



Universidad Autónoma de Baja California
Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Facultad de Ciencias Marinas
Facultad de Ciencias

Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo

Tesis que para obtener el grado de
DOCTOR EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

Título:

Evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de México ante los factores de
estrés asociados al cambio climático global

Presenta:

Mariana Berenice Reyna Fabián

Dra. Martha Ileana Espejel Carbajal
Dr. Leonardo Dagoberto Ortiz Lozano
Dr. Georges Seingier
Dr. Alejandro Espinoza Tenorio
Dr. Héctor Reyes Bonilla

Directora
Sinodal
Sinodal
Sinodal
Sinodal

Ensenada, Baja California, enero de 2019

Universidad Autónoma de Baja California
Instituto de Investigaciones Oceanológicas
Facultad de Ciencias Marinas
Facultad de Ciencias

Título: Evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático global

Doctorado en Medio Ambiente y Desarrollo

Tesis que para obtener el grado de
DOCTOR EN MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO

Presenta:
Mariana Berenice Reyna Fabián

Aprobado por:



Dra. Martha Ileana Espejel Carbajal
(Directora)



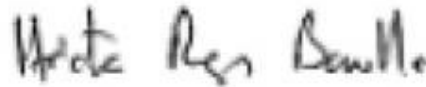
Dr. Leonardo Dagoberto Ortiz Lozano
(Sinodal)



Dr. Georges Seingier
(Sinodal)



Dr. Alejandro Espinoza Tenorio
(Sinodal)



Dr. Héctor Reyes Bonilla
(Sinodal)

Agradecimientos

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (Conacyt) por la beca de manutención otorgada durante la realización del doctorado.

Al proyecto Al Proyecto PNUD-INECC-00086487 “Caracterización y regionalización de las zonas costeras de México en condiciones actuales y con cambio climático”.

Al Posgrado en Medio Ambiente y Desarrollo del Instituto de Investigaciones Oceanológicas, de la Facultad de Ciencias Marinas y de la Facultad de Ciencias.

Mi más sincero agradecimiento al comité de tesis. Dr. Georges Seingier, Dr. Leonardo Dagoberto Ortiz Lozano, Dr. Alejandro Espinoza Tenorio, Dr. Héctor Reyes Bonilla, muchas gracias a todos por su valioso apoyo, dedicación y comentarios al trabajo.

A la Dra. Martha Ileana Espejel Carbajal por su paciencia, ideas, discusiones, pero sobre todo por tu apoyo en todo momento durante estos años.

A mi familia que siempre ha sido mi inspiración, pero sobre todo mi fortaleza; este logro es también de ustedes.

A todos amigos de Ensenada, gracias por convertirse en mi familia nortaña.

A mi nuevo gran tesoro **Zacek**, eres una fuente de vida y felicidad inmensa.

ÍNDICE

RESUMEN	6
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Arrecifes y su importancia	7
1.2. La degradación de los arrecifes.....	7
1.3. Arrecifes en México	8
2. ANTECEDENTES	9
2.1. El cambio climático, el océano y los arrecifes.....	9
2.2. La vulnerabilidad y los arrecifes.....	12
2.3. Los Sistemas Socio-Ecológicos (SSE) y la vulnerabilidad	13
3. OBJETIVOS	15
3.1. Objetivo general.....	15
3.2. Objetivos particulares	15
4. MÉTODO GENERAL	15
5. RESULTADOS	17
5.1. CAPÍTULO 1. De la evaluación ecológica a la socio-ecológica: la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático	17
Resumen	17
5.1.1. Introducción	17
5.1.2. Métodos	20
5.1.3. Resultados y discusión	21
5.1.4. Conclusiones	34
5.1.5. Referencias.....	35
5.1.6. Anexos.....	45
5.2. CAPÍTULO 2. Modelo conceptual y metodológico para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático	50
Resumen	50
5.2.1. Introducción	51
5.2.2. Antecedentes	52
5.2.3. Métodos	53
5.2.4. Resultados y discusión	54

5.2.5. Conclusiones	69
5.2.6. Referencias.....	70
5.2.7. Anexos.....	79
5.3. CAPÍTULO 3. Evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de Sian Ka'an y Mahahual ante el incremento de la temperatura superficial oceánica	102
Resumen	102
5.3.1. Introducción	103
5.3.2. Métodos	104
5.3.3. Resultados y discusión	119
5.3.4. Conclusiones y recomendaciones	133
5.3.5. Referencias.....	135
5.3.6. Anexos.....	142
6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES	146
7. GLOSARIO	149

RESUMEN

Los sistemas arrecifales en México son de suma importancia por su biodiversidad, amplia distribución y servicios ecosistémicos. Los arrecifes de coral principalmente se localizan en el Mar Caribe y Golfo de México y los arrecifes rocosos en el Golfo de California y sur del Océano Pacífico Mexicano. Como otros ecosistemas costeros, hay sistemas muy bien conservados y otros que sufren severas afectaciones. La degradación de los arrecifes se ha asociado al desarrollo costero, a la pesca destructiva y sobrepesca, a la contaminación (terrestre y marina), así como a los factores asociados al cambio climático (acidificación del océano, aumento del nivel medio del mar, incremento en la temperatura del agua del mar, y aumento en la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales). Dado que se han desarrollado modelos conceptuales y modelos metodológicos para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de estos ecosistemas con el fin de brindar información sobre la naturaleza y las magnitudes de los impactos esperados del cambio climático, se plantearon las siguientes preguntas de investigación. ¿Cuáles son elementos que se deben considerar en las evaluaciones de la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático?, ¿Cuál ha sido la evolución de los modelos conceptuales y metodológicos para evaluar dicha vulnerabilidad en un contexto internacional y nacional?, ¿Cómo se conceptualiza esta vulnerabilidad de los arrecifes en México? y ¿Existen indicadores que permitan desarrollar un marco metodológico para evaluar su vulnerabilidad? ¿Si es así, cómo sería la vulnerabilidad socio-ecológica ante los factores de estrés asociados al cambio climático actual de alguno de los sistemas arrecifales mexicanos? Para responder estos cuestionamientos, primero se realizó la revisión de la literatura relacionada con los modelos que han sido desarrollados para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes a los efectos del cambio climático. Se analizó la evolución de estos modelos (nivel nacional e internacional) y se adoptó un modelo conceptual y metodológico para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes a través de la combinación de diversos indicadores de tipo social y ecológico. Finalmente, se aplicó el modelo y sus indicadores en un ejercicio que evaluó la vulnerabilidad socio-ecológica ante efecto del cambio climático en dos localidades del Caribe mexicano con sistemas arrecifales coralinos: Mahahual y Sian Ka'an. Los primeros modelos para evaluar la vulnerabilidad de los sistemas coralinos sólo incorporaban a los elementos ecológicos, pero actualmente se incorporan también los elementos socioeconómicos. En México, los modelos se han desarrollado principalmente para las áreas naturales protegidas costeras. En el presente trabajo se adoptó un modelo conceptual para los arrecifes de México que incorpora nuevos elementos (resiliencia socio-ecológica, condiciones de contorno, ecosistemas asociados y duración, frecuencia e intensidad de los impactos del cambio climático). Se presenta el modelo metodológico teórico con índices e indicadores que han sido desarrollados principalmente para el Caribe y el Golfo de California. Se formó una base de datos única en su tipo ya que es integradora y completa. Se aplicó el modelo comparando dos localidades con arrecifes coralinos y los resultados demuestran que el modelo es útil para fijar prioridades de manejo en atención a los efectos del cambio climático, prioridades de investigación para llenar vacíos de información u homogeneizar datos para comparaciones en el futuro. Por ejemplo, resultó una vulnerabilidad ecológica mayor en Sian Ka'an que en Mahahual, pero la vulnerabilidad social es mayor en Mahahual que en Sian Ka'an. Con esto, se evidencian las prioridades de manejo en ambos sistemas socio-ecológicos arrecifales. Finalmente, se propone el uso del modelo propuesto y el seguimiento del comportamiento de los indicadores en observatorios de resiliencia costera existentes o que se están desarrollando en el país.

Palabras clave: vulnerabilidad climática, arrecifes de México, modelos conceptuales, modelos metodológicos, índices e indicadores de vulnerabilidad climática.

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Arrecifes y su importancia

Los arrecifes son ecosistemas con una alta riqueza de especies, lo cual crea una compleja trama de relaciones interespecíficas (Pérez-España *et al.*, 1996). Por su parte, los arrecifes de coral se encuentran entre los ecosistemas más diversos y productivos del planeta y son la estructura biogénica más grande que se logra observar desde el espacio (Mumby y Steneck, 2008), mantienen cerca de una tercera parte de todas las especies marinas descritas y sólo ocupan un área relativamente pequeña, sólo el 2% del océano (Reaka-Kudla, 2005).

Además de su importancia ecológica, los arrecifes de coral proveen de una gran cantidad de bienes y servicios a la sociedad (UNEP, 2006). Principe *et al.* (2011) enlistan los beneficios que estos ecosistemas brindan dentro de cuatro categorías; la primera categoría, usos extractivos directos, incluye: pesca comercial, pesca de subsistencia, peces de acuario, pesca deportiva, coral para joyería, recolección para farmacéuticos y no farmacéuticos; la segunda categoría, usos no extractivos indirectos: actividades recreativas marinas (buceo, esnórquel y paseo en bote), químicos farmacéuticos y productos naturales no farmacéuticos; la tercera categoría, usos indirectos: hábitat para peces, nutrientes, reducción de las inundaciones, aminorar daños de las tormentas, disminución de muertes por tormentas e inundaciones, disminución de la erosión por tormentas e inundaciones, protección para manglares y pastos marinos, vivero de la vida marina y soporte de vida marina; y la cuarta categoría, valores de no uso: valor por su existencia, valores culturales, valores de opinión, valores de legado, valores instrumentales, valores intrínsecos, valores científicos y valores de rareza¹.

1.2. La degradación de los arrecifes

A pesar de su importancia socio ecológica, los arrecifes de coral han mostrado claros signos de degradación en las últimas décadas, lo que ha generado que al menos una tercera parte de las especies de coral que los componen se encuentren en peligro de extinción². Para el caso de los arrecifes rocosos, se reporta que a estos ecosistemas como uno de los ecosistemas más vulnerables ante el cambio climático en Canadá (Okey *et al.*, 2015).

Las causas del decline de los arrecifes reportadas en la literatura mundial son muy diversas, las principales incluyen a: la sobrepesca y sus técnicas destructivas³; a la contaminación marina⁴ y a

¹ Principe P, Bradley P, Yee S, Fisher W, Johnson E, Allen P and Campbell D. (2011). "Quantifying Coral Reef Ecosystem Services". U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Research Triangle Park, NC.

² Carpenter, K. E., Abrar, M., Aeby, G., Aronson, R. B., Banks, S., Bruckner, A., ... Wood, E. (2008). One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. *Science (New York, N.Y.)*, 321(5888), 560–3

³ Jackson Jeremy B. C., Michael X. Kirby, Wolfgang H. Berger, Karen A. Bjorndal, Louis W. Botsford, Bruce J. Bourque, ... Robert R. Warner (2001). Historical overfishing and the recent collapse of coastal ecosystems. *Science* 293: 629–638

⁴ Horta-Puga G. y Carriquiry J. D. (2014). The Last Two Centuries of Lead Pollution in the Southern Gulf of Mexico Recorded in the Annual Bands of the Scleractinian Coral *Orbicella faveolata*. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 92 (5): 567-573

la contaminación que se origina en el continente (Halpern *et al.*, 2008 y Burke y Maidens, 2005); a las especies invasoras⁵; a la eutrofización por nutrientes⁶; al turismo y sus malas prácticas⁷; al encallamiento de embarcaciones⁸; a las enfermedades que les afectan⁹. Así como a los factores asociados al cambio climático global que incluyen: el aumento de la acidificación del océano (Madin *et al.*, 2012; Wilkinson, 2008); el aumento del nivel medio del mar (Cinner *et al.*, 2016); el incremento en la temperatura del agua del mar¹⁰; y el aumento en la frecuencia e intensidad de las tormentas tropicales (De'ath *et al.*, 2012).

1.3. Arrecifes en México

En México, los arrecifes coralinos se distribuyen en ambos litorales, principalmente en el Mar Caribe y Golfo de México y en el Océano Pacífico se encuentran de manera intermitente; los arrecifes rocosos se localizan primordialmente en el Golfo de California y en el sur del Océano Pacífico con poca presencia en el Golfo de México y Veracruz. Los arrecifes rocosos con *Macrocystis pyrifera* se presentan en la porción noroeste del Pacífico Mexicano (Santander *et al.*, 2018). Estos ecosistemas tienen gran importancia socio económica; por ejemplo, en el sector turístico las zonas con arrecifes aportan grandes beneficios substanciales Herman *et al.*, 2003; sin embargo, estos ingresos se ven amenazados por la degradación de los mismos ecosistemas que frecuentemente deriva del turismo masivo. La costa del Caribe de la Península de Yucatán se caracteriza por una industria turística en expansión que depende económica y ecológicamente de la barrera de arrecife Mesoamericana y actualmente Quintana Roo tiene el mayor número de cuartos de hotel de todo México, con una clara tendencia al desarrollo que se concentra en el corredor de Cancún a Tulum (Baker *et al.*, 2013).

A nivel nacional se observa la misma tendencia de declines masivos de estos sistemas arrecifales (Jackson *et al.*, 2014). En la Figura 1 se observa que, en la región del Caribe los arrecifes se encuentran muy impactados. En el 2003, Gardner *et al.* (2003) reportaron un decline masivo de los corales en esta región; su estudio se basa en 263 sitios y muestra que el porcentaje promedio de la cobertura de coral duro en los arrecifes se ha reducido de un 50% a un 10% desde 1977 a 2001 asociados a diversos eventos (Gardner *et al.*, 2003).

⁵ Gómez Lozano R. L., Anderson J.L., Akins D.S.A., Buddo G., García-Moliner F., Gourdin M., Laurent C., Lilyestrom J.A., Morris, Jr., N. Ramnanan y R. Torres (2013). *Estrategia regional para el control del Pez León invasor en el Gran Caribe. Iniciativa Internacional sobre los Arrecifes Coralinos*. 32 pp.

⁶ Fabricius K. E. (2005). Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*, 50: 125-146.

⁷ Horta-Puga G. (2010). *Impactos Ambientales*. En: Arrecifes Coralinos del Sur del Golfo de México (183-205). México: Tunnell Chávez y Whiter

⁸ Hayasaka-Ramírez H y Leonardo Ortiz-Lozano (2014). Anthropogenic pressure indicators associated with vessel groundings on coral reefs in a marine protected area. *Ciencias Marinas*, 40(4): 237-249.

⁹ Lesser M. P., 2004. Experimental biology of coral reef ecosystems. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 300: 217-252

¹⁰ Chen, Ping-Yu; Chen, Chi-Chung; Chu, LanFen, y McCarl, Bruce (2015). "Evaluating the Economic Damage of Climate Change on Global Coral Reefs". *Global Environmental Change*, 30, pp. 12-20.

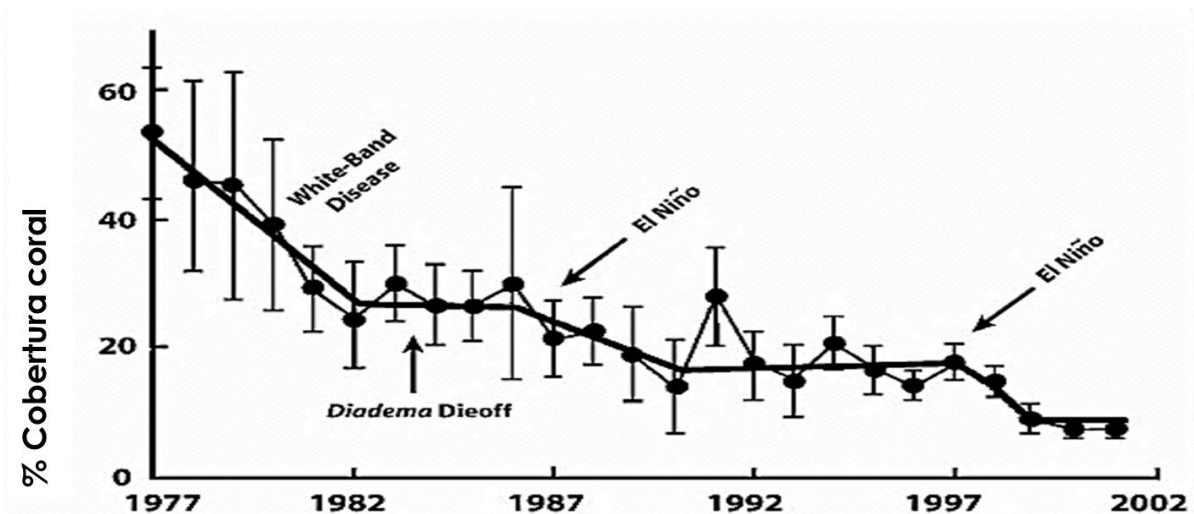


Figura 1. Reporte de pérdida de cobertura de coral en los arrecifes del Caribe desde 1997 a 2002 (tomada de Gardner *et al.*, 2003).

Para el caso de los arrecifes del Suroeste del Golfo de México, Ortiz-Lozano *et al.* (2013) mencionan que el Sistema Arrecifal Lobos Tuxpan ha sido impactado por el crecimiento del Puerto de Tuxpan y descargas accidentales de combustible, así como por los contaminantes del río Tuxpan (fertilizantes, metales pesados, biocidas y coliformes fecales). Los factores responsables de las condiciones de deterioro de los arrecifes del Sistema Arrecifal Veracruzano son el desarrollo urbano del área metropolitana de Veracruz y la presencia del Puerto de Veracruz. Y los arrecifes de Los Tuxtlas han sido impactados por pesquerías y por la contaminación generada por productos del petróleo y aceite.

2. ANTECEDENTES

2.1. El cambio climático, el océano y los arrecifes

El IPCC (2014) define al cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. El rápido aumento de las concentraciones de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) han causado condiciones no vistas en millones de años en los ecosistemas marinos. Este trabajo se referirá al cambio climático según el origen antropocéntrico, a menos que se especifique otra atribución.

En general, los principales impactos del cambio climático antropogénico en el océano incluyen la disminución en su productividad, la alteración de las redes tróficas, la reducción en la abundancia de las especies que forman hábitats, el cambio de la distribución de las especies y una mayor

incidencia de enfermedades¹¹. En la Figura 2 se observa un esquema de las alteraciones proyectadas en los flujos oceánicos y en los eventos atmosféricos debidos al cambio climático en las siguientes décadas. Las propiedades del océano serán alteradas en sus capas superficiales y medias. En la capa superficial, la profundidad de las aguas mezcladas (línea horizontal sólida) se volverá más superficial, lo que elevará el promedio de los niveles de luz y disminuirá el suministro de nutrientes para los organismos fotosintéticos. El dióxido de carbono antropogénico acidificará (disminuirá el pH) la superficie del océano y la penetración de las aguas acidificadas a niveles más profundos dará como resultado una capa de agua más superficial en la cual las estructuras de CaCO_3 , como los caparazones, se disolverán (línea horizontal punteada)¹².

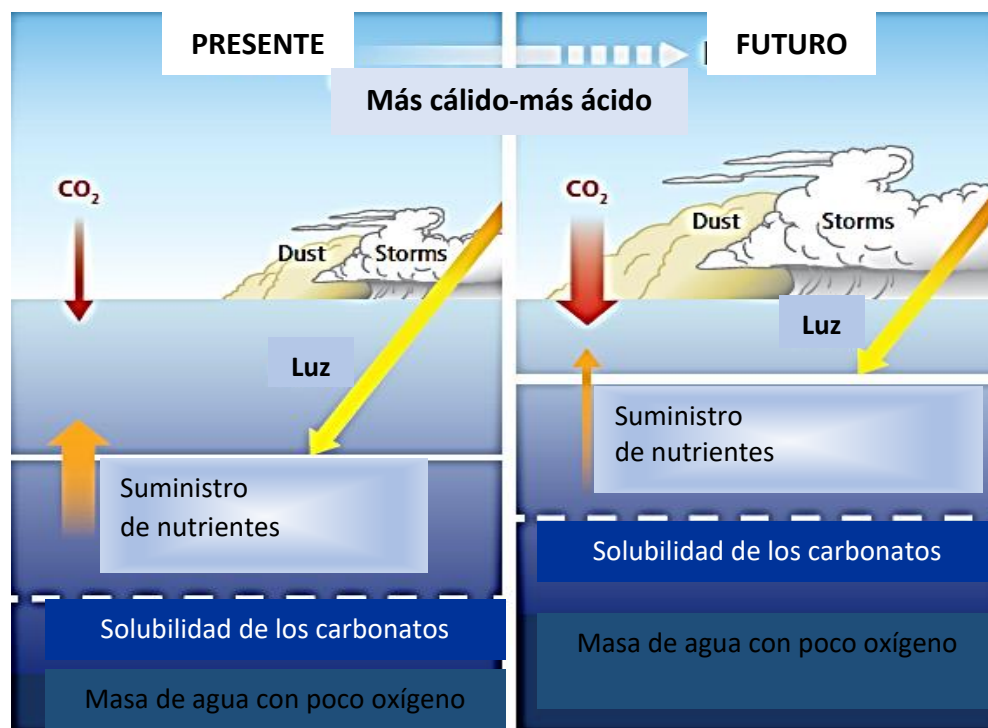


Figura 2. Alteraciones proyectadas en el océano por el cambio climático (tomada de Pörtner *et al.*, 2014).

¹¹ Hoegh-Guldberg O. y Bruno F. J. (2010). The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. *Science*, 328: 1523-1528.

¹² Pörtner, Hans-O., Karl, M. David, Boyd, W. Philip, Cheung, W. L., Lluich-Cota, E. Salvador, Nojiri, Yukihiro, Schmidt, N. Daniela y Zavialov, O. Peter (2014). "Ocean systems". En: *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, pp. 411-484.

La relación del cambio climático y los arrecifes es señalada por Wilkinson (2008), menciona que los arrecifes de coral podrían ser el primer ecosistema marino que sufra severos daños y posiblemente un colapso como consecuencia de los efectos este fenómeno. En la Figura 3, se observan las múltiples vías de impacto de los cuatro factores de estrés asociados al cambio climático (aumento de la temperatura de la superficie del mar, tormentas tropicales severas, aumento del nivel del mar y acidificación del océano) sobre los cinco principales componentes del sistema socio-ecológico de los arrecifes: 1) ambiente, que incluye aspectos de disponibilidad de hábitat, química del agua, producción primaria y complejidad estructural del hábitat bentónico; 2) dinámica de poblaciones, de los organismos con importancia económica o ecológica, incluyendo sus tasas de dispersión y de crecimiento; 3) disponibilidad de recursos, que incluye a la abundancia, distribución y comportamiento; 4) pesquerías, que incluye aspectos de esfuerzo de captura y variabilidad; y 5) bienestar social, que incluye el tipo de vida, salud humana y seguridad, infraestructura y valores culturales (Cinner *et al.*, 2016).

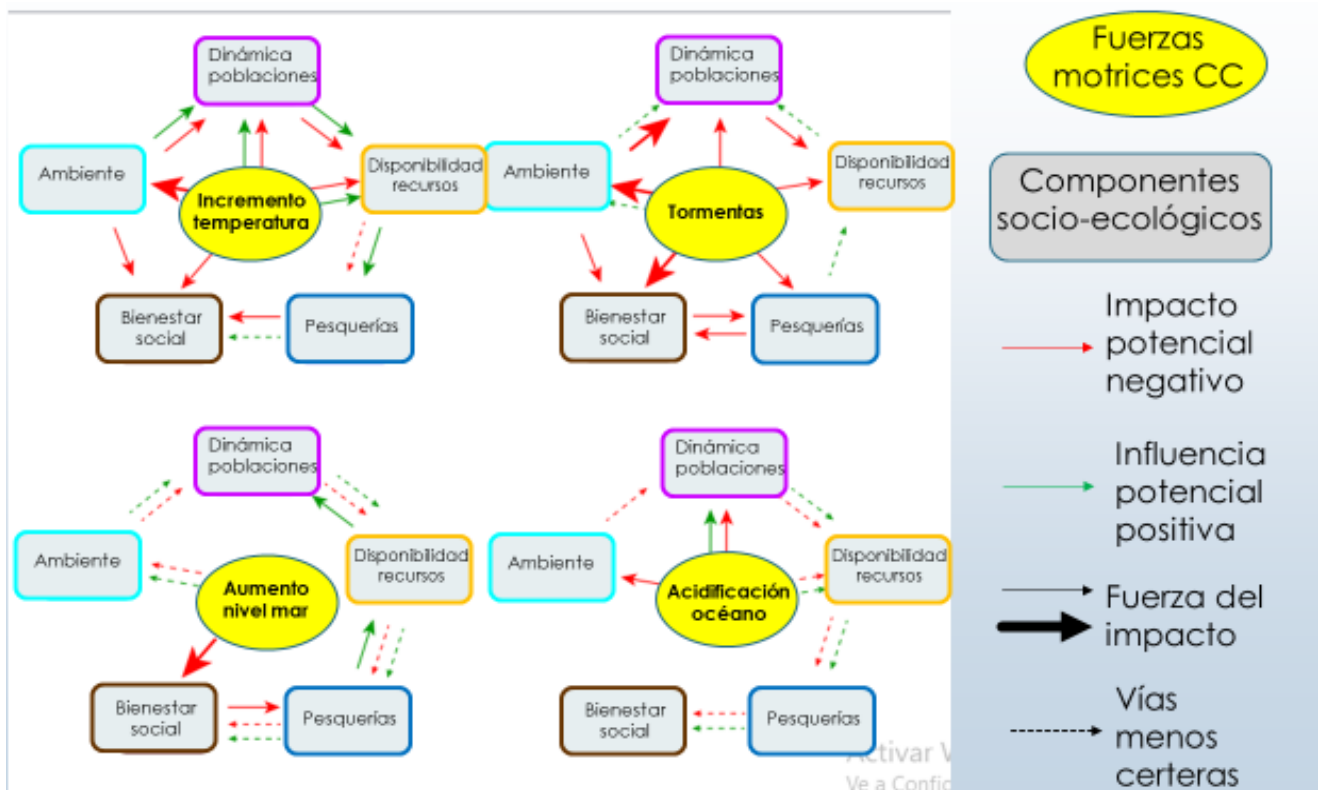


Figura 3. Modelo conceptual que muestra a los cinco componentes clave del sistema socio-ecológico utilizado para identificar las múltiples vías de impacto y sus impactos potenciales sobre cada componente. Las flechas rojas representan los impactos negativos y las flechas verdes los impactos positivos, el tamaño de la flecha refleja la fuerza del impacto, y las flechas punteadas a las vías menos ciertas de estos impactos (tomada de Cinner *et al.*, 2016).

Es tan importante como urgente evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático. Para ello, es necesario definir los conceptos de vulnerabilidad socio-ecológica y entender a los sistemas arrecifales como socio ecosistemas.

2.2. La vulnerabilidad y los arrecifes

Para comprender la relación entre la degradación de los arrecifes de coral y la vulnerabilidad ante los efectos de estrés asociados al cambio climático, es necesario definir a la vulnerabilidad en el contexto de este fenómeno. De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) la vulnerabilidad se refiere a “la propensión o predisposición a ser afectado negativamente; comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación” (IPCC, 2014). La vulnerabilidad no es una característica medible de un sistema sino un concepto que expresa la compleja interacción de los diferentes factores que determinan la susceptibilidad de un sistema a los impactos del cambio climático y que no existe una regla fija que defina cuáles son los factores por considerar, ni los métodos utilizados para cuantificarlos; por lo cual se habla de evaluar en vez de medir la vulnerabilidad (GIZ, 2016). Actualmente se han incrementado el desarrollo y uso de las evaluaciones de la vulnerabilidad ante el Cambio Climático (CC) en diversos sectores y campos de la sociedad que sirven como base para el desarrollo de estrategias de adaptación (Mamauag *et al.*, 2013). Estas evaluaciones de vulnerabilidad “brindan información sobre la naturaleza y las magnitudes de los impactos esperados del cambio climático e informan sobre las decisiones en torno a las formas y urgencias de las actividades y estrategias de adaptación” (Marshall *et al.*, 2009: 9).

Las evaluaciones de vulnerabilidad se enmarcan en modelos conceptuales, en este caso en modelos conceptuales de vulnerabilidad. Un modelo conceptual ilustra la complejidad de las interacciones involucradas en el análisis de la vulnerabilidad, haciendo hincapié en la variedad de factores y vínculos que potencialmente afectan a la vulnerabilidad del sistema humano-ambiental asociado (Turner *et al.*, 2003). Los modelos metodológicos con índices e indicadores permiten evaluar y comparar la vulnerabilidad de los ecosistemas; a lo cual Nguyen y colaboradores (2016) mencionan que el uso de estos indicadores de vulnerabilidad ante los impactos del CC en las costas pueden ayudar a identificar y priorizar regiones, sectores o grupos de la sociedad. Con la intención de lograr un manejo adaptativo, que se ajuste conforme mejora el entendimiento de un sistema, es indispensable realizar evaluaciones y dar seguimientos de la respuesta del sistema a las acciones de manejo (Maass *et al.*, 2010).

En cuanto a los arrecifes de coral, es un gran reto comprender cuál es exactamente la vulnerabilidad de estos ecosistemas ante los factores de estrés asociados al cambio climático (Wachenfeld *et al.*,

2007) ya que involucra componentes sociales y ecológicos, así como múltiples interacciones temporales y espaciales (Cinner *et al.*, 2012; Cinner *et al.*, 2016; Marshall *et al.*, 2009).

2.3. Los Sistemas Socio-Ecológicos (SSE) y la vulnerabilidad

Los factores de estrés asociados al cambio climático no sólo tienen consecuencias sobre los sistemas naturales o ecológicos, este fenómeno también afecta a los sistemas sociales (comunidades aledañas y dependientes de los ecosistemas). Por lo cual se define a los Sistemas Socio-Ecológicos (SSE); se considera a un SSE como un sistema social (y sus subsistemas y elementos) integrado a un sistema ecológico (y sus subsistemas y elementos), formando un conjunto inseparable, en el cual las relaciones recíprocas entre los componentes y subsistemas conducen la evolución del SES como un todo¹³. En la Figura 4 se presenta un ejemplo de modelo conceptual del SSE para identificar las interacciones recíprocas entre los pescadores y las especies de interés, así como al sistema socio-institucional y el sistema ecológico en el cual están inmersos; estas interacciones que a su vez están mediadas por los entornos sociales, económicos, políticos y ecológicos más amplios llevan a diversos resultados ecológicos y sociales (Leslie *et al.*, 2015).

Dentro de los enfoques de la vulnerabilidad, la vulnerabilidad de los SSE tiene como objetivo explicar la vulnerabilidad de los sistemas humanos y ambientales acoplados (Adger, 2006). Según Maina y colaboradores (2016), actualmente existe un vacío importante en la integración de las proyecciones climáticas y los análisis de vulnerabilidad socio-ecológica a escalas que son importantes, lo que ha afectado la planificación de la adaptación a escala local y sus acciones¹⁴. Actualmente, a nivel nacional, el concepto del SSE comienza a llegar al discurso político, como un modelo potencial para la gestión ambiental, ya que su aplicación parece prometer diversas ventajas; pero su puesta en práctica también presenta retos, y hasta ahora la gestión ambiental basada en sistemas socio-ecológicos no ha sido llevada a la práctica, mediante políticas públicas específicas¹³. En este trabajo se propone el análisis de la vulnerabilidad bajo este enfoque de SSE.

¹³ Challenger, Antony, Bocco, Gerardo, Equihua, Miguel, Chavero, Elena Lazos y Maass, Manuel (2014). "La aplicación del concepto del sistema socio- ecológico : alcances , posibilidades y limitaciones en la gestión ambiental de México". *Investigación Ambiental*, 6(2): 1-21

¹⁴ Maina, Joseph, Kithia, Justus, Cinner, Josh, Neale, Ezra, Noble, Sylvia, Charles, Daniel y Watson, James E. M. (2016). "Integrating social-ecological vulnerability assessments with climate forecasts to improve local climate adaptation planning for coral reef fisheries in Papua New Guinea". *Regional Environmental Change*, 16(3): 881-891.

