





BLANQUEAMIENTO CORALINO

¿EXISTE UN FUTURO PARA
LOS ARRECIFES DE CORAL?

/// GUILLERMO HORTA-PUGA



Figura 1. Arrecifes coralinos deteriorados. Arriba: el fondo está cubierto por algas coralinas encostrantes. Siguiendo página: el fondo presenta una alta cobertura de la macroalga carnosa *Lobophora variegata*. Arrecife Anejada de Adentro, Sistema Arrecifal Veracruzano.

RESUMEN

Los arrecifes de coral están seriamente amenazados por el aumento de las temperaturas oceánicas causadas por el calentamiento global. Un aumento de 1-2 °C durante el verano, interfiere en la fotosíntesis de las microalgas endosimbiontes (zooxantelas), que viven en el interior de los corales formadores de arrecifes. Al perder la capacidad de producir compuestos orgánicos, que utilizan los corales como alimento, el coral las expulsa. Este fenómeno se conoce como blanqueamiento, y potencialmente causa la muerte coralina. El 2023 fue declarado el año más cálido en el registro climático reciente, y fue causa del cuarto evento global de blanqueamiento masivo coralino. Desafortunadamente este evento afectó los arrecifes coralinos de México, tanto en el Pacífico como en el Atlántico.

ABSTRACT

Coral reefs are seriously threatened by rising ocean temperatures driven by global warming. A 1-2 °C increase during summer, disturb the photosynthesis performed by the endosymbiotic microalgae (zooxanthellae), that live in reef corals. When their capacity is lost to produce organic compounds, that coral use as food, they are expelled from tissues. This is the process known as bleaching, which potentially cause coral death. The 2023 was declared as the warmest year on the recent climate record, and was the cause of the fourth global coral bleaching event. Unfortunately, this event impacted Mexican corals reefs, both in the Atlantic and in the Pacific.



Palabras clave: Arrecifes de coral, blanqueamiento coralino, México.

Keywords: Coral reefs, coral bleaching, Mexico.



BLANQUEAMIENTO CORALINO ¿EXISTE UN FUTURO PARA LOS ARRECIFES DE CORAL?

POBLACIÓN HUMANA Y EL USO DE RECURSOS NATURALES

El impacto del hombre en la biosfera ha sido muy amplio y complejo y a menudo ha llevado a cambios irreversibles. El hombre primitivo interfería muy poco y mantenía una relación estable con su entorno. Sin embargo, la capacidad creciente del hombre para alterar su ambiente y controlar algunos procesos naturales para su propio beneficio, ha sido una fuente de cambios drásticos que alteran el balance natural y el flujo de energía en los ecosistemas. Los procesos geológicos y biológicos sobre la superficie de la tierra ocurren a escalas de miles y cientos de miles de años, lo que permite la adecuación de los ecosistemas al cambio (evolución). Pero, los cambios inducidos por la actividad humana se acumulan a escalas de días, meses y años, muy rápidamente, a tal grado que no les han permitido a los ecosistemas adaptarse al cambio y, por lo tanto, se han deteriorado ostensiblemente, como es el caso de los arrecifes de coral (Figura 1).

Las comunidades humanas prehistóricas se sostenían con base en la recolección de plantas como fuente de alimento. Asimismo, desarrollaron artefactos de piedra para la cacería de diversas presas, con la cual complementar su dieta. Estas actividades tenían un bajo impacto en el ambiente. No obstante, con el descubrimiento de la agricultura y la domesticación

de especies animales, el hombre también tuvo la capacidad de modificar drásticamente su entorno. Así, áreas extensas se deforestaron para dar paso a actividades agropecuarias, para el establecimiento de asentamientos urbanos y el nacimiento de las civilizaciones de la antigüedad. Esto implicó un aumento de la población humana de 4 millones hace 10,000 años, a 200 millones en siglo I de nuestra era y mil millones para el año 1800 (Roser & Ritchie, 2023). Lo anterior, aunado a la sobreexplotación de los recursos naturales en las inmediaciones, fue la causa de un fuerte impacto ambiental a escalas local y regional.

A mediados del siglo XVIII, en el inicio de la llamada revolución industrial, se inventó la máquina de vapor, un avance significativo ya que la producción de diversas manufacturas pasó de ser una actividad manual donde los objetos de uso cotidiano se fabricaban de uno en uno, a una actividad industrial con maquinaria sofisticada que requería la quema de grandes cantidades de carbón mineral para su funcionamiento. Posteriormente, ya en el siglo XIX un derivado del petróleo, la gasolina, reemplaza al carbón como el principal combustible, el cual se usa principalmente en los vehículos automotores. La población ahora tiene acceso a medios de transporte eficientes, producción masiva de bienes, y electricidad para el uso doméstico, todo esto gracias a la quema de combustibles fósiles, que siguen siendo hasta nuestros días, la principal fuente de energía. De esta forma la población humana

aumentó drásticamente a 2000 millones en los 1920s, 4000 millones en los 1970s, para finalmente llegar a los 8000 millones en esta década (WOM, 2025) (Figura 2). Ahora la escala de impacto ambiental a dejado de ser local y regional, para convertirse en global, por lo que los efectos de la actividad humana se extienden a todos los rincones y ecosistemas de nuestro planeta.

