

## AUMENTO DEL NIVEL DEL MAR EN LA REGIÓN DEL CARIBE COMO INDICADOR DEL CAMBIO CLIMÁTICO

---

*Jennifer Denisse Ruiz Ramírez*

Universidad de Quintana Roo, Departamento  
de Recursos Naturales  
Chetumal, Quintana Roo, México  
ORCID 0000-0001-8429-9473

*Jaime Dionisio Cuevas Domínguez*

Universidad de Quintana Roo, Departamento  
de Energías  
Chetumal, Quintana Roo, México  
ORCID 0000-0002-0685-2867

*Joel Omar Yam Gamboa*

Universidad de Quintana Roo, Departamento  
de Energías  
Chetumal, Quintana Roo, México  
ORCID 0000-0001-8478-7872

All content in this magazine is licensed under a Creative Commons Attribution License. Attribution-Non-Commercial-Non-Derivatives 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).



**Resumen:** El comportamiento del nivel del mar, puede reflejar los cambios en el clima global, por ello su medición y análisis es de importancia para la predicción de estos cambios. En este trabajo se presentan datos del nivel del Mar Caribe de 1993 a 2015, obtenidos de los altímetros TOPEX-Poseidón, Jason-1, Jason 2/OSTM, lanzados por las agencias espaciales de Estados Unidos (NASA) y Francia (CNES). Y se analizan mediante series temporales para conocer sus componentes de estacionalidad, cíclica y tendencia. Los resultados indican una tendencia cíclica de aumento del nivel del mar en el Mar Caribe.

**Palabras clave:** Aumento del nivel del mar, cambio climático, series temporales.

## INTRODUCCIÓN

El aumento del nivel del mar (ANM) es un tema que ha sido abordado por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), el cual ha mostrado especial interés en las zonas costeras e islas, debido a la importancia global en términos de valores ecológicos y socioeconómicos amenazados por este fenómeno (Bijlsma, et al., 1995; IPCC, 2014). A nivel mundial se ha generado interés para implementar estrategias encaminadas a la mejor planeación y manejo de las áreas costeras y sus recursos (pesquerías, acuicultura, turismo, extracción de hidrocarburos y minerales, etc.), porque se estima que más de la mitad de la población mundial se ubica dentro de una franja de 100 km de costa y se pronostica que para el año 2025, el 75% de la misma podría establecerse en las zonas costeras, por lo que se requiere prevenir su degradación y su vulnerabilidad a los potenciales impactos del cambio climático aunado al ANM (Bijlsma, et al., 1995; IPCC, 2012; SEMARNAT, 2006).

Para analizar la tendencia del nivel del mar, es frecuente la combinación de datos mareográficos y datos registrados

por altímetros. Cazenave y Nerem (2004) presentaron las causas y consecuencias a nivel global del cambio en el nivel del mar, utilizando datos mareográficos y datos de los altímetros TOPEX/Poseidón y Jason-1 (1993-2003), considerando los resultados del Tercer Reporte del IPCC dedicado al cambio en el nivel del mar. En la actualidad, globalmente se tienen reportes en tiempo real del incremento del nivel del mar contrastando los datos mareográficos y altimétricos ofrecidos por el Laboratorio de Altimetría Satelital de la NOAA y por el Centro de Oceanografía Física (PODAAC) de la NASA, ambas agencias han reportado un incremento global del nivel del mar de  $3.2 \text{ mm año}^{-1}$  (NASA, NOAA, 2015). Pero, el IPCC (2013) también señala que los modelos climáticos, los datos satelitales y las observaciones hidrográficas muestran que el nivel del mar no sube uniformemente en todo el mundo. En algunas regiones, las tasas son muy superiores al promedio mundial, mientras que en otras regiones el nivel del mar disminuye, sugiriendo la necesidad de realizar estudios locales.

El escenario a 1m de ANM para el año 2100, se considera entre los más comúnmente abordados por el IPCC y estudios regionales para el Mar Caribe señalan que podría ser aún más del metro para el mismo año (CEPAL, 2012; Jevrejeva, et al., 2012; Meinshausen, et al., 2011; Rahmstorf, 2007; Schewe, et al., 2011).

El objetivo de este estudio es determinar si existe ANM en la región del Mar Caribe, analizando el comportamiento histórico del nivel del mar.