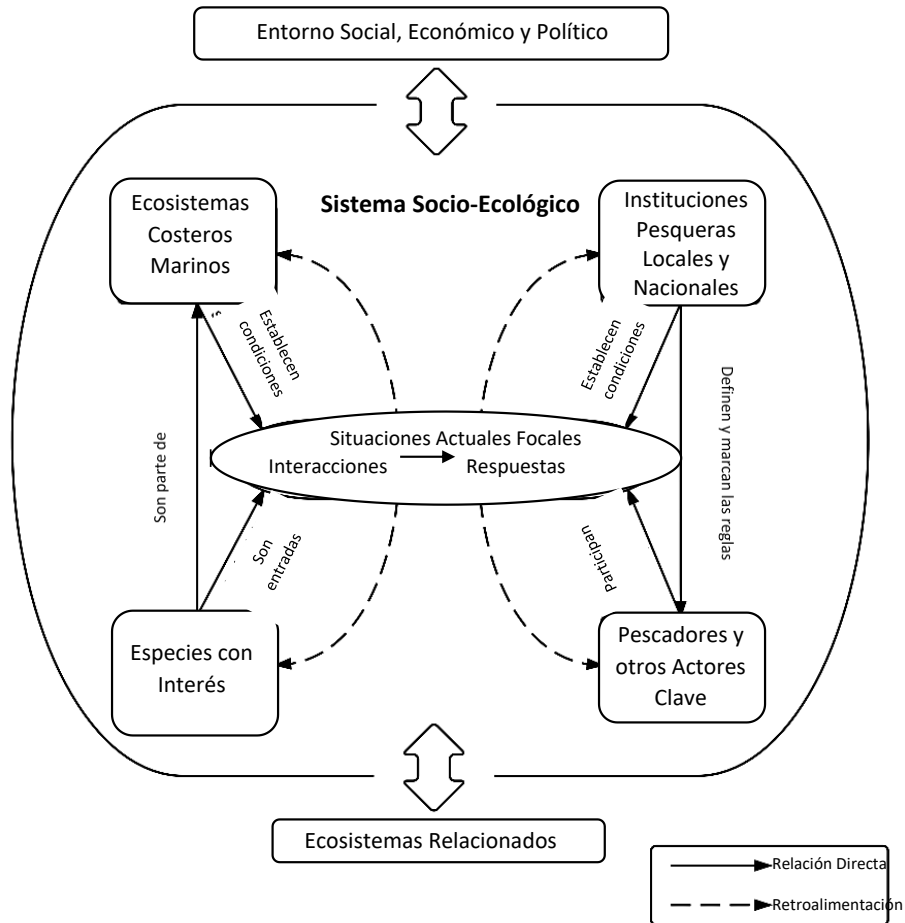


Figura 4. Modelo conceptual del SSE para pesquerías de pequeña escala y las especies de interés para Baja California Sur en donde se muestra la relación directa (flechas sólidas) y la retroalimentación (flechas punteadas) entre los subsistemas del sistema socio-ecológico y su entorno (Tomada de Leslie *et al.*, 2015).

Dado que los sistemas arrecifales son muy importantes en México y están siendo modificados por los efectos de las actividades humanas y el cambio climático, se plantearon las siguientes preguntas de investigación en esta tesis: ¿cuáles son elementos que se deben considerar en las evaluaciones de la vulnerabilidad socio-ecológicas de los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático?, ¿cuál ha sido la evolución de los modelos conceptuales y metodológicos para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes ante este cambio climático en el contexto internacional y nacional?, ¿cómo se conceptualiza la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes en México ante los factores de estrés asociados al CC?, ¿existen indicadores que permitan desarrollar un marco metodológico para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de estos ecosistemas ante estos factores de estrés asociados al CC? y si es así, ¿cómo es la

vulnerabilidad socio-ecológica ante los factores de estrés asociados al cambio climático de alguno de los sistemas arrecifales mexicanos?.

Para responder estos cuestionamientos, se plantearon los siguientes objetivos.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo general

Elaborar un modelo de evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático.

3.2. Objetivos particulares

1. Analizar la evolución de los modelos conceptuales y metodológicos para evaluar la vulnerabilidad (social, ecológica o ambas) de los arrecifes ante los factores de estrés asociados al cambio climático en el contexto internacional y nacional.
2. Identificar los índices e indicadores de exposición, sensibilidad y adaptación que se han desarrollado y aplicado en México para proponer un modelo metodológico teórico con indicadores que permita evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes ante este fenómeno.
3. Realizar un ejercicio de evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes coralinos del Caribe Mexicano (en Sian Ka'an y Mahahual) ante el incremento de la temperatura superficial oceánica por medio de índices de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación.

4. MÉTODO GENERAL

En el siguiente esquema metodológico se pueden observar las etapas para cumplir con los objetivos de esta tesis. Para el objetivo 1, se realizó una revisión de la literatura relacionada con los modelos para evaluar la vulnerabilidad social, ecológica (climática) o ambas de los arrecifes, la cual se llevó a cabo por medio de la metodología de Fink (2014) para revisiones de literatura en motores de búsqueda universales. La finalidad de esta revisión fue analizar la evolución de los modelos de vulnerabilidad social y ecológica de los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático, tanto en el contexto internacional como nacional. Para el objetivo 2, también se realizó un análisis documental de los índices e indicadores que se han desarrollado o aplicado a nivel nacional con el objetivo de adoptar un modelo conceptual de vulnerabilidad socio-ecológica ante este fenómeno y para proponer un modelo metodológico teórico con índices e indicadores que permitieran una evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático. Finalmente, para el objetivo 3 se realizó un ejercicio de evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica ante los factores de estrés asociados al cambio climático en un caso de estudio en el Caribe Mexicano (Mahahual y Sian Ka'an). La evaluación se desarrolló por medio de la selección de índices e indicadores socioeconómicos y

ecológicos disponibles y aplicables al modelo metodológico propuesto, el cual considera aspectos de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación.

Esquema metodológico general para cumplir con los tres objetivos específicos de esta tesis.

Objetivo general Elaborar un modelo de evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático					
Objetivo 1		Objetivo 2		Objetivo 3	
Método	Resultado	Método	Resultado	Método	Resultado
<u>Análisis documental</u> Bases datos: EBSCOhost Science Direct JSTOR Annual Reviews Springer Link PNAS Términos búsqueda: arrecife + vulnerabilidad + cambio climático Idiomas: español/inglés Años: 1997-2017	<u>Análisis descriptivo de la evolución de los modelos para evaluar la vulnerabilidad contexto:</u> • Internacional • Nacional	<u>Análisis documental</u> Bases datos: EBSCOhost Science Direct JSTOR Springer Link PNAS Google Académico Research.net Términos de búsqueda: sensibilidad + arrecifes + México; adaptación + arrecifes + México; y exposición + arrecifes + México Idiomas: español/inglés Años: 1997-2018	<u>Desarrollo modelo conceptual y modelo metodológico para evaluar la vulnerabilidad</u>	<u>Recolección de datos para calcular la vulnerabilidad en caso de estudio</u> Búsqueda de valores índices: Exposición Sensibilidad Capacidad Adaptación	<u>Valores de la vulnerabilidad socio-ecológica</u> En: • Mahahual • Sian • Ka'an

5. RESULTADOS

5.1. CAPÍTULO 1. De la evaluación ecológica a la socio-ecológica: la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático

Mariana Reyna-Fabián, Alejandro Espinoza-Tenorio, Georges Seingier, Leonardo Ortiz-Lozano e Ileana Espejel

Capítulo publicado en *Sociedad y Ambiente*, 17: 59-92. Disponible en: <http://revistas.ecosur.mx/sociedadambiente/index.php/sya/article/view/1840>

Resumen

La degradación de los arrecifes de coral ha evidenciado su vulnerabilidad ante los factores de estrés asociados al cambio climático. Se presenta una panorámica de la evolución de los modelos conceptuales y metodológicos para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático, a través de una revisión de las publicaciones científicas especializadas resultantes de estas bases de datos bibliográficas: EBSCOhost, Science Direct, JSTOR, Annual Reviews, Springer Link y PNAS con los términos específicos de búsqueda: arrecife, vulnerabilidad y cambio climático (español e inglés). Se observó una tendencia al aumento en el número de autores, instituciones y países por publicación, siendo Oceanía la región con mayor número de estos trabajos. Los primeros modelos para evaluar la vulnerabilidad climática de estos ecosistemas sólo incorporan sus elementos ecológicos; actualmente la mayoría incorpora sus elementos socio-ecológicos. En México, se encontró este tipo de modelos en reportes, informes, manuales y capítulos de libro; la mayoría presentan modelos metodológicos para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de estos ecosistemas y están enfocados principalmente a la capacidad de adaptación en las áreas naturales protegidas; también se observa la colaboración entre diversas instituciones gubernamentales, de la sociedad civil —nacionales e internacionales— y académicas.

Palabras clave: vulnerabilidad socio-ecológica; modelos conceptuales; modelos metodológicos; evaluación de la vulnerabilidad

5.1.1. Introducción

Los arrecifes son ecosistemas con una alta riqueza de especies, lo cual crea una compleja trama de relaciones interespecíficas (Pérez-España *et al.*, 1996). Por su parte, los arrecifes de coral se encuentran entre los ecosistemas más diversos y productivos del planeta y al mismo tiempo de los

más amenazados a nivel global y que en el ambiente marino pueden sufrir un colapso debido al cambio climático (Mumby y Steneck, 2008), mantienen cerca de una tercera parte de todas las especies marinas descritas y sólo ocupan un área relativamente pequeña, sólo el 2% del océano¹ (Reaka-Kudla, 2005); además de su importancia ecológica, los arrecifes de coral proveen de una gran cantidad de bienes y servicios a la sociedad (UNEP, 2006).

En México, los arrecifes de coral se ubican en el Sistema Arrecifal Mesoamericano (Mar Caribe), el cual es la segunda barrera arrecifal más grande del mundo; en el Pacífico, a través de diferentes formaciones coralinas (Sarukhán *et al.*, 2009), y en el Corredor Arrecifal del Suroeste del Golfo de México (Ortiz-Lozano *et al.*, 2013). En general, los arrecifes del Caribe se encuentran entre los ecosistemas marinos más impactados pues en esta región se ha reportado una pérdida de cobertura de coral de 40-50% (Halpern *et al.*, 2008). En otras regiones de México se reporta una pérdida de cobertura de 50% inicial a casi 20% de cobertura final entre 1970 y 2010 (Jackson *et al.*, 2014).

La degradación de estos ecosistemas y su relación con los factores asociados al cambio climático global incluye: el aumento de la acidificación del océano (Madin *et al.*, 2012; Wilkinson, 2008); el aumento del nivel medio del mar (Cinner *et al.*, 2016); el incremento en la temperatura del agua del mar (Chen *et al.*, 2015) y su relación con el blanqueamiento del coral (Selig *et al.*, 2010); los cambios en las tasas de precipitación pluvial (Pramova *et al.*, 2013); y el aumento en la frecuencia e intervalo de las tormentas tropicales (De'ath *et al.*, 2012).

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, por su acrónimo en inglés) la vulnerabilidad se refiere a la predisposición a que un individuo o sociedad sea afectado negativamente, lo que involucra una variedad de elementos que incluyen, entre otros, la sensibilidad o susceptibilidad al daño, la exposición y la capacidad de adaptación (IPCC, 2014). Por su parte, las evaluaciones de vulnerabilidad “brindan información sobre la naturaleza y las magnitudes de los impactos esperados del cambio climático e informan sobre las decisiones en torno a las formas y urgencias de las actividades y estrategias de adaptación” (Marshall *et al.*, 2009: 9).

En cuanto a los arrecifes de coral, es un gran reto comprender cuál es exactamente la vulnerabilidad de estos ecosistemas ante los factores de estrés asociados al cambio climático (Wachenfeld *et al.*, 2007) ya que involucra componentes sociales y ecológicos, así como múltiples interacciones temporales y espaciales (Cinner *et al.*, 2012; Cinner *et al.*, 2016; Marshall *et al.*, 2009). Por ello, el objetivo de este trabajo es presentar una panorámica de la evolución de los modelos conceptuales y metodológicos para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático.

Conceptualmente el modelo más reciente y holístico para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante el cambio climático —vulnerabilidad climática— es el de Cinner *et al.* (2013b) mostrado en la Figura 1. Éste evolucionó del modelo de Marshall *et al.* (2009) y presenta dos

dimensiones: la dimensión ecológica (recuadro café) y la dimensión socioeconómica (recuadro naranja), reconociendo la retroalimentación de ambas dimensiones (flecha azul). En la dimensión ecológica, la exposición y la sensibilidad crean un impacto potencial ecológico; este impacto, junto con la recuperación potencial, representan la vulnerabilidad ecológica; ésta, junto con la sensibilidad social, representan el impacto potencial social y éste, junto con la capacidad de adaptación social, determina la vulnerabilidad socio-ecológica.

En este trabajo se aborda la vulnerabilidad socio-ecológica como aquella que incorpora la dimensión ecológica —componentes biológicos de los arrecifes— junto con la dimensión social —componentes socioeconómicos de las comunidades humanas dependientes o aledañas a los arrecifes— y que reconoce estas dos dimensiones como interdependientes, además de la complejidad de los procesos y dinámicas que se retroalimentan entre las dos dimensiones. También se define la vulnerabilidad ecológica como aquella que aborda sólo los componentes biofísicos de estos sistemas y la vulnerabilidad social la que considera únicamente los componentes socioeconómicos.

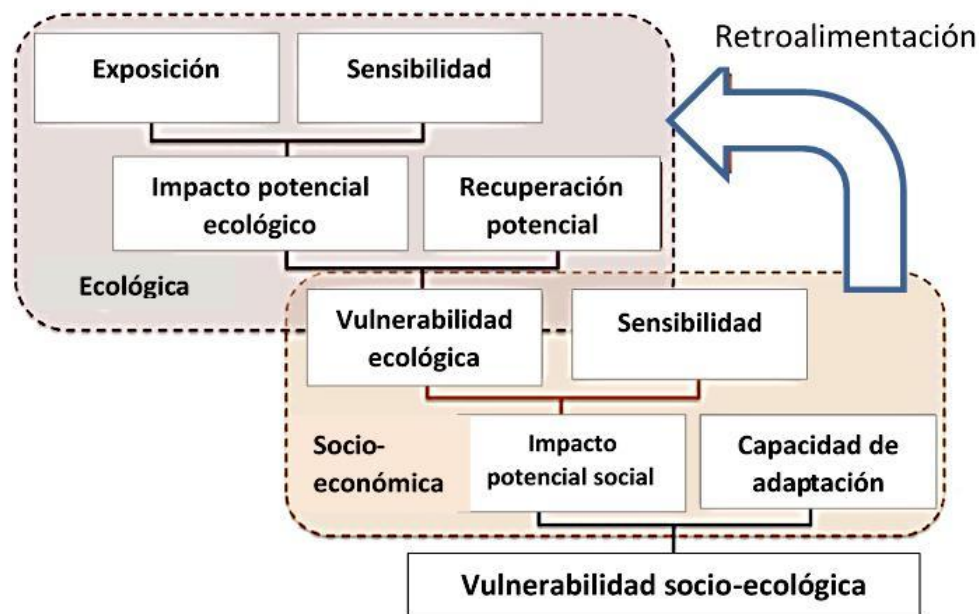


Figura 1. Modelo conceptual que muestra la codependencia entre las dimensiones ecológica y socioeconómica de un sistema arrecifal (modificado de Cinner *et al.*, 2013b).

Este tipo de modelos conceptuales (Figura 1) permiten visualizar los elementos y su relación de vulnerabilidad. Por su parte, los modelos metodológicos proponen índices e indicadores que sintetizan los múltiples aspectos de la vulnerabilidad para identificar las áreas más susceptibles a los cambios ambientales (Abson *et al.*, 2012). La evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica de estos ecosistemas ante los factores de estrés asociados a este fenómeno es un tema de

investigación urgente en general, y se considera relevante a nivel nacional por la importancia de sus arrecifes coralinos.

Las preguntas de investigación que se plantearon son: 1) ¿cuál es la panorámica de la evolución de los modelos conceptuales y metodológicos para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes ante los factores de estrés asociados al cambio climático?, 2) ¿cuáles son los elementos de la vulnerabilidad climática que incorporan este tipo de modelos?, 3) ¿qué tipos de modelos (conceptuales, metodológicos o ambos) se desarrollan o adoptan para evaluar esta vulnerabilidad climática en estos ecosistemas?, 4) ¿quiénes y cuáles son los principales investigadores y regiones que desarrollan o adaptan estos modelos de vulnerabilidad climática de los arrecifes coralinos? y 5) ¿cuál ha sido la evolución de estos modelos para evaluar la vulnerabilidad climática de los arrecifes coralinos en México?.

5.1.2. Métodos

La revisión de la literatura relacionada con los modelos para evaluar la vulnerabilidad climática de los arrecifes se llevó a cabo por medio de la metodología de Fink (2014), quien propone los siguientes siete pasos: Paso 1, seleccionar la pregunta de investigación; Paso 2, seleccionar las bases de datos bibliográficas; Paso 3, seleccionar los términos de búsqueda; Paso 4, aplicar los criterios de selección prácticos; Paso 5, aplicar los criterios de selección metodológicos; Paso 6, realizar la revisión y Paso 7, sintetizar los resultados. En la Figura 2, se observan los pasos de esta metodología seguidos en este trabajo.

En el Paso 2, las bases de datos fueron consultadas en julio de 2016; éstas se seleccionaron, principalmente, debido a su disponibilidad de acceso a través del Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica (Conricyt) del Conacyt en la que diversas instituciones de educación superior y centros de investigación tienen acceso, también por disponibilidad en la red. Para el Paso 3, los términos específicos de búsqueda se definieron con relación a las preguntas de investigación. El Paso 4 describe el criterio de selección práctica (Criterio 1), en a) inglés y español con la finalidad de encontrar trabajos relacionados con el tema en el contexto internacional y nacional, y b) periodo de tiempo, de 1997 a 2016, para incluir literatura actual. Para el Paso 5, o criterios de selección metodológicos, se aplicaron dos de éstos; el Criterio 2 permitió descartar los trabajos que no especificaran en su título, resumen o palabras clave los términos específicos de búsqueda; en el Criterio 3 se revisó, de manera rápida, todo el texto para poder seleccionar únicamente trabajos que incorporaran modelos conceptuales o metodológicos para evaluar la vulnerabilidad de estos ecosistemas ante los factores de estrés asociados al cambio climático. El Paso 6 incluye la revisión detallada de los trabajos obtenidos por medio de los pasos previos y éste permitió incorporar otros nuevos obtenidos de las referencias de dichos productos. Los trabajos obtenidos hasta este paso se clasificaron en dos tipos de literatura; los publicados en revistas indizadas y aquellos que aparecen en otras fuentes. Finalmente, la síntesis descriptiva de la

literatura (Paso 7) consistió en identificar las posibles respuestas a las preguntas de investigación de este trabajo.

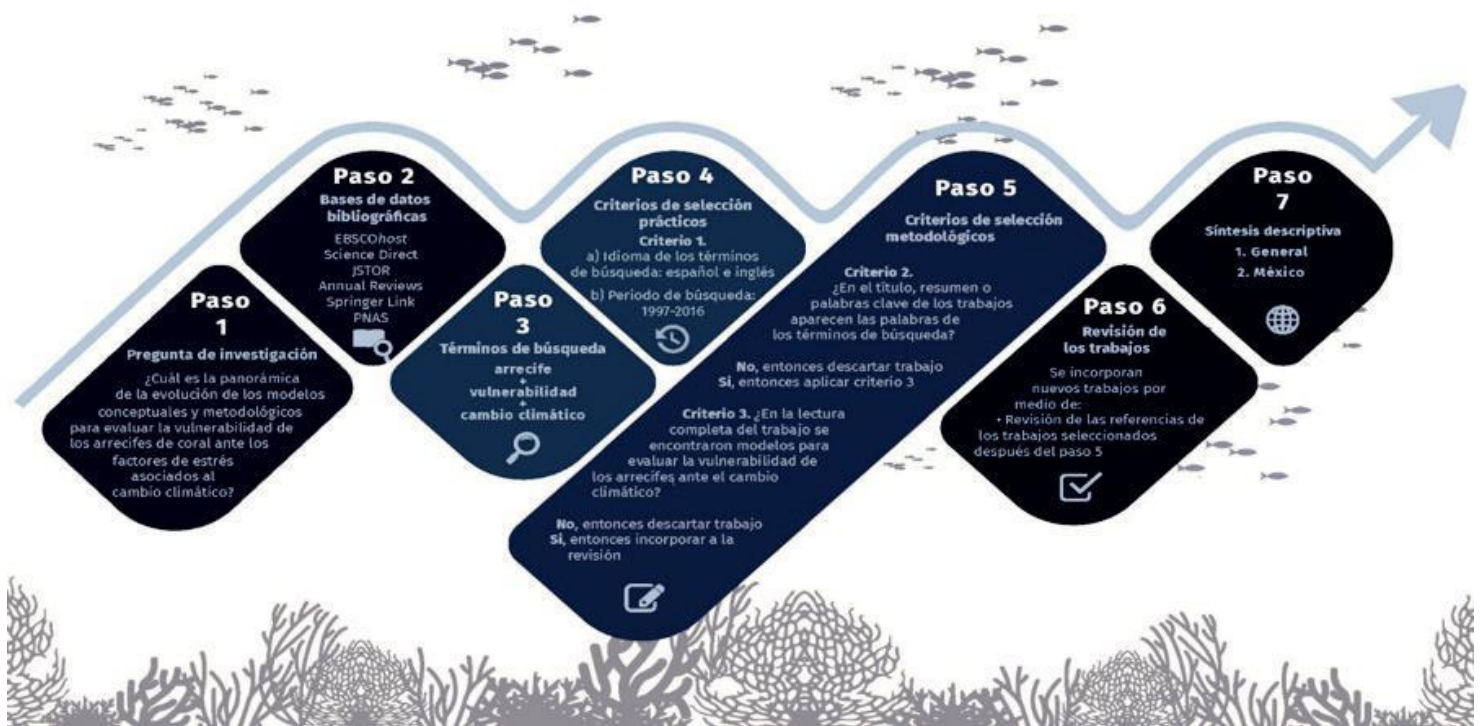


Figura 2. Pasos y criterios aplicados para el análisis de la revisión de la literatura relacionada con la evaluación de la vulnerabilidad de los arrecifes coralinos ante los factores de estrés asociados al cambio climático (elaboración propia en base a Fink, 2014).

5.1.3. Resultados y discusión

Los trabajos encontrados después del Criterio 1 sumaron 4 395 y se trataba de artículos de investigación y de revisión, reportes, informes, libros, capítulos de libros y notas o comentarios de editores. Después de aplicar el Criterio 2, se redujo esa cantidad a 188 trabajos —incluidos en el recurso electrónico—; posterior a la aplicación del Criterio 3 y Paso 6, se seleccionaron 36 trabajos publicados en revistas indizadas (Anexo I) y 18 publicaciones en otras fuentes a manera de reportes, informes, manuales y capítulos de libros (Anexo II). En total se analizaron 54 publicaciones que cumplieron con los tres criterios de selección. Los trabajos del Anexo i presentan las 27 diferentes revistas indizadas que los publicaron, siendo las revistas con un mayor número de publicaciones: *Regional Environmental Change* (4) y *Global Change Biology* (3). Los objetos de estudio con mayor número de publicaciones fueron los arrecifes como ecosistema

(33%), seguidos por los peces arrecifales (22%), los corales (20%) y las comunidades humanas aledañas o dependientes de los arrecifes (13%).

Los trabajos que aparecen en otras fuentes se presentan en el Anexo II y algunos fueron publicados por asociaciones civiles como la World Wildlife Foundation (WWF), el Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (FMCN), The Nature Conservancy (TNC) y el World Resource Institute (WRI); así como por instituciones gubernamentales como la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (Conanp), el Instituto Nacional de Ecología (INE), el Parque Marino de la Gran Barrera de Australia del Gobierno de Australia y el Ministerio Federal para el Ambiente, la Conservación de la Naturaleza y Seguridad Nuclear de Alemania, la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y Agricultura (FAO), por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal) y por la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (IUCN). De éstos, los principales objetos de estudio se dirigen a los arrecifes coralinos (61%) y a las áreas naturales protegidas (28%).

5.1.3.1 Evolución de los modelos para evaluar la vulnerabilidad climática de los arrecifes de coral

En la Figura 3 se observa el porcentaje de publicaciones relacionadas con los tipos de vulnerabilidad —ecológica, social o socio-ecológica— y el porcentaje del elemento de la vulnerabilidad al que se refieren. En a) se observan los trabajos publicados en revistas indizadas (Anexo I), en donde se observa el mismo porcentaje para los trabajos dirigidos a evaluar la vulnerabilidad ecológica y los de vulnerabilidad socio-ecológica (42%) y 16% de la vulnerabilidad social. En b) a los trabajos publicados en otras fuentes (Anexo II), la mayoría se enfoca a la vulnerabilidad socio-ecológica (72%), seguidos por los de vulnerabilidad ecológica (22%) y 6% por los de vulnerabilidad social.

5.1.3.2. Modelos de vulnerabilidad ecológica

En los primeros años, 1997-2007, los trabajos presentan modelos que evalúan la vulnerabilidad climática únicamente desde la dimensión ecológica. Sin embargo, los trabajos en las revistas indizadas se han publicado en mayor porcentaje desde esta dimensión (42%) en comparación con las publicaciones de otras fuentes (22%). Como ejemplo, Done (1999) hace referencia a la vulnerabilidad de las comunidades de coral presentando un modelo conceptual que muestra las formas en las que dichas comunidades podrían responder a estresores ambientales que incrementarían en los escenarios de cambio climático. Las respuestas hacen referencia a las transformaciones en las comunidades coralinas e incluyen desde los cambios menores o la tolerancia —aclimatación de los organismos a nuevas circunstancias— hasta las transformaciones mayores —cambios de fase o reemplazo de grupos funcionales—. Como se mencionó anteriormente, este tipo de modelos de evaluación de la vulnerabilidad climática no reconoce la interdependencia de las dos dimensiones del sistema ni su complejidad. Algunos trabajos recientes que evalúan este tipo de vulnerabilidad son los de Lawton *et al.* (2012) y Parravicini *et al.* (2014).

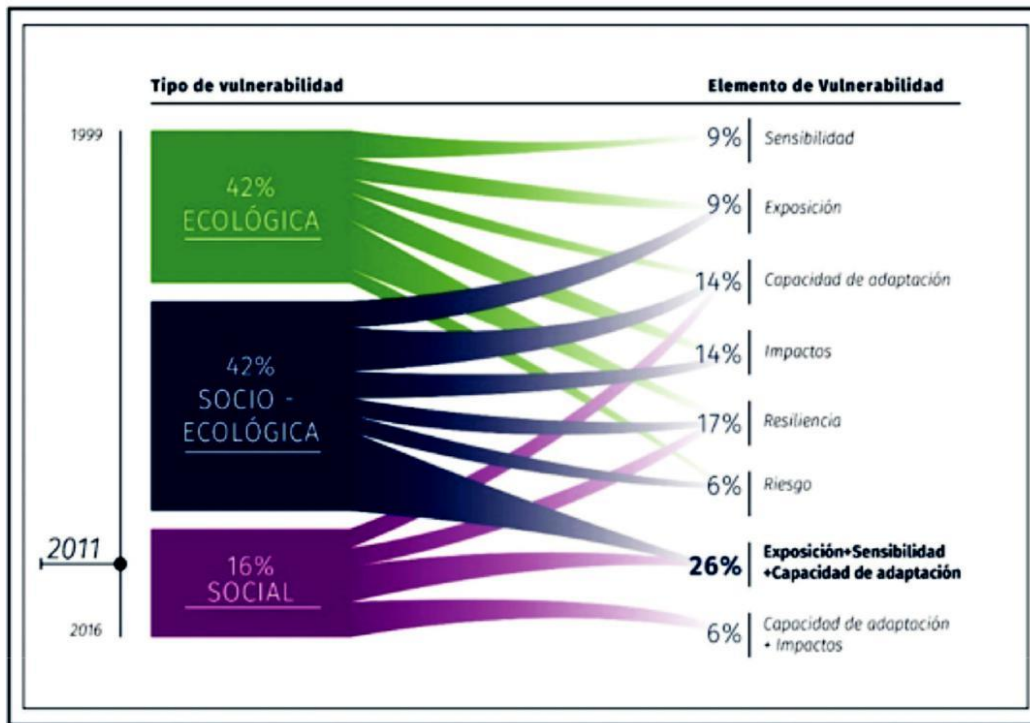
5.1.3.3. Modelos de vulnerabilidad social

La mayoría de las publicaciones que evalúan la vulnerabilidad desde la dimensión socio-económica se enfocan en la vulnerabilidad de las actividades económicas; destacando las pesquerías y el turismo. Como ejemplo, el trabajo presentado por Marshall *et al.* (2013), dirigido a evaluar la vulnerabilidad de dos actividades económicas importantes para las comunidades asociadas a los arrecifes en la Gran Barrera de Coral en Australia —pesca y turismo— ante los eventos climatológicos extremos asociados al cambio climático. Otros trabajos recientes clasificados dentro de esta perspectiva económica son los de Biggs *et al.* (2015), Holbrook y Johnson (2014) y Tapsuwan y Rongrongmuang (2015). El trabajo de Grasso y colaboradores (2014) presenta un índice de vulnerabilidad social para Samoa construido con la participación de grupos de interés de la comunidad ante eventos asociados al cambio climático. Otro trabajo similar dentro de esta perspectiva de participación social es el de Khan y Vincent (2015).

5.1.3.4. Modelos de vulnerabilidad socio-ecológica

A partir del 2008 comienzan los trabajos dirigidos a evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de coral ante el cambio climático; a partir de este año se observa una constancia anual y la tendencia del uso de este tipo de modelos. El porcentaje de trabajos que se publican en revistas indizadas es menor (42%) al número de estudios de este tipo publicados en otras fuentes (72%) (Figura 3). Esto podría asociarse al primer trabajo que propone un marco conceptual para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica presentado por Marshall *et al.* (2009); forma parte del Anexo II y reconoce la codependencia de las dimensiones social y ecológica y a su vez está basado en el modelo de vulnerabilidad ante el cambio climático del IPCC (IPCC, 2007). Después de este trabajo, el número de publicaciones de este tipo aumentó considerablemente y ha sido citado por otros publicados en revistas indizadas (Cinner *et al.*, 2012; Cinner *et al.*, 2013a; Cinner *et al.*, 2013b; Hernández-Delgado, 2015; Holbrook y Johnson, 2014; Marshall *et al.*, 2013).

a)



b)

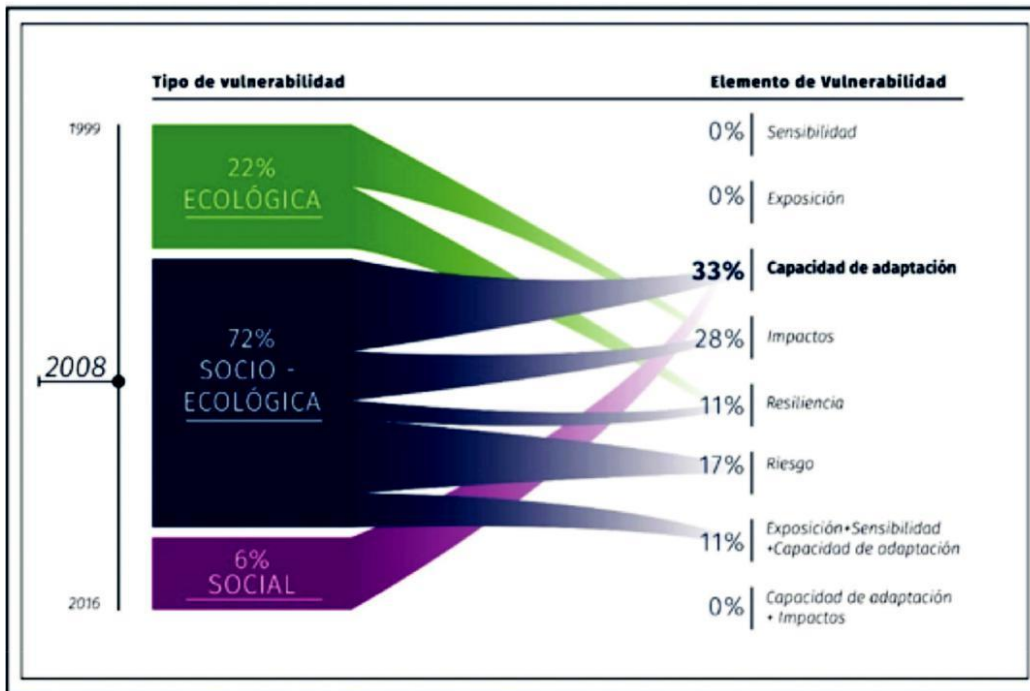


Figura 3. Porcentajes de los tipos y elementos de la vulnerabilidad que abordan los trabajos analizados en este trabajo, En a) se presentan los trabajos publicados en revistas indizadas y en b) los trabajos publicados en otras fuentes (manuales, reportes, informes o capítulos de libro) (elaboración propia).

