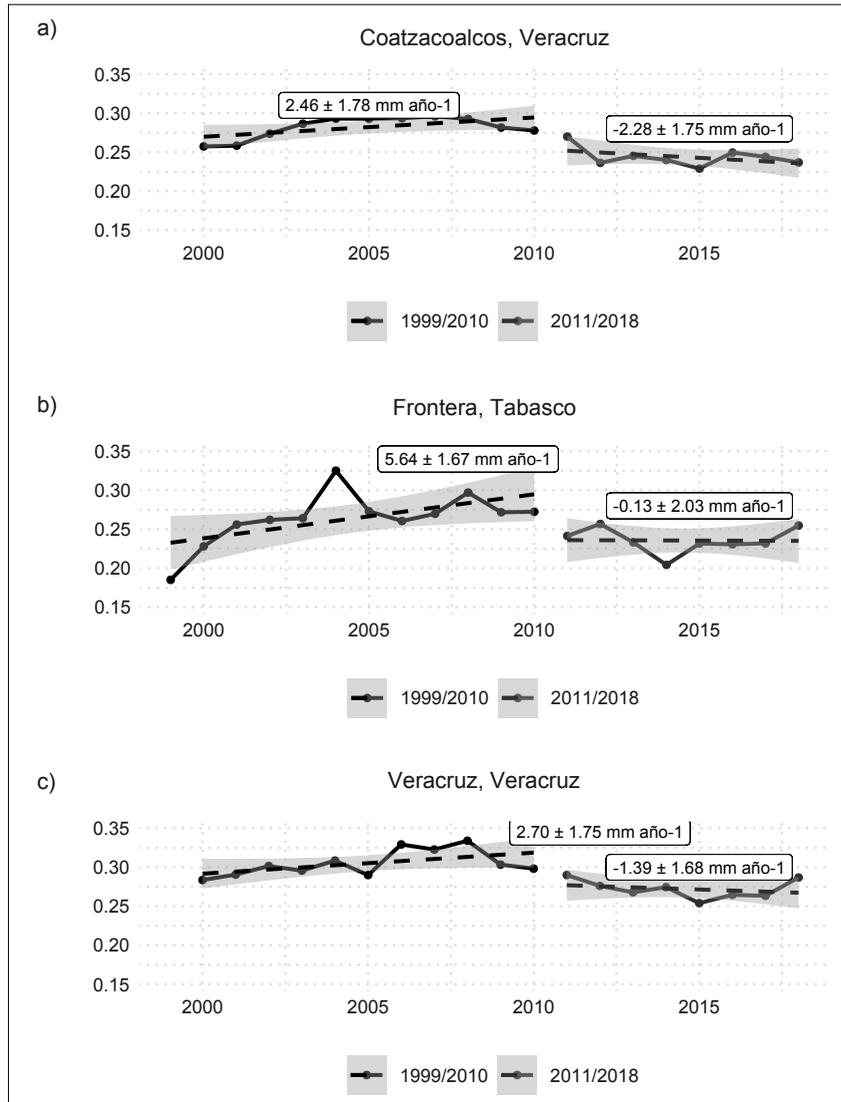


Figura 6. Evolución temporal de nivel del mar con tendencia segmentada corregida en a) Coatzacoalcos, b) Frontera y c) Veracruz.

manera regular y obedece a su naturaleza cíclica. No se aprecia ninguna perturbación importante. Los máximos diarios se ubican alrededor de las 2 y las 14 horas –solares– y los mínimos se identifican alrededor de las 7 y 21 horas. Esto se mantiene en toda la costa central del golfo de México. Este comportamiento de la marea relacionado a los ciclos diarios es consistente con los resultados de Salas-Pérez *et al.* (2008) para el golfo de México.

El máximo anual se presenta alrededor de los meses de otoño, puntualmente octubre, algo

que puede obedecer a la presencia de la marea de tormenta (Rosengaus Moshinsky *et al.*, 2021). El mínimo anual oscila entre los meses de mayo-julio en toda la costa central del golfo de México.