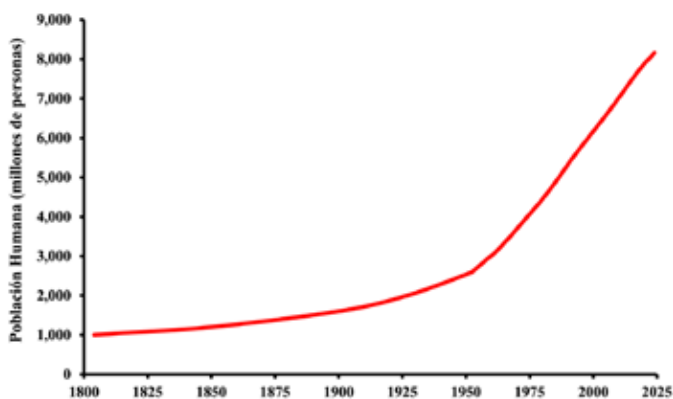


Figura 2. Población humana durante los dos últimos siglos (modificado de WOM 2025).

CALENTAMIENTO GLOBAL

Las emisiones de bióxido de carbono (CO_2), debido a la quema de combustibles fósiles, como son carbón, gas natural y petróleo y sus derivados, han pasado de un promedio anual de 1 GT (1 GT = 1000 millones de toneladas) a inicios del siglo XIX, a 5 GT en promedio hasta mediados del siglo XX (Figura 3). Ya en el 2023 el promedio anual rebasó las 36 GT (OWD, 2025). Así la concentración promedio global de bióxido de carbono en la atmósfera ha aumentado de 280 ppm en 1800 a 428 ppm en el 2024 (Figura 4), un aumento de más del 50% en los últimos 200 años (NOAA, 2023; CO_2L , 2025). Dado que el CO_2 es un gas de efecto invernadero, lo que significa que absorbe el calor que la tierra irradia, después de calentarse durante el día, el aumento de su concentración también ha sido la causa de un aumento sostenido de la temperatura anual promedio global, lo que ahora conocemos como calentamiento global. Así, la temperatura anual promedio global actual ha aumentado cerca de 1.4 °C con respecto al promedio en el siglo XIX, y los últimos 10 años han sido los más calurosos considerando los registros históricos (Figura 5) (BE, 2024). De hecho, el 2023 fue declarado el año más cálido, con una temperatura global promedio de 14.98 °C, que fue 1.48 °C superior al promedio del siglo XIX (Copernicus, 2024; NASA 2024). Y el 2024 es posible que, en cuanto se disponga de todos los registros alrededor del planeta, sea declarado todavía más cálido (WMO, 2024). Dado que la quema de combustibles continúa en aumento, concomitantemente la temperatura global seguirá incrementándose, lo que potencialmente disparará cambios irreversibles como son el deshielo de los polos, glaciares y el permafrost, la ralentización de las corrientes marinas y la desaparición de los arrecifes de coral tropicales (Lenton *et al.*, 2019; Armstrong-McKay *et al.*, 2022).

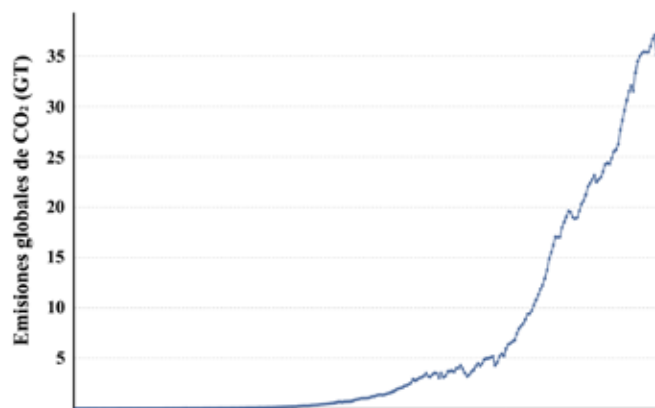


Figura 3. Emisiones globales anuales totales de CO_2 hacia la atmósfera, derivados de la quema de combustibles y de la actividad industrial (modificado de OWD 2025).



Figura 4. Concentración promedio anual de CO_2 en la atmósfera (modificado de CO_2L 2025).