## MÉTODO

Los datos de las mediciones del nivel del mar para la región del Mar Caribe se obtuvieron de 3 altímetros: TOPEX/Poseidón (1993-2001), Jason-1 (2001-2008) y OSTM/Jason-2 (2008-2015); éstos fueron lanzados

por las agencias espaciales de Estados Unidos (NASA) y Francia (CNES). Con los datos combinados se obtuvo una serie de tiempo de 23 años (1993-2015). Estos altímetros monitorean el nivel del mar global, sus datos se registran cada 10 días para el mismo sitio, con una precisión de milímetros y sus series de tiempo se pueden obtener por regiones. Para este estudio, se seleccionaron los datos de la región del Mar Caribe para conocer su comportamiento y tendencia, obtenidas a través de la Universidad de Colorado, E.U. ([www.sealevel.colorado.edu/content/regional-sea-level-time-series](http://www.sealevel.colorado.edu/content/regional-sea-level-time-series)).

La serie de tiempo es modelada como de componentes aditivos  $y = T(t) + E(t) + \epsilon$ , donde  $y$  son los datos ANM (medido en mm año<sup>-1</sup>),  $T(t)$  es la componente de tendencia,  $E(t)$  es la componente estacional y  $\epsilon$  representan los residuales. Para identificar estos componentes se emplea el método de promedios móviles, con ayuda de la función *decompose* del paquete R (R Core team, 2016).

Se usa el método de mínimos cuadrados ordinarios para estimar los parámetros  $\alpha$ ,  $\beta$  del modelo  $y = t\alpha + I\beta + \epsilon$ , con el componente de tendencia  $T(t) = t\alpha$  (una recta), el componente estacional  $E(t) = I\beta$ , donde  $I$  es una matriz indicadora de los 37 datos que corresponden a cada año, y es elaborada con la ayuda de la función *seasonal dummy*, de la librería *forecast* (Hyndman et al, 2019).

## RESULTADOS

La serie de tiempo muestra entre sus componentes, una tendencia positiva de ANM, un comportamiento estacional, ocasionado por los ciclos anuales y el componente aleatorio (Figura 1). Los errores aleatorios y sus residuales presentan una distribución normal, como se observa en la Figura 2.

La tendencia regional obtenida de la serie de tiempo muestra un incremento lineal positivo y reporta una tasa de 2.8 mm

año<sup>-1</sup> de ANM (ver gráfica superior de la Figura 3). El componente más marcado es la estacionalidad, influenciado directamente por los ciclos anuales, que están representados exactamente en los 23 picos (ver gráfica intermedia de la Figura 3). El modelo de ajuste de mínimos cuadrados ordinarios utilizado para el análisis de esta serie temporal muestra que al sumar las componentes de tendencia y estacional, el ajuste explica aproximadamente el 66% de los datos (ver gráfica inferior de la Figura 3). En este caso puede ser mejorado el ajuste si se utiliza una función no lineal para el componente de tendencia; sin embargo, esto podría dificultar la interpretación de la tasa de crecimiento.

## DISCUSIÓN

El IPCC (2013) señala que los modelos climáticos, los datos satelitales y las observaciones hidrográficas muestran que el nivel del mar no sube uniformemente en todo el mundo (IPCC, 2014). En algunas regiones, las tasas son muy superiores al promedio mundial, mientras que en otras regiones el nivel del mar disminuye.

Para la región del Mar Caribe, la tasa de ANM registrada para el periodo 1993-2009, fue de 1.7 mm año<sup>-1</sup> (Bâkilz, et al., 2012), y ésta ha ido en aumento, ya que para el periodo 1993-2013, se reportó una tasa de 2.0 mm año<sup>-1</sup> (Ruiz Ramírez, et al. 2014); y actualmente para el periodo 1993-2015, la tasa es de 2.8 mm año<sup>-1</sup> -esta cifra coincide con el reportado en un trabajo previo, pero con un análisis diferente- (Ruiz Ramírez, et al., 2018). Cabe mencionar que, aunque la tasa se ha ido incrementado, sigue siendo todavía menor en comparación con la tasa promedio mundial de 3.2 mm año<sup>-1</sup> reportada por la NASA y la NOAA, pero de seguir ese ritmo, pronto la tasa regional alcanzaría la tasa mundial.