Tendencias del nivel del mar

De manera general, las tendencias globales corregidas en cada sitio, así como la tendencia global media para la costa central del golfo de México presentan valores negativos, es decir un comportamiento descendente en el nivel medio del mar en la región. Este comportamiento contradice los

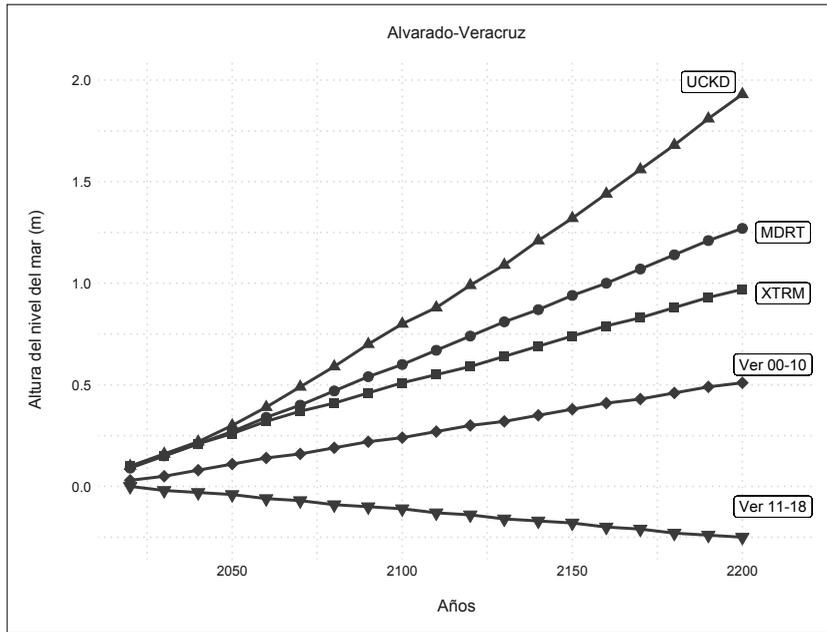


Figura 7. Comparación de predicciones en Alvarado, Veracruz. Las líneas XTRM, MDRT y UCKD corresponden a las RCP 2.6, 4.5 y 8.5, respectivamente.

Nota: las líneas 00-10 y 11-18 muestran resultados de las tendencias segmentadas corregidas calculadas para Veracruz.

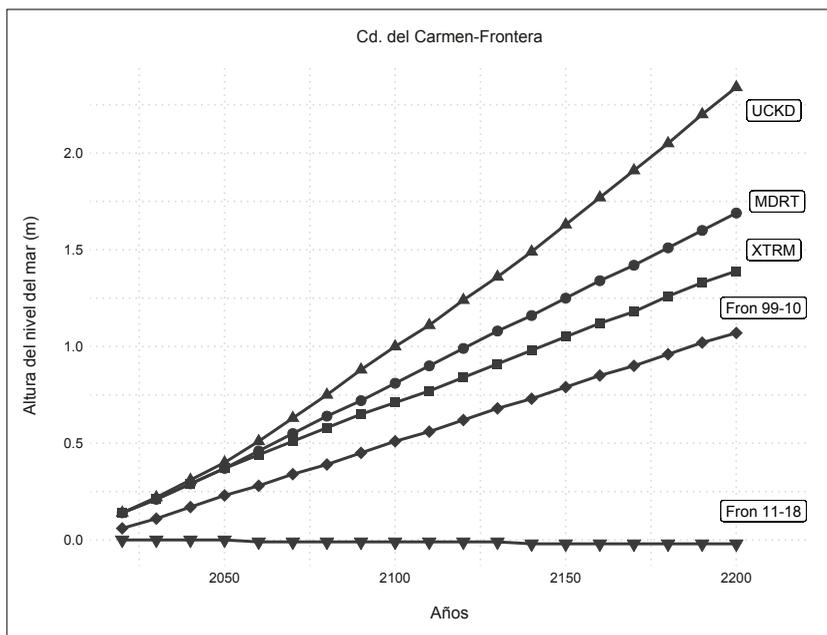


Figura 8. Comparación de predicciones en Cd Carmen, Campeche. Las líneas XTRM, MDRT y UCKD corresponden a las RCP 2.6, 4.5 y 8.5 respectivamente.