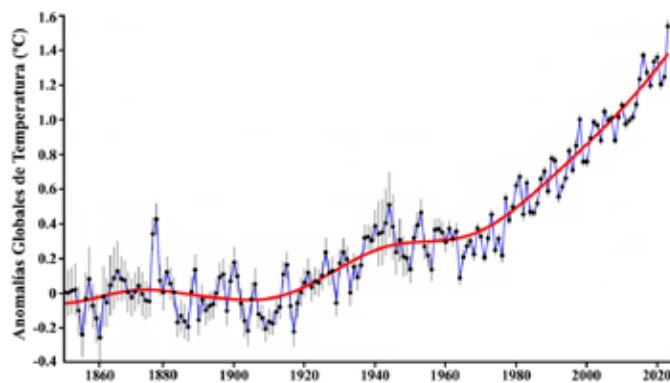


Figura 5. Anomalías anuales globales promedio de temperatura atmosférica en la superficie, con respecto al promedio para el periodo 1850-1900. La línea roja representa la tendencia (modificado de BE 2024).

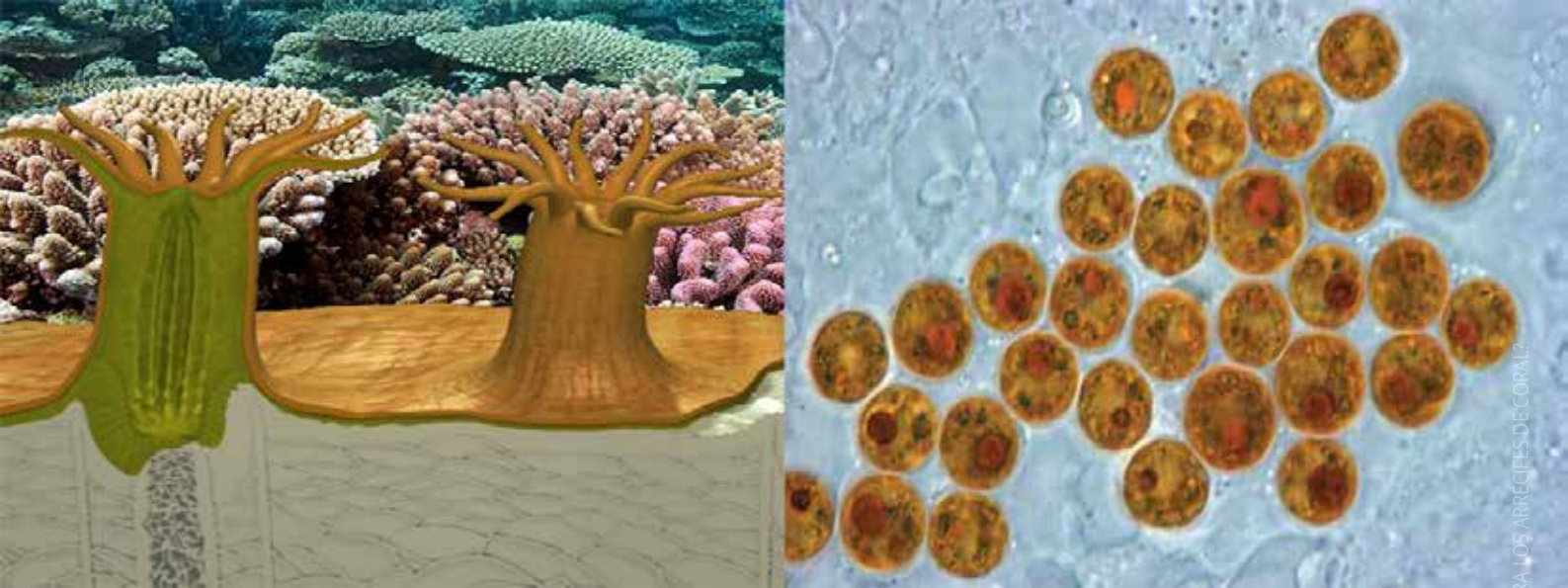


Figura 6. Derecha: anatomía del pólipo coralino (tomado de CAS 2025). Izquierda: micrografía de zooxantelas endosimbiontes (tomado de NW 2023).