Es probable que esa tasa se alcance antes de concluir esta década, ya que los datos de

### Decomposition of additive time series

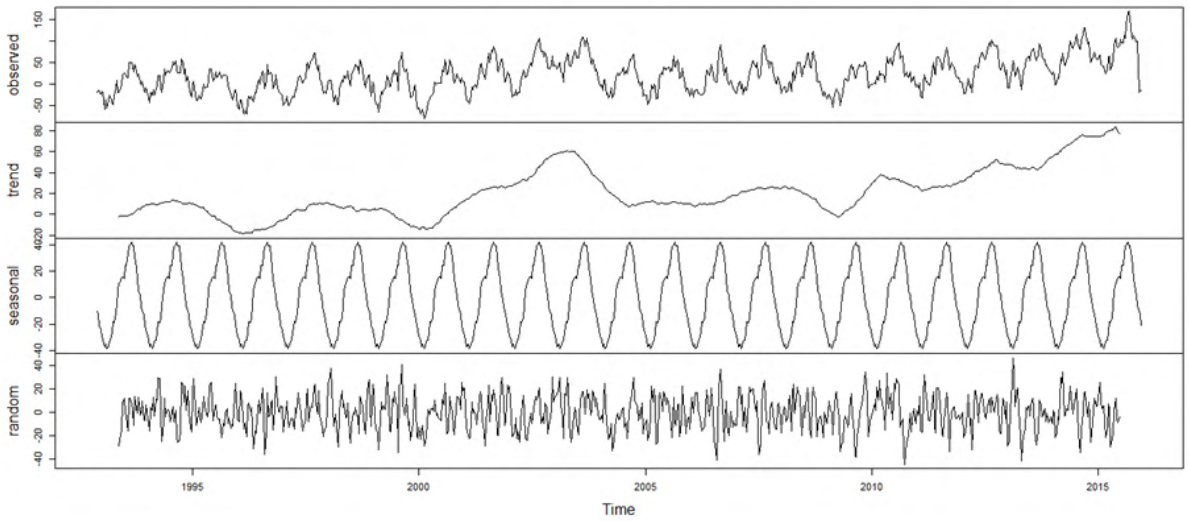


Figura 1. Componentes de la serie de tiempo aplicando Fourier para el periodo 1993-2015 de la región del Mar Caribe.

### Errores aleatorios

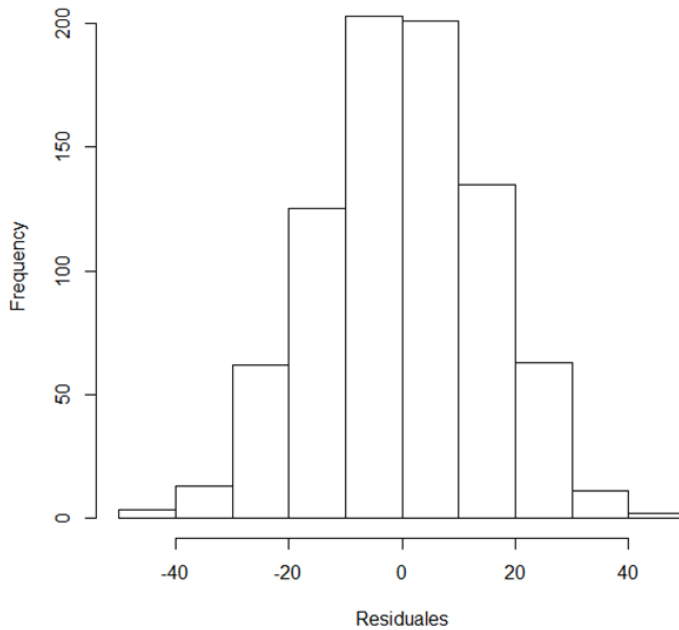


Figura 2. Gráfica de la distribución normal de los errores aleatorios y sus residuales.