Nota: las líneas 99-10 y 11-18 muestran resultados de las tendencias segmentadas corregidas calculadas para Frontera.

resultados planteados por la bibliografía consultada tanto a nivel local (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2011 y Ruíz-Ramírez *et al.*, 2014) como a nivel global (IPCC, 2021).

Las tendencias segmentadas corregidas contienen en cada serie, un segmento con tendencia positiva y un segmento con tendencia negativa. En

los tres sitios, el primer periodo corresponde físicamente a un aumento en el nivel medio del mar, cuya magnitud se comporta de manera irregular. El segundo periodo corresponde físicamente a una disminución en el nivel del mar, sin embargo, es posible apreciar una ligera recuperación posterior a 2015.

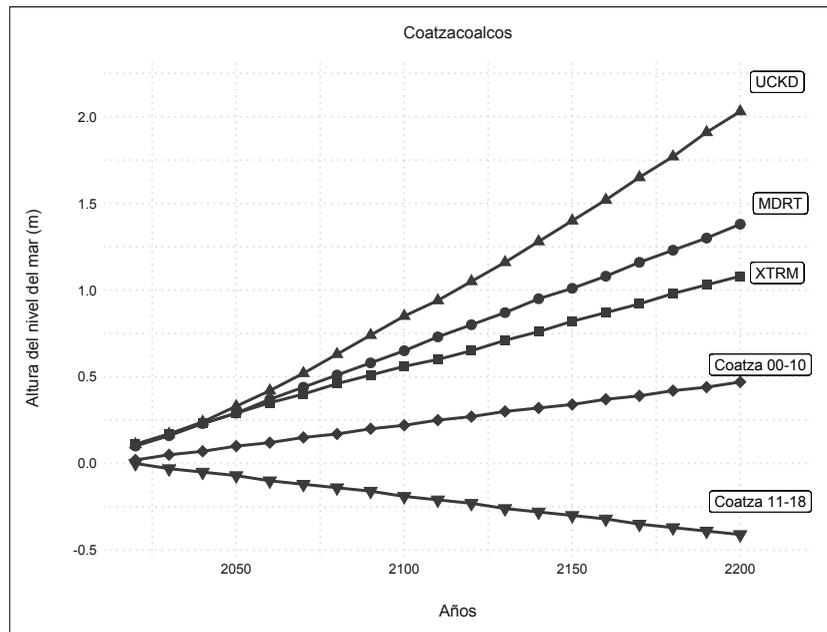


Figura 9. Comparación de predicciones en Coatzacoalcos, Veracruz. Las líneas XTRM, MDRT y UCKD corresponden a las RCP 2.6, 4.5 y 8.5 respectivamente.

Nota: las líneas 00-10 y 11-18 muestran resultados de las tendencias segmentadas corregidas calculadas para Coatzacoalcos.

De acuerdo al primer segmento, –1999 a 2010 en Frontera y 2000 a 2010 en Coatzacoalcos y Veracruz– el nivel del mar se eleva en Coatzacoalcos ($2.46 \pm 1.78 \text{ mm año}^{-1}$) y Veracruz ($2.70 \pm 1.75 \text{ mm año}^{-1}$) a una razón menor al valor medio establecido por Ruíz-Ramírez et al. (2014) para el golfo de México 3.5 mm año^{-1}). Por su parte, el nivel del mar en Frontera ($5.64 \pm 1.67 \text{ mm año}^{-1}$) se eleva a una razón mayor a este valor medio.