La importancia de estos modelos radica en reconocer los sistemas como sistemas socio-ecológicos (SSE), ante lo cual Ostrom (2009) menciona que los recursos utilizados por el humano están embebidos en SSE complejos. Además, se ha señalado que los modelos conceptuales que integran los SSE permiten alcanzar metas de sustentabilidad que benefician tanto a las sociedades humanas como a la naturaleza, y que integran además información de diversas disciplinas naturales y sociales con el fin de proporcionar un medio teóricamente fundamentado para probar hipótesis sobre las dinámicas y las implicaciones de las interacciones socio-ecológicas (Leslie *et al.*, 2015).

5.1.3.5. Elementos para evaluar la vulnerabilidad climática de los arrecifes coralinos

En la Figura 3, en a) se encontró que, la mayoría de los artículos publicados en revistas indizadas, incorporan los tres elementos de la vulnerabilidad: sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación (27%), seguidos de los trabajos que abordan sólo la resiliencia (18%), la capacidad de adaptación e impactos (15% cada uno), la sensibilidad y la exposición (9% cada uno), y finalmente la exposición y al riesgo (6% cada uno). En cambio, en b) se observa que la capacidad de adaptación es el elemento más recurrente (33%), seguido por los impactos (28%), el riesgo (17%), los tres elementos —sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación— y la resiliencia (11% cada uno).

El primer trabajo cuyo objetivo es evaluar la vulnerabilidad climática con sus tres elementos es nuevamente el de Marshall *et al.*, 2009; su definición de vulnerabilidad utilizada está basada en el IPCC y menciona que “la vulnerabilidad está dada en función del tipo, la magnitud y la tasa de variación climática a la que un sistema está expuesto, así como de la sensibilidad y capacidad de adaptación de dicho sistema” (Marshall *et al.*, 2009: 5). A partir de 2012 se observan numerosas publicaciones en revistas indizadas que evalúan los tres elementos de la vulnerabilidad (por ejemplo, Hughes *et al.*, 2012; Johnson y Welch, 2016; Licuanan *et al.*, 2015).

Sin embargo, en los primeros años (1997-2007) todos los trabajos evalúan la vulnerabilidad climática desde el enfoque de sólo uno de sus elementos —o de sus temas relacionados— y la mayoría están enfocados en mostrar aspectos de la resiliencia ecológica. En un ejemplo, Bellwood *et al.* (2004) analizan la resiliencia de los arrecifes de coral ante los cambios de fase, o de estado, de comunidades coralinas a comunidades de algas filamentosas ante los factores relacionados con las actividades humanas —pesca, exceso de nutrientes y contaminación— y con los efectos del cambio climático, como el blanqueamiento de coral. En esta investigación se encontraron seis trabajos de resiliencia ecológica. Otras dos publicaciones abordan la resiliencia desde la dimensión social (Anthony *et al.*, 2015; Biggs *et al.*, 2015).

Las producciones que incorporan sólo la capacidad de adaptación son abordadas principalmente desde la dimensión social, es decir, evidencian la capacidad de adaptación de las comunidades y de las industrias asociadas a los arrecifes de coral. Por ejemplo, en Bohensky y colaboradores

(2010) se muestra la percepción de la capacidad de adaptación y de la política de adaptación en las comunidades pesqueras de Queensland (Australia) por medio de encuestas a pescadores y a sus familias. Otras dos publicaciones se enfocan en este elemento; son las de Evans *et al.* (2013) y Khan y Vincent (2015).

Por otro lado, Doney y sus colaboradores (2012) presentan una revisión de la literatura sobre los impactos del cambio climático en los ecosistemas marinos. En cuanto a los arrecifes resaltan la importancia que tienen los impactos del cambio climático sobre estos ecosistemas debido a que la cuarta parte de todas las especies marinas están asociadas a ellos. Cinner *et al.* (2016) identifican las múltiples vías de impacto dentro de los sistemas socio-ecológicos de los arrecifes de coral que surgen de cuatro fuerzas motrices clave: la temperatura superficial del océano, las tormentas, el aumento del nivel del mar y la acidificación del océano: este modelo conceptual está dirigido a la investigación del impacto del cambio climático en los sistemas socio-ecológicos que ayuda a identificar los diversos impactos que deben ser considerados con el fin de desarrollar una comprensión más completa de los impactos del cambio climático, así como para desarrollar acciones de manejo dirigidas a mitigar estos impactos en los arrecifes de coral y en las comunidades. Se encontraron otros dos trabajos importantes enfocados a los impactos y son los de McLeod *et al.* (2010) y Selkoe *et al.* (2009).

Para el tema de riesgo, hay un trabajo que presenta un modelo conceptual que estima el riesgo de extinción de los peces arrecifales con relación a disturbios del cambio climático —blanqueamiento del coral y mortalidad— y que predice la vulnerabilidad de una población de peces arrecifales, con la extinción de éstos después de un disturbio climático —índice de vulnerabilidad climática— en las Islas Seychelles (Graham *et al.*, 2011). Dos trabajos reportan índices de riesgo para distintas naciones con arrecifes de coral y para el Indo-Pacífico; los principales riesgos y amenazas de los arrecifes a este fenómeno incluyen a los eventos de blanqueamiento de coral masivos y la reducción en las tasas de crecimiento del coral (Burke *et al.*, 2012; Burke *et al.*, 2011).

Finalmente, son muy pocos los trabajos que se enfocan sólo en uno de los elementos de la vulnerabilidad: la sensibilidad (Maina *et al.*, 2008; McClanahan *et al.*, 2014) y la exposición (Hereher, 2016; Maina *et al.*, 2011). Esto puede estar determinado por las palabras clave o términos de búsqueda específicos utilizados al indagar en las bases de datos y no significa que no se publiquen trabajos asociados a estos elementos de la vulnerabilidad y a los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático.

Un trabajo que evalúa la vulnerabilidad climática desde una perspectiva diferente a todas las anteriores es el de Madin *et al.* (2008), quienes desde los componentes mecánicos de los arrecifes utilizaron una ecuación que medía la velocidad máxima del agua que una colonia de coral puede resistir en las Islas Lagartijas de Australia antes de desagregarse durante un disturbio climático

intenso, y muestran cómo está vulnerabilidad climática está en función de la forma de la colonia y de la velocidad del agua.

5.1.3.6. Modelos conceptuales y metodológicos para evaluar la vulnerabilidad climática de los arrecifes de coral

En general, la mayoría de los trabajos presentan un modelo metodológico —con índices o indicadores—seguido por los modelos conceptuales, pero pocos presentan ambos modelos. Sería interesante desarrollar modelos conceptuales a nivel local que permitieran identificar los elementos de vulnerabilidad climática con sus implicados y las particularidades de estos sistemas socioecológicos con la finalidad de establecer medidas de adaptación o mitigación. Por su parte la aplicación de los modelos metodológicos que proponen índices e indicadores sirve para hacer comparaciones de la vulnerabilidad climática de estos sistemas a diversas escalas —local, regional y mundial—.

Un modelo metodológico interesante exhibe un procedimiento que correlaciona las variables físicas presentes cuando sucede un evento de blanqueamiento masivo y de mortalidad en los corales con el fin de predecir qué variables se correlacionan con este evento, éstas incluyen las corrientes superficiales, velocidad del viento, temperatura superficial del océano, radiación UV, radiación fotosintéticamente activa y concentración de clorofila a (Maina *et al.*, 2008). En 2011 proponen un modelo metodológico similar para evaluar la exposición de los corales, a nivel global y regional, ante los factores de estrés relacionados a las variables de radiación (SST, anomalías de SST, luz UV y velocidad del viento), las variables que refuerzan el estrés (clorofila a y materia total suspendida) y las variables que lo reducen (variabilidad SST y rango mareal); así el estrés por radiación es el factor que mayor influencia tiene sobre los corales (Maina *et al.*, 2011). Otro modelo de este tipo plantea una herramienta para evaluar la vulnerabilidad con la finalidad de identificar los impactos del cambio climático en las áreas costeras y buscar medidas de adaptación ante estos impactos; está construido mediante preguntas dirigidas a personas no especializadas en el tema para obtener los elementos de la vulnerabilidad para diversos ecosistemas y para los arrecifes de coral (Licuanan *et al.*, 2015).

Cinner *et al.* (2013b) presentan un modelo conceptual para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica ante el impacto del blanqueamiento del coral en pesquerías junto con un modelo metodológico representado por el índice de vulnerabilidad socio-ecológica; este modelo ha sido modificado por Wolff y colaboradores (2015) para añadir un elemento de inequidad entre las emisiones de gases de efecto invernadero por país y sus efectos en los países con arrecifes de coral. Otro trabajo que presenta estos dos tipos de modelos, dirigido a evaluar la vulnerabilidad de los ecosistemas costeros en los trópicos ante el cambio climático, es propuesto como modelo VATURE y presenta tres componentes: pesquero, de ecosistemas arrecifales y socio-económico; se aplicó en dos sitios de Filipinas con la participación de la comunidad y personal local para

determinar su vulnerabilidad climática y su metodología promueve la participación local en el desarrollo de la evaluación de la vulnerabilidad que les confiere la oportunidad de escalar sus esfuerzos a los niveles de gobierno (Mamauag *et al.*, 2013).

5.1.3.7. Investigadores y regiones destacadas

Las investigaciones en cambio climático requieren de equipos multi o interdisciplinarios, por lo que las publicaciones son de multiautores. Esto es evidente en los resultados de esta investigación ya que se encontró que se ha incrementado el número de colaboradores e instituciones en los artículos de revistas indizadas (Anexo I); por ejemplo, del 1999 al 2007 el número de colaboradores máximo fue de cuatro (Bellwood *et al.*, 2004) y a partir del 2010 se observa una mayor participación de autores, instituciones y países. Por ejemplo, el trabajo de Anthony *et al.* (2015) tiene 29 colaboradores de siete países (Australia, Estados Unidos de América, Fiji, Polinesia Francesa, Suecia, Kenia y Tailandia) y 21 instituciones de investigación, educación, gobierno y organizaciones de la sociedad civil. En el estudio de Cinner *et al.* (2016) participaron 25 colaboradores de seis países (Australia, Estados Unidos de América, Canadá, Islas Salomón, Francia y Reino Unido) de institutos relacionados con Ciencias de la Atmósfera, Biología, Oceanografía, Geografía, y Sustentabilidad.

En la Figura 4 se observan los autores con mayor número de publicaciones relacionados con este tema, el país y el sitio de adscripción de cada uno, así como el número de trabajos publicados. Los autores con mayor número de publicaciones en revistas indizadas se encuentran en Australia, excepto tres de ellos que están en Estados Unidos de América. El autor con mayor número de trabajos es McClanahan, adscrito a la asociación civil Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre en los Estados Unidos de América (ocho trabajos), seguido de los investigadores Cinner y Graham, con seis trabajos cada uno y ambos adscritos al Centro de Excelencia de Estudios de Arrecifes de Coral de la Universidad James Cook en Queensland, Australia. En cuanto a las zonas de estudio de las publicaciones en revistas indizadas, la mayoría de ellas se dirigen a Australia, la Gran Barrera de Coral, y Oceanía (30%); le sigue la región del Indo-Pacífico, con 22% y 7% para la región del Caribe.

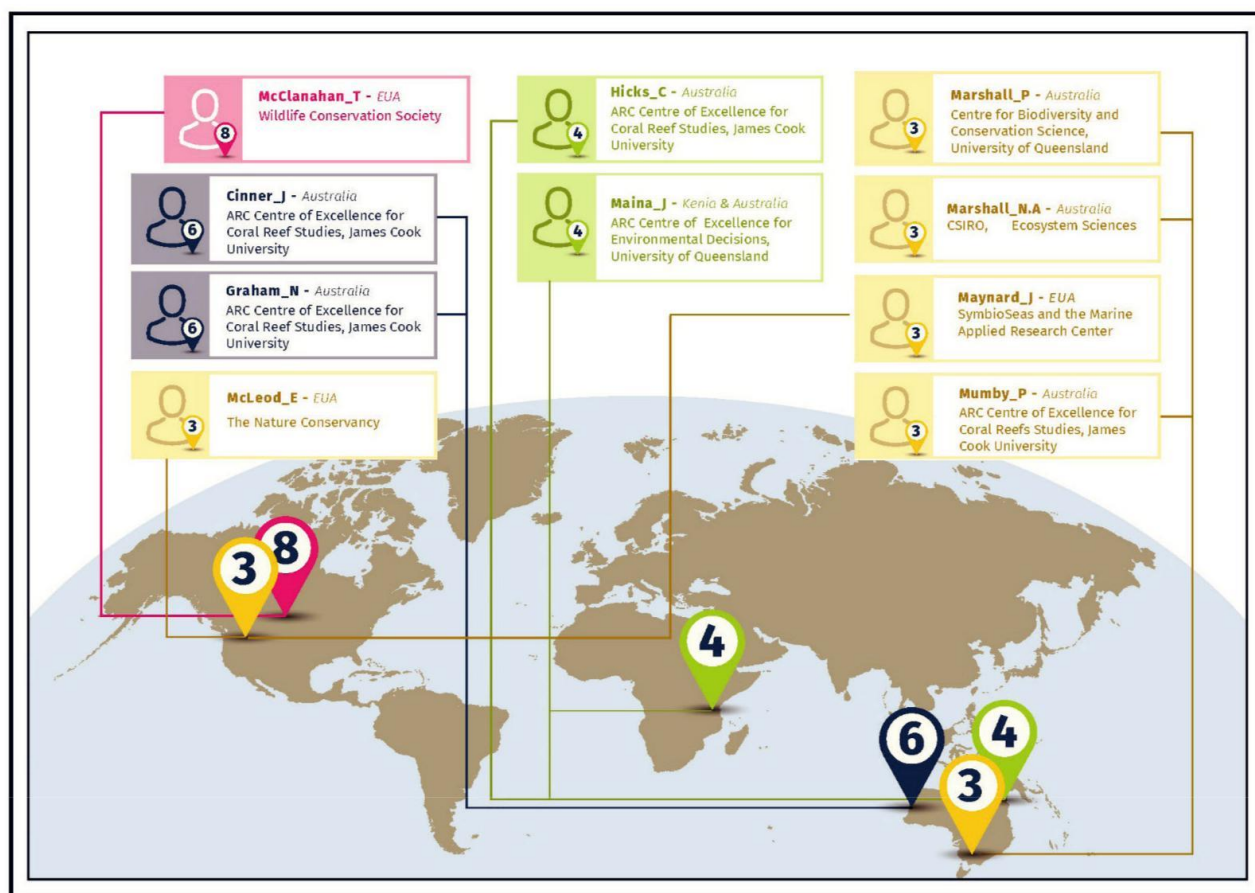


Figura 4. Principales investigadores que publican en revistas indizadas acerca de los modelos para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante el cambio climático (elaboración propia).

5.1.3.8. Contexto mexicano en los modelos para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante el cambio climático

En el Cuadro 1 se observa que las publicaciones con modelos para evaluar la vulnerabilidad climática de los arrecifes en México datan del año 2008, y se presentaron en forma de reportes, informes, manuales, capítulos de libro y un artículo publicado en una revista indizada (resaltado en gris). Al igual que los trabajos a nivel mundial, se observa que la mayoría presentan modelos para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica; esto es de gran importancia pues se sigue la tendencia de reconocer las dos dimensiones de la vulnerabilidad como interdependientes y que se retroalimentan. Tres trabajos abordan la vulnerabilidad desde la perspectiva ecológica (Blanchon

et al. 2010; INE, UNAM y Semarnat, 2008; Ponce-Vélez *et al.*, 2011), mientras que sólo uno evalúa la dimensión socio-económica (Conanp y GIZ, 2014).

Tipo de vulnerabilidad	Autor, año	Elemento de la vulnerabilidad	Tipo de modelo	Objeto de estudio	Colaboradores	Tipo de trabajo	Idioma
Ecológica	INE, UNAM y Semarnat, 2008	Impactos	Metodológico	Coral	55	Informe	Español
	Blanchon <i>et al.</i> , 2010	Impactos	Metodológico	Arrecifes de coral	4	Capítulo de libro	Español
	Ponce-Vélez <i>et al.</i> , 2011	Impactos	Metodológico	Arrecifes de coral	3	Capítulo de libro	Español
Socio-ecológica	Padilla <i>et al.</i> , 2010	Riesgo	Conceptual	Arrecifes de coral	3	Capítulo de libro	Español
	Martínez <i>et al.</i> , 2011	Riesgo	Metodológico	Peces arrecifales	3	Artículo en revista indizada	Inglés
	March <i>et al.</i> , 2011	Capacidad de adaptación	Metodológico	ANP	33	Reporte	Español
	Conap-FMCN-TNC, 2011	Capacidad de adaptación	Metodológico	ANP	38	Reporte	Español
	Cepal, 2012	Impactos	Metodológico	Arrecifes de coral	22	Reporte	Español
	Conanp-CE-GAM-WWF Fundación Carlos Slim, 2015	Capacidad de adaptación y resiliencia	Metodológico	ANP	11	Manual	Español
Social	Conap-GIZ, 2014	Capacidad de adaptación	Metodológico	ANP	No aparece	Manual	Español

Cuadro 1. Estudios con modelos conceptuales o metodológicos para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes de coral en México ante el cambio climático.

En el mismo Cuadro 1 se muestra la colaboración entre instituciones gubernamentales, sobre todo de la Conanp, con las Organizaciones de la Sociedad Civil (OSC) nacionales (FMCN, Fundación

Carlos Slim y CEGAM) e internacionales (WWF, TNC y GIZ), incluyendo la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal). En general, la mayoría cuenta con una amplia colaboración entre autores, contabilizando un máximo de 55 (p. ej., INE, UNAM y Semarnat, 2008). Algunos de los autores que publican en estos trabajos pertenecen a instituciones educativas y/o de investigación nacionales como el Instituto de Ciencias del Mar y Limnología (UNAM), Universidad Autónoma de Campeche (UAC) y El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR). Sin embargo, la mayoría de los autores pertenecen a instituciones gubernamentales (Conanp y Semarnat) y a las OSC.

Una gran cantidad de trabajos incorporan la capacidad de adaptación (40%). El interés por este tema podría explicarse porque esas publicaciones tienen como objeto de estudio a las ANP. Uno de los ejemplos más recientes para estas áreas (Conanp, CEGAM, WWF y Fundación Carlos Slim, 2015) se presenta como una herramienta para conocer la vulnerabilidad socio-ecológica de éstas ante el cambio climático. Otro trabajo presenta los resultados obtenidos en el proyecto “Desarrollo de Programas Piloto de Adaptación al Cambio Climático en Áreas Naturales Protegidas del Sureste de México” (March *et al.*, 2011) e identifica los manglares y los arrecifes de coral entre los ecosistemas más amenazados ante los efectos del cambio climático. En ese mismo año, se presenta el reporte Programa de Adaptación al Cambio Climático en Áreas Naturales Protegidas del complejo del Caribe de México (Conanp, FMCN y TNC, 2011), el cual identifica estrategias de conservación para el complejo de áreas protegidas del Caribe de México e incluye áreas con arrecifes coralinos, por ejemplo, el Parque Nacional Arrecifes de Xcalak.

Hay trabajos que tienen como objeto de estudio las ANP con modelos metodológicos para evaluar la vulnerabilidad desde la capacidad de adaptación; esto podría estar relacionado con que estas áreas están administradas por la Conanp, quien ha tomado la política de adaptación ante el cambio climático global como eje de desarrollo institucional (Semarnat e INECC, 2012); otro motivo podría ser que el Plan Nacional de Desarrollo 2007-2012 incluye como estrategia la evaluación de los impactos, la vulnerabilidad y la adaptación al cambio climático en diferentes sectores socio-económicos y sistemas ecológicos (Graizbord *et al.*, 2009). Incluso se ha desarrollado una alianza, entre la Conanp y algunas OSC que busca recopilar herramientas técnicas, disponibles en línea y de acceso libre, que apoyen en la toma de decisiones y en la implementación de acciones en campo para la adaptación de los ecosistemas y las comunidades al cambio climático, siendo algunas de estas herramientas aplicables para determinar la vulnerabilidad de los arrecifes (March *et al.*, 2013).

Sin desalentar el esfuerzo que se está realizando para evaluar la vulnerabilidad en las ANP, hay que considerar que no todos los arrecifes se encuentran bajo esta categoría de manejo. Además, estos modelos metodológicos son muy generales, por lo que sería importante presentar un marco conceptual y metodológico particular para estos ecosistemas arrecifales a nivel nacional. Con

respecto a las ANP ante el cambio climático, Bezaury-Creel (2010: 689-690) mencionan: Sin afán de desestimar los posibles beneficios que las áreas naturales protegidas costeras y marinas pueden representar en la mitigación del cambio climático global, sólo si somos capaces de lograr que estos espacios continúen proporcionando bienes y servicios directos a los mexicanos y que el valor de estos sea socialmente reconocido, especialmente aquellos relacionados con la capacitación ecosistémica al cambio climático para los asentamientos humanos costeros, se logrará que estas áreas sean vigentes en el siglo XXII.

En cuanto a los trabajos enfocados a los impactos (40%), la mayoría de estos evalúan la vulnerabilidad desde la dimensión ecológica. Por ejemplo, Ponce-Vélez y colaboradores (2011) estiman el grado de vulnerabilidad de algunos ecosistemas costeros, incluyendo los arrecifes, a través de las metodologías propuestas por el IPCC para Veracruz, Tabasco, Campeche y Quintana Roo. Asimismo, Veracruz y Tabasco presentaron un grado de vulnerabilidad e impacto ambiental alto, mientras que Campeche y Quintana Roo se clasificaron con una afectación media ante los cambios climáticos y los fenómenos hidrometeorológicos extremos.

Al igual que los trabajos a nivel internacional, la mayoría de los de México presentan un modelo metodológico (88%) principalmente aplicado en las mismas ANP, por lo que se puede asumir que en estas áreas se realizan ejercicios prácticos para identificar la vulnerabilidad de estos ecosistemas. Sólo un trabajo presenta un modelo conceptual (Padilla *et al.*, 2010) que muestra la estrategia de acción para la atención de la problemática ambiental que a nivel local, regional y global está afectando a los arrecifes de coral, así como las estrategias de conservación para fortalecer la resiliencia de estos ecosistemas.

El trabajo publicado por la Cepal (2012) presenta una metodología muy detallada para la construcción de dos índices de vulnerabilidad climática de la costa —índice de vulnerabilidad ecológica e índice de vulnerabilidad socioeconómica—. Incluye una sección relacionada con la vulnerabilidad de los arrecifes de coral; sin embargo, el cálculo de la vulnerabilidad climática de estos ecosistemas está basado en la recopilación y síntesis de otros trabajos, en los cuales los detalles de sus resultados son a nivel mundial y por lo tanto generales; este tipo de metodología podría ser útil para evaluar los arrecifes tanto a gran escala como a nivel nacional.

Con este método de búsqueda aplicado en este trabajo, sólo se encontró un artículo publicado en una revista indizada (Martínez *et al.*, 2011), resaltado en el Cuadro 1, el cual presenta un modelo metodológico para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de diversos ecosistemas marinos ante el cambio climático adaptado para el Golfo de México. Entre los ecosistemas evaluados se incluyen los arrecifes de coral junto con las especies de importancia pesquera. También se señalan los impactos que afectarían por dicho fenómeno a la producción pesquera en México; precisamente hacia ellos se tendrán que dirigir las estrategias de adaptación y mitigación.

También se encontraron trabajos con modelos para evaluar la vulnerabilidad climática en zonas costeras en México y, aunque no son específicos para los arrecifes de coral, en ellos se resaltan modelos metodológicos para evaluar esta vulnerabilidad sirviendo como casos de estudio para estos sistemas socio-ecológicos. El trabajo presentado por Núñez *et al.* (2016), estima la vulnerabilidad costera de Tabasco, ante el potencial incremento del nivel del mar, mediante el uso del índice de vulnerabilidad costera; otro trabajo similar para Tabasco, junto con Campeche, es el presentado por Ramos-Reyes *et al.* (2016). Ortiz y Méndez (1999) presentan un trabajo para el Golfo de México y el Mar Caribe, el cual está dirigido a evaluar la vulnerabilidad de la costa, desde el impacto ante el aumento del nivel del mar. Otros trabajos de este tipo son presentados por Yáñez-Arancibia y Day (2010) y Buenfil (2009).

Algunos trabajos nacionales, que también presentan una panorámica de este tipo, son los presentados por Azuz-Adeath y colaboradores (2010) y Ruíz-Ramírez (2016); el primero presenta una revisión sobre el estado del arte en la construcción e implementación de diferentes indicadores e índices propuestos para el desarrollo sustentable y la gestión ambiental, proponiendo algunos indicadores para la gestión costera y marina que consideren los impactos del cambio climático en México. El segundo, muestra una revisión y descripción de cuatro herramientas de análisis para la vulnerabilidad costera ante el aumento del nivel del mar para el caribe mexicano, la metodología común del IPCC, el análisis multicriterio y los modelos DIVA y CATSIM.

Vale la pena mencionar que se encontraron diversos trabajos que evalúan la salud de los arrecifes, sobre todo para el Arrecife Mesoamericano, por medio de índices e indicadores que también son utilizados en las evaluaciones de vulnerabilidad climática de estos ecosistemas; por ejemplo el trabajo presentado por Healthy Reefs Initiative (2008) detalla con gran precisión el método y uso de los indicadores para evaluar la vulnerabilidad climática de los arrecifes del Caribe; o el presentado por Mcfield y Kramer (2007), quienes muestran un modelo conceptual de salud del Arrecife Mesoamericano, en el cual la estructura y función del ecosistema, el bienestar social y la gobernanza y los factores de cambio —cambio climático global— determinan esta salud.

Otro trabajo es el de Arrivillaga y Windevoxhel (2008), en el cual se evalúa el mismo sistema arrecifal (Mesoamericano) y se proponen estrategias para aunar los principales retos, minimizar o abatir las amenazas a los elementos de conservación, garantizar el mejoramiento de la viabilidad de los elementos de conservación y promover el uso sostenible y conservación de los recursos de biodiversidad para promover el logro de las aspiraciones y el desarrollo económico y social, así como la conservación en la región. Estos trabajos a nivel regional son importantes para México, ya que el Banco Interamericano de Desarrollo (2010) menciona que la región mesoamericana es altamente vulnerable al cambio climático.

En general, Balvanera *et al.* (2016) afirman que el conocimiento relacionado con las condiciones climáticas —actuales y futuras— para los arrecifes de coral en México se encuentra en claro desarrollo con aportaciones conceptuales, metodológicas y de datos. En relación a esto se reconoce que, considerando las bases de datos y los motores de búsqueda seleccionados, quedan fuera trabajos de colegas enfocados a la vulnerabilidad climática de estos ecosistemas en México y que no son citados aquí. Análisis futuros podrían incluir los trabajos que tienen que ver con la sensibilidad de los arrecifes o sus componentes ante los factores de estrés climático que se presentan en Álvarez-Filip y Gil (2006), Álvarez-Filip *et al.* (2009), Carricart-Ganivet *et al.* (2012), Carriquiry *et al.* (2001) y Reyes-Bonilla *et al.* (2002). Otros ejemplos de trabajos que versan sobre la capacidad de adaptación son Ayala-Bocos y Reyes-Bonilla (2008), Calderón-Aguilera y Reyes-Bonilla (2006), Fernández-Rivera *et al.* (2018), Medellín-Maldonado *et al.* (2016), Tortolero-Langarica *et al.* (2017) y Walther-Mendoza *et al.* (2016).

5.1.4. Conclusiones

En la mayoría de los trabajos revisados se observa una tendencia a la presentación de modelos dirigidos a evaluar la vulnerabilidad climática de los arrecifes de coral desde la dimensión socio-ecológica. En México se observa cómo se visualiza esta misma tendencia, hecho de gran relevancia puesto que se reconoce la codependencia de los arrecifes coralinos con las comunidades humanas asociadas o dependientes de estos ecosistemas.

En general, la mayoría de los trabajos presentan un modelo metodológico en el que incorporan la sensibilidad, la exposición y la capacidad de adaptación. Es importante señalar que los modelos conceptuales de la literatura publicada en otros medios, y no en revistas indizadas, han sido utilizados en éstas mismas, e incluso han marcado un punto de partida en la propuesta de este tipo de modelos como el de Marshall *et al.* (2009). A nivel nacional, la mayoría de los modelos presentados también son metodológicos, dirigidos principalmente a evaluar el impacto y la capacidad de adaptación, ésta última dirigida a las áreas naturales protegidas.

Se observa una tendencia al aumento en el número de colaboradores y de instituciones gubernamentales, académicas y de la sociedad civil— en los trabajos nacionales e internacionales analizados en el periodo. La región con mayor número de producción de escritos es Oceanía (Gran Barrera de Coral). Los países con un mayor número de investigadores que publican este tipo de modelos son Australia y Estados Unidos; en estos países los trabajos presentados a manera de reportes y capítulos de libros muchas veces se publican en revistas indizadas. En México, la mayoría de los trabajos se materializan en forma de reportes, informes, manuales y capítulos de libros.

Considerando las bases de datos y los motores de búsqueda seleccionados, quedan fuera importantes investigaciones de colegas que trabajan en los arrecifes en México, por lo que es importante hacer un ejercicio de reflexión acerca del tipo de literatura que se publica a nivel nacional, ¿cuáles son las posibles causas para que estos modelos no terminen en publicaciones de

revistas indizadas?, ¿es realmente necesario publicar en revistas internacionales si un gran número de trabajos tienen como público meta a los tomadores de decisiones o manejadores de ANP? También sería necesario revisar los criterios hegemónicos de búsqueda que desarrollan muchos buscadores, los preferidos por el Sistema de Investigación Nacional, en lugar de valorar las formas de comunicación del conocimiento nacional.