LOS CORALES FORMADORES DE ARRECIFES

Los corales formadores de arrecifes, también llamados hermatípicos, son organismos bentónicos marinos que pertenecen al Orden Scleractinia del Filo Cnidaria (Daly *et al.*, 2007). Los corales hermatípicos generalmente son coloniales, formados por cientos a miles de pólipos. Cada pólipo es como un cilindro hueco con la boca en posición superior, la cual está rodeada de tentáculos. La pared del cuerpo está formada por tres capas, epidermis, mesoglea y gastrodermis (Figura 6). Esta última, que está sumamente plegada, recubre la cavidad gastrovascular interna. El cuerpo está cubierto por un exoesqueleto de carbonato de calcio (Wallace, 2019). El ciclo de vida incluye una fase larvaria planctónica, la plánula, que se dispersa por las corrientes hasta encontrar un sustrato adecuado, asentándose y transformándose en un pólipo. Cada pólipo por gemación produce un mayor número de pólipos, todos unidos histológicamente, para formar una colonia (Harrison & Wallace, 1990). Los corales tienen tasas de crecimiento (0.6-1.0 cm/año) y calcificación (0.5-2.0 g/cm²/año) altas, por lo cual pueden crecer hasta alcanzar varios metros de altura y diámetro, y su esqueleto pesar decenas de toneladas (Dullo, 2005; Norzagaray-López *et al.*, 2019). Una característica fundamental de los corales hermatípicos, es que tienen una relación simbiótica con las zooxantelas (Dinofyta, Symbiodiniaceae), que son algas unicelulares que se encuentran en el interior de las células de la gastrodermis (LaJeunesse *et al.*, 2018). Las zooxantelas tienen una gran capacidad fotosintética, por lo cual translocan diversos compuestos orgánicos, brindándole al coral hasta el 90% de sus requerimientos alimenticios (Muscatine, 1990; Muscatine & Porter, 1997). Sin embargo, esto ha hecho dependientes a los corales de las zooxantelas, de tal forma que los corales mueren de hambre si se suspende el suministro de fotosintetatos y/o se pierden las zooxantelas (Grottoli *et al.*, 2006).

BLANQUEAMIENTO CORALINO

Los corales hermatípicos usualmente habitan los mares tropicales, con temperaturas anuales promedio de 22-29 °C. Pero, en los meses de verano las temperaturas son más altas, y en ese periodo las zooxantelas endosimbiontes viven en el límite de su tolerancia térmica, de tal forma

que un aumento de 1-2 °C por arriba de la temperatura promedio mensual más alta del año, interrumpe la capacidad de fotosíntesis de la zooxantelas. La respuesta del coral es expulsar las zooxantelas de su cuerpo, ya que éstas ahora no le brindan beneficio alguno. Los corales pierden su coloración característica, tornándose blanquecinos, por lo cual a este fenómeno se le denominó blanqueamiento coralino (Glynn, 1983; Lough & van Oppen, 2018) (Figura 7). Durante el verano del 2023 las temperaturas oceánicas en México rebasaron el umbral térmico de las zooxantelas por hasta 3 °C, por lo cual se registraron eventos de blanqueamiento masivo coralino en Huatulco (López-Pérez *et al.*, 2023), Caribe Mexicano (Gaceta UNAM, 2023), y en Veracruz (Horta-Puga *et al.*, 2023). El impacto fue de tal magnitud, que entre 50-90% de los corales perecieron en diversos arrecifes de Huatulco (López-Pérez *et al.*, 2024), y en Veracruz poco más del 50% de los corales de 27 especies diferentes mostraron signos de blanqueamiento (Horta-Puga *et al.*, 2023) (Figura 8). De hecho, no solo se presentó blanqueamiento coralino masivo en México, también se registró en diversas localidades como son Florida, el Caribe y Brasil en el Atlántico; la Gran Barrera Australiana, Fiji, Vanuatu, Tuvalu, Kiribati, Samoa, la Polinesia Francesa y América tropical desde México hasta Colombia en el Pacífico; y el Mar Rojo, el Golfo Pérsico, las Seychelles, Mauricio y África oriental en el Índico. Lo anterior llevó a la comunidad científica a declarar el 2023 como el cuarto evento de blanqueamiento masivo coralino a nivel global, al igual que en 1998, 2010 y 2015 (ICRI, 2024; NOAA, 2024; Reimer *et al.*, 2024).

EL FUTURO DE LOS ARRECIFES DE CORAL

Es conocido que los arrecifes de coral prestan múltiples servicios ecosistémicos. Los arrecifes son geoestructuras que actúan como un rompeolas, protegiendo la costa del oleaje de tormenta. Los esqueletos coralinos se usan como material de construcción, ya sea como ladrillos o para la fabricación de cal. La arena blanca, producto de la erosión de los esqueletos calcáreos genera playas que son visitadas por millones de turistas, lo que significa una derrama económica de muchos millones en hospedaje, alimentos y servicios turísticos. El ecoturismo y las actividades de educación ambiental, así como ya sea por actividades contemplativas de la fauna arrecifal



Figura 7. Corales hermatípicos sanos y con signos de blanqueamiento. Arriba: *Colpophyllia natans*. Abajo: *Montastraea cavernosa*

por medio del buceo libre y autónomo, también son un servicio que presta el ecosistema arrecifal. A través de la pesca de diversas especies de peces, pulpos, caracoles, almejas y langosta, se obtiene alimento y esto representa una fuente de ingresos para los pescadores (Moberg & Folke, 1999; Horta-Puga, 2007; Moberg & Rönnbäck, 2023).