De acuerdo al segundo periodo de las tendencias segmentadas corregidas –2011 a 2018 en las tres estaciones– el nivel del mar disminuye con más velocidad en Coatzacoalcos ($-2.28 \pm 1.75 \text{ mm año}^{-1}$), seguido por Veracruz ($-1.39 \pm 1.68 \text{ mm año}^{-1}$) y finalmente, Frontera ($-0.13 \pm 2.03 \text{ mm año}^{-1}$).

Promediando los valores de tendencia global en cada sitio, se calculó un valor de tendencia global media para la costa central del golfo de México, el resultado indica una disminución de alrededor de $-1.86 \text{ mm año}^{-1}$ para el periodo de 1999 a 2018. Del mismo modo, para los dos periodos de las tendencias segmentadas fueron calculados valores medios regionales. El periodo de 1999 a 2010 presenta un aumento medio de aproximadamente 3.6 mm año^{-1} , que coincide con la tendencia media a nivel global establecida por el IPCC (2019, 2021).

El periodo de 2011 a 2018 presenta una tendencia media de $-1.26 \text{ mm año}^{-1}$.

Todos los conjuntos de las bases de datos muestran una disminución en sus registros posterior a 2011, que coincidentemente, es un año entero de datos faltantes tanto en la base de Coatzacoalcos, como en la base de Veracruz. En este estudio se desconoce –aunque no se descarta– el grado de influencia de esta caída en el resultado negativo de las tendencias globales y segmentadas posteriores a 2010.

Son negativas las tendencias globales medias para las estaciones de Coatzacoalcos ($-2.64 \pm 1.28 \text{ mm año}^{-1}$) y Veracruz ($-2.13 \pm 1.17 \text{ mm año}^{-1}$), y claramente las tendencias positivas calculadas por Zavala-Hidalgo et al. (2011): para Coatzacoalcos $2.9 \pm 1.5 \text{ mm año}^{-1}$ y Veracruz $1.9 \pm 0.6 \text{ mm año}^{-1}$ discrepan. La tendencia global media para la costa central del golfo de México es de $-1.86 \text{ mm año}^{-1}$ resultado que también discrepa de la tendencia positiva de 3.8 mm año^{-1} establecida por Ruíz-Ramírez et al. (2014) para el litoral del golfo de México y la tendencia global de 3.7 mm año^{-1} establecida por el IPCC (2021).

El descenso en el nivel del mar sugerido por los resultados en este trabajo implicaría respuestas

físicas tales como un avance de la línea de costa y una extensión persistente de los humedales, respuestas que no solo no se han identificado en la costa central del golfo de México, si no que se ha identificado procesos contrarios en las últimas décadas (Landgrave y Moreno-Casasola, 2011 y Hernández Santana *et al.*, 2007).

Las gráficas de evolución temporal –independientemente del tratamiento que recibieron– presentan un mínimo abrupto hacia 2011. Debido a las limitaciones metodológicas establecidas para este estudio, no se determinó si este comportamiento obedece a una re-calibración de la instrumentación en la red mareográfica o a algún factor externo. Sin embargo, en este trabajo los autores consideran altamente probable que esta caída sea la principal influencia para el resultado negativo de las tendencias y predicciones asociadas.

Predicciones de nivel del mar

Considerando aquellos valores que sirvieron de base para calcular la única tendencia media que coincide y es coherente con la media global (3.6 mm año⁻¹), fue estimado el comportamiento a futuro del nivel del mar en la región. Para contrastar y completar el análisis, se realizó el mismo procedimiento con las tendencias segmentadas del periodo más cercano a la actualidad –2011 a 2018–. Este cálculo es considerado para el análisis a futuro del nivel del mar en la costa central del golfo de México.