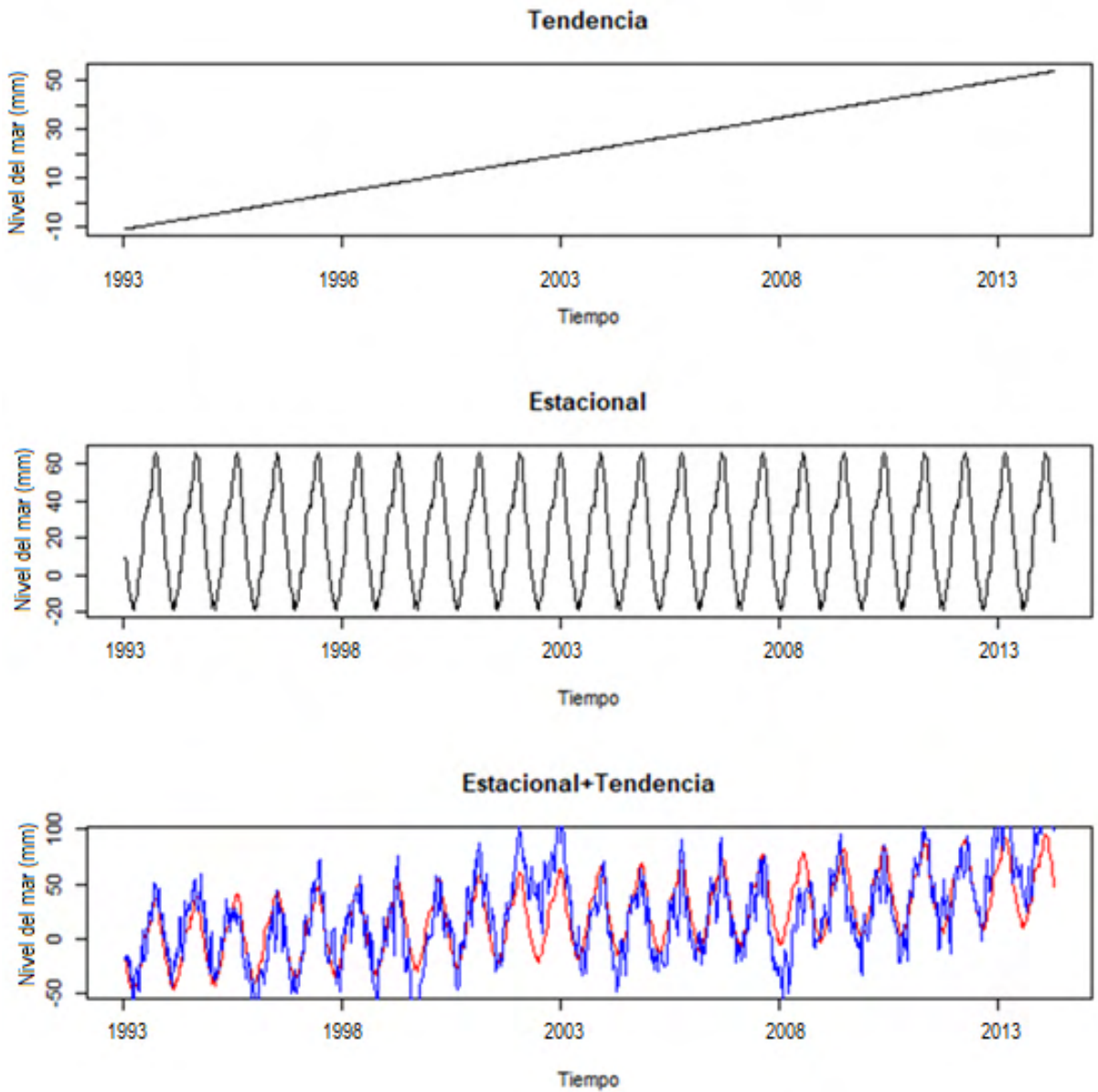


Figura 3. Tendencia estacional de la serie de tiempo para el Mar Caribe.

los años 2016 al 2018 no están disponibles aún para analizar su tendencia; pero los estudios previos en la zona (CEPAL, 2012; Blanchon, et al., 2010; Flores Verdugo, et al., 2010; Márquez García, et al., 2010; Ortiz Pérez y Méndez Linares, 1999; Vázquez Botello, 2008) revelan que hasta aumentos de 50 cm a 1m pueden ser devastadores para la costa caribeña, especialmente para la infraestructura turística que ocupa áreas susceptibles de inundación y las playas que se irán erosionando por el oleaje, ocasionando un fuerte impacto a la economías de los países caribeños.

Como el nivel del mar se modifica por diversos fenómenos que ocurren en distintas escalas de tiempo, para estimar estos cambios se requieren series de tiempo largas, ya que muestran variaciones interanuales y decadales, (periodos de 10 años) que permitirían conocer su tendencia y podrían ofrecer predicciones más precisas (Ariana, et al., 2017; Houston and Dean, 2011; IPCC, 2013 y 2014; Valle-Levinson, et al., 2017; Zavala, et al., 2010). A nivel local, los cambios en el nivel del mar son el resultado de una gran variedad de fenómenos, como las mareas, las corrientes costeras, los nortes, las tormentas tropicales, los tsunamis, los movimientos verticales de la corteza terrestre, los cambios en la presión atmosférica, incluidos los relativos al cambio climático como la expansión térmica y el deshielo de los polos (IPCC, 2013; IPCC 2014; Wong, et al, 2014; Zavala, et al., 2010). La combinación de otras oscilaciones espacio-temporales también influye en las variaciones del nivel del mar, como El Niño – Southern Oscillation (ENSO), Oscilación del Atlántico Norte (NAO) y Oscilación Multidecadal Atlántica (OMA), que fue estudiada para la costa este de Estados Unidos, donde la tasa local - regional de SLR excede también la media global (Valle-Levinson, et al., 2017).

