

EL CAMBIO CLIMÁTICO Y SUS EFECTOS SOBRE LOS ARRECIFES DE CORAL DEL CARIBE MEXICANO

	CIN2018A10194
Escuela:	Colegio Alemán Alexander von Humboldt, Plantel Sur
Autor (es):	Nathalie Valentine Burgeff López Itzy Dubhe Zamora Sibaja
Asesor(es):	Dra. Sandra L. López Varela, Facultad de Filosofía y Letras, UNAM Irene Bronillet Tarrago, ERM (Environmental Resources Management) Peter Konrad, Colegio Alexander von Humboldt A.C.
Área de conocimiento:	Ciencias Biológicas, Químicas y de la Salud
Disciplina:	Medio Ambiente Biología
Tipo de investigación	Documental
Lugar y Fecha:	Ciudad de México, 16 de febrero de 2018

Índice

1. Resumen Ejecutivo.....	3
Resumen Español.....	4
Resumen en inglés.....	5
2. Introducción.....	6
La riqueza arrecifal del Caribe Mexicano.....	7
Identificación de amenazas humanas.....	9
La vulnerabilidad al cambio climático.....	9
La capacidad de actuación de las autoridades.....	10
3. Fundamentación Teórica.....	11
Factores que afectan el crecimiento de los corales.....	12
La solución.....	14
4. Metodología.....	16
Fase I: Investigación.....	17
Fase II: Plan de Manejo.....	19
Fase III Sostenibilidad ambiental y social.....	20
5. Resultados.....	21
6. Conclusiones.....	22
7. Referencias.....	24

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. EL BLANQUEAMIENTO DEL CORAL, TOMADO DE THE UNIVERSITY OF QUEENSLAND AUSTRALIA, HTTP://WWW.GLOBALCORALBLEACHING.ORG	7
FIGURA 2. RESERVA DE LA BIÓSFERA DEL CARIBE MEXICANO (CONANP 2016, PAG. 12).....	8

LISTA DE TABLAS

TABLA 1. PLAN DE MANEJO PARA LA PROTECCIÓN DE LOS ARRECIFES DE CORAL DEL CARIBE MEXICANO (ELABORADO POR NATHALIE V. BURGEFF LÓPEZ, BASADO EN LÓPEZ VARELA Y DORE 2008, LÓPEZ VARELA 2014).....	18
--	----

1. Resumen Ejecutivo

El cambio climático y sus efectos en los arrecifes corales del Caribe Mexicano es el tema de esta investigación, que tiene como objetivo generar una estrategia de preservación ambiental para la supervivencia y preservación de los arrecifes de coral. El cambio climático ha ocasionado un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre, ocasionando que los polos se derritan y con ello aumente el nivel del mar (Mumby et al., 2014). Cuando se presentan altas temperaturas, éstas producen el blanqueamiento de los arrecifes de coral y por lo tanto su muerte (Baker et al., 2008). Las altas temperaturas, no son las únicas presiones a las que están expuestos los arrecifes de coral, ya que las actividades humanas o antropogénicas, como los desarrollos costeros y el turismo ponen en riesgo su supervivencia.

La preservación de los arrecifes de coral se justifica porque la desaparición de los arrecifes de coral pone en riesgo el hábitat de muchos organismos, ya que con su muerte, disminuyen los nutrientes esenciales de la cadena alimenticia marina. En los arrecifes de coral viven un gran número de peces comestibles de gran importancia comercial y de consumo (Cederstav et al., 2015). De hecho, un km² de arrecife sano puede cubrir la ingesta proteica de más de 300 personas (Cederstav et al., 2015, pág. 9). Su desaparición es materia de seguridad alimenticia porque suministran alimento a los seres humanos. Además, la acumulación de fragmentos rotos de coral y de sedimentos son la fuente de abastecimiento de arenas calcáreas blancas que se encuentran en las playas, mismas que atraen al turismo y crean empleos para las comunidades locales. Económicamente, su desaparición pone en riesgo la industria pesquera y turística. Los arrecifes coralinos, además, absorben el 95% del impacto de las olas, comportándose como una importante barrera ante estas ondas que se producen por la fuerza de los huracanes, ayudando también a disminuir la erosión costera y las inundaciones (Cederstav et al., 2015).

Esta investigación se ha propuesto contribuir a resolver este problema, partiendo de la hipótesis de que, *si se puede reducir el estrés en los arrecifes de coral del caribe*

mexicano, solo si se reducen los efectos del cambio climático y se mitigan los efectos dañinos de las actividades antropogénicas. Por lo tanto hemos diseñado una metodología que incluye como estrategias: 1) la búsqueda bibliográfica sobre los arrecifes de coral, el calentamiento global, la acidificación de los océanos, el impacto de la industria pesquera, los planes de manejo de preservación ambiental y estrategias locales de pesca y de preservación; y 2) la consultoría con expertos científicos. Esta metodología nos permitirá presentar como resultado un plan de manejo que considere la cooperación con la sociedad como esencial para lograr la concientización en torno a su protección.

Resumen Español

El cambio climático y sus efectos en los arrecifes corales del Caribe Mexicano es el tema de esta investigación, que tiene como objetivo generar una estrategia de preservación ambiental para su supervivencia y preservación. El cambio climático ha ocasionado un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre, ocasionando que los polos se derritan y con ello aumente el nivel del mar. Las altas temperaturas en las aguas del mar producen el blanqueamiento de los arrecifes de coral, provocando su muerte. El uso de combustibles fósiles ha generado altos niveles de dióxido de carbono en los océanos, reduciendo su pH. Al aumentar su acidez disminuye la cantidad de iones de carbonato que forman el esqueleto de los corales. Las actividades humanas o antropogénicas, como los desarrollos costeros y el turismo, también ponen en riesgo la supervivencia de los arrecifes de coral. La muerte de los corales pone en riesgo el hábitat de más de dos millones de especies porque los arrecifes hacen circular los nutrientes esenciales que necesitan para vivir. Los arrecifes coralinos protegen a los seres humanos de los fenómenos naturales porque se comportan como una barrera que absorbe el 95% del impacto de las olas que se producen por la fuerza de los huracanes. Además de proteger la infraestructura, los corales suplen la arena blanca de las playas que atrae el turismo. Económicamente, su desaparición pone en riesgo la industria pesquera y turística.