Las predicciones basadas en el primer periodo –1999 a 201– describen un comportamiento ascendente y paulatino a través del tiempo, estimando un aumento medio en el nivel del mar entre 0.47 y 1.07 metros a final de siglo XXII. Este resultado es similar al aumento de 0.40 a 1 metros establecido por Yáñez-Arancibia *et al.* (2010).

A diferencia del aumento descrito por las tendencias del primer segmento, las predicciones construidas con base en las tendencias negativas posteriores a 2011, describen un comportamiento negativo persistente en el nivel medio del mar, estimando una disminución de aproximadamente -0.41 a -0.02 metros a final del siglo XXII. Esta disminución no parece relacionarse con ningún resultado de estudios previos. Este conjunto de

predicciones son las únicas que estimaron una disminución en la altura del nivel del mar.

Al comparar gráficamente las predicciones se puede apreciar un contraste entre las líneas basadas en escenarios de emisión –RCP– y las líneas basadas en tendencias calculadas en este trabajo. Ninguna línea de tendencia para la costa central del golfo de México fue idéntica a las líneas estimadas por el Climate Central (2020). El único escenario en el que superan las líneas resultantes de las predicciones propias, corresponde al percentil cinco de la RCP 2.6, que representa un corte estricto y una reducción de emisiones a nivel global. De manera que, ante un manejo poco regulado de emisiones y gases de efecto invernadero, podemos esperar un aumento que duplique e incluso triplique a los valores calculados en este trabajo.

COMENTARIOS FINALES

Las respuestas de la dinámica oceánica, al igual que casi cualquier respuesta en nuestro planeta, dependen de más de un factor y pueden presentarse de múltiples formas. En este sentido, es una tarea compleja identificar las respuestas oceánicas ocasionadas directa o indirectamente por efecto antropogénico de las causas naturales.

En este trabajo se pretendió evaluar la contribución del calentamiento global –a través del aumento del contenido de calor en el océano y el derretimiento de la capa de hielo– al incremento en el nivel medio del mar, sin embargo, existen muchos agentes con distintas escalas temporales y espaciales, que influyen en el nivel medio del mar, dos básicos son el volumen total de agua oceánica y los movimientos del subsuelo y fondo marino que implican cambios en el tamaño y forma de las cuencas oceánicas. Además, los factores dinámicos como el viento, la presión atmosférica, las corrientes oceánicas y las olas también juegan un papel importante (Mimura, 2013).

Así, se encontró que el nivel del mar en la costa central del golfo de México presenta una tendencia negativa, aún después de la imputación de datos faltantes de alrededor de -1.86 mm año⁻¹ para el periodo 1999-2018. En el periodo 2000 a 2010

se observa un aumento constante en la altura del nivel del mar de un orden de aproximadamente 3.6 mm año⁻¹, valor consistente con la media global establecida por el IPCC (2019, 2021). En el periodo 2011 a 2018 se observa una disminución en el nivel del mar de aproximadamente de -1.26 mm año⁻¹ con una ligera recuperación en los registros posteriores a 2015. La magnitud de las tendencias entre los sitios analizados no muestra un patrón claro de aumento o disminución a escala espacial.

Las tendencias negativas de los periodos 1999-2018 y 2011-2018 no coinciden con ningún valor de la literatura consultada para este trabajo.

Las perspectivas del comportamiento futuro en la costa central del golfo de México subestiman el aumento en el nivel del mar respecto a los valores predichos por las RCP 2.6, 4.5 y 8.5 del Climate Central (2020). De acuerdo con las tendencias del periodo 1999 a 2010, se espera un aumento de aproximadamente 0.47 a 1.07 metros a finales del siglo XXII en la región, mientras que siguiendo las estimaciones basadas en las tendencias del periodo 2011 a 2018 se espera una disminución de alrededor de -0.41 a -0.02 metros a final del presente siglo.

Los resultados negativos en el análisis de comportamiento actual pueden tener diversas causas: movimientos continentales, presencia o ausencia de eventos de La Niña y El Niño o eventos hidrometeorológicos de mesoescala.