Los arrecifes de coral, a pesar de que solo representan el 0.1% de la superficie oceánica, se calcula albergan a cerca del 25% de las especies que habitan los mares, por lo que son los ecosistemas más diversos de nuestro planeta (Knowlton *et al.*, 2010; Plaisance *et al.*, 2011). Así, miles de especies de prácticamente todos los grupos biológicos como son virus, bacterias, hongos, protozoos,

algas, plantas, esponjas, cnidarios, platelmintos, nematodos, moluscos, anélidos, crustáceos, briozoos, equinodermos y peces, los podemos encontrar en los arrecifes de coral (Reaka-Kudla, 1997; Small *et al.*, 1998; Idjadi & Edmonds, 2006).

Desafortunadamente las actividades humanas cada vez ejercen un mayor impacto en los arrecifes coralinos. El uso indiscriminado de sus recursos, la sobrepesca, la destrucción de los hábitats asociados como son manglares y pastos marinos, el turismo excesivo, una disminución en la calidad del agua por el aumento de la concentración ambiental de sedimentos terrígenos, nutrientes y otros contaminantes químicos, son una constante en la mayoría de los arrecifes que se ubican en las costas de los

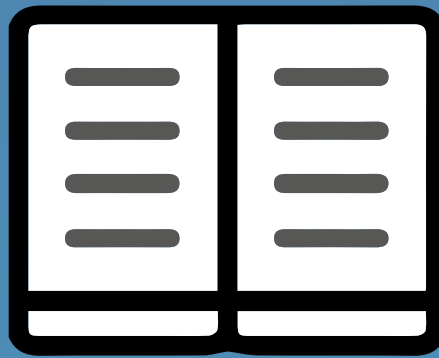
continentes (Halpern *et al.*, 2007; Ban *et al.*, 2014). Y esto ha influido negativamente disminuyendo la cobertura coralina (proporción del área del fondo cubierta por corales vivos y saludables) durante las últimas décadas, de tal forma que ahora difícilmente encontramos coberturas mayores al 10% (Gardner *et al.*, 2003; Bruno & Selig, 2007; Horta-Puga *et al.*, 2019). Otro problema importante, generado por la contaminación y el aumento de nutrientes, es que las macroalgas bentónicas está sustituyendo a los corales, en un proceso que se denomina cambio de fase, y que afecta seriamente la viabilidad del ecosistema (Hughes *et al.*, 2007, Horta-Puga *et al.*, 2020).

Sin embargo, la amenaza más grande para los arrecifes coralinos de todo el planeta son los efectos del calentamiento global, en especial el blanqueamiento coralino masivo (Hoegh-Gulderg *et al.*, 2007; Carpenter *et al.*, 2008; Hoegh-Gulderg, 2011; Hughes *et al.*, 2017). El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), ha convocado a expertos de todas las disciplinas científicas para que analicen las causas, determinen las posibles repercusiones y propongan una estrategia para mitigar los efectos del calentamiento global (IPCC, 2021).

Entre los resultados obtenidos destacan los escenarios de cambio climático considerando para el siglo XXI considerando las emisiones de CO₂ y la evolución socioeconómica de la humanidad. En todos los casos la temperatura global promedio aumentará de 1.4-4.4 °C para finales de siglo. Se prevé una desaceleración de la circulación termohalina oceánica, así como un aumento de las ondas marina de calor, de sequías o lluvias intensas según la ubicación, en el número e intensidad de huracanes, el deshielo de las capas polares y del permafrost, la acidificación del océano, y un incremento en el nivel medio del mar (Lenton *et al.*, 2019; Armstrong-McKay *et al.*, 2022). Pero, lo más importante y desafortunado, es que bajo este conjunto de condiciones adversas también se prevé la desaparición de los arrecifes coralinos antes del 2050. Si la humanidad no hace algo por detener el calentamiento global, muy pronto la existencia de los arrecifes coralinos estará seriamente comprometida. De hecho, en este 2024, nuevamente observamos blanqueamiento coralino en los arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano (Horta-Puga *et al.*, 2024). Quizás seamos la última generación que tengamos el privilegio de conocer los arrecifes de coral.



Figura 8. Blanqueamiento masivo coralino en el Sistema Arrecifal Veracruz, Golfo de México, en septiembre del 2023. Arriba: arrecife Aneгада de Adentro. En medio: arrecife La Blanquilla. Abajo: arrecife Isla Verde.