Palabras clave: cambio climático, arrecifes de coral, Caribe Mexicano, sostenibilidad, planes de manejo ambiental

Resumen en inglés

Climate change has produced a warming trend, raising the atmosphere's temperature, causing the melting of the earth's poles and increasing sea levels. Warmer water temperatures produce coral bleaching, causing their death. The uptake of carbon dioxide by the oceans, produced by the burning of fossil fuels, has reduced its pH. Ocean acidification reduces the amount of carbonates ions that build the corals' skeleton. Human or anthropogenic activities, such as coastal developments and tourism threaten coral reefs. The death of corals could be devastating to more than two million species because of their tight recycling of nutrients that support this habitat. Coral reefs protect human beings from natural phenomena by acting as a barrier, absorbing 95% of the wave impact, produced by the destructive force of hurricanes. In addition to protecting coastal infrastructure, corals supply white sandy beaches, a main tourist attraction. The death of reefs creates an uncertain future for the livelihoods of industries and communities that depend on it. Therefore, climate change's impacts on the Mexican Caribbean coral reefs is at the center of our research, hereby discussed, propounding an environmental management plan (EMP) guidelines for its preservation.

Key words: climate change, coral reefs, Mexican Caribbean, sustainability, environmental management

2. Introducción

El cambio climático y sus efectos en los arrecifes de coral del Caribe Mexicano es el tema de esta investigación, que tiene como objetivo generar una estrategia de preservación ambiental para su supervivencia y preservación. El cambio climático ha ocasionado un aumento en la temperatura de la atmósfera terrestre, ocasionando que los polos se derritan y con ello aumente el nivel del mar (Mumbay et al., 2014). Cuando se presentan altas temperaturas en el mar, éstas producen el blanqueamiento de los arrecifes de coral y por lo tanto su muerte (Baker et al., 2008; Figura 1). Las altas temperaturas, no son las únicas presiones a las que están expuestos los arrecifes de coral, ya que las actividades humanas o antropogénicas, como los desarrollos costeros y el turismo ponen en riesgo su supervivencia.

La preservación de los arrecifes de coral se justifica porque estos hacen circular los nutrientes esenciales que proporcionan alimento a las más de dos millones de especies que viven en este hábitat (National Geographic 2018a). De desaparecer, se pondría en riesgo este hábitat, en el que viven un gran número de peces comestibles de gran importancia comercial (Cederstav et al., 2015). De hecho, un km² de arrecife sano puede cubrir la ingesta proteica de más de 300 personas (Cederstav et al., 2015, pág. 9). Mantener la salud de los océanos es sumamente importante en términos económicos y de seguridad alimenticia, ya que más de 100 millones de hogares en el mundo dependen de la industria pesquera, de acuerdo al World Economic Forum. Por otra parte, la acumulación de fragmentos rotos de coral y de sedimentos son la fuente de abastecimiento de arenas blancas calcáreas que se encuentran en las playas, mismas que atraen al turismo y crean empleos para las comunidades locales. Económicamente, su desaparición pone en riesgo la industria pesquera y turística.

Además, los arrecifes coralinos protegen a los seres humanos de los fenómenos naturales porque se comportan como una barrera que absorbe el 95% del impacto de las olas que se producen por la fuerza de los huracanes, ayudando también a disminuir la erosión costera y las inundaciones (Cederstav et al., 2015).



Figure 1. El blanqueamiento del coral, tomado de The University of Queensland Australia, <http://www.globalcoralbleaching.org>

La riqueza arrecifal del Caribe Mexicano

La Comisión Nacional de Áreas Naturales y Protegidas (CONANP, 2016) ubica el Caribe Mexicano en las porciones costera y terrestre del noreste de la Península de Yucatán, comprendiendo los municipios de Lázaro Cárdenas, Isla Mujeres, Benito Juárez y Tulum en el estado de Quintana Roo (Figura 2). El Caribe Mexicano queda comprendido dentro del Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), un ecosistema de casi 1,000 kilómetros de longitud que comprende las costas de Belice, Guatemala y Honduras (CONANP, 2016, pág. 81). La temperatura superficial marina oscila entre los 25.5°C en invierno y 28°C en verano (Wilkinson et al., 2009, citado en CONANP, 2016, pág 54). Esta franja forma el segundo sistema arrecifal más grande del mundo, después de la Gran Barrera Arrecifal Australiana.

En el Caribe Mexicano viven un total de 143 especies de peces, inclusive de importancia comercial, como por ejemplo, la ballesta, la mojarra, el boquinete, el mero,