5.1.5. Referencias

- Abson, David J.; Dougill, Andrew J., y Stringer, Lindsay C. (2012). “Spatial Mapping of Socio-eco-logical Vulnerability to Environmental Change in Southern Africa”, (documento de trabajo). Recuperado de <https://www.see.leeds.ac.uk/fileadmin/Documents/research/sri/workingpa-pers/SRIPs-32.pdf> (Última consulta el 15 de marzo de 2016).
- Álvarez-Filip, Lorenzo y Gil, I. (2006). “Effects of Hurricanes Emily and Wilma on Coral Reefs in Cozumel, Mexico”. *Coral Reefs*, 25(4), pp. 583.
- Álvarez-Filip, Lorenzo; Millet-Encalada, Marinés, y Reyes-Bonilla, Héctor (2009). “Impact of Hurricanes Emily and Wilma on the Coral Community of Cozumel Island, Mexico”. *Bulletin of Marine Science*, 84(3), pp. 295-306.
- Anthony, Kenneth R.N.; Marshall, Paul A.; Abdulla, Ameer; Beeden, Roger; Bergh, Chris; Black, Ryan; Eakin, C. Mark; Game, Edward T.; Gooch, Margaret; Graham, Nicholas A. J.; Green, Alison; Heron, Scott F.; Hooidonk, Ruben V.; Knowland, Cheryl; Mangubhai, Sangeeta; Marshall, Nadine; Maynard, Jeffrey A.; McGinnity, Peter; Mcleod, Elizabeth; Mumby, Peter J.; Nyström, Magnus; Obura, David; Oliver, Jamie; Possingham, Hugh P.; Pressey, Robert L.; Rowlands, Gwilym P.; Tamelander, Jerker; Wachenfeld, David, y Wear, Stephanie (2015). “Operationalizing Resilience for Adaptive Coral Reef Management under Global Environmental Change”. *Global Change Biology*, 21(1), pp. 48-61.
- Anthony, Kenneth R.N.; Maynard, Jeffrey A.; Diaz-Pulido, Guillermo; Mumby, Peter J.; Marshall, Paul A.; Cao, Long, y Hoegh-Guldberg, Ove (2011). “Ocean Acidification and Warming Will Lower Coral Reef Resilience”. *Global Change Biology*, 17(5), pp. 1798-1808.
- Arrivillaga, A., y Windevoxlhel, N. (2008). “Evaluación Ecorregional del Arrecife Mesoamericano: Plan de Conservación Marina”. Recuperado de <https://www.cbd.int/doc/meetings/mar/rweb-sa-wcar-01/other/rwebsa-wcar-01-guatemala-02-es.pdf> (Última consulta el 22 de noviembre de 2017).
- Ayala-Bocos, Arturo y Reyes-Bonilla, Héctor (2008). “Analysis of Reef Fish Abundance in the Gulf of California, and Projection of Changes by Global Warming”. *11th International Coral Reef Symposium*, Ft. Lauderdale, Florida.
- Azuz-Adeath, Isaac; Espejel, Ileana; Rivera-Arriaga, Evelia; Fermán, José Luis, y Seingier, Georges (2010). “Referentes internacionales sobre indicadores e índices. Historia y estado del arte”. En Alfonso V. Botello, Susana Villanueva, Jorge Gutiérrez, y José. Luis Rojas (eds.),

- Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. México: Gobierno del Estado de Tabasco/Semarnat-INE/ UNAM-ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche, pp. 845-872.
- Balvanera, Patricia; Arias-González, Jesús Ernesto; Rodríguez-Estrella, Ricardo; Almeida- Leñero, Lucía y Schmitter-Soto, Juan J. (2016). *Una mirada al conocimiento de los ecosistemas de México*. Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México, 441 pp.
- Bellwood, David R.; Hughes, Terence Patrick; Folke, Carl, y Nyström, Magnus (2004). “Confronting the Coral Reef Crisis”. *Nature*, 429(6994), pp. 827-833.
- Bezaury-Creel, Juan E. (2010). “Las Áreas Naturales Protegidas costeras y marinas de México ante el cambio climático”. En Alfonso V. Botello, Susana Villanueva, Jorge Gutiérrez, y José Luis Rojas Galaviz (eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. México: Gobierno del Estado de Tabasco. Semarnat-INE/UNAM-ICMyL/Universidad Autónoma de Campeche, pp. 689-736.
- Biggs, Duan; Hicks, Christina C.; Cinner, Joshua E., y Hall, C. Michael (2015). “Marine Tourism in the Face of Global Change: The Resilience of Enterprises to Crises in Thailand and Australia”. *Ocean and Coastal Management*, 105, pp. 65-74.
- Blanchon, Paul; Iglesias-Prieto, Roberto; Jordan Dahlgren, Eric, y Richards, S. (2010). “Mitigación, adaptación y costos en los Arrecifes de coral y cambio climático: vulnerabilidad de la zona costera de Quintana Roo”. En Alfonso V. Botello, Susana Villanueva, Jorge Gutiérrez, y José. Luis Rojas Galaviz (eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. México: Gobierno del Estado de Tabasco/Semarnat-INE/UNAM-ICMyL/Universidad Autónoma de Campeche, pp. 229-248.
- Bohensky, Erin; Stone-Jovicich, Samantha; Larson, Silva, y Marshall, Nadine (2010). “Adaptive Capacity in Theory and Reality: Implications for Governance in the Great Barrier Reef Region”. En Derek Armitage y Ryan Plummer (eds.), *Adaptive Capacity and Environmental Governance*. Alemania: Springer, pp. 23-41.
- Buenfil Friedman, Jacinto (2009). *Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México*. México: ine- Semarnat, 375 pp.
- Burke, Lauretta; Reytar, Kathleen; Spalding, Mark, y Perry, Allison (2011). “Reefs at Risk Revisited”. Recuperado de http://pdf.wri.org/reefs_at_risk_revisited.pdf (Última consulta el 20 de abril de 2016).
- Burke, Lauretta; Reytar, Kathleen; Spalding, Mark, y Perry, Allison (2012). “Reefs at Risk: Revisited in the Coral Triangle”. Recuperado de [https://doi.org/10.1016/0022-0981\(79\)90136-9](https://doi.org/10.1016/0022-0981(79)90136-9) (Última consulta el 22 de marzo de 2016).
- Calderón-Aguilera, Luis Eduardo y Reyes-Bonilla, Héctor (2006). “Can Local Oceanographic Conditions in the Mexican Pacific Buffer the El Niño-Southern Oscillation Effects on Coral Reefs?”. *Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium*, Okinawa, Japón.

- Carricart-Ganivet, Juan P.; Cabañillas-Terán, Nancy; Cruz-Ortega, Israel, y Blanchon, Paul (2012). “Sensitivity of Calcification to Thermal Stress Varies among Genera of Massive Reef-Building Corals”. *PLoS ONE*, 7(3), e32859.
- Carriquiry, José D.; Cupul-Magaña, Amílcar L.; Rodríguez-Zaragoza, Fabián, y Medina-Rosas, Pedro (2001). “Coral Bleaching and Mortality in the Mexican Pacific during the 1997–98 El Niño and Prediction from a Remote Sensing Approach”. *Bulletin of Marine Science*, 69(1), pp. 237-249.
- Cinner, Joshua E.; McClanahan, Tim; Graham, Nick; Daw, Tim R.; Maina, Joseph; Stead, Selina; Wamukota, Andrew; Brown, Katrina, y Bodin, Örjan (2012). “Vulnerability of Coastal Communities to Key Impacts of Climate Change on Coral Reef Fisheries”. *Global Environmental Change*, 22(1), pp. 12-20.
- Cinner, Joshua E.; Huchery, Cindy; Darling, Emily S.; Humphries, Austin T.; Graham, Nicholas; Hicks, Christina C.; Marshall, Nadine, y McClanahan, Tim R. (2013a). “Evaluating Social and Ecological Vulnerability of Coral Reef Fisheries to Climate Change”. *PLoS ONE*, 8(9), e74321-e74321.
- Cinner, Joshua; McClanahan, Tim; Wamukota, Andrew; Darling, Emily; Humphries, Austin; Hicks, Christina; Huchery, Cindy; Marshall, Nadine; Hempson, Tessa; Graham, Nick; Bodin, Örjan; Daw, Tim, y Allison, Eddie (2013b). “Social-Ecological Vulnerability of Coral Reef Fisheries to Climatic shocks”. Recuperado de www.fao.org/3/a-ap972e.pdf (Última consulta el 20 de febrero de 2016).
- Cinner, Joshua Eli; Pratchett, Morgan Stuart; Graham, Nicholas Anthony James; Messmer, Vanessa; Menezes, Mariana; Bezerra Fuentes, Prata; Ainsworth, Tracy; Ban, Natalie; Bay, Line Kolind; Blythe, Jessica; Dissard, Delphine; Dunn, Simon; Evans, Louisa; Fabinyi, Michael; Fidelman, Pedro; Figueiredo, Joana; Frisch, Ashley John; Fulton, Christopher John; Hicks, Christina Chemtai; Lukoschek, Vimoksalehi; Mallela, Jennie; Moya, Aurelie; Penin, Lucie; Rummer, Jodie Lynn; Walker, Stefan, y Williamson, David Hall (2016). “A Framework for Understanding Climate Change Impacts on Coral Reef Social-Ecological Eystems”. *Regional Environmental Change*, 16(4), pp. 1133-1146.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe (Cepal) (2012). “Efectos del cambio climático en la costa de América Latina y el Caribe Vulnerabilidad y exposición”. Recuperado de http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/3982/1/S2012024_es.pdf (Última consulta el 20 de noviembre de 2017).
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp), y Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) (2014). “Herramienta para el análisis de vulnerabilidad social a los impactos climáticos a nivel local en Áreas Naturales Protegidas. México”. Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/61191/Herramienta_Vulnerabilidad_Social_completa.pdf (Última consulta el 15 de marzo de 2016).

- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp), Alianza WWW-Fundación Carlos Slim, y Centro de Especialistas en Gestión Ambiental (CEGAM) (2015). “Herramienta para el diagnóstico rápido de vulnerabilidad al cambio climático en áreas naturales protegidas. México.” Recuperado de https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/248689/Diagnostico_rapido_vulnerabilidad_cc.pdf (Última consulta el 15 de marzo de 2016).
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (Conanp); Fondo Mexicano para la Conservación de la Naturaleza (FMCN), y The Nature Conservancy (TNC) (2011). “Programa de adaptación al cambio climático en áreas naturales protegidas del complejo del Caribe de México”. Recuperado de http://cambioclimatico.conanp.gob.mx/documentos/re_caribe_de_mexico.pdf (Última consulta el 15 de febrero de 2016).
- De’ath, Glenn; Fabricius, Katharina E.; Sweatman, Hugh, y Puotinen, Marji (2012). “The 27-Year Decline of Coral Cover on the Great Barrier Reef and its Causes”. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109(44), pp. 17995-17999.
- Done, Terence J. (1999). “Coral Community Adaptability to Environmental Change at the Scales of Regions, Reefs and Reef Zones”. *American Zoologist*, 39, pp. 66-79.
- Doney, Scott C.; Ruckelshaus, Mary; Duffy, Emmett J.; Barry, James P.; Chan, Francis; English, Chad A.; Galindo, Heather M.; Grebmeier, Jacqueline M.; Hollowed, Anne B.; Knowlton, Nancy; Polovina, Jeffrey; Rabalais, Nancy N.; Sydeman, William J.; Talley, Lynne D. (2012). “Climate Change Impacts on Marine Ecosystems”. *Annual Review of Marine Science*, 4, pp. 11-37.
- Evans, Louisa S.; Hicks, Christina C.; Fidelman, Pedro; Tobin, Renae C., y Perry, Allison L. (2013). “Future Scenarios as a Research Tool: Investigating Climate Change Impacts, Adaptation Options and Outcomes for the Great Barrier Reef, Australia”. *Human Ecology*, 41(6), pp. 841-857.
- Fernández-Rivera Melo, Francisco J.; Reyes-Bonilla, Héctor; Martínez-Castillo, Violeta, y Pérez-Alarcón, Fernanda (2018). “Northernmost Occurrence of *Zanclus Cornutus* (Zanclidae) in the Eastern Pacific (Northern Gulf of California, Mexico)”. *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, pp. 6-9.
- Fink, Arlene (2014). *Conducting Research Literature Reviews: from the Internet to Paper*. EUA: The Langley Research Institute, 257 pp.
- Graham, Nicholas A.J.; Chabanet, Pascale; Evans, Richard D.; Jennings, Simon; Letourneur, Yves; MacNeil, M. Aaron; McClanahan, Tim R.; Öhman, Marcus C.; Polunin, Nicholas V.C., y Wilson, Shaun K. (2011). “Extinction Vulnerability of Coral Reef Fishes”. *Ecology Letters*, 14(4), pp. 341-348.

- Graizbord, Boris; Nava, Emelina; Martínez, Anabel; Ramírez, Jaime, y Lemus Raúl (2009). “Marco general de políticas de adaptación al cambio climático”. En Jacinto Buenfil Friedman (ed.). *Adaptación a los impactos del cambio climático en los humedales costeros del Golfo de México*. México: INE-Semarnat, pp. 79-102.
- Grasso, Marco; Moneo, Marta, y Arena, Marco (2014). “Assessing Social Vulnerability to Climate Change in Samoa”. *Regional Environmental Change*, 14(4), pp. 1329-1341.
- Halpern, Benjamin S.; Walbridge, Shaun; Selkoe, Kimberly A.; Kappel, Carrie V.; Micheli, Fiorenza; D’Agrosa, Caterina; Bruno, John F.; Casey, Kenneth S.; Colin, Ebert; Fox, Helen E.; Fujita, Rod; Heinemann, Dennis; Lenihan, Hunter S.; Madin, Elizabeth M.P.; Perry, Matthew T.; Selig, Elizabeth R.; Spalding, Mark; Steneck, Robert, y Watson, Reg (2008). “A Global Map of Human Impact on Marine Ecosystems”. *Science*, 319, pp. 948-952.
- Healthy Reefs Initiative (2008). “Libreta de calificaciones correspondientes al Sistema Arrecifal Mesoamericano. Una evaluación de la salud del ecosistema”. Recuperado de <http://www.healthyreefs.org/cms/wp-content/uploads/2012/12/Reporte-2008.pdf> (Última consulta el 19 de noviembre de 2017).
- Hereher, Momahed E. (2016). “Vulnerability Assessment of the Saudi Arabian Red Sea Coast to Climate Change”. *Environmental Earth Sciences*, 75(1), pp. 1-13.
- Hernández-Delgado, Edwin A. (2015). “The Emerging Threats of Climate Change on Tropical Coastal Ecosystem Services, Public Health, Local Economies and Livelihood Sustainability of Small Islands: Cumulative Impacts and Synergies”. *Marine Pollution Bulletin*, 101(1), pp. 5-28.
- Hoegh-Guldberg, Ove, y Hoegh-Guldberg, Hans (2004). “The Implications of Climate Change for Australia’s Great Barrier Reef”. Recuperado de http://awsassets.wwf.org.au/downloads/mo020_implications_of_climate_change_for_gbr_21feb04.pdf (Última consulta el 30 marzo de 2016).
- Holbrook, Neil J., y Johnson, Johanna E. (2014). “Climate Change Impacts and Adaptation of Commercial Marine Fisheries in Australia: A Review of the Science”. *Climatic Change*, 124(4), pp. 703-715.
- Hughes, Sara; Yau, Annie; Max, Lisa; Petrovic, Nada; Davenport, Frank; Marshall, Michael; McClanahan, Timothy R.; Allison, Edward H., y Cinner, Joshua E. (2012). “A Framework to Assess National Level Vulnerability from the Perspective of Food Security: The Case of Coral Reef Fisheries”. *Environmental Science & Policy*, 23, pp. 95-108.
- Instituto Nacional de Ecología (INE), Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), y Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat) (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”. Recuperado de

http://www.inecc.gob.mx/descargas/cclimatico/e2008_ev_regional_zcm.pdf (Última consulta el 25 de febrero de 2016).

- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2007). “Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability: Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel”. Cambridge, UK, 976 pp.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2014). “Anexo II: Glosario”. En Katharine J. Mach; Serge Planton, y Christoph von Stechow (eds.), *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático* [Equipo principal de redacción, Rajendra K. Pachauri y Leo Meyer (eds.)]. Ginebra, Suiza: IPCC, pp. 127-141.
- Jackson, Jeremy; Donovan, Mary; Cramer, Katie, y Lam, Vivian (2014). *Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970-2012*. Gland, Suiza: Global Coral Reef Monitoring Network, IUCN, 304 pp.
- Johnson, Johanna E., y Marshall, Paul A. (2007). *Climate Change and the Great Barrier Reef: A Vulnerability Assessment*. Australia: Climate Change and the Great Barrier Reef/Great Barrier Marine Park Authority/Australian Greenhouse Office, 801 pp.
- Johnson, Johanna E., y Welch, David J. (2016). “Climate Change Implications for Torres Strait Fisheries: Assessing Vulnerability to Inform Adaptation”. *Climatic Change*, 135(3-4), pp. 611-624.
- Khan, Ahmed, y Vincent, Amelie (2015). “Assessing Climate Change Readiness in Seychelles: Implications for Ecosystem-Based Adaptation Mainstreaming and Marine Spatial Planning”. *Regional Environmental Change*, 15(4), pp. 721-733.
- Lawton, Rebecca J.; Pratchett, Morgan S., y Berumen, Michael L. (2012). “The Use of Specialisation Indices to Predict Vulnerability of Coral-Feeding Butterflyfishes to Environmental Change”. *Oikos*, 121(2), pp. 191-200.
- Leslie, Heather M.; Basurto, Xavier; Nenadovic, Mateja; Sievanen, Leila; Cavanaugh, Kyle C.; Cota-Nieto, Juan José; Erisman, Brad E.; Finkbeiner, Elena; Hinojosa-Arango, Gustavo; Moreno-Báez, Marcia; Nagavarapu, Sriniketh; Reddy, Sheila M.W.; Sánchez-Rodríguez, Alexandra; Siegel, Katherine; Ulibarria-Valenzuela, José Juan; Weaver, Amy Hudson, y Aburto-Oropeza, Octavio (2015). “Operationalizing the Social-Ecological Systems Framework to Assess Sustainability”. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), pp. 5979-5984.
- Licuanan, Wilfredo Y.; Samson, Maricar S.; Mamauag, Samuel S.; David, Laura T.; Borja-del Rosario, Roselle; Quibilan, Miledel Christine C.; Siringan, Fernando P.; Sta. Maria, Ma Yvaine Y.; España, Norievill B.; Villanoy, Cesar L.; Geronimo, Rollan C.; Cabrera, Olivia C.; Martínez, Renmar Jun S., y Aliño, Porfirio M. (2015). “IC-SEA Change: A Participatory Tool

- for Rapid Assessment of Vulnerability of Tropical Coastal Communities to Climate Change Impacts”. *Ambio*, 44(8), pp. 718-736.
- Madin, Joshua S.; Hughes, Terry P., y Connolly, Sean R. (2012). “Calcification, Storm Damage and Population Resilience of Tabular Corals under Climate Change”. *PLoS ONE*, 7(10), e46637.
- Madin, Joshua S.; O’Donnell, Michael J., y Connolly, Sean R. (2008). “Climate-Mediated Mechanical Changes to Post-Disturbance Coral Assemblages”. *Biology Letters*, 4(5), pp. 490-493.
- Maina, Joseph; McClanahan, Tim R.; Venus, Valentijn; Ateweberhan, Mebrahtu, y Madin, Joshua (2011). “Global Gradients of Coral Exposure to Environmental Stresses and Implications for Local Management”. *PLoS ONE*, 6(8), e23064.
- Maina, Joseph; Venus, Valentijn; McClanahan, Timothy R., y Ateweberhan, Mebrahtu (2008). “Modelling Susceptibility of Coral Reefs to Environmental Stress Using Remote Sensing Data and GIS Models”. *Ecological Modelling*, 212(3), pp. 180-199.
- Mamaug, Samuel S.; Aliño, Porfirio M.; Martínez, Renmar Jun. S.; Muallil, Richard N.; Doctor, Maria Victoria A.; Dizon, Emerlinda C.; Geronimo, Roland C.; Panga, Fleurdeliz M., y Cabral, Reniel B. (2013). “A Framework for Vulnerability Assessment of Coastal Fisheries Ecosystems to Climate Change-Tool for Understanding Resilience of Fisheries (VA-TURF)”. *Fisheries Research*, 147, pp. 381-393.
- March, Ignacio J.; Cabral, Hernando; Echeverría, Yven; Bellot, Mariana, y Frausto, Juan Manuel (2011). “Adaptación al Cambio Climático en Áreas Protegidas del Caribe de México”, (reporte). Recuperado de [http://www.marfund.org/sp/learnmore/whatsgoing/AdaptacionANP Caribe Mexico Final.pdf](http://www.marfund.org/sp/learnmore/whatsgoing/AdaptacionANPCaribeMexicoFinal.pdf) (Última consulta el 18 de marzo de 2017).
- March, Ignacio J.; Buenfil, Jacinto; Ulrich, Silvia; von Bertrab, Alejandro, y Núñez, Miriam T. (2013). “Herramientas disponibles en línea de utilidad para evaluar los impactos del cambio climático y apoyar el diseño de medidas de adaptación y mitigación”. Alianza México Resiliente: áreas protegidas, respuestas naturales al cambio climático. Recuperado de <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/251117/Herramientas-para-ladaptacion.pdf> (Última consulta el 18 de noviembre de 2017).
- Marshall, N.A.; Marshall, Paul.; Tamelander, Jerker; Obura, David O.; Malleret-King, Delphine, y Cinner, Joshua (2009). “A Framework for Social Adaptation to Climate Change. Sustaining Tropical Coastal Communities and Industries”. Gland, Suiza: IUCN, 36 pp.
- Marshall, Nadine A.; Tobin, Renae C.; Marshall, Paul A.; Gooch, Margaret, y Hobday, Alistair J. (2013). “Social Vulnerability of Marine Resource Users to Extreme Weather Events”. *Ecosystems*, 16(5), pp. 797-809.
- Martínez, Arroyo A.; Manzanilla, Nain S., e Hidalgo, Zavala J. (2011). “Vulnerability to Climate Change of Marine and Coastal Fisheries in México”. *Atmósfera*, 24(1), pp. 103-123.

- Maynard, Jeffrey A.; McKagan, Steven; Raymundo, Laurie; Johnson, Steven; Ahmadi, Gabby N.; Johnston, Lyza; Houk, Peter; Williams, Gareth J.; Kendall, Matt; Heron, Scott F.; Ivan Hooi-donk, Ruben; Mcleod, Elizabeth; Tracey, Dieter., y Serge, Planes (2015). "Assessing Relative Resilience Potential of Coral Reefs to Inform Management". *Biological Conservation*, 192, pp. 109-119.
- McClanahan, Timothy R.; Graham, Nicholas A.J., y Darling, Emily S. (2014). "Coral Reefs in a Crystal Ball: Predicting the Future From the Vulnerability of Corals and Reef Fishes to Multiple Stressors". *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 7, pp. 59-64.
- Mcfield, Melanie, y Kramer, Patricia (2007). "Healthy Reefs for Healthy People: A Guide to Indicators of Reef Health and Social Well-being in the Mesoamerican Reef Region". Recuperado de http://www.rareplanet.org/sites/rareplanet.org/files/McFieldKramer_2007_HealthyReefForHealthyPeople.pdf (Última consulta el 19 de noviembre de 2017).
- McLeod, Elizabeth; Moffitt, Russell; Timmermann, Axel; Salm, Rodney; Menviel, Laurie; Palmer, Michael J.; Selig, Elizabeth R.; Casey, Kenneth S., y Bruno, John F. (2010). "Warming Seas in the Coral Triangle: Coral Reef Vulnerability and Management Implications". *Coastal Management*, 38(5), pp. 518-539.
- Medellín-Maldonado, Francisco; Cabral-Tena, Rafael Andrés; López-Pérez, Andrés; Calderón-Aguilera, Luis E.; Norzagaray-López, C. Orión; Chapa-Balcorta, Cecilia y Zepeta-Vilchis, Ronald C. (2016). "Calcificación de las principales especies de corales constructoras de arrecifes en la costa del Pacífico del sur de México". *Ciencias Marinas*, 42(3), 209-225.
- Mumby, Peter J., y Steneck, Robert S. (2008). "Coral Reef Management and Conservation in Light of Rapidly Evolving Ecological Paradigms". *Trends in Ecology and Evolution*, 23(10), pp. 555-563.
- Muñiz Irigoyen, Carla G. y Raúl Gío Argáez (2016). "Conservación y restauración en arrecifes de coral". *Ciencias*, 120-121: 60-71.
- Núñez Gómez, Juan Carlos; Ramos Reyes, Rodimiro; Barba Macías, Everardo; Espinoza Tenorio, Alejandro, y Gama Campillo, Lilia María (2016). "Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México». *Investigaciones Geográficas*, 91, pp. 70-85.
- Obura, David O. (2005). "Resilience and Climate Change: Lessons from Coral Reefs and Bleaching in the Western Indian Ocean". *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 63(3), pp. 353-372.
- Okey, Thomas A., Alidina, Hussein M. y Selina Agbayani (2015). "Mapping ecological vulnerability to recent climate change in Canada's Pacific marine ecosystems". *Ocean and Coastal Management*, 106: 35-48
- Ortiz-Lozano, Leonardo; Pérez-España, Horacio; Granados-Barba, Alejandro; González-Gándara, Carlos, Gutiérrez-Velázquez, Ana, y Martos, Javier (2013). "The Reef Corridor of the

- Southwest Gulf of Mexico: Challenges for its management and conservation". *Ocean & Coastal Management*, 86, pp. 22-32.
- Ortiz Pérez, Mario Arturo, y Méndez Linares, Ana Patricia (1999). "Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe". *Investigaciones Geográficas Boletín*, 39, pp.68-81.
- Ostrom, Elinor (2009). "A General Framework for Analyzing Sustainability of Social-Ecological Systems". *Science*, 325, pp. 419-422.
- Padilla, Souza C.; Alafita-Vázquez, H., y Andreu-Montalvo, E. (2010). "Factores de riesgo para los arrecifes coralinos y sus mecanismos de respuesta ante los efectos del cambio climático global". En Evelia Rivera-Arriaga; Isaac Azuz-Adeath; Leticia Alpuche Gual, y Guillermo Jorge Villalobos-Zapata (eds.), *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Universidad Autónoma de Campeche/CETYS-Universidad/Gobierno del Estado de Campeche, pp. 181-204.
- Parravicini, Valeriano; Villéger, Sébastien; McClanahan, Tim R.; Arias-González, Jesus Ernesto; Bellwood, David R.; Belmaker, Jonathan; Chabanet, Pascale; Floeter, Sergio R.; Friedlander, Alan M.; Guilhaumon, François; Vigliola, Laurent; Kulbicki, Michel, y Mouillot, David (2014). "Global Mismatch between Species Richness and Vulnerability of Reef Fish Assemblages". *Ecology Letters*, 17, pp. 1107-1110.
- Pérez España, Horacio, Abitia Cárdenas, Leonardo y Galván Magaña, F. (1996). "Variaciones temporales y espaciales en la estructura de la comunidad de peces de arrecifes rocosos". *Ciencias Marinas*, 22(3): 273-294.
- Ponce-Vélez, Guadalupe; Villanueva-Fragoso, Susana y García-Ruelas, Claudia (2011). "Vulnerabilidad de la zona costera. Ecosistemas costeros del Golfo y Caribe Mexicanos". En Alfonso V. Botello; Susana Villanueva-Fragoso; Jorge Gutiérrez, y José Luis Rojas Galaviz (eds.), *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa/UNAM-ICMyL/Universidad Autónoma de Campeche, pp. 37-72.
- Ramos-Reyes, Rodimiro; Zavala-Cruz, Joel; Gama-Campillo, Lilia María; Pech-Pool, Daniel, y Ortiz-Pérez, Mario Arturo (2016). "Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México". *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 68(3), pp. 581-598.
- Reaka-Kudla, Marjorie L. (2005). "Biodiversity of Caribbean coral reefs". En P. Miloslavich y Klein, E. (eds.), *Caribbean Marine Biodiversity*. Des Tech Publishers, Lancaster PA, pp. 259–276

- Reyes-Bonilla, Héctor; Carriquiry, José; Leyte-Morales, Gerardo Esteban, y Cupul-Magaña, Amílcar L. (2002). "Effects of the El Niño-Southern Oscillation and the Anti-El Niño Event (1997-1999) on Coral Reefs of the Western coast of Mexico". *Coral Reefs*, 21, pp. 368-372.
- Ruíz-Ramírez, Jennifer Denisse (2016). "Herramientas actuales de análisis para la vulnerabilidad costera ante el aumento del nivel del mar: revisión para el caribe mexicano". *Caos Conciencia*, 10(1), pp. 29-46.
- Sarukhán, José; Koleff, Patricia; Carabias, Julia; Soberón, Jorge; Dirzo, Rodolfo; Llorente-Bousquets, Jorge; Halffter, Gonzalo; González, Renée; March, Ignacio; Mohar, Alejandro; Anta, Salvador, y de la Maza, Javier (2009). *Capital natural de México. Síntesis: conocimiento actual, evaluación y perspectivas de sustentabilidad*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 97 pp.
- Selig, Elizabeth R.; Casey, Kenneth S., y Bruno, John F. (2010). "New Insights into Global Patterns of Ocean Temperature Anomalies: Implications for Coral Reef Health and Management". *Global Ecology and Biogeography*, 19(3), pp. 397-411.
- Selkoe, Kimberly A.; Halpern, Benjamin S.; Ebert, C.M.; Franklin, E.C.; Selig, Elizabeth R.; Casey, Kenneth S.; Bruno, John, y Toonen, Robert J. (2009). "A Map of Human Impacts to a 'Pristine' Coral Reef Ecosystem, the Papahānaumokuākea Marine National Monument". *Coral Reefs*, 28(3), pp. 635-650.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), e Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) (2012). *México quinta comunicación nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*, México: Grupo Comunicare, S.C., 399 pp.
- Tapsuwan, Sorada, y Rongrongmuang, Wansiri (2015). "Climate Change Perception of the Dive Tourism Industry in Koh Tao Island, Thailand". *Journal of Outdoor Recreation and Tourism*, 11, pp. 58-63.
- Tortolero-Langarica, José de Jesús; Rodríguez-Troncoso, Alma; Cupul-Magaña, Amílcar L., y Carricart-Ganivet, Juan P. (2017). "Calcification and Growth Rate Recovery of the Reef-building Pocillopora Species in the Northeast Tropical Pacific Following an ENSO Disturbance". *PeerJ*, 5, e3191.
- UNEP (2006). "Marine and coastal ecosystems and human well-being: A synthesis report based on the findings of the Millennium Ecosystem Assessment". UNEP, 76 pp.
- Wachenfeld, David; Johnson, Johanna; Skeat, Andrew; Kenchington, Richard; Marshall, Paul, e Innes, James (2007). "Introduction to the Great Barrier Reef and Climate Change". En Johanna E. Johnson, y Paul A. Marshall (eds.), *Climate Change and the Great Barrier Reef*. Australia: Great Barrier Marine Park Authority/Australian Greenhouse Office, pp. 2-13.

Walther-Mendoza, Mariana; Reyes-Bonilla, Héctor; Lajeunesse, Todd C., y López-Pérez, Andrés (2016). “Distribución y diversidad de dinoflagelados simbióticos en corales pétreos de la costa de Oaxaca, Pacífico de México”. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(2), 417-426.

Wilkinson, Clive (2008). *Status of Coral Reefs of the World: 2008*. Townsville, Australia: Global Coral Reef Monitoring Network/Reef and Rainforest Research Centre, 298 pp.

Wolff, Nicholas H.; Donner, Simon D.; Cao, Long; Iglesias-Prieto, Roberto; Sale, Peter F., y Mumby, Peter J. (2015). “Global Inequities between Polluters and the Polluted: Climate Change Impacts on Coral Reefs”. *Global Change Biology*, 21(11), pp. 3982–3994.

Yáñez-Arancibia, Alejandro, y Day, John W. (2010). “La Zona Costera frente al Cambio Climático: Vulnerabilidad de un Sistema Biocomplejo e Implicaciones en Manejo Costero”. En Alejandro Yáñez-Arancibia (eds.) *Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*. México: Instituto de Ecología A. C. (INECOL)/Texas Sea Grant Program/Instituto Nacional de Ecología (INE-Semarnat), pp. 12-35.