LITERATURA CITADA

- Armstrong-McKay, D.I., A. Staal, J.F. Abrams, R. Winkelmann, B. Sakschewski, S. Loriani, Lenton, T.M. 2022. Exceeding 1.5 °C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*. 377(6611). doi:10.1126/science.abn7950
- Ban, S.S., N.A. Graham, S.R. Connolly. 2014. Evidence for multiple stressor interactions and effects on coral reefs. *Global Change Biology*. 20(3), 681-697. doi:10.1111/gcb.12453.
- BE. 2024. Global temperature report for 2023. Berkeley Earth. Available from: <https://berkeleyearth.org/global-temperature-report-for-2023/> (consultado el 03/01/2025).
- Bruno, J.F., E.R. Selig. 2007. Regional decline of coral cover in the Indo-Pacific: Timing, extent, and subregional comparisons. *PLoS One*. 2(8):e711. doi:10.1371/journal.pone.0000711
- Carpenter, K.E., M. Abrar, G. Aeby, R.B. Aronson, S. Banks, A. Bruckner, E. Wood. 2008. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. *Science*. 321(5888):560-563. doi:10.1126/science.1159196.
- CAS. 2025. Is a coral a predator, a producer, or both? California Academy of Sciences. <https://www.calacademy.org/educators/is-a-coral-a-predator-a-producer-or-both> (consultado el 03/01/2025).
- CO2L. 2025. Atmospheric CO2 levels graph. CO2Levels. <https://www.co2levels.org/> (consultado el 03/01/2025).
- Copernicus. 2024. The 2023 annual climate summary: Global climate highlights 2023-2024. <https://climate.copernicus.eu/global-climate-highlights-2023> (consultado el 03/01/2025).
- Daly, M., M.R. Brugler, P. Cartwright, A.G. Collins, M.N. Dawson, D.G. Fautin, S.C. France, C.S. McFadden, D.M. Oprezko, E. Rodríguez, S.L. Romano, J.L. Stake. 2007. The phylum Cnidaria: A review of phylogenetic patterns and diversity 300 years after Linnaeus. *Zootaxa*. 1668:127-182. doi:10.5281/zenodo.180149
- Dullo, W.C. 2005. Coral growth and reef growth: a brief review. *Facies*. 51:33-48. doi:10.1007/s10347-005-0060-y
- Gaceta UNAM. 2023. Muerte masiva de corales en arrecifes mexicanos. <https://www.gaceta.unam.mx/muerte-masiva-de-corales-en-arrecifes-mexicanos/> (consultado 03/01/2025).
- Gardner, T.A., I.M. Côté, J.A. Gill, A. Grant, A.R. Watkinson. 2003. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science*. 301:958-960. doi:10.1126/science.1086050
- Glynn, P.W. 1983. Extensive "bleaching" and death of reef corals on the Pacific coast of Panama. *Environmental Conservation*. 10:149-54. doi:10.1017/s0376892900012248
- Grottoli, A.G., L.J. Rodrigues, J.E. Palardy. 2006. Heterotrophic plasticity and resilience in bleached corals. *Nature*. 440:1186-89. doi:10.1038/nature04565
- Halpern, B.S., K.A. Selkoe, F. Micheli, C.V. Kappel. 2007. Evaluating and ranking the vulnerability of global marine ecosystems to anthropogenic threats. *Conservation Biology*. 21(5):1301-1315. doi:10.1111/j.1523-1739.2007.00752.x
- Harrison, L.P., C.C. Wallace. 1990. Reproduction, dispersal and recruitment of scleractinian corals. Pp. 133-207. En: Dubinsky Z. (Ed.). *Coral Reefs. Ecosystems of the World* 25. Elsevier, Amsterdam.
- Hoegh-Guldberg, O. 2011. Coral reef ecosystems and anthropogenic climate change. *Regional Environmental Change*. 11:215-227. doi:10.1007/s10113-010-0189-2
- Hoegh-Guldberg, O., P.J. Mumby, A.J. Hooten, R.S. Steneck, P. Greenfield, E. Gómez, C.D. Harvell, P.F. Sale, A.J. Edwards, K. Caldeira, N. Knowlton, C.M. Eakin, R. Iglesias-Prieto, N. Muthiga, R.H. Bradbury, A. Dubi, M.E. Hatzioios. 2007. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. *Science*. 318:1737-1742. doi:10.1126/science.1152509
- Horta-Puga, G. 2007. Environmental impacts. Pp. 126-142. En: Tunnell, J.W., E.A. Chávez, K. Whithers (eds.). *Coral reefs of the Southern Gulf of Mexico*. Texas A&M University Press, College Station, TX.
- Horta-Puga, G., L. Álvarez-Filip, R.A. Cabral-Tena, A. López-Pérez, L. Ortiz Lozano, H. Pérez-España, H. Reyes-Bonilla. 2019. Coastal coral reefs in Mexico. Pp. 329-366. En: Botello, A.V., S. Villanueva, J. Gutiérrez (eds.). *Costas y mares mexicanos: Contaminación, impactos, vulnerabilidad y cambio climático*. UNAM, UAC, Campeche.
- Horta-Puga, G., J.L. Tello-Musi, A. Córdova, A. Gutiérrez-Carrillo, J. Gutiérrez-Martínez, Morales-Aranda, A.A. 2020. Spatio-temporal variability of benthic macroalgae in a coral reef system highly influenced by fluvial discharge: Veracruz, Gulf of Mexico. *Marine Ecology* 41(4):e12596. doi:10.1111/maec.12596
- Horta-Puga, G., J. Gutiérrez-Martínez, A.A. Morales-Aranda, M. Victoria-Muguira. 2023. First report of mass bleaching in the Southwestern Gulf of Mexico. *Reef Encounter*. 54:59-64. <https://coralreefs.org/society-publications/reef-encounter/>
- Horta-Puga, G., E. Ramírez-Chávez, J. Bello-Pineda. 2024. Blanqueamiento coralino: ¿El cuarto jinete del apocalipsis para los arrecifes de coral?. *Espacio Profundo*. 188:23-28. <https://www.espacioprofundo.com.mx/revistadigital/188/22/>
- Hughes, T.P., M.J. Rodrigues, D.R. Bellwood, D. Ceccarelli, O. Hoegh-Guldberg, L. McCook, N. Moltschaniwskyj, M.S.