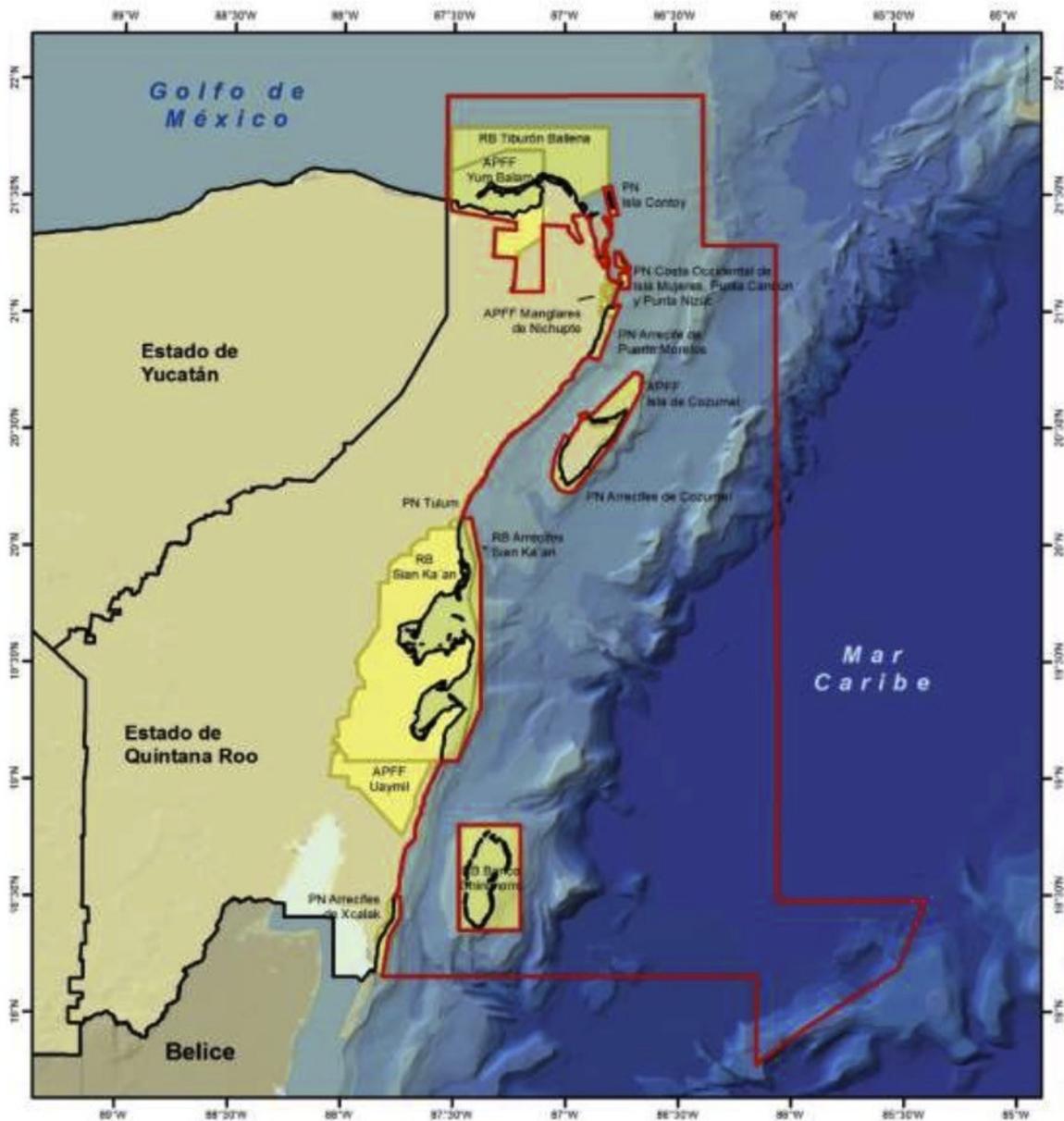


Figure 2. Reserva de la Biósfera del Caribe Mexicano (CONANP 2016, pag. 12).

el atún y la barracuda. La vegetación marina está compuesta por 69 especies de algas y tres de pastos, mismos que reducen el oleaje y la energía de las corrientes; que filtran y estabilizan los sedimentos; y que proveen áreas de alimentación y protección para diferentes especies (Fonseca et al., 1982, citado en CONANP, 2016, pág 45). Las estructuras arrecifales incluyen dos tipos de corales, duros y blandos. Entre los corales duros se encuentra el cuerno de alce y el cuerno de ciervo; y entre los corales blandos, el abanico de mar o coral candelabro inclinado. La importancia económica de este hábitat, le representó un volumen de producción pesquera de 4,419 toneladas en 2014, con un valor de \$161 millones de pesos (CONANP, 2016,

pág. 49). En la zona del Caribe Mexicano existen también zonas de pecios que atraen al turismo náutico. Ante su importancia natural y cultural, el 7 de diciembre de 2016, el Diario Oficial publicó el decreto de la Reserva de la Biósfera del Caribe Mexicano (RBCM) firmado por el Presidente de la República, Enrique Peña Nieto.

Identificación de amenazas humanas

La Asociación Interamericana para la Defensa del Ambiente (Cederstav et al., 2015), ha identificado las principales actividades que dañan los arrecifes de coral y que ponen en riesgo su preservación. Entre ellas se encuentran las descargas de aguas residuales a los ríos, la basura, los derrames y el mal manejo de aceites y gasolina de las embarcaciones. Estos elementos, al llegar a los arrecifes, inducen el crecimiento desmesurado de algas, impidiendo que les llegue la luz solar, provocando su muerte. La sobrepesca y la sobre explotación de especies marinas, por ejemplo, dañan la biodiversidad, el equilibrio ecológico y la estructura coralina de los arrecifes. El crecimiento demográfico y las actividades turísticas también presionan al ecosistema arrecifal, porque se requiere de la construcción de desarrollos inmobiliarios y hoteleros, que incluyen campos de golf, los cuales generan residuos sólidos y descargas de aguas negras. El turismo de cruceros ha requerido de la construcción de terminales y puertos afectando la vida del arrecife. La alta concentración de embarcaciones en zonas arrecifales para transportar al turismo náutico requieren del anclaje. El anclaje o el contacto de buceadores inexpertos tienen el potencial de romper, fragmentar y destruir al arrecife (CONANP, 2016, pág. 173). A pesar de que la CONANP, ha reconocido el que estas actividades pueden dañar el arrecife, el reciente decreto regula de manera indirecta estas actividades, llevando a Green Peace y al Centro para la Diversidad Biológica a exigir que se elabore un plan de manejo para la reserva.

La vulnerabilidad al cambio climático

El cambio climático en el Caribe Mexicano se ha hecho evidente a partir de las fluctuaciones en la precipitación pluvial y en el incremento de la temperatura de la atmósfera. En 2010, el Banco Interamericano de Desarrollo (BID) ha proyectado

para la región, una media de calentamiento de 1°C a 4°C y de 2°C a 6 °C, en sus escenarios optimista y pesimista, respectivamente (CONANP, 2016). El nivel del mar ha aumentado 2 mm por año en las últimas décadas (Parry et al., 2007, pág. 583). El cambio climático ya ha provocado desastres naturales en el Caribe Mexicano, como han sido los huracanes que han tenido un fuerte impacto en la infraestructura de la zona costera, produciendo daños de un alto costo económico. El cambio climático ha alterado el rendimiento agrícola, estimulado cambios en la calidad y cantidad de recursos hídricos; y provocado la pérdida de bosques y de vidas humanas. Los modelos climáticos predicen que en las próximas décadas, se producirán fenómenos meteorológicos más intensos y frecuentes, que afectarán seriamente el medio ambiente de la región, teniendo repercusiones negativas para millones de personas (CONANP, 2016, pág 182).

La capacidad de actuación de las autoridades

Los arrecifes de coral son ecosistemas imprescindibles para la vida marina y humana que se encuentran amenazados por el cambio climático y por diversas actividades antropogénicas. A pesar de que existe un marco jurídico en México para la protección de los arrecifes de coral, su protección está fragmentada en diversas leyes. Sin embargo, su administración y regulación depende de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), la cual tiene la autoridad para otorgar concesiones a particulares para el uso y aprovechamiento del arrecife. La falta de implementación de planes de desarrollo urbanos, de ordenamientos territoriales y ecológicos; aunada a la falta de integración entre lineamientos de protección; así como la escasa coordinación de las autoridades en el manejo y protección del arrecife, tal y como han señalado Cederstav et al. (2015, pág. 22), han resultado en una toma de decisiones contrarias a la conservación y restauración de los arrecifes. A este panorama hay que agregar la dificultad de establecer de medidas y herramientas para la preservación del arrecife en la zona fronteriza entre México y Belice, ante la falta de límites geopolíticos desde 1882 (CONANP, 2016, pág. 170- 171). La declaratoria de la Reserva de la Biósfera del Caribe Mexicano no ha implementado procesos de control y de mitigación de las actividades humanas que tienen el potencial de dañar a los arrecifes, quedando a consideración de las

secretarías y organismos gubernamentales el diseño de estrategias preventivas. Por lo tanto, es urgente crear un instrumento de planeación dinámico y multisectorial, como política específica para la protección y manejo de la zona arrecifal de coral, que considere la cooperación con la sociedad como esencial para lograr la concientización en torno a su protección y cuyas características proponemos en esta investigación.