5.1.6. Anexos

5.1.6.1. Anexo 1. Publicaciones en revistas indizadas utilizadas en este trabajo (por orden cronológico de publicación).

Autor, año	Nombre revista	Tipo vulnerabilidad, elemento de vulnerabilidad/ tipo modelo	Dimensión geográfica	Objeto de estudio	Colaboradores
Done T.J., 1999	<i>American Zoologist</i>	Ecológica, capacidad de adaptación/Conceptual		Corales y algas	1
Bellwood <i>et al.</i> , 2004	<i>Nature</i>	Ecológica, resiliencia/ Metodológico	Australia y el Caribe	Peces y corales	4
Obura D., 2005	<i>Estuarine, Coastal and Shelf Science</i>	Ecológica, resiliencia/ Conceptual	Océano Índico	Corales, zooxantelas y algas	1
Madin <i>et al.</i> , 2008	<i>Biology Letters</i>	Ecológica, vulnerabilidad mecánica/Metodológico	Australia (Islas Lagartijas)	Colonias de coral	3
Maina <i>et al.</i> , 2008	<i>Ecological Modelling</i>	Ecológica, sensibilidad/ Metodológico	Océano Índico	Comunidades coralinas	4
Selkoe <i>et al.</i> , 2009	<i>Coral Reefs</i>	Ecológica, impactos/ Metodológico	Monumento Marino Nacional Papahānaumokuākea	Arrecifes coralinos	8
McLeod <i>et al.</i> , 2010	<i>Coastal Management</i>	Ecológica, impactos/ Metodológico	Triángulo de Coral, Indo-Pacífico	Arrecifes coralinos	9
Graham <i>et al.</i> , 2011	<i>Ecology Letters</i>	Ecológica, riesgo/Conceptual	Islas Seychelles	Peces arrecifales	10

Martínez <i>et al.</i> , 2011	<i>Atmósfera</i>	Socio-ecológica, riesgo/ Metodológico	Golfo de México	Peces arrecifales con importancia económica	3
Anthony <i>et al.</i> , 2011	Global Change Biology	Ecológica, resiliencia/ Conceptual		Peces arrecifales y comunidades bentónicas	7
Maina <i>et al.</i> , 2011	<i>PLoS ONE</i>	Ecológica, exposición/ Metodológico		Corales	5
Lawton <i>et al.</i> , 2012	<i>Oikos</i>	Ecológica, especialización ecológica/Metodológico	Islas Lagartijas, Australia	Peces coralívoros y corales	3
Cinner <i>et al.</i> , 2012	<i>Global Environmental Change</i>	Socio-ecológica, sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación/Metodológico	Océano Índico	Arrecifes coralinos	9
Hughes <i>et al.</i> , 2012	<i>Environmetal Science and Policy</i>	Social, sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación/Metodológico	Mundial	Peces arrecifales con importancia económica	9
Doney <i>et al.</i> , 2012	<i>Annual Review of Marine Science</i>	Ecológica, impactos/ Conceptual	Mundial	Arrecifes coralinos	14
Cinner <i>et al.</i> , 2013a	<i>PLoS ONE</i>	Socio-ecológica, sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación/Metodológico	Kenia	Arrecifes coralinos	8
Marshall <i>et al.</i> , 2013	<i>Ecosystems</i>	Social, sensibilidad y capacidad de adaptación/ Metodológico	Gran Barrera de Australia	Arrecifes coralinos	5
Mamauag <i>et al.</i> , 2013	<i>Fisheries Research</i>	Socio-ecológica, sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación/Conceptual y metodológico	Filipinas	Arrecifes coralinos	9
Evans <i>et al.</i> , 2013	<i>Human Ecology</i>	Socio-ecológica, capacidad de adaptación/Metodológico	Gran Barrera de Australia	Arrecifes coralinos	5
Parravicini <i>et al.</i> , 2014	<i>Ecology Letters</i>	Ecológica, sensibilidad y exposición/Metodológico	Mundial	Peces arrecifales	13
McClanahan <i>et al.</i> , 2014	<i>Environmental Sustainability</i>	Ecológica, sensibilidad/ Metodológico	Mundial	Corales y peces	3
Spalding <i>et al.</i> , 2014	<i>Ocean & Coastal Management</i>	Socio-ecológica, capacidad de adaptación/Conceptual		Arrecifes coralinos	7

	<i>Journal</i>				
Grasso <i>et al.</i> , 2014	<i>Regional Environmental Change</i>	Social, capacidad de adaptación e impactos/ Metodológico	Samoa	Comunidades costeras	3
Holbrook y Johnson, 2014	<i>Climatic Change</i>	Social, capacidad de adaptación e impactos/ Conceptual	Australia	Pesquerías	2
Maynard <i>et al.</i> , 2015	<i>Biological Conservation</i>	Ecológica, resiliencia/ Metodológico	Islas Marianas	Macroalgas, corales, peces herbívoros	14
Anthony <i>et al.</i> , 2015	<i>Global Change Biology</i>	Socio-ecológica, resiliencia/ Conceptual y metodológico	Caribe e Indo-Pacífico	Arrecifes coralinos	29
Licuanan <i>et al.</i> , 2015	<i>Ambio</i>	Socio-ecológica, sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación/ Metodológico	Indo-Pacífico	Comunidades costeras	14
Biggs <i>et al.</i> , 2015	<i>Ocean & Coastal Management</i>	Social, resiliencia/ Metodológico	Tailandia y Australia	Empresas turismo	4
Hernández-Delgado, 2015	<i>Marine Pollution Bulletin</i>	Socio-ecológica, impactos/ Conceptual		Arrecifes coralinos	1
Tapsuwan y Rongrongmuang, 2015	<i>Journal of Outdoor Recreation and Tourism</i>	Social, capacidad de adaptación/ Metodológico	Tailandia	Industria, buses, hospitales	2
Khan y Vincent, 2015	<i>Regional Environmental Change</i>	Socio-ecológica, capacidad de adaptación/ Metodológico	Islas Seychelles	Islas	2
Wolff <i>et al.</i> , 2015	<i>Global Change Biology</i>	Socio-ecológica, sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación	Mundial	Arrecifes de coral	6
Maina <i>et al.</i> , 2015	<i>Regional Environmental Change</i>	Socio-ecológica, exposición y capacidad de adaptación/ Metodológico	Papua Nueva Guinea	Arrecifes coralinos y comunidades humanas	7
Cinner <i>et al.</i> , 2016	<i>Regional Environmental Change</i>	Socio-ecológica, impactos/ Conceptual		Arrecifes coralinos	25
Hereher, 2016	<i>Environmental Earth Sciences</i>	Socio-ecológica, exposición/ Metodológico	Mar Rojo de Arabia Saudita	Arrecifes coralinos	1
Johnson y Welch,	<i>Climatic</i>	Socio-ecológica, sensibilidad,		Peces con	

2016	Change	exposición y capacidad de adaptación/Metodológico	Estrecho Torres	importancia económica	2
------	--------	---	-----------------	-----------------------	---

5.1.6.2. Anexo 2. Publicaciones que no aparecen en revistas indizadas analizadas en este trabajo (por orden cronológico de publicación).

Autor, año	Tipo de trabajo, editorial	Tipo de vulnerabilidad, elemento/ Tipo de modelo	Dimensión geográfica	Objetos de estudio	Colaboradores
Hoegh-Guldberg O. y Hoegh-Guldberg H., 2004	Reporte, WWF	Ecológica, resiliencia/Metodológico	Gran Barrera de Australia	Arrecifes de coral	2
Johnson y Marshall, 2007	Libro, Gobierno de Australia	Ecológica, resiliencia/Conceptual	Gran Barrera de Australia	Arrecifes de coral	10
INE, UNAM y Semarnat, 2008	Informe, ine	Socio-ecológica, impactos/Metodológico	México	Corales	55
Padilla <i>et al.</i> , 2010	Capítulo libro, Universidad Autónoma de Campeche, UCC-Universidad	Socio-ecológica, riesgo/Conceptual	México	Arrecifes de coral	3
Marshall N. A. <i>et al.</i> , 2009	Libro, iuen	Socio-ecológica, sensibilidad, exposición y capacidad de adaptación/Conceptual y metodológico		Arrecifes de coral	6
Blanchon <i>et al.</i> , 2010	Capítulo libro, Semarnat-INE, UNAM-ICML, Universidad Autónoma de Campeche	Ecológica, impactos/Metodológico	Quintana Roo (México)	Arrecifes de coral	4
Bohensky <i>et al.</i> , 2010	Capítulo libro, Springer	Socio-ecológica, capacidad de adaptación/Metodológico	Gran Barrera de Australia	Arrecifes de coral	4
March <i>et al.</i> , 2011	Reporte, Conanp, TNC, FMCN	Socio-ecológica, capacidad de adaptación/Metodológico	México	ANP	33
Conanp-FMCN-TNC, 2011	Reporte, Conanp-FMCN-TNC	Socio-ecológica, capacidad de adaptación/Metodológico	México	ANP	38
Burke <i>et al.</i> , 2011	Reporte, WRI	Socio-ecológica, riesgo/Metodológico	Mundial	Arrecifes de coral	12

Ponce-Vélez <i>et al.</i> , 2011	Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche	Ecológica, impactos/Metodológico	México	Arrecifes de coral	3
Cepal, 2012	Reporte, Naciones Unidas	Socio-ecológica, impactos/ Metodológico	Costa de América Latina y Caribe	Arrecifes de coral	22
Burke <i>et al.</i> , 2012	Reporte, WRI	Socio-ecológica, riesgo/ Metodológico	Indo-Pacífico	Arrecifes de coral	9
Cinner <i>et al.</i> , 2013b	Informe, FAO	Socio-ecológica, sensibilidad, exposición y riesgo/ Conceptual y metodológico	Kenia	Peces arrecifales	14
Pramova <i>et al.</i> , 2013	Reporte, República Federal de Alemania	Socio-ecológica, impactos/ Conceptual	Indonesia y Filipinas	Arrecifes de coral	
Conanp-Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2014	Manual, Conanp- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit	Social, capacidad de adaptación/ Metodológico		ANP	12
Conanp-CEGAM-Alianza www-Fundación Carlos Slim, 2015	Manual, Conanp-cegam-Alianza www-Fundación Carlos Slim	Socio-ecológica, capacidad de adaptación, resiliencia, vulnerabilidad y riesgo/ Conceptual	México	ANP	11
Belokurov <i>et al.</i> , 2016	Manual, WWF	Socio-ecológica, capacidad de adaptación/ Conceptual		Áreas Marinas y Costeras Protegidas	16

5.2. CAPÍTULO 2. Modelo conceptual y metodológico para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático

Resumen

Se elaboró un modelo conceptual de vulnerabilidad socio-ecológica ante los factores de estrés asociados al cambio climático para los arrecifes de México, por medio del análisis de los modelos identificados en el capítulo 1 de esta tesis. Además, se identificaron los trabajos que presentan posibles indicadores para evaluar esta vulnerabilidad en estos ecosistemas de México a través de una revisión de la literatura en diversas bases de datos y motores de búsqueda electrónicos. Los términos específicos de búsqueda fueron: sensibilidad + arrecifes + México; adaptación + arrecifes + México; y exposición + arrecifes + México (español e inglés). Una vez identificados éstos, se categorizaron dentro de los elementos de vulnerabilidad (exposición, sensibilidad o capacidad de adaptación) dentro de los sistemas ecológico o socio-económico y se identificó la región arrecifal en donde se han desarrollado o aplicado estos indicadores. Como resultados, se incorporaron al modelo conceptual los siguientes elementos: resiliencia socio-ecológica, condiciones de contorno, ecosistemas asociados y la duración, frecuencia e intensidad de los impactos del cambio climático. Con respecto al modelo metodológico propuesto, se presentan cuatro indicadores de exposición ecológica, cuatro de sensibilidad ecológica y cuatro de recuperación potencial ecológica; además dos indicadores de sensibilidad socio-económica y cuatro de capacidad de adaptación social. En cuanto a las regiones y el desarrollo de indicadores para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes ante los factores de estrés asociados al cambio climático, se identificó la región del Caribe y el Golfo de California como zonas con un gran número de datos que pueden transformarse en indicadores; aunque los sistemas arrecifales del Pacífico y del Banco de Campeche también tienen bases de datos que ofrecen la oportunidad para el desarrollo de indicadores que permiten evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes ante los factores de estrés asociados al cambio climático.

Palabras clave: indicadores exposición, indicadores sensibilidad, indicadores adaptación

5.2.1. Introducción

Un modelo conceptual ilustra la complejidad de las interacciones involucradas en el análisis de la vulnerabilidad, haciendo hincapié en la variedad de factores y vínculos que potencialmente afectan a la vulnerabilidad del sistema humano-ambiental asociado (Turner *et al.*, 2003). Dentro de los enfoques de la vulnerabilidad, la vulnerabilidad de los Sistemas Socio-Ecológicos (SSE) tiene como objetivo explicar la vulnerabilidad de los sistemas humanos y ambientales acoplados (Adger, 2006). Según Leslie *et al.* (2015), los modelos conceptuales de Sistemas Socio-Ecológicos (SSE) permiten alcanzar metas de la sustentabilidad que benefician tanto a las sociedades humanas como a la naturaleza, integran información de diversas disciplinas naturales y sociales para proporcionar un medio teóricamente fundamentado y probar hipótesis sobre las dinámicas y las implicaciones de las interacciones socio-ecológicas.

La vulnerabilidad no es una característica medible de un sistema, sino un concepto que expresa la compleja interacción de los diferentes factores que determinan la susceptibilidad de un sistema a los impactos del cambio climático y es inexistente una regla fija que defina específicamente los factores a considerar, ni los métodos utilizados para cuantificarlos. Por lo cual, se habla de evaluar en vez de medir la vulnerabilidad (GIZ, 2016). Se han incrementado el desarrollo y uso de las evaluaciones de la vulnerabilidad ante el Cambio Climático en diversos sectores y campos de la sociedad que sirven como base para el desarrollo de estrategias de adaptación (Mamauag *et al.*, 2013). Estas evaluaciones se realizan por medio de variables clave, a lo cual Nguyen y colaboradores (2016) mencionan que el uso de estos indicadores de vulnerabilidad ante los impactos del CC en las costas pueden ayudar a identificar y priorizar regiones, sectores o grupos de la sociedad.

Los sistemas arrecifales rocosos y coralinos se encuentran en todos los mares de México (Santander *et al.*, 2018) pero se han reportado declines masivos a nivel nacional (Gardner *et al.*, 2003; Jackson *et al.*, 2014). En general, las amenazas al funcionamiento de estos ecosistemas se asocian a prácticas equivocadas de la pesca, al cambio climático y a la disminución de la calidad del agua (Harborne, Rogers, Bozec, & Mumby, 2017).

Dado lo anterior, las preguntas de investigación que se plantean en este capítulo son: 1) ¿Cómo se conceptualiza la vulnerabilidad de los arrecifes en México ante el CC? 2) ¿Existen indicadores que permitan desarrollar un marco metodológico para evaluar la vulnerabilidad de los SSE arrecifales de México ante los factores de estrés asociados al CC?

Para responder estos cuestionamientos, se definieron los objetivos de este capítulo que son: 1) elaborar un modelo conceptual de vulnerabilidad de los SSE arrecifales de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático y 2) identificar trabajos que presenten datos que puedan

ser transformados a indicadores que permitan construir un modelo metodológico teórico para evaluar la vulnerabilidad y sus elementos en los SSE arrecifales de México.

En este trabajo interesa abordar la vulnerabilidad de los arrecifes ante los factores de estrés asociados al CC utilizando la definición de vulnerabilidad del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC), la cual la define como la propensión o predisposición a ser afectado negativamente, y comprende conceptos de sensibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación (IPCC, 2014).

5.2.2. Antecedentes

En la Tabla 1 se presentan dos de los modelos conceptuales más importantes para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de coral ante el CC. Ambos consideran la dependencia de sus dos sistemas: el ecológico y el socioeconómico e incorporan los siguientes elementos de la vulnerabilidad: exposición, sensibilidad, impacto potencial y capacidad de adaptación. El modelo de Marshall y colaboradores (2009) marca el inicio del desarrollo y aplicación de estos modelos conceptuales para evaluar la vulnerabilidad de estos SSE arrecifales y el de Cinner *et al.* (2013) ha sido ampliamente citado en estos trabajos de vulnerabilidad (Reyna *et al.*, 2018). Para el caso de los arrecifes rocosos y rocosos con macroalgas, Okey *et al.* (2015), presentan un marco metodológico para evaluar la vulnerabilidad ecológica de estos ecosistemas en Canadá, utilizando indicadores de exposición, de sensibilidad y de impacto potencial climático (como un proxy inverso de la capacidad de adaptación).

Tabla 1. Los modelos conceptuales más utilizados para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante el cambio climático global.

Autor(es)	Sistemas por evaluar	Elementos de la vulnerabilidad por evaluar
Marshall <i>et al.</i> , 2009	Ecológico + Socio-económico	Exposición, sensibilidad, impacto potencial, capacidad de adaptación y dependencia de recursos
Cinner <i>et al.</i> , 2013	Ecológico + Socio-económico	Exposición, sensibilidad, impacto potencial ecológico, capacidad de recuperación, impacto potencial social y capacidad de adaptación

En México, el desarrollo de modelos para evaluar la vulnerabilidad de los SSE arrecifales ha sido mayormente para evaluar la capacidad de adaptación en las Áreas Naturales Protegidas, propuestos por la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (Conanp) y la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (Semarnat), en conjunto con organizaciones de la sociedad civil e instituciones académicas (Reyna-Fabián *et al.* 2018).

5.2.3. Métodos

5.2.3.1. *Elaboración del modelo conceptual de vulnerabilidad socio-ecológica*

Con la finalidad de elaborar un modelo conceptual para evaluar la vulnerabilidad para los SSE arrecifales para México ante el CC, objetivo 1 de este capítulo, se analizaron los trabajos que presentan este tipo de modelos: 54 trabajos publicados en revistas indizadas y en otras fuentes (capítulos de libros, reportes y manuales); de estos modelos se identificaron los elementos de vulnerabilidad que incorporan y los conceptos clave que podrían determinar la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes ante los factores de estrés asociados al cambio climático en el contexto nacional.

5.2.3.2. *Indicadores de vulnerabilidad socio-ecológica*

Para el objetivo 2 de este capítulo, se realizó una revisión de la literatura para identificar posibles indicadores que permitieran evaluar la vulnerabilidad ante el CC de estos ecosistemas en México. La metodología para la revisión de la literatura fue la propuesta por Fink, (2014), consistente en siete pasos: 1) seleccionar la pregunta de investigación; 2) seleccionar las bases de datos bibliográficas; 3) seleccionar los términos de búsqueda; 4) aplicar los criterios de selección prácticos; 5) aplicar los criterios de selección metodológicos; 6) realizar la revisión y 7) sintetizar los resultados. Según estas síntesis, se pueden producir nuevos resultados, en un proceso que se conoce como meta-análisis.

Para el Paso 1 se definió la siguiente pregunta de investigación: ¿Existen indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación que permitan desarrollar un modelo metodológico teórico para evaluar la vulnerabilidad de los SSE arrecifales de México ante los factores de estrés asociados al CC?.

En el paso 2, las bases de datos fueron consultadas hasta mayo de 2018; éstas se seleccionaron, principalmente, debido a su disponibilidad de acceso a través del Consorcio Nacional de Recursos de Información Científica y Tecnológica (Conricyt) del Conacyt e incluyen a: EBSCOhost, Science Direct, JSTOR, Annual Reviews, Springer Link, PNAS y a la plataforma Researchgate.net.

Para el Paso 3, se utilizaron los siguientes términos específicos de búsqueda: sensibilidad + arrecifes + México; adaptación + arrecifes + México; y exposición + arrecifes + México.

En el Paso 4 se aplicaron cuatro criterios de inclusión: 1) artículos publicados únicamente en inglés o español, 2) publicados desde 1997 a la fecha, 3) publicados en revistas indizadas, reportes, manuales, libros o capítulos de libros, y 4) que presentaran posibles indicadores de exposición, sensibilidad o capacidad de adaptación en los arrecifes de México.

El Paso 5, o criterios de selección metodológicos, permitió seleccionar los trabajos que identifican especies, poblaciones o comunidades de corales, peces, herbívoros, especies de importancia económica, comunidades humanas o sectores económicos sensibles, tolerantes o resistentes a algunos de los impactos del CC en los SSE arrecifales: aumento temperatura oceánica, tormentas, aumento nivel del mar y acidificación del océano (Cinner et al., 2016) como posibles indicadores en alguna de las siete regiones arrecifales propuestas por Santander *et al.* (2018): Pacífico Norte, Golfo de California, Pacífico Sur, Islas Revillagigedo, Corredor del suroeste del Golfo de México, Banco de Campeche y Yucatán y Caribe Mexicano.

El Paso 6 incluyó la revisión detallada de los trabajos obtenidos por medio de los pasos previos y esto permitió incorporar nuevos trabajos obtenidos de las referencias de dichas publicaciones o documentos.

En el Paso 7, se realizó una síntesis descriptiva de los posibles indicadores del modelo metodológico para evaluar la vulnerabilidad de los SSE arrecifales de México ante el CC. Se obtuvo el valor de estos indicadores en los arrecifes, se categorizaron dentro de las regiones arrecifales mencionadas previamente con el fin de clasificar a las regiones de acuerdo al número de trabajos con bases de datos con potencial a la generación de indicadores de vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes ante los factores de estrés asociados al cambio climático. Esto con la finalidad de proponer el modelo metodológico con los indicadores que se han generado a nivel nacional que permitan evaluaciones inmediatas de esta vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes en diversas escalas espacio temporales.

5.2.4. Resultados y discusión

5.2.4.1. Modelo conceptual de vulnerabilidad climática de los arrecifes en México

La evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes ante los factores de estrés asociados al cambio climático no están aislada del ambiente que lo rodea, por esta razón deben identificarse las condiciones de contorno de los sistemas arrecifales, también sería importante que se representen como sistemas complejos; a lo cual Dizon y Yap (2006) comentan que, para estos ecosistemas, se han realizado algunas aproximaciones sobre su complejidad, pero se necesita progresar más y ser más efectivos en la línea de enfoques más holísticos, integrativos y de mayor escala.

En la Figura 1 se presenta el modelo conceptual de vulnerabilidad adaptado para los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático, presenta dos sistemas, el sistema ecológico (recuadro sólido naranja) y el sistema socioeconómico (recuadro sólido azul) que se retroalimentan (flecha sólida azul). Los nuevos aportes a este modelo conceptual incluyen a: la Resiliencia Socio-Ecológica (recuadro sólido verde), los impactos de origen no climático: las presiones regionales y locales (recuadro punteado morado), la duración, frecuencia e intensidad

de los impactos del CC (flecha colores degradados), los ecosistemas asociados (pastos marinos, manglares y ecosistemas cuenca terrestre) y a la acumulación de impactos climáticos más los impactos no climáticos (flecha anaranjada) que se detallan a continuación.

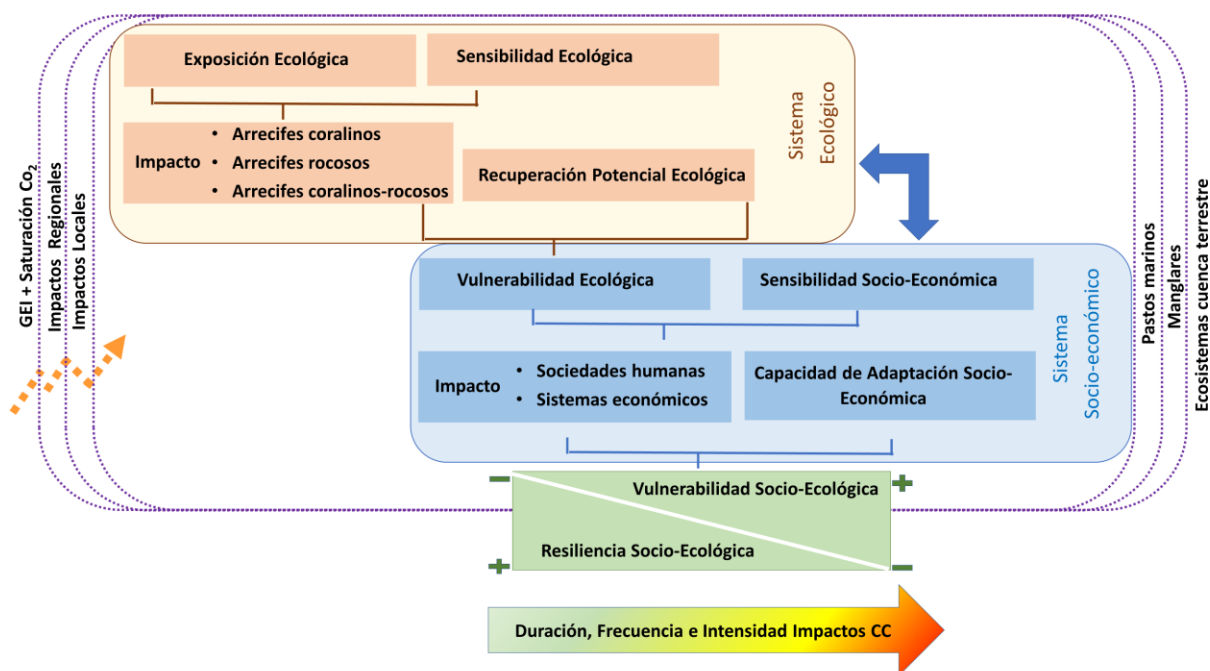


Figura 1. Modelo conceptual de vulnerabilidad de los arrecifes de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático (modificado de Marshall *et al.*, 2009 y Cinner *et al.*, 2013).

5.2.4.1.1. Resiliencia Socio-Ecológica

Se incorpora a la Resiliencia Socio-Ecológica (RSE), recuadro sólido verde de la Figura 1, al modelo conceptual de vulnerabilidad para los arrecifes de México del modelo presentado por la CONANP, CEGAM, WWF y Fundación Carlos Slim (2015) para las Áreas Naturales Protegidas de México (ANP), en donde la relación entre la vulnerabilidad y la resiliencia es inversa. Esta correlación negativa implica que las comunidades ecológicas o sociedades humanas con alta vulnerabilidad suelen ser menos resilientes mientras que las de alta resiliencia típicamente implican menos vulnerabilidad (GIZ, 2016). Se incorpora este elemento debido a su importancia, Padilla y colaboradores (2010) mencionan que ha surgido un nuevo paradigma para la conservación de estos ecosistemas, el cual consiste en diseñar e implementar estrategias de adaptación al cambio climático global, a través de fortalecer la resiliencia en estos ambientes y sociedades, permitiendo que sus mecanismos de respuesta naturales actúen para adecuarse al cambio.

Scheffer *et al.* (2015) mencionan que actualmente existen grandes retos ante la limitación de los datos ecológicos para evaluar la resiliencia ecológica, pero, ha incrementado la disponibilidad de los datos masivos y en línea de programas de monitoreo. Por lo cual, hay información que podría ser utilizada de forma novedosa para inferir las propiedades de estabilidad de los ecosistemas.

Por ejemplo, para los arrecifes de coral, Maynard *et al.* (2010) proponen un modelo para evaluar la resiliencia de los arrecifes de coral en Australia. Presentan 19 indicadores categorizados por importancia, i.e. indicadores críticos: conectividad, cobertura de coral, arrecifes previamente expuestos a estrés térmico y abundancia de especies resistentes, indicadores muy importantes: abundancia de colonias de coral maduras, disponibilidad del sustrato, abundancia de herbívoros, e indicadores importantes: exposición a surgencias, reducción de la luz, ausencia de bioerosionadores y ausencia de enfermedades de coral; además señalan la importancia de realizar estas evaluaciones que permitan identificar a los sitios con menor potencial de resiliencia con la finalidad de proponer medidas de manejo para reducir su vulnerabilidad.

5.2.4.1.2. Impactos de origen no climático

Los impactos de origen no climáticos se consideran en dos escalas. La primera escala incluye los impactos derivados de actividades locales: al desarrollo costero no planificado, la pesca destructiva y excesiva, el turismo y las actividades acuáticas mal practicadas, especies invasoras (algas, invertebrados y peces), la contaminación marina, los altos niveles de nutrientes (Secaira Fajardo & Acevedo, 2017) y el tráfico ilegal de especies de coral y otros organismos (WWF, s/f). Y la segunda escala incorpora a los derivados de escalas regionales, consideran los procesos que ocurren a nivel cuenca terrestre a través de flujos hidrológicos superficiales y subsuperficiales, así como al aporte de sedimentos, nutrientes terrestres y contaminación (contaminación de origen en la cuenca: sedimentos lodosos, metales pesados) y a los derrames de petróleo (eventos puntuales con alcances regionales importantes).

Autores como Ainsworth *et al.*, (2012) mencionan que las evaluaciones de vulnerabilidad se consideran de "segunda generación" cuando abordan tanto factores no climáticos como la capacidad de adaptación del sistema. Este en sí, marca el cambio de una evaluación del impacto climático a una evaluación de la vulnerabilidad.

Además, la importancia de la acumulación de los GEI + saturación CO₂ en la atmósfera, de los impactos no climáticos regionales y locales se muestra en la Figura 1 (flecha naranjada degradada), la cual señala que, a mayor número de éstos, mayor efecto en la vulnerabilidad de los SSE arrecifales. Halpner y colaboradores (2008) han evaluado los impactos acumulativos de diversos ecosistemas marinos a nivel global y señalan a los arrecifes rocosos y coralinos con altos valores de estos impactos acumulativos (climáticos y no climáticos).

5.2.4.1.3. Ecosistemas asociados

Los pastos marinos y a los manglares se incluyen como condiciones de contorno debido al importante flujo entre estos ecosistemas (Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit, 2013); además de que diversas especies de peces arrecifales migran, en algún momento de su ciclo de vida, entre estos ecosistemas (Mumby, 2006).

Los ecosistemas de las cuencas terrestres también se incorporan en el modelo, debido a su conexión directa con la salud de los arrecifes (Larsen, Leon, McGrath, & Trancoso, 2013). También, debido a que el mantenimiento de la conectividad ecológica entre selvas, manglares y humedales costeros y arrecifes de coral, resulta una estrategia fundamental para mantener la resiliencia de especies y ecosistemas a nivel regional (March et al., 2011). Por ejemplo, la deforestación de los bosques y su consecuente aporte de sedimentos a los arrecifes, por medio de los ríos, puede llegar a enterrarlos (Manson, 2004). Por la importancia de esta interconexión entre estos ecosistemas, su grado de conservación y de vulnerabilidad se relaciona a la vulnerabilidad de los SSE arrecifales.

5.2.4.1.4. Duración, frecuencia e intensidad de los impactos del CC

La duración, la frecuencia y la intensidad de los impactos del CC y los impactos de origen no climáticos representa un importante efecto en los umbrales que determinan a los diversos estados de los arrecifes y cambios en sus poblaciones (Done, 1992; Dizon y Yap, 2006; Hughes, 1994; y Benet *et al.*, 2016). Esto es importante porque repercute tanto en su recuperación y en su resiliencia (Baker, Glynn, y Riegl, 2008; Marshall y Schuttenberg, 2006; Obura, 2005).

El trabajo de Smitson y Conklin (2008) en Hawái ejemplifica un caso bien documentado que evidencia que al remover la frecuencia e intensidad de un agente causante de efectos negativos para la comunidad de corales éstos pueden mejorar nuevamente. Históricamente en Kāneʻohe Bay se ha documentado el sobrecrecimiento de la macroalga *Dictyosphaeria* cavernosa sobre los corales, este sobrecrecimiento se atribuye a los nutrientes vertidos por el drenaje que se descargaban en la zona de arrecifes desde el inicio de los noventa; en 1977 la comunidad desvía el drenaje que se vertía en el arrecife y entre 1977-2008 se reporta una disminución importante de la cobertura de esta macroalga.

5.2.4.2. Marco metodológico teórico con indicadores para evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes en México ante los factores de estrés asociados al cambio climático el CC

Para ejemplificar el conocimiento de los indicadores de vulnerabilidad en los SSE arrecifales de México, se mencionan algunos de éstos para el sistema ecológico y el socio-económico. La finalidad de separarlos es facilitar la elección de los indicadores que permitirían tener en el mediano y largo plazo un monitoreo de los cambios a nivel de país. El problema con los diagnósticos a nivel nacional es que el conocimiento de los sistemas arrecifales es heterogéneo; de algunos sistemas se ha publicado mucho y de otros casi nada. La información detallada para cada

uno de estos trabajos se presenta en el Anexo I para el sistema ecológico y en el Anexo II para el sistema socio-económico.

5.2.4.2.1. Sistema Ecológico

En la Tabla 2 se presenta la síntesis de los trabajos con posibles indicadores para el sistema ecológico, por región arrecifal. También se muestra el elemento de vulnerabilidad dentro del cual fueron categorizados (exposición, sensibilidad o recuperación potencial ecológica), marcado con asterisco se señalan los trabajos que presentan proyecciones futuras. También se presentan por el factor de estrés asociado al CC relacionado de la siguiente manera: en azul los relacionados al incremento de temperatura, en amarillo al incremento en frecuencia e intensidad de tormentas tropicales, en anaranjado a la acidificación y en verde al aumento del nivel del mar. Estos trabajos se presentan mayormente para la exposición (43%) y para la sensibilidad (39%), y menormente para la recuperación potencial ecológica (19%). La mayoría se relacionan al aumento de temperatura (66%) y al aumento en tormentas tropicales (25%).

En la Figura 2a) se observa que el Caribe y el Golfo de California son las regiones arrecifales con mayor porcentaje de trabajos con indicadores (28% y 18% respectivamente) y las Islas Revillagigedo son la región con menor porcentaje (10%). En b) cuatro regiones (Caribe, Pacífico Norte, Pacífico Sur y Golfo de California) presentaron trabajos con indicadores para los tres elementos de vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y recuperación potencial), las otras tres regiones (Revillagigedo, Veracruz y Campeche) no contaron con trabajos con posibles indicadores para la recuperación potencial. Esto indica que, en el Caribe, Pacífico Norte, Pacífico Sur y Golfo de California sería posible hacer una evaluación inmediata.