Las tres series utilizadas presentaban un porcentaje de datos faltantes relativamente alto –aproximadamente 50% de datos faltantes–. En este aspecto, es importante continuar con las mediciones en los sitios y mejorar la calidad de las mismas. Contar con series de tiempo más largas y con mayor densidad de datos permitirá mejorar la estimación de tendencias de nivel del mar y reducir la incertidumbre asociada.

REFERENCIAS

- British Geological Survey. (s.f.). Impacts of climate change. British Geological Survey; Natural Environment Research Council. Recuperado el 7 de Diciembre, 2021, de <https://www.bgs.ac.uk/discovering-geology/climate-change/impacts-of-climate-change/>
- Cazenave, A. y Cozannet, G. L. (2014). Sea level rise and its coastal impacts. *Earth's Future*, 2(2), 15–34. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1002/2013ef000188>
- Climate Central. (2020). Surging Seas: Sea level rise analysis by Climate Central. [Climatecentral.org](https://sealevel.climatecentral.org/). <https://sealevel.climatecentral.org/>
- Conde Álvarez, C., y Palma Grayeb, B. (2006). Escenarios de riesgo para el territorio veracruzano ante un posible cambio climático. En A. Tejada Martínez y C. Welsh Rosdríguez (Eds.), *Inundaciones 2005 en el estado De Veracruz* (pp. 285-300). Universidad Veracruzana.
- DeConto, R. M. y Pollard, D. (2016). Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise. *Nature*, 531(7596), 591–597. <https://doi.org/10.1038/nature17145>
- Gómez-Villeras, R. S., Tejada-Martínez, A., Conde Álvarez, A. C. C., Reyes Umaña, M. R., Rosas-Acevedo, J. L., Ruz Vargas, M. I. R. y Galán Castro, E. A. G. (2022). Potential Sea Level Rise Impacts in Acapulco Diamante, Mexico. *Climate*, 10(3), 45. <https://doi.org/10.3390/cli10030045>
- Hernández Santana, J. R., Ortiz Pérez, M. A., Méndez Linares, A. P. y Gama Campillo, L. (2008). Morfo-dinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Investigaciones Geográficas*, 65(0188-4611), 7–21. <https://doi.org/10.14350/rig.17971>
- IPCC. (2013) Glosario [Planton, S. (ed.)]. En T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (Eds.), *Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2019). Summary for Policymakers. En H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (Eds.), *IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere En a Changing Climate*. Disponible en <https://bit.ly/3MGesZe>
- IPCC. (2021) *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change V. Masson-Delmotte, P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy,*