3. Fundamentación Teórica

Los corales (*Anthozoa*) son animales invertebrados y carnívoros, relacionados con las anémonas, que se encuentran en aguas tropicales (National Geographic 2018a). Las temperaturas de las aguas tropicales (superiores a 20° C) y su alcalinidad son ideales para la formación de los esqueletos de corales, el cual está constituido de carbonato de calcio, en forma de aragonita (Calderón-Aguilera et al., 2007). El esqueleto del coral (exoesqueleto) protege al pólipo, una estructura de células especializadas que les permiten extraer el carbonato de calcio que está disuelto en el agua de mar y depositarlo alrededor del pólipo para formar su esqueleto, el cual les sirve de sostén. Un pólipo puede vivir cientos, si no, miles de años. Los tentáculos del coral le permiten atrapar animales muy pequeños, al soltar un pequeño arpón del cual fluyen sustancias tóxicas que adormecen a la presa. Cuando un pólipo se pega a una superficie tiene que adaptarse para reproducirse por métodos asexuales o sexuales. Cuando se fragmentan, un pedazo puede seguir creciendo al pegarse a una superficie. En ciertas épocas del año, los corales liberan gametos al agua que se unen y forman larvas o plánulas, que viven en el agua por siete días, hasta pegarse a una superficie donde crecerán y se reproducirán hasta formar colonias de corales a lo largo de cientos de años. Hay que tener claro, que no todas las especies de coral forman arrecifes, sólo aquellas que tienen un exoesqueleto duro.

Los arrecifes de coral forman un ecosistema en el que viven un tercio de todas las especies marinas (National Geographic 2018a), de los cuales se extraen casi 6 millones de toneladas de pescado anualmente, siendo una fuente importante de ingresos económicos a las comunidades pesqueras y de consumo alimenticio a las poblaciones locales (Crabbe, 2008, pág. 311). Los arrecifes proveen un rico hábitat a

casi dos millones de especies (National Geographic 2018a) y un espacio protector a los peces en crecimiento. Los corales, aunque son translúcidos, deben su pigmentación a la relación simbiótica que guardan con las algas unicelulares que viven dentro de los tejidos del pólipo, llamadas zooxantelas. Esta relación simbiótica provee al coral con todos los nutrientes necesarios para su crecimiento y reproducción. Las algas, además, producen oxígeno y ayudan al coral a remover residuos. A cambio, el coral protege a las zooxantelas y les ofrece un medio de donde pueden obtener nutrientes. “La mayoría de los corales hermatípicos contienen entre uno y cinco millones de zooxantelas por cm² de superficie de tejido vivo y de 2–10 pg de clorofila *a* por zooxantela” (Calderón-Aguilera et al., 2007, pág. 216). La clorofila les permite sintetizar su propio alimento mediante la fotosíntesis. El 90% de los productos orgánicos derivados de la fotosíntesis se transfieren al pólipo (NOAA, 2018). Los productos derivados de la fotosíntesis, como la glucosa, glicerol y aminoácidos son aprovechados por el coral para generar proteínas, grasas, carbohidratos y carbonato de calcio (NOAA, 2018). Las zooxantelas son fundamentales para la vida del coral.

La relación simbiótica entre el coral y las zooxantelas, de la cual se desprende el carbonato de calcio que forma el esqueleto del arrecife, es altamente dependiente de la disponibilidad de nitrógeno inorgánico disuelto en las aguas del mar que se libera a partir de los residuos metabólicos que elimina el coral. Las zooxantelas absorben el nitrógeno liberado, el cual es compartido con el pólipo en forma de aminoácidos. Otros microorganismos como bacterias y arqueas ayudan a fijar o a metabolizar el nitrógeno, siendo de vital importancia a la estabilidad de la simbiosis que mantienen las algas con el coral (Rädecker et al., 2015).

Factores que afectan el crecimiento de los corales

El crecimiento de los corales depende de muchas variables, como por ejemplo, la temperatura, la irradiancia, la saturación de carbonato de calcio, la salinidad, el pH y de la absorción de nutrientes (Crabbe, 2008, pág. 311). Los procesos meteorológicos pueden alterar estas variables. La supervivencia de los corales se encuentra amenazada principalmente por el cambio climático, es decir, por el incremento

gradual en la temperatura de la atmosfera terrestre producto de los gases de efecto invernadero, como son el vapor de agua (H₂O), el dióxido de carbono (CO₂) o el ozono (O₃); así como por la acidificación de las aguas del mar y por los efectos que generan diversas actividades humanas o antropogénicas, como son la contaminación del mar, la sobrepesca, los desarrollos costeros y el turismo. El cambio climático no debe confundirse con el clima. El clima es un resumen de las condiciones climáticas experimentadas en un área determinada durante un largo período de tiempo. El cambio climático es un proceso natural del planeta.