## CONCLUSIONES

Mediante el análisis del comportamiento histórico del nivel del mar en la región Mar Caribe, se encuentra una tendencia positiva del ANM de 2.8 mm año<sup>-1</sup>, valor inferior a la tasa promedio reportada por la NASA y la NOAA de ANM a nivel mundial.

Los eventos, los cambios y las consecuencias sobre el nivel del mar deben estudiarse de manera integral, combinando herramientas de análisis de datos oceanográficos y dispositivos de percepción remota para la generación de información y nuevo conocimiento. Esta información es vital para poder diagnosticar y modelar escenarios de incremento del nivel del mar como lo ha recomendado el IPCC, a nivel local y regional, que servirían de base para estudios más complejos, y de carácter multidisciplinario.

Este estudio regional para el Mar Caribe concuerda con lo mencionado por el IPCC, que el ANM no es uniforme a nivel global y que para esta región caribeña, la tasa es positiva y se ha incrementado con el tiempo, que pronto podría alcanzar la tasa mundial.

Analizar y monitorear las series de tiempo en el nivel del mar en la región del Mar Caribe es indispensable, pues el aumento en el nivel del mar representa una amenaza preocupante para los ecosistemas, los centros turísticos y poblaciones costeras.

## REFERENCIAS

- Ariana, D., Permana, C., & Setiawan, Y. 2017. **Study of sea level rise using satellite altimetry data in the sea of Dumai, Riau, Indonesia.** *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*. 4(1): 75-82.
- BákiIz, H, L. Berry and M. Koch. 2012. **Modeling regional sea level rise using local tide gauge data.** *Journal of Geodetic Science*. 2(3): 188-199.
- Bijlsma, L., C.N. Ehler, R.J.T. Klein, S.M. Kulshrestha, R.F. McLean, N. Mimura, R.J. Nicholls, L.A. Nurse, H. Pérez Nieto, E.Z. Stakhiv, R.K. Turner, and R.A. Warrick. 1995. **Coastal Zones and Small Islands.** *In* Climate Change 1995: Impacts, Adaptations and Mitigation of Climate Change: Scientific-Technical Analyses. Contribution of Working Group II to the Second Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Edited by Robert T. Watson, Marufu C. Zinyowera, and Richard H. Moss. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 289-324.
- Blanchon, P., R. Iglesias-Prieto, E. Jordán Dahlgren y S. Richards. 2010. **Arrecifes de coral y cambio climático: vulnerabilidad de la zona costera del estado de Quintana Roo.** p. 229-248. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- Cazenave, A., and R. S. Nerem. 2004. **Present-day sea level change: Observations and causes.** *Reviews of Geophysics*. RG3001. doi:10.1029/2003RG000139.42:1-20.
- CEPAL. 2012. **Efectos del Cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe.** Riesgos. Organización de Naciones Unidas – CEPAL. 44 p.
- Flores Verdugo, F.J., P. Casasola, G. de la Lanza-Espino, y C. Agraz Hernández, 2010. **El manglar, otros humedales costeros y el cambio climático,** p. 165-188. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- Houston, J.R. and Dean, R.G. 2011. **Sea-level acceleration based on U.S. tide gauges and extensions of previous global-gauge analyses.** *Journal of Coastal Research*. 27(3): 409–417.
- Hyndman R. et al, 2019. **Package “Forecast”.** <https://cran.r-project.org/web/packages/forecast/forecast.pdf>. Fecha de consulta: 25 de marzo de 2019.
- IPCC. 2012. **Historia de la organización.** [www.ipcc.ch/organization/organization\\_history.shtml](http://www.ipcc.ch/organization/organization_history.shtml). Fecha de consulta: 21 de mayo de 2012.
- IPCC. 2013. **Cambios en el nivel del mar.** [www.ipcc.ch/publications\\_and\\_data/ar4/wg1/es/faq-5-1.html](http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/faq-5-1.html) Fecha de consulta: 22 de mayo de 2013.
- IPCC. 2014. **Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.** [https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap5\\_FINAL.pdf](https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg2/WGIIAR5-Chap5_FINAL.pdf) Fecha de consulta: 23 de noviembre de 2018.
- Jevrejeva, S., Moore, J.C., and Grinsted, A. 2012. **Sea level projections to AD2500 with a new generation of climate change scenarios.** *Global and Planetary Change*. 80 -81: 14-20.
- Márquez García, A.Z., E. Márquez García, A. Bolongaro Crevenna Recasens, y V. Torres Rodríguez. 2010. **Cambio en la línea de costa en la Riviera Maya debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos, ¿consecuencia del cambio global climático?** p. 345-358. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- Meinshausen, M., Smith, S.J., Calvin, K., Daniel, J.S., Kainuma, M.L.T., Lamarque, J.F., Matsumoto, K., Montzka, S.A., Raper, S.C.B., Riahi, K., Thomson, A., Velders, G.J.M., and van Vuuren, D.P.P. 2011. **The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300.** *Climatic Change*. 109: 213-241.
- NASA. 2015. **Global Climate Change, Sea Level.** <http://climate.nasa.gov/vital-signs/sea-level/> Fecha de consulta: 24 de enero de 2016.