- J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu y B. Zhou (Eds.). Cambridge University Press.
- Kopp, R. E., DeConto, R. M., Bader, D. A., Hay, C. C., Horton, R. M., Kulp, S., Oppenheimer, M., Pollard, D. y Strauss, B. H. (2017). Evolving Understanding of Antarctic Ice-Sheet Physics and Ambiguity En Probabilistic Sea-Level Projections. *Earth's Future*, 5(12), 1217-1233. <https://doi.org/10.1002/2017ef000663>
- Kopp, R. E., Horton, R. M., Little, C. M., Mitrovica, J. X., Oppenheimer, M., Rasmussen, D. J., Strauss, B. H. y Tebaldi, C. (2014). Probabilistic 21st and 22nd century sea-level projections at a global network of tide-gauge sites. *Earth's Future*, 2(8), 383-406. <https://doi.org/10.1002/2014ef000239>
- Landgrave, R. y Moreno-Casasola, P. (2012). Evaluación cuantitativa de la pérdida de humedales en México. *Investigación Ambiental. Ciencia y Política Pública*, 4(2007-4492), 19-35. Biblat. <https://proyectopuente.com.mx/wp-content/uploads/2019/05/121-707-1-pb.pdf>
- Marcos, M. y Tsimplis, M. N. (2008). Coastal sea level trends in Southern Europe. *Geophysical Journal International*, 175(1), 70-82. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.2008.03892.x>
- McGranahan, G., Balk, D. y Anderson, B. (2007). The rising tide: assessing the risks of climate change and human settlements in low elevation coastal zones. *Environment and Urbanization*, 19(1), 17-37. <https://doi.org/10.1177/0956247807076960>
- Mimura, N. (2013). Sea-level rise caused by climate change and its implications for society. *Proceedings of the Japan Academy, Series B*, 89(7), 281-301. <https://doi.org/10.2183/pjab.89.281>
- Rodríguez Villafuerte, B. (2006). Las inundaciones y la dinámica geográfica en el estado de Veracruz. En A. Tejada Martínez y C. Welsh Rodríguez (Eds.), *Inundaciones 2005 en el estado De Veracruz* (pp. 209-225). Universidad Veracruzana.
- Rosengaus Moshinsky, M., Jiménez Espinosa, M., y Vázquez Conde, M.T. (2021). *Atlas climatológico de ciclones tropicales en México* Cenapred, IMTA. <http://www.cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/37.pdf>
- RStudio. (2018, 11 de octubre). *RStudio*. Disponible en <https://www.rstudio.com/products/RStudio/>
- Ruíz-Ramírez, J. D., Euan-Ávila, J. I. y Torres-Irrieco, E. (2014). Tendencias del nivel del mar en las costas del caribe mexicano. *European Scientific Journal*, 10(1857- 7431), 86-95. Core. <https://core.ac.uk/download/pdf/236410897.pdf>
- Salas-Pérez, J. J., Salas-Monreal, D., Arenas-Fuentes, V. E., Salas-De-León, D. A. y Riveron-Enzastiga, M. L. (2008). Características de la marea en un sistema arrecifal coralino del golfo de México occidental. *Ciencias Marinas*, 34(0185-3880), 467-478. SciELO. <http://www.scielo.org.mx/pdf/ciemar/v34n4/v34n4a6.pdf>
- Secretaría de Marina. (n.d.). *DIGAOHM*. [Digaohm.semar.gob.mx](http://digaohm.semar.gob.mx). Recuperado el 23 de abril de 2021 de <https://digaohm.semar.gob.mx/>
- Universidad Nacional Autónoma de México. (n.d.). *Servicio Mareográfico Nacional*. www.mareografico.unam.mx; Instituto de Geofísica. Recuperado el 20 de abril de 2021 de <http://www.mareografico.unam.mx>
- White, N. J., Haigh, I. D., Church, J. A., Koen, T., Watson, C. S., Pritchard, T. R., Watson, P. J., Burgette, R. J., McInnes, K. L., You, Z.-J., Zhang, X. y Tregoning, P. (2014). Australian sea levels Trends, regional variability and influencing factors. *Earth-Science Reviews*, 136(7), 155-174. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.05.011>
- Yáñez-Arancibia, A., Day, J. W., Jacob, J. S., Ibáñez Martí, C., Martínez Arroyo, A., Miranda Alonso, S., Tejada-Martínez, A., Welsh-Rodríguez, C. M., y Carranza-Edwards, A. (2010). Panel INECOL 2007 – conclusiones – la zona costera en crisis en el golfo de México, el Caribe y el Mediterráneo. En A. Yáñez-Arancibia (Ed.), *Impactos del cambio climático sobre la zona costera* (pp. 167-172). Instituto Nacional de Ecología A.C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT).
- Zavala-Hidalgo, J., de Buen Kalman, R., Romero Centeno, R. y Hernández Maguay, F. (2011). Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. En A. Vázquez Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J. L. Rojas Galaviz (Eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático* (pp. 315-334). Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma De Campeche. <https://www.redicomar.com/wp-content/uploads/2018/10/Vulnerabilidad-de-las-Zonas-Costeras-de-Latinoame%CC%81rical-Cambio-Clima%CC%81tico.pdf>