El ritmo de calcificación de los corales presenta una alta correlación con la temperatura de la superficie marina. Diversos estudios han analizado la relación entre la temperatura y el crecimiento de los corales de la Gran Barrera Australiana, encontrando que el incremento de 1°C aumenta la calcificación de los corales en un 4.5%. Las altas temperaturas en el mar alimentan a las tormentas tropicales y a los huracanes. El calentamiento del mar ha aumentado la actividad de huracanes en el caribe en un 40%. Los huracanes dañan a los corales con el fuerte oleaje que generan. Además, los huracanes depositan escombros y sedimentos que asfixian a los corales. Las bajas temperaturas que se han registrado en el Golfo de México, a consecuencia de los frentes fríos y secos que bajan desde Canadá, también estresan a los corales (Crabbe, 2008, pág. 312). Si los corales se exponen a temperaturas por arriba o por debajo de lo normal, los efectos son devastadores porque se agotan sus reservas de nutrientes al romperse la relación simbiótica que mantienen con las zooxantelas (Crabbe, 2008, pág. 312). El estrés causado por las altas o bajas temperaturas produce su blanqueamiento, la respuesta fisiológica del coral ante la pérdida de entre el 60 y 90% de sus zooxantelas (Calderón-Aguilera et al., 2007, pág 216). En México, el calentamiento inducido por los fenómenos atmosféricos como El Niño, han provocado el blanqueamiento de los corales (Cederstav et al., 2015). Los corales pueden morir ante la pérdida de nutrientes, de biomasa y de energía que le proporcionan las zooxantelas. Aunque en ocasiones pueden recuperarse, aunque esto les puede tomar varios años, inclusive décadas (Baker et al., 2008; Crabbe, 2008). La UNESCO y la Organización Meteorológica Científica reportaron que los arrecifes en donde este fenómeno se está presentando a un ritmo acelerado se encuentran en el Caribe, el Sureste de Asia y la Gran Barrera Australiana (Baker et al., 2008).

La acidificación de los océanos es otro factor que pone en riesgo a los arrecifes de corales (Baker et al., 2008). Los océanos al absorber grandes cantidades de dióxido de carbono (CO_2) de la atmósfera (Hudson, 2007), reducen su pH, produciendo su acidificación a partir de una serie de reacciones químicas que dan como resultado una mayor concentración de iones de hidrógeno y una disminución en iones de carbonato. Los iones de carbonato son la base de las estructuras de los esqueletos de coral y de las conchas de mar. Si se presenta una disminución de estos iones, organismos como ostras, almejas, erizos de mar, corales de aguas someras, corales de aguas profundas y plancton calcáreo difícilmente podrán mantenerse o sobrevivir a este cambio drástico en la acidez de las aguas oceánicas (Hudson, 2007). En el Caribe, la acidificación oceánica ha traído un descenso en los niveles de saturación de aragonita, impidiendo la formación del esqueleto de los corales.

El Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) estima que en los últimos 30 años se ha perdido casi el 70% de los arrecifes de coral del mundo. Revertir el rápido deterioro de la salud de los océanos es de vital importancia, como se ha señalado en el World Economic Forum, porque los océanos cubren el 70% de la superficie terrestre, generan más del 50% del oxígeno en el mundo, y absorben la mitad del dióxido de carbono (CO_2) de que se produce y albergan el 80% de la biodiversidad del planeta. Uno pensaría que existe un mayor porcentaje de dióxido de carbono en la atmósfera, mas no es así. Los océanos son el receptor más importante de CO_2 . Desde la Revolución Industrial, la concentración de dióxido de carbono (CO_2) en la atmósfera ha pasado de 250 a 400 partes por millón, debido a la quema de combustibles fósiles y al mal uso de los recursos naturales. La demanda de alimento que proviene del mar ha aumentado, sin embargo, el 85% de las fuentes pesqueras se han explotado por completo. Cerca de 100 millones de hogares dependen de esta fuente de trabajo.

La solución

Esta investigación se ha propuesto contribuir a resolver este problema generando una estrategia de preservación ambiental, que considera la cooperación con la

sociedad como esencial para la supervivencia y preservación de los arrecifes de coral, partiendo de la hipótesis de que, ***si se puede reducir el estrés en los arrecifes de coral del caribe mexicano, solo si se reducen los efectos del cambio climático y se mitigan los efectos dañinos de las actividades antropogénicas.***

Asegurar el futuro del planeta, su población y sus recursos, reforzando la inclusión social y limitando las cargas económicas a las generaciones futuras es el compromiso de muchas naciones e instituciones internacionales para fomentar el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental, mediante acciones colectivas que mitiguen el cambio climático al reconocer que los recursos naturales son finitos (World Bank, 2016). Parte de las acciones mundiales incluye el diseño de planes de manejo o de gestión ambiental, los cuales se elaboran para garantizar que se sigan las prácticas de gestión ambiental apropiadas durante el desarrollo de un proyecto, estableciendo compromisos claros por parte de la persona o institución que realiza la acción sobre cómo se evitarán, minimizarán y gestionarán dichos impactos para que sean ambientalmente aceptables (DIPNR, 2004; Commonwealth of Australia, 2014). En México, los planes de manejo son el instrumento rector de planeación y regulación que establece actividades, acciones y lineamientos básicos para la operación y administración de un área natural protegida (CONANP, 2017). La intención de cualquier plan de manejo o de gestión ambiental es lograr la conservación de los ecosistemas y su biodiversidad. El plan de manejo puede formar parte del proceso de evaluación de impacto ambiental y pueden ser parte de la documentación considerada por un gobierno o secretaría de estado, para decidir si se aprueba un proyecto o una acción propuesta.

SEMARNAT ha generado un Manual de Sistemas de Manejo Ambiental para que el personal de la institución mejore el desempeño ambiental de sus actividades laborales cotidianas o guías para el manejo de residuos o para regular que las actividades del sector agropecuario, energía eléctrica, minero, turístico o de comunicaciones, actúen de forma responsables ante el cuidado del medio ambiente y protejan los recursos naturales. Es la SEMARNAT quien regula y administra los arrecifes de coral tiene la autoridad para otorgar concesiones a particulares para uso y aprovechamiento de los arrecifes. La SEMARNAT se apoya de diversas

secretarías de estado e instituciones para realizar sus funciones, como por ejemplo, la CONANP, inclusive se apoya de la PGR (Procuraduría General de la República) y del Ministerio Público (MP), así como de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT), por medio de las Capitanías de Puerto, para regular a las embarcaciones mexicanas. Parte de las acciones de la SEMARNAT es el declarar zonas ambientales como reservas para su protección. Inclusive, el gobierno mexicano para proteger su riqueza natural y cultural se ha suscrito a tratados internacionales como el de La Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar o La Convención sobre la Protección del Patrimonio Mundial, Cultural y Natural de las Naciones Unidas (Cederstav et al., 2015). A pesar de la existencia de un cuerpo legal que protege al medio ambiente, éste no ha tenido el éxito deseado porque su protección jurídica se dispersa en diversos ordenamientos y normas (Cederstav et al., 2015).

Ante esta situación, proponemos un plan de manejo dinámico y multisectorial como solución a la preservación de los arrecifes de coral ante el cambio climático y las actividades antropogénicas, el cual considera la cooperación con la sociedad como esencial para lograr sus metas y propone un modelo de negocios para financiar las actividades de preservación. El plan que se propone es multisectorial porque las acciones separadas ayudan a evitar la degradación de los arrecifes de coral, pero en conjunto constituyen un plan de acción ante los factores de estrés a los que están expuestos.