A pesar de que las regiones del Caribe y Golfo de California son las que mayor número de posibles indicadores presentaron, se señala que la región del Caribe es una de las zonas que presenta las mayores anomalías y frecuencia de aumentos en la SST (Hayes & Goreau, 2008) y, en la región del Golfo de California, se menciona que la conectividad larvaria actual podría tener una importante reducción con el calentamiento oceánico (Álvarez-Romero *et al.*, 2017).

Se han identificado diversos organismos tolerantes a los factores de estrés asociados al CC; sin embargo, Álvarez-Filip *et al.* (2013) demostraron que las especies de coral que pueden sobrevivir a las nuevas condiciones (mayor temperatura y acidez) no serán capaces de mantener ni la estructura ni la complejidad del arrecife aun cuando mantengan la cobertura en el Caribe.

Tabla 2. Trabajos nacionales con posibles indicadores de vulnerabilidad para el sistema ecológico, en azul los factores de estrés asociados al aumento de la temperatura, en amarillo al aumento en intensidad y frecuencia de las tormentas tropicales, en anaranjado a la acidificación del océano y en verde al aumento en el nivel del mar.

Exposición Ecológica		Sensibilidad Ecológica		Recuperación Potencial	
Indicador/Índice	Región	Indicador/ Índice	Región	Indicador/ Índice	Región
Tendencias elevación temperatura (1982-2006) ⁴	II	Reporte de sitios con blanqueamiento de coral ¹	VII	Proyección de poblaciones sanas de peces loro aplazan la pérdida de complejidad estructural del arrecife ³ *	VII
Trayectoria huracanes que dañaron corales (2005) ¹	VII	Pérdida de % coral vivo ante ENSO ² y ¹³	II y VII	Aumento de abundancia y rango de distribución pronosticada ante escenarios de incremento de temperatura (1-3°C) para especies de peces (<i>P. punctatus</i> , <i>C. punctatissima</i> , <i>S. flavilatus</i> , <i>C. oxycephalus</i> , <i>S. ghobban</i> y <i>T. grammaticum</i>) ¹⁴ *	II
Sea Surface Temperature SST (1963-2018) ⁷ y 1985-2017 ³²	I-VII	Incremento de roca expuesta del sustrato después de dos huracanes (Emily y Wilma, en 2005) a arrecifes poco profundos (< 8 m profundidad) ²	VII	Aumento en % cobertura de coral vivo de distintas especies antes y después de huracanes (Emily y Wilma en 2005) ¹⁷	VII
Sea Surface Temperature Máximas 1985-2017 ³²	I-VII	Decremento de coral duro después de dos huracanes (Emily y Wilma, en 2005) a arrecifes poco profundos (< 8 m profundidad) ²	VII	Aumento en% cobertura de esponjas vivas en distintos tipos de arrecifes después de huracán (Gilberto 1998) ¹⁸	VII
Anomalías SST (1963-2018) ⁷ y 1985-2017 ³²	I-VII	Daño en un tipo de corales en específico después de dos huracanes (Emily y Wilma, en 2005) en la cresta de los arrecifes a corales ²	VII	Aumento en % cobertura de coral vivo en distintos tipos de arrecifes después de huracán (Gilberto 1998) ¹⁸	VII
Anomalías SST Máximas 1985-2017 ³²	I-VII	Especies de peces sensibles al aumento temperatura oceánica proyectada para 2050 ⁴ *	II	Aumento en número de peces de arrecifes de coral en distintos tipos de arrecifes después de huracán (Gilberto 1998) ¹⁸	VII
Proyección aumento en temperatura oceánica promedio para 2030 y 2050 (de 0.63°C) ⁴ *	II	Especies de equinodermos sensible al aumento temperatura oceánica proyectada para 2050 ⁴ *	II	Sitios con relación positiva entre tasa de calcificación y SST para especies de coral (<i>Pavona gigantea</i> y <i>Pavona varians</i>) ²⁰	IV
Anomalías SST Mínimas 1985-2017 ³²	I-VII	Reporte severidad blanqueamiento 1963-2018 ⁷	II, III, IV, VI y VII	Especies de coral presentes en sitios (ojos de agua) con estados de saturación Ω_{arg} bajos ²³	VII
Promedios mensuales de SST (derivados de satélites), ecuación tendencia lineal y el coeficiente de regresión (temperatura vs tiempo) para sitios arrecifales 1984-2003 ⁵	VII	Observaciones de blanquimientos de coral (1983-2003) ¹⁰	VII	Proyecciones de posibles nuevas áreas de presencia de peces (<i>Zanclus cornutus</i>) relacionados a temperaturas cálidas ²⁴ *	I y II
Promedios mensuales del estado de saturación Ω_{arg} (enero y agosto 1996 y 2006), promedios anuales de Secular decrease in sea-surface aragonite saturation state (1996, 1998, 2000, 2004 y 2006) ⁶	VII	Susceptibilidad al aumento nivel del mar ¹²	VII	Frecuencias observadas mayores clados de simbioses dinoflagelados (D1) en arrecifes someros y profundos sobre otros clados (2008) en <i>Pollicipora</i> , <i>Pavona</i> y <i>Porite</i> ²⁵	IV
SST Tendencia (a 7 días) 2018 ³²	I-VII	Decremento en % de cobertura coral vivo antes y después condiciones ENSO ¹³ y ²²	II y IV	Sitios con altas tasas de éxito en fragmentación (número de fragmentos exitosos -m ²) en 2001-2002 ²⁶	IV
Degree Heating Weeks, en 2005 ¹ y de 1985-2017 ³²	I-VII	Registro de mortalidad de especies de coral después de blanqueamiento ¹³	II		

Degree Heating Weeks Máximos 1985-2017 ³²	I-VII	Decremento en abundancia y rango de distribución pronosticada ante escenarios de incremento de temperatura (1-3°C) para especies de peces (<i>A. troschelli</i> , <i>G. simplicidens</i> , <i>C. gracilis</i> y <i>C. limbaughii</i>) ¹⁴ *	II
HotSpots (1963-2018) ⁷ y 1985-2017 ³²	I-VII	Sensibilidad de géneros de coral al estrés térmico (coeficiente de correlación entre SST promedio anual 1977-2006 y tasas de calcificación) ¹⁵	VII
HotSpots Máximos 1985-2017 ³²	I-VII	Reporte daños extensos a géneros de corales (<i>Agaricia</i> y <i>Porites</i>) y esponjas después de dos huracanes (Emily y Vilma 2005) en arrecifes ¹⁶	VII
Efecto de la temperatura en valor mensual de Ω_{arg} (sept 2012-agosto 2013) ⁸	II	Decremento en % cobertura de algunas especies corales vivos después de huracanes (Emily y Vilma en 2005 y Gilberto 1988) en arrecifes ¹⁷	VII
Distribución del estado saturación aragonita (1880, 2000 y 2050) ¹¹	I-VII	Decremento en % vivo de cobertura de coral en distintos tipos de arrecifes después de huracán (Gilberto 1998) ¹⁸	VII
Disturbio por huracanes ¹²	VII	Decremento en % vivo de cobertura de esponjas en distintos tipos de arrecifes después de huracán (Gilberto 1998) ¹⁸	VII
Promedio mensual de SST (oC) durante condiciones ENSO (1997-1998) ¹³	II y IV	Decremento del crecimiento anual (g cm ⁻² año ⁻¹) en condiciones La Niña vs condiciones Non-ENSO (2010-2011 vs 2012-2013) para <i>Pollicipora</i> ¹⁹	II
Promedio mensual de SST (oC) durante condiciones La Niña (2010-2011) ¹⁹	IV	Decremento en tasa de fotosíntesis neta máxima (μmol O ₂ cm ⁻² h ⁻¹) para algas calcáreas coralinas en temperaturas cálidas (32oC) ²⁷	VII
Promedio mensual de SST (°C) para tres estaciones del año (2003-2009) ²⁸	I-VII	Decremento en % cobertura de coral en proyecciones de aumento SST, aumento en % mortalidad ante proyecciones de blanqueamiento y pérdida de biomasa de coral para 2065 ³⁰ *	VII
Bleaching Alert Area Máxima 1985-2017 ³²	I-VII	Decremento en % biomasa de peces, gastrópodos, bivalvos, langosta, camarones, pulpos, tiburones y tortugas ante proyecciones de acidificación para 2065 ³⁰ *	VII
Alerta de Blanqueamiento (diario) ³²	I-VII		
Pronósticos semanales (proyección a cuatro meses) de la probabilidad (60% y 90%) de blanqueamiento por estrés térmico ³²	I-VII		

- 1 Eakin et al. (2010)
- 2 Wilkinson & Souter (2008)
- 3 Bozec, Alvarez-Filip, & Mumby (2015)
- 4 Ayala-Bocos, Reyes-Bonilla, Calderón-Aguilera, Herrero-Perezrul, & González-Espinosa (2015)
- 5 Hayes & Goreau (2008)
- 6 Gledhill, Wanninkhof, Millero, & Eakin (2008)
- 7 reefgis (s.f.)
- 8 Norzagaray-López et al. (2017)
- 10 Burke y Malden (2005)
- 11 Boesch, Field, & Scavia (2000)
- 12 Rivera-Monroy et al. (2004)
- 13 Reyes-Bonilla, Carriquiry, Leyte-Morales, & Cupul-Magaña (2002)
- 14 Ayala-Bocos & Reyes-Bonilla (2008)
- 15 Carricart-Ganivet, Cabañillas-Terán, Cruz-Ortega, & Blanchon (2012)
- 16 Álvarez-Filip & Gil (2006)
- 17 Álvarez-Filip, Millet-Encalada, & Reyes-Bonilla (2009)
- 18 Fenner (1991)
- 19 Tortolero-Langarica, Rodríguez-Troncoso, Cupul-Magaña, & Carricart-Ganivet (2017)
- 20 Medellín-Maldonado et al. (2016)

- 22 Calderon-Aguilera & Reyes-Bonilla (2006)
- 23 Crook, Potts, Rebolledo-Vieyra, Hernandez, & Paytan (2012)
- 24 Fernández-Rivera Melo, Reyes-Bonilla, Martínez-Castillo, & Pérez-Alarcón (2018)
- 25 Walther-Mendoza, Reyes-Bonilla, Lajeunesse, & López-Pérez (2016)
- 26 López-Pérez, Mora-Pérez, & Leyte-Morales (2007)
- 27 Vásquez-Elizondo & Enriquez (2016)
- 28 Martínez, Manzanilla, & Hidalgo (2011)
- 29 Alva-Basurto & Arias-González (2014)
- 30 Alva-Basurto & Arias-González (2014)
- 32 NOAA (s.f.)
- 33 UNIAMTOS (s.f.)

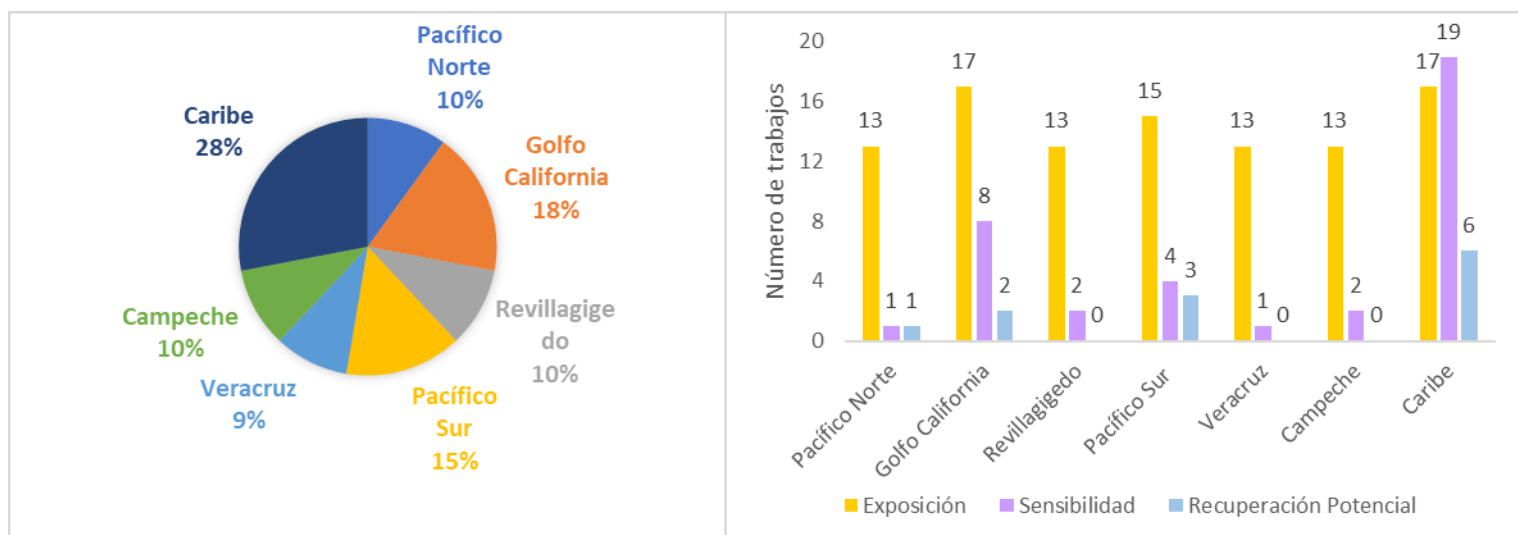


Figura 2. En a) el porcentaje de los trabajos por región del total de trabajos encontrados para el sistema ecológico y en b) el número total de trabajos por categoría de vulnerabilidad (exposición, sensibilidad y recuperación potencial) por región arrecifal.

5.2.4.1.2. Sistema Socio-Económico

En la Tabla 3 se presenta la síntesis de los trabajos con posibles indicadores para el sistema socioeconómico por región arrecifal. También, se muestra el elemento de vulnerabilidad dentro del cual fueron categorizados (sensibilidad o capacidad de adaptación), marcado con asterisco se señalan los trabajos que presentan proyecciones futuras y en azul los relacionados al incremento de temperatura y en amarillo al incremento en frecuencia e intensidad de tormentas tropicales. Estos índices se presentan mayormente para la sensibilidad (57%) y menormente para la capacidad de adaptación (43%).

En la Figura 3a) se observa la distribución de porcentajes de tipos de indicadores del total de trabajos agrupados por las regiones arrecifales (14-16%). La región Islas Revillagigedo se ha estudiado menos y por lo tanto no hay tantos trabajos de donde obtener indicadores (10%). En 3b) se muestra que las siete regiones presentaron trabajos con indicadores para los dos elementos de vulnerabilidad (sensibilidad y capacidad de adaptación). Esto también permitiría una inmediata evaluación del sistema socio-económico en algunos arrecifes de todas las regiones.

Tabla 3. Trabajos nacionales con posibles indicadores de vulnerabilidad para el sistema socio-económico

Sensibilidad Socio-Económica		Capacidad Adaptación Socio-Económica	
Indicador/ Índice	Región	Indicador/ Índice	Región
Grado de dependencia a las pesquerías en arrecifes de coral para alimento ¹	I-VII	Potencial del país para responder a los cambios debidos a la contribución de las pesquerías realizadas en los arrecifes al sistema alimentario ¹	I-VII
Ocurrencia de desastres por windstorms (ciclones, huracanes, tormentas, tornados, tormentas tropicales, tifones y desastres por tormentas invernales) en estados costeros (1900-2007) ²	I-VII	Aumento de abundancia y rango de distribución pronosticada ante escenarios de incremento de temperatura para especies de peces de importancia económica (<i>Scarus ghobban</i>) ^{5 *}	II
Ocurrencia de desastres naturales acumulados (inundaciones, volcánicos, windstorms, terremotos, oleaje, sequías y escurrimientos de tierra) en estados costeros (1900-2007) ²	I-VII	Comunidades pesqueras con valores bajos para índice de vulnerabilidad social ante factores de estrés antropogénicos (incluyendo CC) comparado con 12 comunidades ¹⁰	II
Número de huracanes que tocaron tierra por estados costeros (1951-2000) ³	I-VII	Atlas de riesgo para municipios costeros ¹²	I, II, IV-VII
Trayectorias de los huracanes (categoría 5) que tocaron tierra (1951-2000) por estados costeros ³	V, VI y VII	Playas de importancia turística con erosión extrema posterior huracán (Wilma, 2005) ¹³	VII
Número de tormentas tropicales que tocaron tierra por estados costeros (1951-2000) ³	I-VII	Identificación de cinco especies de peces de ornato con potencial económico como actividad económica sustentable ¹⁴	II y III
Peligro en tierra de huracanes, de marejadas de tormenta y de inundaciones ⁴	VII	Sitios con cooperativas de mujeres pescadoras establecidas como apoyo a la economía familiar	VI
Trayectorias de los ciclones tropicales que han tocado territorio nacional (1970-2009) ¹⁸	I-VII	Comunidades humanas con baja vulnerabilidad ante el CC debido al acceso a la información sobre estrategias adaptativas ante el CC ^{15 y 16}	I
Anomalías negativas entre captura por unidad de esfuerzo de macroalga con importancia económica (<i>Macrocystis pyrifera</i>) y el aumento de SST ⁶	I	Estados costeros con Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático ¹⁷	I-VII
Decremento de organismos con importancia económica sensibles a proyecciones aumento temperatura (en escenarios de emisiones A1B, A2 y B2 de GEI) para 2030 y 2050 ⁷	I-VII	Estados costeros con Ley Local de CC o propuesta de esta Ley ¹⁷	I, II, IV, V y VII
Decremento de abundancia y distribución de especies con importancia económica ante proyecciones de SST para 2030 y 2050 ⁸	II	Municipios costeros con Plan de Acción Climática Municipal ¹⁷	I, II, V, VI y VII
Comunidades pesqueras con valores altos para índice de vulnerabilidad social ante factores de estrés antropogénicos (incluyendo CC) comparado con 12 comunidades ¹⁰	II	17 convenios, protocolos y programas internacionales firmados/ratificados por México relacionados a la conservación, protección o manejo de los SSE arrecifales (Anexo III)	I-VII
Zonas susceptibles a inundaciones (por criterios topográficos, geológicos, geomorfológicos, edafológicos, cobertura vegetal y de precipitación) ¹⁹	I, II, IV-VII	30 leyes, normas, reglamentos, estrategias o programas relacionados a la conservación, protección o manejo de los SSE arrecifales (Anexo IV)	I-VII
Impacto económico por ciclones tropicales (200-2012) por entidad federativa en millones de pesos ¹⁹	I, II, IV-VII	21 ejemplos de instrumentos de gestión de conservación y manejo de los SSE arrecifales que permite aumentar su resiliencia o adaptación al CC (Anexo V)	I-VII
Impacto económico por ciclones inundaciones (200-2012) por entidad federativa en millones de pesos ¹⁹	I, II, IV-VII	Cooperación internacional y nacional para la realización de programas y acciones de adaptación al cambio climático ¹⁷	I-VII
Porcentaje municipios vulnerables (número de municipios vulnerables en cada estado en relación con el total de municipios de cada estado) ¹⁹	I, II, IV-VII	Valor índice de Capacidad Adaptativa (Capital Humano, Capital Social, Capital Financiero y Capital Natural) por municipios ²²	I-VII

Valor índice de Sensibilidad climática (Población, Salud y Productivo) por municipios ²²	I-VII
Índice de población susceptible a inundaciones, porcentaje del municipio con zonas de inundación ²²	I-VII
Modelos de Escenarios cambio climático (modelo BCC-CSM1, CAnESM 1 y 2, CNRMCM5, CSIRO-Mk3, GFDL-CM3, GISS-E2-R, HADGEM2-ES, INM, IPSL-cm5a-IR, MICRO5, MICROesm, MICRO-ESM-chem, MPI-ESM-LR. MRI-CGCM3, MRI-CGCM3 y Ensamble REA) para RCP 8.5 y 4.5 Temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura promedio, precipitación y % cambio precipitación para estados costeros ²¹ *	
1	Hughes et al. (2012)
2	Maynard-Ford, Phillips, Chirico, & Survey (2008)
3	Jáuregui (2003)
4	Pereira, Prezas, Olivares, Fragoso, & Niño (2013)
5	Ayala-Bocos & Reyes-Bonilla (2008)
6	Casas Valdez, Serviere Zaragoza, Lluch Belda, Marcos, & Aguila Ramírez (2003)
7	Martínez et al. (2011)
8	Ayala-Bocos et al. (2015)
9	Alva-Basurto & Arias-González (2014)
10	Morzaria-Luna, Turk-Boyer, & Moreno-Baez (2014)
11	Scott, Simpson, & Sim (2012)
12	CENAPRED (s.f.)
13	Secaira Fajardo & Acevedo (2017)
14	Gijón-Díaz, Reyes-Bonilla, Guerrero-Izquierdo, & Fernández-Rivera Melo (2017)
15	Salinas Akhmadeeva et al. (2017)
16	Hernández-Velasco, Villaseñor, Torre, Suarez, & Espinoza (2015)
17	SEMARNAT & INECC (2012)
18	INECC & SEMARNAT (2012)
19	Gobierno de la República (2014)
20	Monterroso Rivas et al. (2014)
21	UNAM (s.f.)
22	SEMARNAT & INECC (2012)
23	Azuz-Adeath (2010)

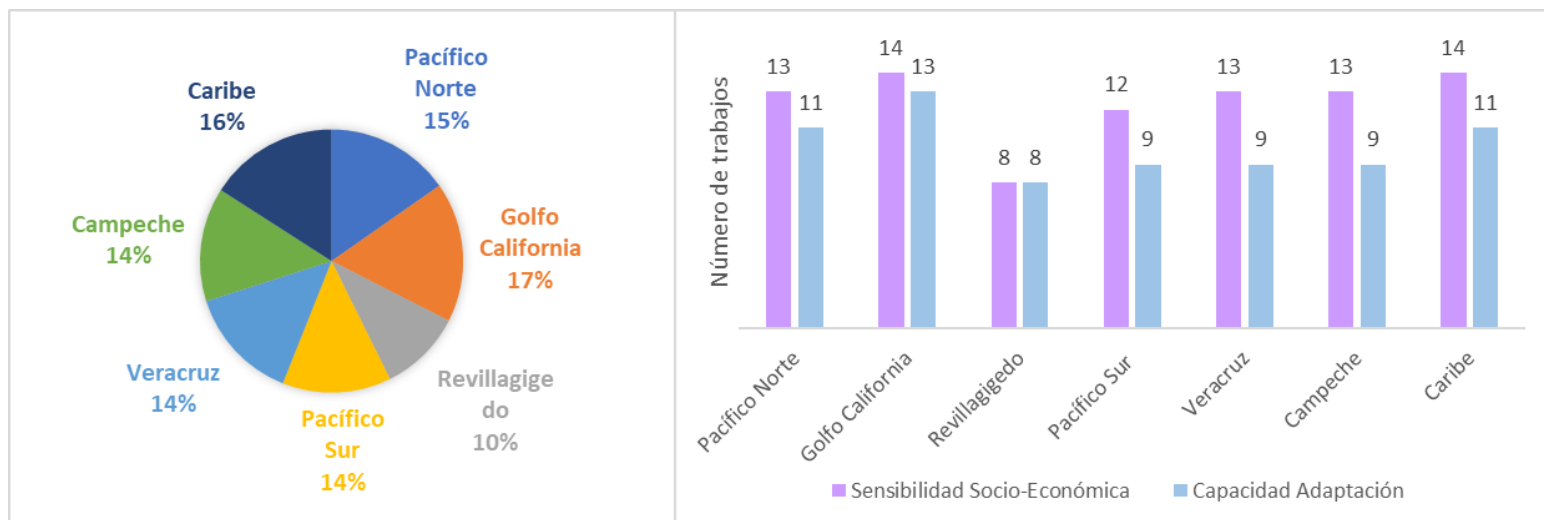


Figura 3. En a) el porcentaje de los trabajos por región del total de trabajos encontrados para el sistema socio-económico y en b) el número total de trabajos por categoría de vulnerabilidad (sensibilidad y capacidad de adaptación) por región arrecifal.

En cuanto a la escala espacial de los indicadores, a diferencia del sistema ecológico, en este sistema la mayoría de los indicadores se desarrollan para escalas administrativas (estatales o municipales); por lo cual, ese sugiere el desarrollo de éstos a escalas más locales y cercanas a las comunidades humanas aledañas a los arrecifes. Para la escala temporal, especialmente para la sensibilidad, se encontraron diversos trabajos elaborados con datos históricos (i.e. para los huracanes y ciclones tropicales); sin embargo, SEMARNAT e INECC, (2012).

Para la capacidad de adaptación, dentro de los instrumentos internacionales que México ha firmado y se ha comprometido relacionados a la conservación, protección o manejo de los SSE arrecifales, se identificaron 17 y se presentan detalladamente en el Anexo III. La mayoría son convenciones con la Organización de las Naciones Unidas (ONU), también se presentan protocolos de acción derivados de las mismas convenciones; la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático es la más relacionada a la vulnerabilidad de los sistemas arrecifales. En cuanto a las leyes, normas, reglamentos, estrategias y programas nacionales, se identificaron 30 instrumentos relacionados directamente a la capacidad de adaptación o resiliencia de estos SSE arrecifales (Anexo IV), la mayoría son normas oficiales, seguidas por las leyes y estrategias. El Programa Especial de Cambio Climático (2014-2018) es el más relacionado a el tipo de vulnerabilidad que aquí se pretende evaluar. A nivel estatal, se implementan los Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático los cuales tienen como objetivo crear instrumentos de apoyo para el diseño de políticas públicas para la sustentabilidad y acciones relacionadas en materia de cambio climático. A nivel municipal, los Planes de Acción Climática Municipal, tienen el objetivo de crear

capacidades entre los tomadores de decisiones de los municipios sobre cambio climático y sus impactos, así como promover políticas públicas a nivel local (SEMARNAT & INECC, 2012).

Como ejemplo del primero, el Programa Estatal de Quintana Roo, en donde se ubica el Sistema Arrecifal Mesoamericano, presenta como acciones de adaptación: 1) la protección especial de los ecosistemas costeros en especial el manglar y los arrecifes y 2) promover y difundir la importancia de la conservación de los ecosistemas (Pereira et al., 2013). El Programa Veracruzano ante el Cambio Climático, dentro del eje de acción 5 (Costas) tiene por objetivo establecer un programa regional para la conservación y rehabilitación de los humedales, lagunas costeras, arrecifes y dunas, también el diseño y desarrollo de infraestructura de protección ante un incremento del nivel del mar (Veracruzana, Ecología, & México, 2009). El Programa Estatal de Baja California Sur, señala que las medidas para la conservación de los arrecifes coralinos (de Cabo Pulmo) “deben tomarse hoy porque mañana puede ser demasiado tarde” (Gámez et al., 2012). Y, el Plan Acción Climática de Cozumel, también ubicado en el mismo sistema arrecifal, señala que “los huracanes, tormentas y depresiones tropicales ocasionan impactos en la biodiversidad y ecosistemas costeros que a su vez repercuten en el sector turismo” (“Plan acción climática de Cozumel 2011-2013”, s/f).

A pesar del gran número de acciones jurídicas nacionales e internacionales identificadas como posibles indicadores, éstos no aseguran su aplicación. Por ejemplo, en 2017 Velázquez señala que “en la Reunión Técnica sobre la Protección de Arrecifes Coralinos y Rocosos, convocada por la Comisión Especial de Cambio Climático, algunos especialistas en medio ambiente y activistas han pedido la creación de una ley que proteja los arrecifes mexicanos, al señalar que actualmente no existe una regulación integral y existen vacíos legales”.

Relacionado a lo anterior, México ha firmado el Convenio sobre la Diversidad Biológica y en su Estrategia Nacional señala (dentro del eje integración y gobernanza, línea de acción 6.1. Armonización e integración del marco jurídico) que hay que desarrollar normas encaminadas a la reducción de amenazas a la biodiversidad específicas para cada ecosistema vulnerable como el de los arrecifes.

Por otro lado, la sociedad civil organizada se muestra inquieta y mencionan que las especies *Porites sverdrupi*, *Pocillopora inflata*, *Fungia curvata*, *Psammocora stellata*, *Pocillopora elegans*, *Pocillopora eydouxi*, *Psammocora obtusangula* y *Porites lobata* se encuentran en la Lista Roja de la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza y no en la NOM-059-SEMARNAT-2010, por lo que resulta urgente su inclusión en esta norma, así como su atención en el Golfo de California y en el Pacífico mexicano (CostaSalvaje, 2017).

En el Anexo V se muestran los instrumentos de gestión de conservación y manejo de los SSE arrecifales que pudieran usarse como indicadores de acciones que permiten aumentar su resiliencia o adaptación al CC. Algunos ejemplos se mencionan a continuación.

1. Manejo Basado en Ecosistemas: muestra el proceso de interfase ciencia-política-sociedad para proponer medidas de manejo novedosas. Por ejemplo, el marco conceptual del proyecto PANGAS contempla el desarrollo de capacidades y recursos humanos y el compromiso con actores clave y las agencias gubernamentales durante todo el proyecto acompañados por la academia (Munguia-Vega *et al.*, 2015). Para este esquema de manejo es importante señalar que, dentro del contexto jurídico nacional (compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030), como componente de adaptación con compromisos no condicionados, se presenta a la adaptación basada en ecosistemas (Gobierno de la República, 2015). Siguiendo esta política, probablemente se promocionará esta herramienta en sistemas arrecifales.
2. Zonas de Refugio: se establecen como una herramienta de manejo pesquero dentro de la Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables en 2007, como áreas delimitadas, con la finalidad de conservar y contribuir, natural o artificialmente, al desarrollo de los recursos pesqueros con motivo de su reproducción, crecimiento o reclutamiento, así como preservar y proteger el ambiente que lo rodea (Niparaja, 2017). En algunas zonas de refugio pesquero hay esfuerzos para establecer la línea base para la evaluación de su éxito, por ejemplo en la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an y en la Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro (Fulton, García, Caamal, & Bourillón, 2014). A nivel internacional se han establecido zonas de refugios climáticos, los cuales promueven la persistencia de procesos ecológicos y de especies durante cambios en el clima por periodos prolongados. Aunque existen ejemplos marinos en arrecifes coralinos, no está bien establecida la metodología para identificar este tipo de refugios (Gross, Watson, Woodley, Welling, & Harmon, 2015). Para su posible establecimiento en México, se podrían seguir los criterios que proponen Kavousi & Keppel (2018) y que se caracterizan por una alta capacidad de amortiguamiento a las condiciones ambientales a largo plazo (durante varias décadas) y a la de múltiples estresores (provisión de condiciones ambientales adecuadas relacionadas al cambio climático, particularmente al calentamiento y la acidificación).
3. Restauración: a nivel nacional, además de cumplir con el objetivo de recuperar arrecifes degradados, contemplan a especies en peligro (*Acropora palmata* y *A. cervicornis*). Para que un proyecto de este tipo pretenda mejorar la resiliencia de las comunidades costeras y los ecosistemas marinos ante los factores de estrés asociados al cambio climático, se sugiere que cumplan con las siguientes características: 1) proyectos de escala ecológica significativa que permitan recuperar servicios como el de protección costera, 2) elección

de sitios que minimicen el riesgo de otros impactos (i.e. sobrepesca y contaminación) que interfieran con la recuperación, 3) maximizar la oportunidad de resiliencia (i.e. trasplante de fragmentos de coral sobrevivientes a eventos intensos de blanqueamiento) y 4) permitir un tiempo adecuado para el monitoreo y validación de los proyectos (USAID, 2017).

4. Planes de respuesta ante los eventos climáticos: a nivel nacional, se identificó al Sistema Alerta Temprana de Blanqueamiento de Corales implementado por la CONABIO. Sería importante pasar de este sistema de alerta a un plan de respuesta ante este tipo de eventos.

Dentro de la capacidad de adaptación, también se propone como indicador, a la cooperación internacional. El Centro Mundial de Monitoreo de la Conservación del Medio Ambiente, la Agencia Internacional Ambiental y la Iniciativa Internacional de Arrecifes Coralinos (2018) mencionan que en relación a los financiamientos que se otorgan para el manejo sustentable de los arrecifes de coral y sus ecosistemas asociados, México es uno de los principales países en donde se fondean más proyectos relacionados al manejo de Áreas Marinas Protegidas. Asimismo, se identifican a nueve principales organismos internacionales (i.e. las Agencia de Cooperación Internacional de Alemania, Corea, Japón y España, el Banco Interamericano de Desarrollo) y a organizaciones de la sociedad civil internacionales (Fondo Mundial para la Naturaleza) y nacionales (i.e. Fundación Gonzalo Río Arronte) que han apoyado a diversas dependencias nacionales (i.e. INE-SEMARNAT y CONANP-SEMARNAT) en proyectos de impacto y adaptación, entre otros (SEMARNAT & INECC, 2012).