- Pratchett, R.S. Steneck, B. Willis. 2007. Phase shifts, herbivory, and the resilience of coral reefs to climate change. *Current Biology*. 17(4):360-365. doi: 10.1016/j.cub.2006.12.049.
- Hughes, T.P., J.T. Kerry, M. Álvarez-Noriega, J.G. Álvarez-Romero, K.D. Anderson, A.H. Baird, R.C. Babcock, M. Beger, D.R. Bellwood, R. Berkelmans, T.C. Bridge, I.R. Butler, M. Byrne, N.E. Cantin, S. Comeau, S.R. Connolly, G.S. Cumming, S.J. Dalton, G. Diaz-Pulido, C.M. Eakin, W.F. Figueira, J.P. Gilmour, H.B. Harrison, S.F. Heron, A.S. Hoey, J.A. Hobbs, M.O. Hoogenboom, E.V. Kennedy, C.Y. Kuo, J.M. Lough, R.J. Lowe, G. Liu, M.T. McCulloch, H.A. Malcolm, M.J. McWilliam, J.M. Pandolfi, R.J. Pears, M.S. Pratchett, V. Schoepf, T. Simpson, W.J. Skirving, B. Sommer, G. Torda, D.R. Wachenfeld, B.L. Willis, S.K. Wilson. 2017. Global warming and recurrent mass bleaching of corals. *Nature*. 543:373-377. doi:10.1038/nature21707
- ICRI. 2024. NOAA and ICRI confirm fourth global coral bleaching event. (International Coral Reef Initiative. <https://icriforum.org/4gbe/> (consultado el 03/01/2025).
- Idjadi, J.A., P.J. Edmunds. 2006. Scleractinian corals as facilitators for other invertebrates on a Caribbean reef. *Marine Ecology Progress Series*. 319:117-127. doi:10.3354/meps319117.
- IPCC. 2021. Technical summary. The physical science basis. Contribution of working group I to the sixth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, UK y USA. doi:10.1017/9781009157896.002
- Knowlton, N., R.E. Brainard, R. Fisher, M. Moews, L. Plaisance, M.J. Caley. 2010. Coral reef biodiversity. Pp. 65-74. En: McIntyre, A.D. (ed.). *Life in the world's oceans: diversity distribution and abundance*. Wiley-Blackwell, UK.
- Lajeunesse, T.C., J.E. Parkinson, P.W. Gabrielson, H.J. Jeong, J.D. Reimer, C.R. Voolstra, S.R. Santos. 2018. Systematic revision of Symbiodiniaceae highlights the antiquity and diversity of coral endosymbionts. *Current Biology*. 28:2570-80. doi:10.1016/j.cub.2018.07.008.
- Lenton, T.M., J. Rockström, O. Gaffney, S. Rahmstorf, K. Richardson, W. Steffen, H.J. Schellnhuber. 2019. Climate tipping points too risky to bet against. *Nature*. 575:592-595. doi: 10.1038/d41586-019-03595-0.
- López-Pérez, A., E. Ramírez-Chávez, R. Granja-Fernández, F.A. Rodríguez-Zaragoza, O. Valencia-Méndez, V. Antonio-Pérez. 2023. El Niño 2023 event in the Southern Mexican Pacific: A preliminary report of an imminent disaster. *Reef Encounter*. 54:64-66. <https://coralreefs.org/society-publications/reef-encounter/>
- López-Pérez, A., R. Granja-Fernández, E. Ramírez-Chávez, O. Valencia-Méndez, F.A. Rodríguez-Zaragoza, T. González-Mendoza, A. Martínez-Castro. 2024. Widespread coral bleaching and mass mortality of reef-building corals in Southern Mexican Pacific reefs due to 2023 El Niño Warming. *Oceans* 2:196-209. <https://doi.org/10.3390/oceans5020012>
- Lough, J.M., M.J.H. van Oppen. 2018. Introduction: coral bleaching-patterns, processes, causes and consequences. Pp.1-8. En: van Oppen, M.J.H., J.M. Lough (eds.). *Coral bleaching, patterns, processes, causes and consequences*. *Ecological Studies* 233. Springer, Australia.
- Moberg, F., C. Folke. 1999. Ecological goods and services of coral reef ecosystems. *Ecological Economics*. 29:215-233. doi:10.1016/S0921-8009(99)00009-9
- Moberg, F., P. Rönnbäck. 2003. Ecosystem services of the tropical seascape: interactions, substitutions and restoration. *Ocean and Coastal Management*. 46:27-46. doi:10.1016/S0964-5691(02)00119-9
- Muscatine, L. 1990. The role of symbiotic algae in carbon and energy flux in coral reefs. Pp 75-87. En: Dubinsky, Z. (ed.). *Ecosystems of the World*. Elsevier, Amsterdam.