4. Metodología

En México, no existen planes de manejo específicos para la protección de arrecifes de coral frente al cambio climático o las actividades antropogénicas y por ello las recientes críticas de Green Peace, al reciente decreto que ha declarado como reserva al Caribe Mexicano que no incluye reglas claras para el desarrollo de actividades humanas en la zona y para evitar los riesgos a la biodiversidad de este ecosistema. Es por ello que el plan de manejo que hemos elaborado se ha inspirado en propuestas que buscan mediar el problema de la sustentabilidad ambiental frente al crecimiento y el desarrollo económico (López Varela, 2014; López Varela & Dore,

2008). La elaboración de este plan de manejo como estrategia de preservación de los arrecifes de coral, por lo tanto, es el resultado de 1) la búsqueda bibliográfica sobre los arrecifes de coral, el calentamiento global, la acidificación de los océanos, el impacto de la industria pesquera, los planes de manejo de preservación ambiental y de 2) la consultoría con expertos científicos. Este plan de manejo ambiental tienen como meta el evitar, prevenir, mitigar y compensar el impacto que pueda causar una acción o un proyecto determinado en los arrecifes de coral del Caribe Mexicano.

El plan de manejo que proponemos para preservar los arrecifes de coral está constituido por tres fases en la que intervienen los stakeholders o grupos de interés y se señalan los resultados que se deben entregar en cada fase (Tabla 1). La Fase I se conforma de dos etapas: A) teoría que guía la investigación y B) la identificación de los recursos naturales, culturales y sociales que existan en el área de trabajo. El resultado de esta primera fase es la descripción de todos los recursos existentes en el área de trabajo. La fase II determina el valor de los recursos definidos en la Fase I para determinar qué se debe administrar y cuáles son los impactos y efectos de la acción o proyecto propuesto sobre los recursos que se quieren administrar. De esta fase se obtendrá la importancia de los recursos que se quieren manejar y el análisis de impacto de la acción. La meta de la Fase III es lograr la sustentabilidad ambiental y social a largo plazo, proponiendo propuestas de mitigación y compensación. En una segunda etapa se propone hacer el seguimiento y el control de las decisiones tomadas para cumplir con el plan de manejo.

Fase I: Investigación

Para poder mitigar los efectos negativos de las actividades humanas a partir de un plan de manejo es importante considerar a la sociedad como central a las actividades de preservación. Esto se puede lograr utilizando teorías y técnicas de las ciencias sociales, como la antropología, y no solo de las ciencias ambientales o de la tierra, para elaborar los planes de manejo o los análisis de impacto ambiental. El Banco Mundial (World Bank, 2016), considera que la mejor estrategia para lograr la sustentabilidad ambiental y social es el promover la participación efectiva de la comunidad desde la elaboración de un proyecto, compartiendo la información

Table 1. Plan de Manejo para la Protección de los Arrecifes de Coral del Caribe Mexicano (elaborado por Nathalie V. Burgeff López, basado en López Varela y Dore 2008, López Varela 2014).

Fase I Investigación

Fase I Investigación	
A. Teoría	B. Identificación de recursos naturales, culturales y sociales
Antropología Ambiental Antropología del Desarrollo Sostenibilidad ambiental y social Crecimiento y desarrollo económico Desarrollo económico	Búsqueda bibliográfica, cartográfica y espacial Bases de Datos Técnicas Etnográficas Reconocimiento de superficie Prospección Remota Láser Aérea o Terrestre: Lidar
Consulta con los stakeholders	
Resultado a entregar de la Fase 1: Identificación de los recursos existentes para su manejo	

Fase II Plan de Manejo

Fase II Plan de Manejo	
A. Determinación del Valor de los Recursos	B. Identificación de los impactos y efectos de la acción
Sistemas de Soporte a la toma de decisiones espaciales (sDSS) Análisis multicriterio (IDRISI) Análisis de Sensibilidad Legislación	SIG de zonas visibles Simulación visual Análisis de Riesgo Modelos 3D Análisis de impacto ambiental, social, económico, patrimonial
Consulta con los stakeholders	Consulta con los stakeholders
Resultado a entregar de la Fase II: análisis de impactos significativos (negativos, positivos o neutros sobre los recursos identificados)	

Fase III. Manejo a largo plazo

Fase III. Manejo a largo plazo	
A. Mitigación y Compensación	B. Seguimiento y Control
Exploraciones	Cumplimiento de decisiones y acuerdos
Análisis de laboratorio	Inspección de las autoridades
Conservación	Determinar efectividad de las medidas de mitigación
Generación de archivos de datos	
Consulta con los stakeholders	Consulta con los stakeholders
Resultado Fase III: Evaluación y toma de decisiones para la preservación de los recursos	Resultado Fase III: Cumplimiento del plan de manejo ambiental

relacionada con el proyecto, realizar consultas para fomentar la retroalimentación. Dado que su director es antropólogo, la tarea central es realizar etnografías para tener una comprensión de la organización de la sociedad, teniendo una actitud reflexiva hacia el crecimiento y el desarrollo económico, que guíe la obtención de los datos.

La etapa de la investigación debe definir el ecosistema de los arrecifes de coral. Es necesario entender que, investigar sobre el área de estudio va más allá de la revisión de la consulta bibliográfica y cartográfica. Es sumamente importante realizar recorridos de superficie directos e indirectos, utilizando tecnologías espaciales no destructivas que permitan identificar los recursos en el mar. Además es importante consultar a las personas o a los grupos interesados para que ayuden a la identificación de los arrecifes de coral. El Lidar es un método topográfico que mide la distancia a un objetivo iluminando ese objetivo con una luz láser pulsada y midiendo los pulsos reflejados con un sensor. Las diferencias en los tiempos de retorno del láser y las longitudes de onda se pueden usar para realizar representaciones tridimensionales digitales del objetivo. El Lidar nos ayudaría a tener una imagen tridimensional topográfica de la zona arrecifal, determinando su extensión y la posibilidad de encontrar nuevas zonas de arrecifes, ampliando nuestro conocimiento sobre la biodiversidad de la zona. Esta técnica es de gran importancia para analizar los daños a la barrera arrecifal. Es necesario identificar a todos los stakeholders o grupos interesados para que colaboren en la identificación de los recursos naturales y culturales. Una vez obtenido los datos es importante incorporarlos a un SIG (Sistemas de Información Geográfica) para que puedan analizarse y compartirse fácilmente.