Finalmente, en la Figura 4 se presenta el marco metodológico, con índices e indicadores, para evaluar la vulnerabilidad de los SSE arrecifales de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático. La sugerencia está basada en las referencias encontradas a nivel nacional para el sistema ecológico y el sistema socio-ecológico (Tablas 2 y 3).

Se sugiere para su aplicación futura, la ponderación de cada uno de sus indicadores por medio de métodos participativos, en diversos contextos y escalas espaciales. El ejercicio a cualquier escala (nacional, regional y local) requiere de la selección de indicadores comparables que podría realizarse con la participación de los científicos, instituciones gubernamentales y la sociedad civil. Relacionado a la ponderación, se encontró un ejercicio para los arrecifes de coral en ANP que muestra una serie de especies o grupos de especies como indicadores y la calidad de cada uno para evaluar los impactos del CC sobre éstos. Presenta a los herbívoros, depredadores tope y las algas carnosas como indicadores de alta calidad, a la fauna coralívora y la langosta de media calidad y a los corales blandos y al caracol rosado como baja calidad (March *et al.*, 2011).

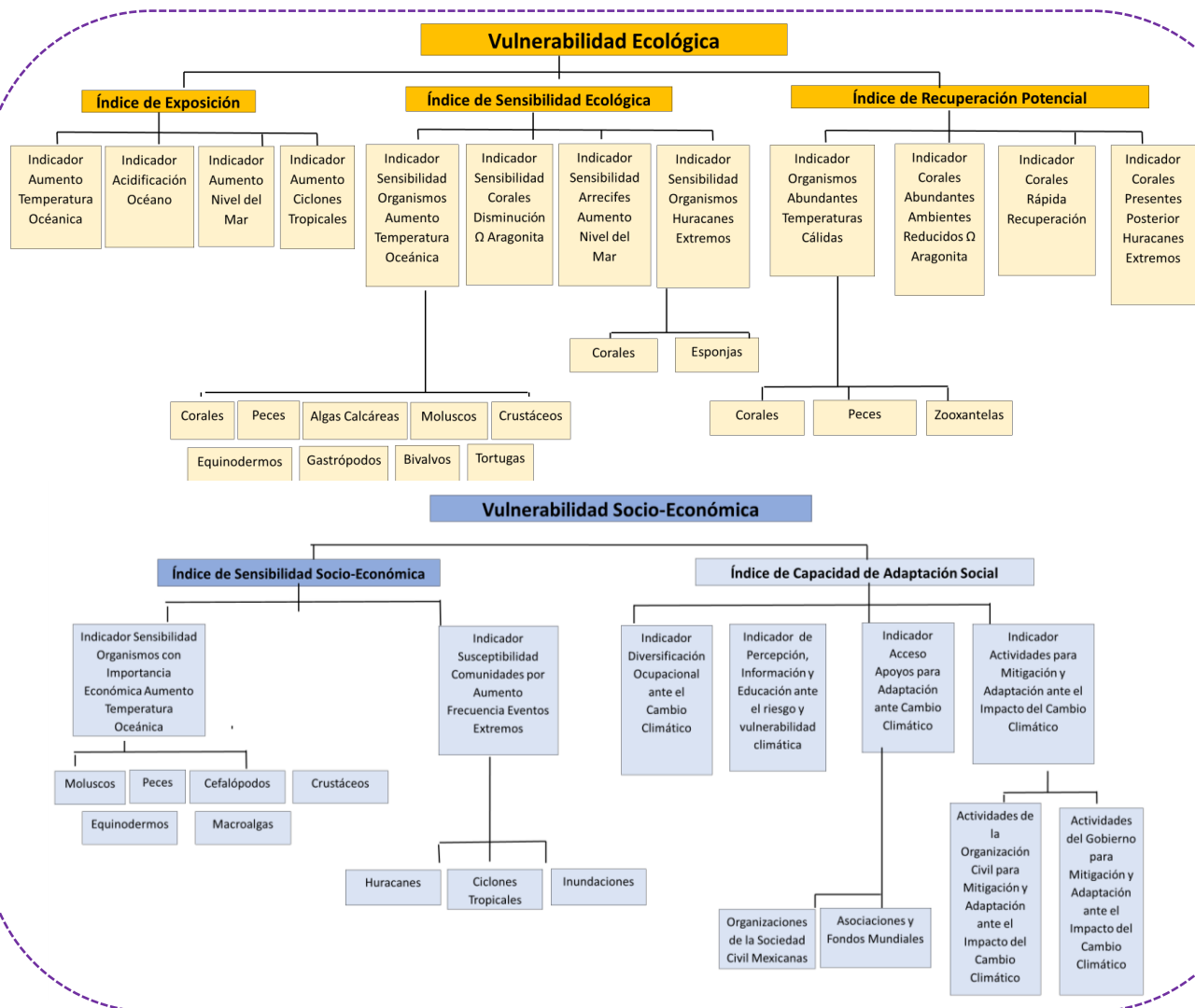


Figura 4. Marco metodológico teórico con índices e indicadores para evaluar la vulnerabilidad de los SSE arrecifales de México ante los factores de estrés asociados al cambio climático.

En especial interesa tener un diagnóstico homogéneo a nivel nacional para comparaciones internacionales, pero sin perder la especificidad regional y por tipo de sistema arrecifal. También importante contar con diagnósticos de cambios, para resaltar y promover los convenios interinstitucionales existentes relacionados a la vulnerabilidad, la mitigación y adaptación ante los factores de estrés relacionados al cambio climático entre grupos multidisciplinarios y entre instituciones de educación, gobierno y sociedad.

5.2.5. Conclusiones

Se presenta un modelo conceptual para evaluar la vulnerabilidad de los SSE arrecifales de México. El modelo incorpora a las dimensiones ecológica y a la socio-económica e incluye a los componentes de exposición, sensibilidad, impacto, recuperación potencial y capacidad de adaptación. Se incorpora a la resiliencia socio-ecológica, determinando de manera inversa a la vulnerabilidad socio-ecológica de estos SSE arrecifales. Además, se representa como sistema complejo, con condiciones de contorno, que incluyen a los GEI y saturación CO₂ en la atmósfera, a los impactos regionales y locales de origen no climáticos, así como a los ecosistemas asociados en la vulnerabilidad de los arrecifes: pastos marinos, manglares y ecosistemas terrestres. Finalmente, se incluye a la duración, frecuencia e intensidad de los impactos y de los factores de estrés asociados al cambio climático.

Se identificaron los trabajos realizados para México como indicadores de exposición, sensibilidad o capacidad de adaptación para los dos sistemas (ecológico y socio-económico) para crear un marco metodológico teórico, con índices e indicadores, que permitirá evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes ante el CCG. Este modelo incluye especies de corales, peces, zooxantelas y otros organismos sensibles o resistentes a los factores de estrés asociados al CC. Así como a comunidades humanas organizadas con gran potencial de capacidad de adaptación a este fenómeno. En general, se proponen una mayor cantidad de indicadores para el sistema ecológico que para el socio-económico, siendo el Caribe y el Golfo de California las regiones arrecifales que presentan el mayor número de posibles indicadores para los dos sistemas, e Islas Revillagigedo con la menor cantidad de trabajos.

Es la primera vez que se conjunta una base de datos de este tipo. Se recomienda la aplicación del modelo propuesto para evaluaciones de estos SSE arrecifales a diversas escalas espaciales y temporales, así como para escenarios futuros de emisiones de los GEI.

5.2.6. Referencias

- Adger, W. N. (2006). Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), 268–281. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2006.02.006>
- Ainsworth, C. H., Morzaria-Luna, H., Kaplan, I. C., Levin, P. S., Fulton, E. A., Cudney-Bueno, R., ... Pfister, T. (2012). Effective ecosystem-based management must encourage regulatory compliance: A Gulf of California case study. *Marine Policy*, 36(6), 1275–1283. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2012.03.016>
- Alva-Basurto, J. C., & Arias-González, J. E. (2014). Modelling the effects of climate change on a Caribbean coral reef food web. *Ecological Modelling*, 289(February 2018), 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.06.014>
- Alva-Basurto, J. C., & Arias-González, J. E. (2014). Modelling the effects of climate change on a Caribbean coral reef food web. *Ecological Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.06.014>
- Álvarez-Filip, L., & Gil, I. (2006). Effects of Hurricanes Emily and Wilma on coral reefs in Cozumel, Mexico. *Coral Reefs*, 25(4), 583. <https://doi.org/10.1007/s00338-006-0141-6>
- Álvarez-Filip, L., Millet-Encalada, M., & Reyes-Bonilla, H. (2009). Impact of hurricanes Emily and Wilma on the coral community of Cozumel Island, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 84(3), 295–306.
- Álvarez-Romero, J. G., Munguía-Vega, A., Beger, M., del Mar Mancha-Cisneros, M., Suárez-Castillo, A. N., Gurney, G. G., ... Torre, J. (2017). Designing connected marine reserves in the face of global warming. *Global Change Biology*, (November). <https://doi.org/10.1111/gcb.13989>
- Ambiente, P. de las N. U. para el M. (2006). Convenio Para La Protección Y El Desarrollo Del Medio Marino De La Región Del Gran Caribe. Recuperado a partir de www.minambiente.gov.co/Puerta/destacado/vivienda/gestion_ds_municipal/trata/c-marino-caribe.doc+&cd=6&hl=es&ct=clnk&gl=co
- Ayala-Bocos, A., & Reyes-Bonilla, H. (2008). Analysis of reef fish abundance in the Gulf of California, and projection of changes by global warming. En *Proceedings of the 11th International Coral Reef Symposium, Ft. Lauderdale, Florida* (pp. 1276–1280).
- Ayala-Bocos, A., Reyes-Bonilla, H., Calderón-Aguilera, L. E., Herrero-Perezrul, M. D., & González-Espinosa, P. C. (2015). Proyección de cambios en la temperatura superficial del mar del Golfo de California y efectos sobre la abundancia y distribución de especies arrecifales. *Revista Ciencias Marinas y Costeras*, 8(1), 29–40. <https://doi.org/10.15359/revmar.8-1.2>
- Azuz-Adeath, I. (2010). Evidencias de cambios de largo plazo en algunas variables climáticas de los estados costeros de México. En E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual, & G. J. Villalobos-Zapata (Eds.), *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. (pp. 33–60). Universidad Autónoma de Campeche Cety-Universidad, Gobierno del Estado de

- Campeche. Recuperado a partir de http://etzna.uacam.mx/epomex/publicaciones/Cambio_Climatico/CCMexico1B.pdf
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2008.09.003>
- Boesch, D. F., Field, J. C., & Scavia, D. (2000). *Potential consequences of The Potential Consequences of Climate Variability and Change on Coastal Areas and Marine Resources. ... of Climate Variability* Silver Spring, MD. Recuperado a partir de http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=pwwBKMA5HeYC&oi=fnd&pg=PA461&dq=POTENTIAL+CONSEQUENCES+OF+CLIMATE+VARIABILITY+AND+CHANGE+ON+COASTAL+AREAS+AND+MARINE+RESOURCES&ots=RRS3DTK_T4&sig=RTXL-VXfFX4PZ1e16Xr2B7w5SEA
- Bozec, Y. M., Alvarez-Filip, L., & Mumby, P. J. (2015). The dynamics of architectural complexity on coral reefs under climate change. *Global Change Biology*, 21(1), 223–235. <https://doi.org/10.1111/gcb.12698>
- Burke, L. y Maidens J., 2005. *Arrecifes en Peligro en el Caribe*. Washington, DC: World Resources Institute.
- Calderon-aguilera, L. E., & Reyes-bonilla, H. (2006). Can local oceanographic conditions in the Mexican Pacific buffer the El Niño-Southern Oscillation effects on coral reefs? En *Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium* (Vol. 1143, pp. 1138–1143).
- Carpenter, K. E., Abrar, M., Aeby, G., Aronson, R. B., Banks, S., Bruckner, A., ... Wood, E. (2008). One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. *Science (New York, N.Y.)*, 321(5888), 560–3. <https://doi.org/10.1126/science.1159196>
- Carricart-Ganivet, J. P., Cabañillas-Terán, N., Cruz-Ortega, I., & Blanchon, P. (2012). Sensitivity of Calcification to Thermal Stress Varies among Genera of Massive Reef-Building Corals. *Cahiers de Biologie Marine*, 53(1), 65–76. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032859>
- Casas Valdez, M., Serviere Zaragoza, E., Lluch Belda, D., Marcos, R., & Aguila Ramírez, R. (2003). Effect of Climatic Change on the Harvest of the Kelp *Macrocystis Pyrifera* on the Mexican Pacific Coast. *Bulletin of Marine Science*, 73(3), 545–556.
- Cinner, J. E., Pratchett, M. S., Graham, N. A. J., Messmer, V., Fuentes, M. M. P. B., Ainsworth, T., ... Williamson, D. H. (2016). A framework for understanding climate change impacts on coral reef social-ecological systems. *Regional Environmental Change*, 16(4), 1133–1146. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0832-z>
- Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras (2010). Estrategia nacional sobre especies invasoras en México, prevención, control y erradicación. Comisión Nacional para el

- Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Comisión Nacional de Áreas Protegidas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. México
- CONABIO. (2016). Estrategia Nacional sobre biodiversidad en México y plan de acción 2016 - 2030.
- CONANP, CEGAM, WWF, & Fundación Carlos Slim. (2015). *Herramienta para el diagnóstico rápido de vulnerabilidad al cambio climático en áreas naturales protegidas*. México. Recuperado a partir de <http://cambioclimatico.conanp.gob.mx/documentos/Herramienta-Vulnerabilidad-para-diagnostico-rapido.pdf>
- Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna Silvestres. (1983).
- Crook, E. D., Potts, D., Rebolledo-Vieyra, M., Hernandez, L., & Paytan, A. (2012). Calcifying coral abundance near low-pH springs: Implications for future ocean acidification. *Coral Reefs*, 31(1), 239–245. <https://doi.org/10.1007/s00338-011-0839-y>
- Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). (2013). *Climate Change Impact Chains in Coastal Areas (ICCA) Final study report*. Eschborn, Alemania. Recuperado a partir de <https://www.google.com.mx/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwiR0Zm4-6HSAhUrrVQKHcEkDboQFggZMAA&url=http%3A%2F%2Fstar-www.giz.de%2Ffetch%2F2C3QL002XP70001gq2%2Fgiz2014-0065en-climate-impact-coastal-areas.pdf&usg=AFQjCNGrzdHq>
- Dizon, R. T., & Yap, H. T. (2006). Understanding coral reefs as complex systems: degradation and prospects for recovery. *Science*, 70(June), 219–226. <https://doi.org/10.3989/scimar.2006.70n2219>
- DOF (2012). ACUERDO por el que se establece una red de zonas de refugio pesquero en aguas marinas de jurisdicción federal ubicadas en el área de Sian Ka an, dentro de la Bahía Espíritu Santo en el Estado de Quintana Roo. SAGARPA
- DOF (2016). Decreto por el que se establece la zona de salvaguarda denominada Arrecifes de Coral del Golfo de México y Caribe Mexicano,
- Ley General de Cambio Climático (2012). Recuperado a partir de [file:///Users/Jordi/Documents/1.Articles/Mexican Government/Mexican Law on Climate Change 2012_lgcc.pdf](file:///Users/Jordi/Documents/1.Articles/Mexican%20Government/Mexican%20Law%20on%20Climate%20Change%202012_lgcc.pdf)
- Eakin, C. M., Morgan, J. A., Heron, S. F., Smith, T. B., Liu, G., Alvarez-Filip, L., ... Yusuf, Y. (2010). Caribbean corals in crisis: Record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *PLoS ONE*, 5(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013969>
- Estrategia Nacional de Cambio Climático. (2015). Gobierno de la República. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

- Fenner, D. P. (1991). Effects of Hurricane Gilbert on coral reefs, fishes and sponges at Cozumel, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 48(3), 719–730.
- Fernández-Rivera Melo, F. J., Reyes-Bonilla, H., Martínez-Castillo, V., & Pérez-Alarcón, F. (2018). Northernmost Occurrence of *Zanclus cornutus* (Zanclidae) in the Eastern Pacific (Northern Gulf of California, Mexico). *Thalassas: An International Journal of Marine Sciences*, (2013), 6–9. <https://doi.org/10.1007/s41208-017-0064-8>
- Fink, A. (2014). *Conducting research literature reviews: from the internet to paper*. (U. of California, Ed.) (Cuarta). Estados Unidos de América: SAGE Publications, Inc.
- Fulton, S., García, C., Caamal, C., & Bourillón, L. (2014). *Reporte de la línea base de los refugios pesqueros en Quintana Roo*. Guaymas, Sonora, México.
- Gámez, A. E., Geiger, A., Ivanova, A., Trasviña, A., Muhlia, A., Breceda, A., ... Zenteno, T. (2012). *Plan Estatal de Acción ante el Cambio Climático para Baja California Sur (PEACC-BCS)*. (A. Ivanova & A. E. Gámez, Eds.). México.
- Gardner, T. a, Côté, I. M., Gill, J. a, Grant, A., & Watkinson, A. R. (2003). Long-term region-wide declines in Caribbean corals. *Science (New York, N.Y.)*, 301(5635), 958–60. <https://doi.org/10.1126/science.1086050>
- Gijón-Díaz, D., Reyes-Bonilla, H., Guerrero-Izquierdo, T. P., & Fernández-Rivera Melo, F. J. (2017). Potencial económico de la captura de peces de ornato bajo protección federal en México. *Revista de Biología Tropical*, 65(1), 195–210. <https://doi.org/10.15517/rbt.v65i1.22949>
- GIZ. (2016). *El Libro de la Vulnerabilidad. Concepto y lineamientos para la evaluación estandarizada de la vulnerabilidad*.
- Gledhill, D. K., Wanninkhof, R., Millero, F. K., & Eakin, M. (2008). Ocean acidification of the Greater Caribbean Region 1996-2006. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 113(10), 1–11. <https://doi.org/10.1029/2007JC004629>
- Ley Federal del Mar (1986). Gobierno de la República
- Ley de Aguas Nacionales (1992). Gobierno de la República
- LGEEPA (1988). Ley General de Equilibrio Ecológico y Protección al Ambiente. *Diario Oficial de la Federación, México*, 1–122.
- Gobierno de la República. (2014). Programa Especial De Cambio Climático 2014 – 2018 (PECC).
- Gobierno de la República. (2015). Compromisos de mitigación y adaptación ante el cambio climático para el periodo 2020-2030. Recuperado a partir de http://www.senado.gob.mx/comisiones/cambio_climatico/reu/docs/presentacion_290415.pdf
- Ley de Hidrocarburos (2014). Gobierno de la República.
- Ley General De Pesca Y Acuicultura Sustentables (2018)., Gobierno de la República, 1–71.
- Ley General de Vida Silvestre (2000). Gobierno de la República.
- Ley de Navegación y Comercio Marítimos (2016). Gobierno de la República

- Ley de Puertos (1993). Gobierno de la República
- Ley de Responsabilidad Ambiental (2013). Gobierno de la República
- Ley de Vertimientos en las Zonas Marinas Mexicanas (2014). Gobierno de la República
- Gross, J., Watson, J., Woodley, S., Welling, L., & Harmon, D. (2015). *Adapting to climate change*. Gland, Suiza: IUCN.
- Harborne, A. R., Rogers, A., Bozec, Y.-M., & Mumby, P. J. (2017). Multiple Stressors and the Functioning of Coral Reefs. *Annual Review of Marine Science*, 9(1), 445–468. <https://doi.org/10.1146/annurev-marine-010816-060551>.
- Hayes, R. L., & Goreau, T. J. (2008). Satellite-derived sea surface temperature from Caribbean and Atlantic coral reef sites, 1984–2003. *Internacional Journal Tropical Biology*, 56(May), 97–118.
- Hernández-Velasco, A., Villaseñor, J. C., Torre, J., Suarez, A., & Espinoza, A. (2015). Isla Natividad Un bosque bajo el agua.
- Hughes, S., Yau, A., Max, L., Petrovic, N., Davenport, F., Marshall, M., ... Cinner, J. E. (2012). A framework to assess national level vulnerability from the perspective of food security: The case of coral reef fisheries. *Environmental Science & Policy*, 23, 95–108. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2012.07.012>
- INECC, & SEMARNAT. (2012). *Adaptación al cambio climático en México: visión, elementos y criterios para la toma de decisiones*.
- IPCC. (2014). *Anexo II Glosario*. Ginebra, Suiza. <https://doi.org/10.1256/004316502320517344>
- Jackson, J., Donovan, M., Cramer, K., & Lam, V. (2014). *Status and Trends of Caribbean Coral Reefs: 1970–2012*. (L. V. Jackson JBC, Donovan MK, Cramer KL, Ed.). Gland, Suiza: Global Coral Reef Monitoring Network, IUCN.
- Jáuregui, E. (2003). Climatology of landfalling hurricanes and tropical storms in Mexico. *Atmosfera*, 16(4), 193–204.
- Kavousi, J., & Keppel, G. (2018). Clarifying the concept of climate change refugia for coral reefs. *ICES Journal of Marine Science*, 75(1), 43–49. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsx124>
- Larsen, J., Leon, J., McGrath, C., & Trancoso, R. (2013). *Review of the catchment processes relevant to the Great Barrier Reef region*. Recuperado a partir de <http://espace.library.uq.edu.au/view/UQ:348675>
- Leslie, H. M., Basurto, X., Nenadovic, M., Sievanen, L., Cavanaugh, K. C., Cota-Nieto, J. J., ... Aburto-Oropeza, O. (2015). Operationalizing the social-ecological systems framework to assess sustainability. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(19), 5979–5984. <https://doi.org/10.1073/pnas.1414640112>.
- López-Pérez, R. A., Mora-Pérez, M. G., & Leyte-Morales, G. E. (2007). Coral (Anthozoa: Scleractinia) Recruitment at Bahías de Huatulco, Western México: Implications for Coral Community Structure and Dynamics. *Pacific Science*, 61(3), 355–369.

- Mamauag, S. S., Aliño, P. M., Martinez, R. J. S., Muallil, R. N., Doctor, M. V. A., Dizon, E. C., ... Cabral, R. B. (2013). A framework for vulnerability assessment of coastal fisheries ecosystems to climate change-Tool for understanding resilience of fisheries (VA-TURF). *Fisheries Research*, 147, 381–393. <https://doi.org/10.1016/j.fishres.2013.07.007>
- Manson, R. H. (2004). Los servicios hidrológicos y la conservación de los bosques de México. *Madera y Bosques*, 10(1), 3–20. <https://doi.org/10.21829/myb.2004.1011276>
- March, I. J., Cabral, H., Echeverría, Y., Bellot, M., & Frausto, J. M. (2011). *Adaptación al Cambio Climático en Áreas Protegidas del Caribe de México*. México. Recuperado a partir de [http://www.marfund.org/sp/learnmore/whatsgoing/AdaptacionANP Caribe Mexico Final.pdf](http://www.marfund.org/sp/learnmore/whatsgoing/AdaptacionANPCaribeMexicoFinal.pdf)
- Martínez, A. A., Manzanilla, N. S., & Hidalgo, J. Z. (2011). Vulnerability to climate change of marine and coastal fisheries in México. *Atmósfera*, 24(1), 103–123.
- Maynard-Ford, B. M. C., Phillips, E. C., Chirico, P. G., & Survey, U. S. G. (2008). *Mapping Vulnerability to Disasters in Latin America and the Caribbean, 1900 – 2007*. Recuperado a partir de <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1294>
- Maynard, J. A., Marshall, P. A., Johnson, J. E., & Harman, S. (2010). Building resilience into practical conservation: Identifying local management responses to global climate change in the southern Great Barrier Reef. *Coral Reefs*. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0603-8>
- Medellín-Maldonado, F., Cabral-Tena, R. A., López-Pérez, A., Calderón-Aguilera, L. E., Norzagaray-López, C. O., Chapa-Balcorta, C., & Zepeta-Vilchis, R. C. (2016). Calcificación de las principales especies de corales constructoras de arrecifes en la costa del pacífico del sur de México. *Ciencias Marinas*, 42(3), 209–225. <https://doi.org/10.7773/cm.v42i3.2650>
- Monterroso Rivas, A., Fernández Eguirarte, A., Trejo Vázquez, I., Conde Álvarez, A. C., Villers Ruíz, L., & Gay García, C. (2014). *Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Programa de Investigación en Cambio Climático Universidad Nacional Autónoma de México.
- Morzaria-Luna, H. N., Turk-Boyer, P., & Moreno-Baez, M. (2014). Social indicators of vulnerability for fishing communities in the Northern Gulf of California, Mexico: Implications for climate change. *Marine Policy*, 45, 182–193. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2013.10.013>
- Mumby, P. J. (2006). Connectivity of reef fish between mangroves and coral reefs: Algorithms for the design of marine reserves at seascape scales. *Biological Conservation*, 128(2), 215–222. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2005.09.042>
- Munguia-Vega, A., Torre, J., Turk-Boyer, P., Marinone, S. G., Lavín, F. M., Pfister, T., ... Cudney-Bueno, R. (2015). PANGAS: An Interdisciplinary Ecosystem- Based Research Framework for Small-Scale Fisheries in the Northern Gulf of California. *Journal of the Southwest*, 57(2–3), 337–390.
- Naciones Unidas. (1982). Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar. *United Nations-Treaty Series*.

- Naciones Unidas. (1998). Protocolo de kyoto de la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. *Protocolo de Kyoto*, 61702, 20. Recuperado a partir de <http://unfccc.int/resource/docs/convkp/kpspan.pdf>
- Nguyen, T. T. X., Bonetti, J., Rogers, K., & Woodroffe, C. D. (2016). Indicator-based assessment of climate-change impacts on coasts: A review of concepts, methodological approaches and vulnerability indices. *Ocean & Coastal Management*, 123, 18–43. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2015.11.022>
- Niparaja. (2017). Zonas de refugio pesquero del Corredor San Cosme a Punta Coyote, B.C.S.
- Norma Oficial Mexicana 005-PESC-1993 (1993). Secretaría de Pesca.
- Norma Oficial Mexicana NOM-05-TUR-2003 (2003). Secretaría de Turismo
- Norma Oficial Mexicana NOM-006-PESC-1993 (1993). SEMARNAP
- Norma Oficial Mexicana NOM-007-SAG/PESC-2015 (2015). SAGARPA
- Norma Oficial Mexicana-009-PESC-1993 (1993). Secretaría de Pesca
- Norma Oficial Mexicana NOM-013-PESC-1994 (1994). SEMARNAP
- Norma Oficial Mexicana-017-PESC-1994 (1994). SAGARPA
- Norma oficial Mexicana 022-SEMARNAT-2003. SEMARNAT
- Norma Oficial Mexicana-029-PESC-2006 (2006). SAGARPA
- Norma Oficial Mexicana-049-SAG/PESC-2014 (2014) SAGARPA
- Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010 (2010). SEMARNAT.
- Norma Oficial Mexicana-064-SAG/PESC/SEMARNAT-2013 (2013). SAGARPA
- Norzagaray-López, C. O., Hernández-Ayón, J. M., Calderon Aguilera, L. E., Reyes-Bonilla, H., Chapa-Balcorta, C., & Ayala-Bocos, A. (2017). Aragonite saturation and pH variation in a fringing reef are strongly influenced by oceanic conditions. *Limnology and Oceanography*, 62(6), 2375–2388. <https://doi.org/10.1002/lno.10571>
- Ortiz-Lozano, L., Pérez-España, H., Granados-Barba, A., González-Gándara, C., Gutiérrez-Velázquez, A., & Martos, J. (2013). The Reef Corridor of the Southwest Gulf of Mexico: Challenges for its management and conservation. *Ocean & Coastal Management*, 86, 22–32. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2013.10.006>
- Pereira, A., Prezas, B., Olivares, J., Fragoso, P., & Niño, C. (2013). Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Quintana Roo (PEACC-QR). Recuperado a partir de <http://sema.qroo.gob.mx/index.php/component/content/article/475>
- Plan acción climática de cozumel 2011-2013. (s/f).
- Ramsar. (2016). Manual de la Convención de RAMSAR. Introducción a la convención sobre los humedales. *Manual De La Convención De Ramsar 5ª Edición, 2016*. Recuperado a partir de http://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/handbook1_5ed_introductiontoconvention_s_final.pdf
- Resolution Conf. 11.10 CoP15. (s/f). Trade in stony Corals.