- Muscatine, L., J.W. Porter. 1997. Reef corals mutualistic symbioses adapted to nutrient-poor environments. *Biosciences*. 27:454-460. doi:10.2307/1297526
- NASA. 2024. NASA analysis confirms 2023 as warmest year on record. National Aeronautics and Space Administration. <https://www.nasa.gov/news-release/nasa-analysis-confirms-2023-as-warmest-year-on-record/> (consultado el 03/01/2025).
- NOAA. 2023. Greenhouse gases continued to increase rapidly in 2022. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.noaa.gov/news-release/greenhouse-gases-continued-to-increase-rapidly-in-2022> (consultado el 03/01/2025).
- NOAA. 2024. NOAA confirms 4th global coral bleaching event. National Oceanic and Atmospheric Administration. <https://www.noaa.gov/news-release/noaa-confirms-4th-global-coral-bleaching-event>
- Norzagaray-López, C.A., L.E. Calderón-Aguilera, L. Álvarez-Filip, L.M. Barranco-Servin, R.A. Cabral-Tena, J.P. Carricart-Ganivet, A. Cupul-Magaña, G. Horta-Puga, A. López-Pérez, H. Pérez-España, H. Reyes-Bonilla, A.P. Rodríguez-Troncoso, J.J.A. Tortolero-Langarica. 2019. Arrecifes y comunidades coralinas. Pp. 127-149. En: Paz-Pellat, F., J.M. Hernández-Ayón, R. Sosa-Ávalos, A.S. Velázquez-Rodríguez (eds.). *Estado del Ciclo de Carbono: Agenda Azul y Verde*, México. Programa Mexicano del Carbono, CDMX.
- NW. 2023. What are zooxanthellae?. *NatureWeb*. <https://natureweb.co/zooxanthellae/> (consultado el 03/01/2025).
- OWD. 2025. CO₂ emissions by fuel. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/emissions-by-fuel> (consultado el 03/01/2025).
- Plaisance, L., M.J. Caley, R.E. Brainard, N. Knowlton. 2011. The diversity of coral reefs: what are we missing?. *PLoS One*. 6(10):e25026. doi: 10.1371/journal.pone.0025026
- Reaka-Kudla, M.L. 1997. The global biodiversity of coral reefs: a comparison with rain forests. Pp. 83-108. En: Reaka-Kudla, M.L., D.E. Wilson, E.O. Wilson (eds.). *Biodiversity II. Understanding and protecting our biological resources*. Joseph Henry Press, Washington, DC.
- Reimer, J.D., R.S. Peixoto, S.W. Davies, N. Traylor-Knowles, M.L. Short, R.A. Cabral-Tena, J.A. Burt, I. Pessoa, A.T. Banaszak, R.Scott-Winters, T. Moore, V. Schoepf, D. Kaullising, L.E. Calderón-Aguilera, G. Wörheide, S. Harding, V. Munbodhe, A. Mayfield, T. Ainsworth, T. Vardi, C.M. Eakin, M.S. Pratchett, C.R. Voostra. 2024. The fourth global coral bleaching event: Where do we go from here? *Coral Reefs* 43:1121-1125. <https://doi.org/10.1007/s00338-024-02504-w>
- Roser, M., H. Ritchie. 2023. How has world population growth changed over time?. *Our World in Data*. <https://ourworldindata.org/population-growth-over-time> (consultado el 03/01/2025).
- Small, A., W.H. Adey, D. Spoon. 1998. Are current estimates of coral reef biodiversity too low? The view through the window of a microcosm. *Atoll Research Bulletin*. 458:1-20. doi:10.5479/si.00775630.458.1
- Wallace, C.C. 2019. Hexacorals 2: reef-building or hard corals (Scleractinia). Pp. 267-282. En: Hutchings, P.A., M. Kingsford, O. Hoegh-Guldberg (eds.). *The Great Barrier Reef: Biology, environment, and management*. Australian Coral Reef Society, Australia,
- WMO. 2024. 2024 is on track to be hottest year on record as warming temporarily hits 1.5°C. World Meteorological Organization. <https://wmo.int/news/media-centre/2024-track-be-hottest-year-record-warming-temporarily-hits-15deg> (consultado el 03/01/2025).
- WOM. 2025. Current world population. *Worldometer*. <https://www.worldometers.info/world-population/> (consultado el 03/01/2025).