Fase II: Plan de Manejo

Determinar el valor de todos los recursos existentes en la zona requiere tomar en cuenta no solo la importancia natural del arrecife, sino considerar el valor que tienen las actividades humanas que se realizan en la zona como puede ser la pesca y el turismo. Esta consideración es la que distingue a este plan de manejo, el que la elaboración de una “etnografía” de la zona, arrojará datos sobre la organización social y no solo sobre la composición demográfica de la zona. Para determinar el

valor que tiene el arrecife sobre las actividades humanas es importante considerar la legislación vigente. En este proceso siempre surge la pregunta qué es más importante, el turismo o el arrecife. Los economistas o los hoteleros dirán el turismo, los ambientalistas dirán el arrecife. Ambos estarán en lo correcto. Mas la única forma de poder analizar si la decisión es correcta, es necesario modelarla, por ejemplo, mediante sistemas de soporte a la toma de decisiones espaciales (sDSS) o análisis multicriterio. Una vez que se ha tomado la decisión es importante considerar los impactos y efectos que pueda tener un proyecto o una acción sobre el área de estudio y para ello es importante modelarlos usando SIG de zonas visibles, simulación visual, modelos 3D, animaciones, análisis de riesgo, pero sobre todo realizar evaluaciones, mínimamente, de impacto ambiental y social. De acuerdo al World Economic Forum, nuestros océanos están en crisis y la tecnología puede salvarlos. Actualmente, se están utilizando vehículos autónomos en el océano, drónes, inteligencia artificial, computación y “machine learning” para medir los factores de estrés, prevenir riesgos e identificar indicadores clave para la resiliencia y adaptación en tiempo real.

Fase III Sostenibilidad ambiental y social

Habiendo conocido los efectos de la acción, es importante mitigar y compensar el daño causado a los recursos que se vean afectados, lo cual debe ser consultado con los stakeholders. En México, la implementación del PPP (Polluter Pays Principle), que propuso la OECD en 1972, debe reforzarse para que aquel que tenga la intención de elaborar un proyecto pague por la elaboración del plan de manejo y de impactar de forma negativa su proyecto a los recursos que se quieren proteger, el que daña pague la mitigación y compense el daño. Este modelo de negocios, “el que daña paga”, debería aplicarse indistintamente de si el promotor de la acción es una entidad privada (un consorcio hotelero) o una secretaria de estado (SAGARPA). La estrategia del PPP es utilizada con éxito por el World Economic Forum for the Ocean a partir de su proyecto New Vision for the Ocean (NVO) que tiene como objetivo ofrecer una plataforma a las industrias, para que trabajen en conjunto con el gobierno, sociedad civil y comunidad científica, en la mejora del manejo de los océanos al explorar nuevas oportunidades bajo nuevas tecnologías que promueven nuevas soluciones. En la Fase III es muy importante hacer un seguimiento de la

legislación vigente y de todos los acuerdos o toma de decisiones para determinar la efectividad de las medidas de mitigación y asegurarse que el daño ha sido compensado.

5. Resultados

De acuerdo a los datos obtenidos, disminuir los efectos del cambio climático y las actividades antropogénicas es la única forma de poder mantener la salud de los océanos y del arrecife de coral del Caribe Mexicano, como se propuso en la hipótesis. La forma en la que responden los gobiernos a la protección de los océanos es a partir de planes de manejo bajo una estrecha cooperación con la sociedad y con distintas agencias internacionales para generar estrategias de preservación, mitigación, de seguimiento y de control.

Esta investigación propone que desde el momento en el que se planea el desarrollo de una acción o un proyecto, se debe generar un plan de manejo, en el que deben participar de manera representativa todos los stakeholders. El plan de manejo plantea apegarse a los avances científicos, realizando por ejemplo, análisis de genética y genómica, como lo han hecho científicos que han recogido paquetes de gametos de coral de la Gran Barrera de Australiana para conformar un banco de esperma de todas las especies de coral, antes de que disminuya la población de los arrecifes y se pierda la información de su DNA (National Geographic, 2018b). En la isla Heron recogieron 171.000 millones de espermatozoides de 31 colonias de corales que representan a ocho especies de coral. Las muestras se congelaron y se guardaron en la cámara del mayor banco de esperma de coral del mundo, en el Western Plains Zoo de Toronga, en Nueva Gales del Sur. El esperma se almacena en nitrógeno líquido a -195°C y se encuentra en un estado de animación suspendida que puede durar cientos de años. Recoger los huevos de coral en mar abierto es prácticamente imposible. Los científicos recogieron corales enteros y los colocaron en tanques llenos de agua de mar. Los científicos australianos está investigando tecnologías que les permitan congelar los huevos y, potencialmente, larvas de coral. Recientemente revelaron en Scientific Reports que habían fertilizado con éxito huevos con esperma que llevaba varios años congelado y que habían producido larvas de coral sanas. Como propuesta, la SEMARNAT podría incorporarse a este

proyecto y coordinar la participación de científicos mexicanos.

Diversas agencias como la U.S. National Oceanic and Atmospheric Administration's Coral Reef Watch (NOAACRW) se han unido para desarrollar predicciones del blanqueamiento de los océanos, utilizando un radiómetro de alta resolución (AVHRR) de las temperaturas oceánicas a partir de satélites NOAA de órbita polar, que se encuentran en Internet. Nos encontramos en un momento en donde los vehículos aéreos no tripulados o drones pueden enviarse al Mar Caribe para determinar las condiciones del océano en tiempo real y monitorear que la reserva pesquera se realice dentro de los marcos legales. Global Fishing Watch, en colaboración con NOAA, Google, Skytruth y Oceanía, ofrece en tiempo real y de forma gratuita el monitoreo de la pesca en el mundo, a cualquier persona con una conexión a internet. SEMARNAT pudiera unirse a este grupo para poder monitorear al arrecife caribeño y a "Project eyes on the sea" para monitorear satelitalmente la salud de los océanos.

Ante las nuevas políticas del Banco Mundial (2016) para otorgar financiamiento, México pronto se verá en la obligación de incorporar a la sociedad en la planeación de proyectos y asegurarse que las comunidades locales y las minorías sean representadas, reconociendo sus formas de vida y midiendo el impacto del proyecto sobre estas mismas y haciéndoles participes de los beneficios que pueda generar el proyecto.