- NOAA. 2015. **Laboratory for Satellite Altimetry / Sea Level Rise, Global sea level time series** [https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA\\_SLR\\_timeseries\\_global.php](https://www.star.nesdis.noaa.gov/sod/lisa/SeaLevelRise/LSA_SLR_timeseries_global.php) . Fecha de consulta: 24 de enero de 2016.
- Ortiz Pérez, M.A. y A.P. Méndez Linares. 1999. **Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe.** *Investigaciones Geográficas*. 39: 68-81.
- R Core Team, 2016. **R: A Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Availableat: <https://www.R-project.org/> de Fecha de consulta: 10 de agosto de 2016.
- Rahmstorf, S. 2007. **A semi-empirical approach to projecting future sea-level rise.** *Science*. 315: 368 – 370.
- Ruiz-Ramírez, J.D., J.I. Euán-Ávila y E. Torres-Irineo, 2014. **Tendencias del nivel del mar en las costas del Caribe mexicano.** *European Scientific Journal*. 10(20): 86-96.
- Ruiz-Ramírez, J.D., G.D. López Montejo y R.J. Cabrera Guillermo. 2018. **Manglares, desarrollo turístico y cambio climático en Playa del Carmen, corazón del Caribe mexicano.** *Cuadernos de Biodiversidad*. 55: 28 - 40
- Schewe, J., Levermann, A. and Meinshausen, M. 2011. **Climate change under a scenario near 1.5°C of global warming: monsoon intensification, ocean warming and steric sea level rise.** *Earth System Dynamics*. 2: 25-35.
- SEMARNAT, 2006. **Política Ambiental Nacional para el Desarrollo Sustentable de Océanos y Costas de México: Estrategias para su conservación y uso sustentable.** Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental. Dirección General de Política Ambiental Integración Regional y Sectorial. Dirección de Integración Regional. México, D.F. 86 p.
- Valle-Levinson, A., Dutton, A. and Martin, J.B. 2017. **Spatial and temporal variability of sea level rise hot spots over the eastern United States.** *Geophysical Research Letter*. 44: 1-7. doi:10.1002/2017GL073926.
- Vázquez Botello, A. (coord.). 2008. **Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos.** Informe final INE/A1-051/2008. Instituto Nacional de Ecología, Universidad Nacional Autónoma de México y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México, 121 p.
- Wong, P.P., I.J. Losada, J.-P. Gattuso, J. Hinkel, A. Khattabi, K.L. McInnes, Y. Saito, and A. Sallenger, 2014. **Coastal systems and low-lying areas.** 361-409. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Field, C.B., V.R. Barros, D.J. Dokken, K.J. Mach, M.D. Mastrandrea, T.E. Bilir, M. Chatterjee, K.L. Ebi, Y.O. Estrada, R.C. Genova, B. Girma, E.S. Kissel, A.N. Levy, S. MacCracken, P.R. Mastrandrea, and L.L. White (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Zavala-Hidalgo, J., R. de Buen Kalman, R. Romero-Centeno, y F. Hernández Maguey. 2010. **Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas.** p. 249-268. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras ante el cambio climático.* SEMARNAT-INE, UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.