6. Conclusiones

El gobierno mexicano debe 1) reconocer el valor del arrecife de coral del Caribe Mexicano, no solo porque constituye la segunda barrera más importante del mundo, sino por su contribución a la sostenibilidad ambiental y económica; y 2) reconocer que la continuidad de su contribución está en riesgo. El gobierno australiano ha generado un plan de manejo del arrecife sostenible al 2050, el cual ha declarado como patrimonio natural ante UNESCO, en respuesta a la responsabilidad que tiene de mantener este ecosistema de beneficio mundial, en colaboración con la comunidad científica, la industria, y la sociedad. De forma similar, el gobierno mexicano debe elaborar una política nacional para la protección y conservación de

los arrecifes coralinos que incluya medidas para bajar las temperaturas oceánicas controlando la emisión de los gases de efecto invernadero. México como miembro suscrito al tratado de París, tiene la responsabilidad de encontrar alternativas al consumo de combustibles fósiles y buscar nuevas fuentes de energía renovable. Pero para ello tiene que haber innovaciones en la forma de gobernanza en México. Es necesario establecer un diálogo y cooperación con la academia, las ONGs, las compañías de cruceros, las autoridades locales federales, la sociedad, que lleve a la creación de un consejo o comisión multisectorial con científicos reconocidos, por representantes de las autoridades locales y federales.

Hasta ahora, ni las acciones de las instituciones federales, ni la firma de acuerdos internacionales, han sido exitosas para frenar el cambio climático y la acidificación de los océanos, que impactan en la salud de las aguas marinas y de los arrecifes de coral. Esto se debe a la inercia política e institucional del gobierno mexicano de no fortalecer ni vigilar el cumplimiento legislación existente para proteger a los arrecifes de los desarrollos hoteleros, comerciales y del turismo de playa. México se arriesga al no tomar precauciones ni solucionar estos problemas. Ante el incremento del nivel del mar, los principales centros turísticos como Cancún, Islas Mujeres, Cozumel y Holbóx tienen el riesgo de inundarse, quedándose sin una fuente importante de recursos económicos. Al tomar acción, se podría lograr frenar la desaparición de los corales para dentro de 30 años. La organización Conservation International es vocera de la naturaleza la cual ha enviado un mensaje a la humanidad, recordándole que es esencial a todo aspecto de la vida humana y se están aprovechando de lo que le ofrece, sin recibir nada a cambio y en consecuencia estamos poniendo en riesgo nuestras vidas. El mensaje es muy simple, "Nature doesn't need people, people need nature". Este mensaje a la humanidad dice, "la naturaleza no necesita de la gente, la gente necesita de la naturaleza. La naturaleza seguirá su curso y es decisión nuestra acompañarle o no en su futuro, porque ella puede existir independientemente de nosotros, pero nosotros no.

7. Referencias

- Baker, A. C., Glynn, P. W., & Riegl, B. (2008). Climate change and coral reef bleaching: An ecological assessment of long-term impacts, recovery trends and future outlook. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 80 (4), 435–471.
- Calderón-Aguilera, L. E., Reyes-Bonilla, H., & Carriquiry, J. D. (2007). El papel de los arrecifes coralinos en el flujo de carbono en el océano: estudios en el Pacífico mexicano. En G.-C. G. & B. Hernández-de la Torre (Eds.), *Carbono en ecosistemas acuáticos de México* (pp. 215-226). México: SEMARNAT-INE-CICESE.
- Cederstav, A., Lawrence, J., & Quintanilla, V. c. (2015). *La Protección de los Arrecifes de Coral en México, rescatando la biodiversidad marina y sus beneficios para la humanidad*. https://www.aida-americas.org/sites/default/files/Informe_Corales_Mexico.pdf, consultado el 13 de febrero de 2018.
- Commonwealth of Australia. (2014). *Environmental Management Plan Guidelines, Commonwealth of Australia*. Canberra: Australian Government, Department of the Environment.
- CONANP. (2016). *Estudio Previo Justificativo para la declaratoria de la Reserva de la Biosfera Caribe Mexicano*, Quintana Roo. México: SEMARNAT.
- CONANP. (2017). *Términos de referencia para la elaboración de programas de manejo de las áreas naturales protegidas competencia de la Federación*. México: SEMARNAT-CONANP.
- http://www.conanp.gob.mx/que_hacemos/pdf/programas_manejo/TERMINOS%20DE%20REF-PAGINA.pdf, consultado el 13 de febrero de 2018.
- Crabbe, M. J. C. (2008). Climate change, global warming and coral reefs: Modelling the effects of temperature. *Computational Biology and Chemistry*, 32(5), 311–314.
- DIPNR. (2004). *Guideline for the Preparation of Environmental Management Plans*. Sydney, Australia: Department of Infrastructure, Planning and Natural Resources.
- Hudson, A. (2017). Acidificación de los océanos: ¿qué es y cómo detenerla? <http://www.undp.org/content/undp/es/home/blog/2017/3/14/Ocean-Acidification-What-it-means-and-how-to-stop-it.html>, consultado el 13 de febrero de 2018.
- López Varela, S. L. (2014). Sustainable heritage in Mexico: archaeological solutions for infrastructure planning and building. *Open Journal of Archaeometry*, 2, 73-76.

López Varela, S. L., & Dore, C. D. (2008). La arqueología aplicada: una alternativa para la protección del patrimonio ante las políticas de desarrollo nacional. En P. Schmidt Schoenberg, E. Ortiz Diaz, & J. Santos Ramírez (Eds.), *Tributo a Jaime Litvak King* (pp. 123-138). México, D.F.: UNAM.

Mumby, P. J., Flower, J., Chollett, I., & Box, S. J. (2014). *Towards Reef Resilience and Sustainable Livelihoods: A handbook for Caribbean coral reef managers*. Exeter, UK: University of Exeter.

National Geographic. (2018a). Corals.
<https://www.nationalgeographic.com/animals/invertebrates/group/corals/>

National Geographic. (2018b). El mayor banco de esperma de coral del mundo servirá para salvar a los arrecifes en el futuro.
<http://www.nationalgeographic.es/animales/2017/12/el-mayor-banco-de-esperma-de-coral-del-mundo-servira-para-salvar-los-arrecifes-en>, consultado el 13 de febrero de 2018.

NOAA. (2018). Corals.
https://oceanservice.noaa.gov/education/kits/corals/coral02_zooxanthellae.html
website: consultado el 13 de febrero de 2018.

Parry, M. L., Canziani, O. F., Palutikof, J. P., van der Linden, P. J., & Hanson, C. E. (2007). *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.