- Reyes-Bonilla, H., Carriquiry, J., Leyte-Morales, G. E., & Cupul-Magaña, A. L. (2002). Effects of the El Niño-Southern Oscillation and the Anti-El Niño event (1997-1999) on coral reefs of the western coast of Mexico. *Coral Reefs*, 21(4), 368–372. <https://doi.org/10.1007/s00338-002-0255-4>
- Rivera-Monroy, V. H., Twilley, R. R., Bone, D., Childers, D. L., Coronado-Molina, C., Feller, I. C., ... Weil, E. (2004). A conceptual framework to develop long-term ecological research and management objectives in the wider Caribbean region. *BioScience*, 54(9), 843–856.
- SAGARPA (2018). Periodos de Veda para Especies Marinas y Dulciacuículas
- Salinas Akhmadeeva, I. A., Reyes-Bonilla, H., Izquierdo Guerrero, T., Cruz-Piñón, G., Vázquez Vera, L., & Walther Mendoza, M. (2017). Vulnerabilidad de las comunidades costeras en el estado de Baja California Sur, ante los efectos del cambio climático. *El Sudcaliforniano*.
- Sánchez-Caballero, C. A., Borges-Souza, J. M., De La Cruz-Agüero, G., & Ferse, S. C. A. (2017). Links between fish community structure and habitat complexity of a rocky reef in the Gulf of California threatened by development: Implications for mitigation measures. *Ocean & Coastal Management*, 137, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.12.013>
- Scheffer, M., Carpenter, S. R., Dakos, V., & van Nes, E. H. (2015). Generic Indicators of Ecological Resilience: Inferring the Chance of a Critical Transition. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 46(1), 145–167. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-112414-054242>
- Scott, D., Simpson, M. C., & Sim, R. (2012). The vulnerability of Caribbean coastal tourism to scenarios of climate change related sea level rise. *Journal of Sustainable Tourism*, 20(6), 883–898. <https://doi.org/10.1080/09669582.2012.699063>
- Secaira Fajardo, F., & Acevedo, C. A. (2017). *Importancia de los arrecifes y dunas en la protección de la costa*. México. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33171.68647>
- SECTUR. (2013). Programa de Turismo Sustentable en México. *Planeación Estratégica del Turismo en México*. Recuperado a partir de http://www.sectur.gob.mx/PDF/planeacion_estrategica/PTSM.pdf
- SEMARNAT, & INECC. (2012). *Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Recuperado a partir de <http://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc5s.pdf>
- SENER, G. F. M. (2012). Atlas de almacenamiento geológico de CO₂ en México.
- Stimson J y Conklin E. (2008). “Potential reversal of a phase shift: the rapid decrease in the cover of the invasive green macroalga *Dictyosphaeria cavernosa* Forsskål on coral reefs in Kāneʻohe Bay, Oahu, Hawai’i”. *Coral Reefs*, 27: 717-726.
- Tortolero-Langarica, J. de J. A., Rodríguez-Troncoso, A. P., Cupul-Magaña, A. L., & Carricart-Ganivet, J. P. (2017). Calcification and growth rate recovery of the reef-building *Pocillopora*

- species in the northeast tropical Pacific following an ENSO disturbance. *PeerJ*, 5(April), e3191. <https://doi.org/10.7717/peerj.3191>
- Turner, B. L., Kasperson, R. E., Matsone, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., ... Schiller, A. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14), 8074–8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- UNEP, 2006. *Marine and Coastal Ecosystems and Human Well-Being: A Synthesis Report Based on the Findings of the Millennium Ecosystem Assessment*. UN Environment Programme, Nairobi.
- USAID. (2017). Restoring Coral Reefs in the Face of Climate Change in the Seychelles Adaptation Approach Project at a Glance. Pennsylvania: USAID.
- Vásquez-Elizondo, R. M., & Enríquez, S. (2016). Coralline algal physiology is more adversely affected by elevated temperature than reduced pH. *Scientific Reports*, 6(January). <https://doi.org/10.1038/srep19030>
- Veracruzana, U., Ecología, I. N. de, & México, E. B. (2009). Programa Veracruzano ante el Cambio Climático.
- Walther-Mendoza, M., Reyes-Bonilla, H., Lajeunesse, T. C., & López-Pérez, A. (2016). Distribución y diversidad de dinoflagelados simbióticos en corales pétreos de la costa de Oaxaca, Pacífico de México. *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 87(2), 417–426. <https://doi.org/10.1016/j.rmb.2016.03.007>
- Wilkinson, W., & Souter, D. Status of caribbean coral reefs after bleaching and hurricanes in 2005 (2008).
- Wolff, N. H., Donner, S. D., Cao, L., Iglesias-Prieto, R., Sale, P. F., & Mumby, P. J. (2015). Global inequities between polluters and the polluted: Climate change impacts on coral reefs. *Global Change Biology*, 21(11), 3982–3994. <https://doi.org/10.1111/gcb.13015>

5.2.7. Anexos

5.2.7.1. Anexo I Indicadores sistema Ecológico. Azul: temperatura, amarillo: huracanes, anaranjado: acidificación y verde: nivel del mar

Exposición		Sensibilidad		Recuperación Potencial Ecológica	
Indicador/Índice	Sitio	Indicador/ Índice	Sitio	Indicador/ Índice	Sitio
Valores de Degree Heating Week (2005) ¹	Mahaua, Las Llamadas, Los Precioses Cañones, Piratas del Caribe, Pez Maya, Bucaneros, Río Bermejo, Los Escalones, Faro Viejo, Paytocal, Cozumel, Dolphin Bay, Xcalac, El Uvero, Akumal, Puerto Morelos	Reporte de sitios con blanqueamiento de coral ¹	2005: Mahaua, Las Llamadas, Los Precioses Cañones, Piratas del Caribe, Pez Maya, Bucaneros, Río Bermejo, Los Escalones, Faro Viejo, Paytocal, Cozumel, Dolphin Bay, Xcalac, El Uvero, Akumal, Puerto Morelos	Proyección de poblaciones sanas de peces loro aplazan la pérdida de complejidad estructural del arrecife ³	Cozumel
Trayectoria de huracanes que dañaron corales (2005) ¹	Gran Caribe (raster)	% Blanqueamiento corales ^{2 y 13}	2005: Mahaua (23%), Sian Ka'an (42%) y Xcalac (45%) 2. 1997: Bahía Concepción (20%) e Islas Marias (50%) ¹³	Aumento de abundancia y rango de distribución pronosticada ante escenarios de incremento de temperatura para especies de peces (<i>P. punctatus</i> , <i>C. punctatissima</i> , <i>S. flavilatus</i> , <i>C. oxycephalus</i> , <i>S. ghobban</i> y <i>T. grammicum</i>) ¹⁴	Golfo California (Bahía de los Ángeles, Santa Rosalía, Loreto, la Paz, Cabo Pulmo y Los Cabos)
Proyección aumento en temperatura oceánica promedio para 2030 y 2050 (de 0.63°C) ⁴	Golfo de California (raster)	Incremento de roca expuesta del sustrato después de dos huracanes (Emily y Wilma, en 2005) a arrecifes poco profundos (< 8 m profundidad) ²	Cozumel (10% al 40%)	Aumento en % cobertura de coral vivo de distintas especies antes y después de huracanes (Emily y Wilma en 2005) ¹⁷	Cozumel 2005: <i>Millepora alcicornis</i> 0.15 a 0.19 y <i>Stephanocoenia michelini</i> 0.06 a 0.13.
Tendencias elevación temperatura (1982-2006) ⁴	Golfo de California (raster)	Decremento de coral duro después de dos huracanes (Emily y Wilma, en 2005) a arrecifes poco profundos (< 8 m profundidad) ²	Cozumel (24% al 10%)	Aumento en % cobertura de esponjas vivas en distintos tipos de arrecifes después de huracán (Gilberto 1998) ¹⁸	Cozumel 1998: patch reef en Paraíso de 9.2 a 9.5, shelf-edge tops en Palancar 3.4 a 4 y en Santa Rosa 3 a 8.4
Promedios mensuales de SST (derivados de satélites), ecuación tendencia lineal y el coeficiente de regresión (temperatura vs tiempo) para sitios arrecifales 1984-2003 ⁵	Chinchorro, Cozumel	Daño un tipo de corales en específico después de dos huracanes (Emily y Wilma, en 2005) en la cresta de los arrecifes a corales ²	Cancún y Puerto Morelos (branching, boulder and mound hard corals)	Aumento en % cobertura de coral vivo en distintos tipos de arrecifes después de huracán (Gilberto 1998) ¹⁸	Cozumel 1998: Patch reef en Yucab 33 a 37, en Shelf-edge reefs slopes en Santa Rosa 12 a 15

Promedios mensuales del estado de saturación Ω_{arg} (enero y agosto 1996 y 2006), promedios anuales de Secular decrease in sea-surface aragonite saturation state (1996, 1998, 2000, 2004 y 2006) ⁶	Gran Caribe	Especies de peces sensibles al aumento temperatura oceánica proyectada para 2050 ⁴	Golfo de California (<i>Pomacanthus zonipectus</i> y <i>Mycteroperca rosacea</i>)	Aumento en número de peces de arrecifes de coral en distintos tipos de arrecifes después de huracán (Gilberto 1998) ¹⁸	Cozumel 1998: Fringing en Paraíso de 32 a 33, Patch en Chankanaab de 33 a 39 y Yucab de 34 a 34, Shelf-edge top Palancar de 29 a 35 y Shelf-edge slopes en Colombia de 19 a 25 y en Palancar de 18 a ³¹
Valores mensuales Degree Heating Week (1963-2018) ⁷	Todo México (raster)	Especies de equinodermos sensible al aumento temperatura oceánica proyectada para 2050 ⁴	Golfo de California (<i>Isostichopus fuscus</i>)	Sitios con relación positiva entre tasa de calcificación y SST para especies de coral (<i>Pavona gigantea</i> y <i>Pavona varians</i>)	Arrecife Zacatoso (Guerrero): 0.29 y Arrecife La Entrega (Oaxaca): 0.23
Valores mensuales SST (1963-2018) ⁷	Todo México (raster)	Severidad de blanqueamiento (sin blanqueamiento, bajo, medio y severo) de 1963-2018 ⁷	Bucaneros (Mahahual) 2005 y 2006, Paytotal (Mahahual) 2005 y 2006, Río Bermejo (Mahahual) 2005 y 2006, Piratas del Caribe (Mahahual) 2005 y 2006, Akumal 1998, Cabo Pulmo 1997, Caletitas (Bahía Banderas) 1998, Majahuitas (Bahía Banderas) 1998, Paredon (Bahía Banderas) 1998, Chileno Bay 1997, Chimo (Bahía Banderas) 1998, Chocota (Bahía Banderas) 1998, Punta Mita (Bahía Banderas) 1998, Concepción Bay 1997, Cozumel 1998, Dolphin Bay (Mahahual) 2005 y 2006, Faro Viejo (Mahahual) 2005 y 2006, Golfo de California 1997, Jalisco 1997, La Colonia (Pez Maya, Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an) 2004 y 2005, Sian Ka'an Biosphere Reserve 1998, Paso Caapechen (Pez Maya, Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an) 2004-2006, Pedro Paila (Pez Maya, Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an) 2004-2006, Punta San Juan (Pez Maya, Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an) 2004-2006, San Miguel de Ruiz (Pez Maya, Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an) 2004-2006, La Paz Bay 1997, Las Iglesias (Bahía Banderas) 1998, Las Llamaradas (Mahahual) 2005 y 2006, Los Escalones (Mahahual) 2005 y 2006, Los Preciosos Cañones (Mahahual) 2005 y 2006, Mahahual 1998, Nayarit 1997,	Especies de coral presentes en sitios (ojos de agua) con estados de saturación Ω_{arg} bajos ²³	Península de Yucatán: presencia de <i>Porites</i> asteroides, <i>Porites divaricata</i> , <i>Siderastrea radians</i> y <i>Millepora alci-cornis</i> ($\Omega_{arg} < 2.5$)

			Oaxaca 1998, Pichilingue Bay 1997, Punta Pericos 1997, Quintana Roo 1998, Revillagigedos 1997, San Carlos Bay 1997, San Gabriel Bay 1997, San José Island 1997, Xcalak 1998, Yelapa (Bahía Banderas) 1998, Yucatán 1998.		
Valores mensuales Anomalías SST (1963-2018) ⁷	Todo México (raster)	Observaciones de blanquimientos de coral (1983-2003) ¹⁰	Gran Caribe	Proyecciones de posibles nuevas áreas de presencia de peces (<i>Zanclus cornutus</i>) relacionados a temperaturas cálidas ²⁴	Golfo California y Pacífico (raster)
Valores mensuales HotSpot (1963-2018) ⁷	Todo México (raster)	Susceptibilidad al aumento nivel del mar ¹²	Sian ka'an (baja)	Frecuencias observadas mayores clados de simbioses dinoflagelados (D1) en arrecifes someros y profundos sobre otros clados (2008) en <i>Pollicipora</i> , <i>Pavona</i> y <i>Porites</i> ²⁵	Oaxaca: someros 58 y profundos 23
Efecto de la temperatura en valor mensual de Ω_{arg} (sept 2012-agosto 2013) ⁸	Cabo Pulmo	Decremento en % de cobertura coral vivo antes y después condiciones ENSO 13 y 22	Baja California Sur (~29 a 25), Bahía Banderas (~15 a 5) y Oaxaca (~45 a 3); Arrecife La Entrega (2002 a 2003 de 21 a 2)	Sitios con altas tasas de éxito en fragmentación (número de fragmentos exitosos -m2) en 2001-2002 ²⁶	Oaxaca: Isla Cacaluta 2.7 e Isla Montosa 2.6
Anomalías promedio de la temperatura máxima respecto al promedio (1971-2009) municipios costeros y índice oscilación multidecada ⁹	Todo México	Registro de mortalidad de especies de coral después de blanqueamiento 13	Golfo California y Bahía Banderas: <i>Pollicipora</i> , <i>Pavona</i> , <i>Psammocora</i> y <i>Porites</i> (30oC por más de 60 días)		
Distribución del estado saturación aragonita (1880, 2000 y 2050) ¹¹	Todo México	Decremento en abundancia y rango de distribución pronosticada ante escenarios de incremento de temperatura para especies de peces (<i>A. troschelli</i> , <i>G. simplicidens</i> , <i>C. gracilis</i> y <i>C. limbaughii</i>) ¹⁴	Golfo California (Bahía de los Ángeles, Santa Rosalía, Loreto, la Paz, Cabo Pulmo y Los Cabos)		
Disturbio por huracanes ¹²	Sian ka'an (baja)	Sensibilidad de géneros de coral al estrés térmico (coeficiente de correlación entre SST promedio anual	Mahuahual: <i>Porites asteroides</i> -0.51 y <i>Montastraea</i> -0.14; Chinchorro: <i>Porites asteroides</i> -0.75 y <i>Montastraea faveolata</i> -0.55		

		1977-2006 y tasas de calcificación) ¹⁵			
Promedio mensual de SST (°C) durante condiciones ENSO (1997-1998) ¹³	Baja California Sur (min: 23 en enero 1997 y máxima 32 agosto 1997), Bahía Banderas (min 23 enero 1997 y max 32 julio y agosto 1997) y Oaxaca (min 27 enero 1997 y max 30 julio y septiembre 1997)	Reporte daños extensos a géneros de corales (<i>Agaricia</i> y <i>Porites</i>) y esponjas después de dos huracanes (Emily y Vilma 2005) en arrecifes ¹⁶	Cozumel		
Promedio mensual de SST (°C) durante condiciones La Niña (2010-2011) ¹⁹	Parque Nacional Islas Marietas: Dic 22, ene 21, feb 19, mar 21, abr 21, may 25, jun 27, jul 28, ago 29, sept 31, oct 30, nov 27	Decremento en % cobertura de algunas especies corales vivos después de huracanes (Emily y Vilma en 2005 y Gilberto 1988) en arrecifes ¹⁷	Cozumel, 2005: <i>Agaricia agaricites</i> 6.08 a 3.92, <i>Agaricia tenuifolia</i> 3.12 a 0.13, <i>Diploria strigosa</i> 0.25 a 0.03, <i>Eusmilia fastigiata</i> 0.68 a 0.24, <i>Isophyllastrea rigida</i> 0.09 a 0.08, <i>Meandrina meandrites</i> 0.40 a 0.35, <i>Montastraea cavernosa</i> 1.14 a 0.94, <i>Montastraea faveolata</i> 1.14 a 0.48, <i>Mycetophyllia lamarckiana</i> 0.09 a 0.05, <i>Porites astreoides</i> 1.45 a 1.29, <i>Porites</i> 7.99 a 0.54 y <i>Siderastrea siderea</i> 1.67 a 1.61.		
Promedio mensual de SST (°C) para tres estaciones del año (2003-2009) ²⁸	Todo México (raster): enero, abril y julio	Decremento en % vivo de cobertura de coral en distintos tipos de arrecifes después de huracán (Gilberto 1998) ¹⁸	Cozumel 1998: Fringing reefs shallow en Paraíso 31 a 17 y Galapago 27 a 13, en Fringing reefs deep en Paraíso 17 a 10 en Galapago 16 a 6 y en DzulHa 13 a .09, en patch reefs en Chancanab 30 a 29 en Paraíso 22 a 16, en Shelf-edge reefs tops en Palancar 48 a 17 en Santa Rosa 43 a 19 y en Colombia 31 a 14, en Shelf-edge reefs slopes palancar 31 a 15 y en Colombia 22 a 14		
		Decremento en % vivo de cobertura de esponjas en distintos tipos de arrecifes después de huracán (Gilberto 1998) ¹⁸	Cozumel 1988: patch reef en Yucab 7.3 a 4.1, shelf-edge tops en Colombia 8.3 a 7.3, shelf-edge slopes en Palancar 7.1 a 5.9 en Santa Rosa 25.6 a 9.5 y en Colombia 7.4 a 6.9		
		Decremento del crecimiento anual (g cm-2 año-1) en condiciones La Niña vs condiciones Non-ENSO (2010-2011 vs 2012-2013) para <i>Pollicipora</i> ¹⁹	Parque Nacional Islas Marietas: tasa crecimiento anual <i>Pollicipora verrucosa</i> 18vs 48, <i>Pollicipora damicornis</i> 16 vs 17		

		Decremento en tasa de fotosíntesis neta máxima ($\mu\text{mol O}_2 \text{ cm}^{-2} \text{ h}^{-1}$) para algas calcáreas coralinas en temperaturas cálidas (32°C) ²⁷	Organismos colectados de Puerto Morelos		
--	--	---	---	--	--

- 1 Eakin et al. (2010)
- 2 Wilkinson & Souter (2008)
- 3 Bozec, Alvarez-Filip, & Mumby (2015)
- 4 Ayala-Bocos, Reyes-Bonilla, Calderón-Aguilera, Herrero-Perezrul, & González-Espinosa (2015)
- 5 Hayes & Goreau (2008)
- 6 Gledhill, Wanninkhof, Millero, & Eakin (2008)
- 7 reefgis (s.f.)
- 8 Norzagaray-López et al. (2017)
- 10 Burke (2005)
- 11 Boesch, Field, & Scavia (2000)
- 12 Rivera-Monroy et al. (2004)
- 13 Reyes-Bonilla, Carriquiry, Leyte-Morales, & Cupul-Magaña (2002)
- 14 Ayala-Bocos & Reyes-Bonilla (2008)
- 15 Carricart-Ganivet, Cabañillas-Terán, Cruz-Ortega, & Blanchon (2012)
- 16 Álvarez-Filip & Gil (2006)
- 17 Álvarez-Filip, Millet-Encalada, & Reyes-Bonilla (2009)
- 18 Fenner (1991)
- 19 Tortolero-Langarica, Rodríguez-Troncoso, Cupul-Magaña, & Carricart-Ganivet (2017)
- 20 Medellín-Maldonado et al. (2016)
- 22 Calderon-Aguilera & Reyes-Bonilla (2006)
- 23 Crook, Potts, Rebolledo-Vieyra, Hernandez, & Paytan (2012)
- 24 Fernández-Rivera Melo, Reyes-Bonilla, Martínez-Castillo, & Pérez-Alarcón (2018)
- 25 Walther-Mendoza, Reyes-Bonilla, Lajeunesse, & López-Pérez (2016)
- 26 López-Pérez, Mora-Pérez, & Leyte-Morales (2007)
- 27 Vásquez-Elizondo & Enriquez (2016)
- 28 Martínez, Manzanilla, & Hidalgo (2011)
- 29 Alva-Basurto & Arias-González (2014)
- 30 Alva-Basurto & Arias-González (2014)
- 32 NOAA (s.f.)
- 33 UNIATMOS (s.f.)

5.2.7.2. Anexo II Indicadores sistema Socio-Económico. Azul: temperatura, amarillo: huracanes, anaranjado: acidificación y verde: nivel del mar

Sensibilidad Socio-Económica		Capacidad adaptación Socio-Económica	
Indicador/ Índice	Sitio	Indicador/ Índice	Sitio
Grado de vulnerabilidad nacional desde la seguridad alimentaria en arrecifes de coral ¹	Valor de vulnerabilidad a nivel nacional=0.75	Potencial del país para responder a los cambios debidos a la contribución de las pesquerías realizadas en los arrecifes al sistema alimentario ¹	Indicador nacional de capacidad de adaptación=0.88
Ocurrencia de desastres por windstorms (ciclones, huracanes, tormentas, tornados, tormentas tropicales, tifones y desastres por tormentas invernales) en estados costeros (1900-2007) ²	BCS: 3-7, BC: 8-12, Sonora: 3-7, Sinaloa: 8-12, Nayarit: 3-7, Jalisco: 3-7, Colima: 3-7, Michoacán: 3-7, Guerrero: 8-12, Oaxaca: 8-12, Chiapas: 8-12, QR: 13-22, Mérida: 8-12, Campeche: 8-12, Tabasco: 3-7, Veracruz: 13-22, Tamaulipas: 8-12	Aumento de abundancia y rango de distribución pronosticada ante escenarios de incremento de temperatura para especies de peces de importancia económica (<i>Scarus ghobban</i>) ⁵	Golfo California (Bahía de los Ángeles, Santa Rosalía, Loreto, la Paz, Cabo Pulmo y Los Cabos)
Ocurrencia de desastres naturales acumulados (inundaciones, volcánicos, windstorms, terremotos, oleaje, sequías y escurrimientos de tierra) en estados costeros (1900-2007) ²	BCS: 4-7, BC: 12-15, Sonora: 12-15, Sinaloa: 16-19, Nayarit: 4-7, Jalisco: 16-19, Colima: 12-15, Michoacán: 16-19, Guerrero: 20-25, Oaxaca: 26-31, Chiapas: 20-25, QR: 12-15, Mérida: 8-11, Campeche: 8-11, Tabasco: 3-7, Veracruz: 26-31, Tamaulipas: 12-15	Comunidades pesqueras con valores bajos para índice de vulnerabilidad social ante factores de estrés antropogénicos (incluyendo CC) comparado con 12 comunidades ¹⁰	Norte Golfo de California (San Felipe, Bahía de los Ángeles, El Barril, Golfo de Santa Clara, Puerto Peñasco, Rodolfo Campodónico, Desemboque, Puerto Lobos, Puerto Libertad, Desemboque Seris, Punta Chueca y Bahía Kino), siendo Puerto Peñasco, Puerto Libertad y San Felipe las menos vulnerables
Número de huracanes que tocaron tierra por estados costeros (1951-2000) ³	BCS: 19, BC: 1, Sonora: sin dato, Sinaloa: 18, Nayarit: 1, Jalisco: 6, Colima: 1, Michoacán: 9, Guerrero: 7, Oaxaca: 2, Chiapas: 1, QR: 13, Yucatán: 1, Campeche: 0, Veracruz: 1, Tamaulipas: 7	Atlas de riesgo para municipios costeros ¹²	BCS: Los Cabos, La Paz, Comondú, Mulegé, BC: Ensenada, Mexicali, Sonora: Puerto Peñasco, Hermosillo, Guaymas, Etchojoa, Huatabampo, Sinaloa: Ahome, Guasave, Angostura, Novaloto, Culiacán, Elota, San Ignacio, Mazatlán, Escuinapa, Nayarit: Tuxpan, Santiago Ixcuintla, Compostela, Bahía de Banderas, Colima: Armería, Manzanillo, Tecmán, Michoacán: Lázaro Cárdenas, Gro: Zihuatanejo de Azueta, Acapulco, Oaxaca: Santiago Pinotepa Nacional, San Pedro Mixtepec, Santa María Colotepec, San Pedro Pochutla, Santa María Huatulco, Santo Domingo Tehuantepec, Salina Cruz, Juchitán, Chias: Tonalá, Pijijian, Mataspetic, Acapetahua, Huixtla, Mazatán, Tapachula, Suchiate, Q Roo: Othón, Felipe Carrillo Puerto, Tulum, Solidaridad, Benito Juárez, Isla Mujeres, Yucatán: Tizimin, Dzilam, Ixil, Progreso, Hunucmá, Campeche: Campeche, Champotón, Carmen, Ver: Coatzacoalcas, Agua Dulce, San Andrés Tuxtla, Ángel R Cabada, Lerdo Tejada, Veracruz, la Antigua, Vega Alatorre, Tamaulipas: Ciudad Madero, Altamira San Fernando, matamoros
Trayectorias de los huracanes (categoría 5) que tocaron tierra por estados costeros ³	Janet 1995, Beulah 1967, Gilberto 1988, Allen 1980, Anita 1977	Playas de importancia turística con erosión extrema posterior huracán (Wilma, 2005) ¹³	Cancún (de Punta Cancún a Punta Nizuc), zona norte con mayor grado de erosión

Número de tormentas tropicales que tocaron tierra por estados costeros (1951-2000) ³	BCS: 20, BC: 3, Sonora: 1, Sinaloa: 8, Nayarit: 1, Jalisco: 14, Colima: 1, Michoacán: 9, Guerrero: 6, Oaxaca: 11, Chiapas: 4, QR: 14, Yucatán: 2, Campeche: 1, Veracruz: 6, Tamaulipas: 6	Identificación de cinco especies de peces de ornato con potencial económico como actividad económica sustentable ¹⁴	áreas con potencial económico: Islas Encantadas, Bahía de los Ángeles, Archipiélago San Lorenzo, Islas Marietas, Islas Revillagigedo
Peligro en tierra de huracanes, de marejadas de tormenta y de inundaciones ⁴	Quintana Roo (ráster)	Sitios con cooperativas de mujeres pescadoras establecidas como apoyo a la economía familiar	Yucatán, San Felipe: Mujeres trabajadoras del mar
Trayectorias de los ciclones tropicales que han tocado territorio nacional (1970-2009) ¹⁸	Todo México (ráster)	Comunidades humanas con baja vulnerabilidad ante el CC debido al acceso a la información sobre estrategias adaptativas ante el CCG ^{15 y 16}	Isla Natividad
Anomalías negativas entre captura por unidad de esfuerzo de macroalga con importancia económica (<i>Macrocystis pyrifera</i>) y el aumento de SST ⁶	Pacífico norte (1956–1998)	Estados costeros con Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático ¹⁷	Todos los estados costeros (en desarrollo o concluidos)
Decremento de organismos con importancia económica sensibles a proyecciones aumento temperatura (en escenarios de emisiones A1B, A2 y B2 de GEI) para 2030 y 2050 ⁷	Decremento en arrecifes de coral y substratos rocosos: red snapper (Lutjanidae family); 2) groupers or cabrillas (Serranidae family); 3) spiny lobster (Panulirus genus); 4) queen conch (Strombus gigas genus); 5) red sea urchin (<i>Strongylocentrotus franciscanus</i>); and 6) octopus (<i>Octopus maya</i>)	Estados costeros con Ley Local de CC o propuesta de esta Ley ¹⁷	Ley: BC, Chiapas, Q Roo y Veracruz. Propuesta de Ley: Sonora, Sinaloa, Michoacán y Tamaulipas
Decremento de abundancia y distribución de especies con importancia económica ante proyecciones de SST para 2030 y 2050 ⁸	Decremento de % población restante en seis grados de distribución latitudinal ante proyecciones de +1°C, +2°C y +3°C: <i>Mycteroperca rosacea</i> en latitudes 27°, 25°, 24°, 23° y 22° decline a 0% a +3°C. <i>Pomacanthus zonipectus</i> y para <i>Isostichopus fuscus</i> : decremento en todas las latitudes (29°, 27°, 25°, 23° y 22°)	Municipios costeros con Plan de Acción Climática Municipal ¹⁷	BC: Tijuana, Sinaloa: Navolato, Culiacán, Elota, Escuinapa, Q Roo: Bacalar, Cozumel, Benito Juárez, Mérida: Mérida, Tabasco: Champotón, Ciudad del Carmen, Ver: Poza Rica, Tecolutla, Tamaulipas: Cd Madero y Matamoros
Comunidades pesqueras con valores altos para índice de vulnerabilidad social ante factores de estrés antropogénicos (incluyendo CC) comparado con 12 comunidades ¹⁰	Norte Golfo de California (San Felipe, Bahía de los Ángeles, El Barril, Golfo de Santa Clara, Puerto Peñasco, Rodolfo Campodónico, Desemboque, Puerto Lobos, Puerto Libertad, Desemboque Seris, Punta Chueca y Bahía Kino), siendo El Barril la más vulnerable, seguida de Puerto Lobos y de Desemboque	17 convenios, protocolos y programas internacionales firmados/ratificados por México relacionados a la conservación, protección o manejo de los SSE arrecifales (Anexo III)	17 documentos (Ver Anexo II)
		30 leyes, normas, reglamentos, estrategias o programas relacionados a la conservación, protección o manejo de los SSE arrecifales (Anexo IV)	27 documentos (Ver Anexo III)
		21 ejemplos de instrumentos de gestión de conservación y manejo de los SSE arrecifales que permite aumentar su resiliencia o adaptación al CCG (Anexo V)	21 ejemplos realizados por OSC, gubernamentales o comunidades (Ver Anexo IV)

2 Maynard-Ford, Phillips, Chirico, & Survey (2008)
3 Jáuregui (2003)
4 Pereira, Prezas, Olivares, Fragoso, & Niño (2013)
5 Ayala-Bocos & Reyes-Bonilla (2008)
6 Casas Valdez, Serviere Zaragoza, Lluch Belda, Marcos, & Aguila Ramírez (2003)
7 Martínez et al. (2011)
8 Ayala-Bocos et al. (2015)
9 Alva-Basurto & Arias-González (2014)
10 Morzaria-Luna, Turk-Boyer, & Moreno-Baez (2014)
11 Scott, Simpson, & Sim (2012)
12 CENAPRED (s.f.)
13 Secaira Fajardo & Acevedo (2017)
14 Gijón-Díaz, Reyes-Bonilla, Guerrero-Izquierdo, & Fernández-Rivera Melo (2017)
15 Salinas Akhmadeeva et al. (2017)
16 Hernández-Velasco, Villaseñor, Torre, Suarez, & Espinoza (2015)
17 SEMARNAT & INECC (2012)
18 INECC & SEMARNAT (2012)
19 Gobierno de la República (2014)
20 Monterroso Rivas et al. (2014)
21 UNAM (s.f.)
22 SEMARNAT & INECC (2012)
23 Azuz-Adeath (2010)

5.2.7.3. Anexo III Instrumentos internacionales que México ha firmado relacionados a la conservación, protección o manejo de los SSE arrecifales

Nombre del convenio, protocolo	Instrumento, número de artículo o mención relacionada a la conservación o manejo de los SSE arrecifales	Ejemplo(s) de acción establecida a raíz del convenio, ley o compromiso en México
Convención sobre la Diversidad Biológica	Estrategia Nacional sobre Biodiversidad de México (ENBioMex) y Plan de Acción 2016-2030. Dentro de las metas nacionales (Aichi): Meta 10.1 Para el 2030, se han reducido las amenazas a los ecosistemas, especies en riesgo y especies marinas prioritarias, en particular zonas con arrecifes y se encuentran bajo protección y las actividades que en ellas se realizan se hacen de manera sustentable. Meta 10.3 Para 2030, se cuenta con una estrategia nacional para la atención de arrecifes . Meta 11.1. Para 2020 10 por ciento de las zonas marinas y costeras se conservan y manejan de manera eficaz y equitativa por medio de áreas naturales protegidas y otros instrumentos de conservación fomentando su conectividad e integridad paisajística y la continuidad de los servicios ambientales que proveen. En Conferencia de las Partes del Convenio sobre Diversidad Biológica (2000) apremió a implementar una gama de medidas de respuesta al fenómeno de blanqueamiento y a la degradación y destrucción de los arrecifes. Acción 5. Aumentar la captura de carbono y fortalecer la protección costera con la implementación de un esquema de conservación y recuperación de ecosistemas marinos y costeros como arrecifes , manglares, pastos marinos y dunas ¹	1) Establecimiento Reserva de la Biosfera Caribe Mexicano en 2016 y Arrecifes de Coral del Golfo de México y Caribe Mexicano). 2) Estrategia CONANP hacia 2040 (buscando atender las recomendaciones y compromisos internacionales particularmente las responsabilidades derivadas del Convenio sobre la Diversidad Biológica y, más específicamente, las Metas de Aichi para la Diversidad Biológica), tiene como objetivo: Orientar el trabajo y toma de decisiones de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas para la conservación de la biodiversidad y desarrollo sustentable en contextos cambiantes al mediano y largo plazo, mediante la articulación, armonización y alineación de los instrumentos, mecanismos e herramientas intra e interinstitucionales; Ejes sustantivos que incluyen: Manejo integrado del Paisaje, Conservación y Manejo de la Biodiversidad, Participación Social y Cultura para la Conservación, Economía de la Conservación y Cambio Climático ¹⁷

Convención sobre Humedales de Importancia Internacional (Convención RAMSAR)	La misión de la Convención de Ramsar, es “la conservación y el uso racional de los humedales mediante acciones locales y nacionales y gracias a la cooperación internacional, como contribución al logro de un desarrollo sostenible en todo el mundo” ³	Iniciativa Regional para la Conservación y Uso Racional de los Ecosistemas de Manglares y Corales, 17 sitios RAMSAR con arrecifes reportados por la Convención RAMSAR ¹⁶ (e.g Parque Nacional Cabo Pulmo ²)
Convención de las Naciones Unidas sobre el Derecho del Mar (CONVEMAR)	Art. 192 (obligación de proteger y preservar el medio marino), Art. 193 (derecho soberano de explotar sus recursos naturales con arreglo a su política en materia de medio ambiente y de conformidad con su obligación de proteger y preservar el medio marino), Art. 194 (Medidas para prevenir, reducir y controlar la contaminación del medio marino), Art. 195 (Deber de no transferir daños o peligros ni transformar un tipo de contaminación en otro), Art. 196 (introducción de especies extrañas o nuevas que puedan causar en él cambios considerables y perjudiciales) ⁵	
Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna Silvestres (CITES)	Procurar que el comercio internacional de las especies incluidas en los Apéndices de la CITES se regule utilizando la mejor evidencia científica, técnica y comercial disponible, a fin de asegurar su conservación y su aprovechamiento sustentable . ⁸ Los corales pétreos se encuentran dentro del tratado internacional como especímenes intactos para acuarios y curiosidades ⁶	En el Apéndice II enlista a las siguientes especies <i>Strombus gigas</i> , <i>Helioporidae</i> spp., <i>Antipatharia</i> spp., <i>Scleractinia</i> spp. y tortugas marinas ⁸
Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC)	Contribución Prevista y Determinada a Nivel Nacional de México, como compromisos no condicionados se incluye la adaptación basada en ecosistemas , con acciones para el 2020-2030 que incluyen aumentar la captura de carbono y fortalecer la protección costera con la implementación de un esquema de conservación y recuperación de ecosistemas marinos y costeros como arrecifes , manglares, pastos marinos y dunas 31 y 32. Como metas: aplicar la norma de especificaciones de protección ambiental y adaptación en desarrollos inmobiliarios turísticos costeros, incrementar los recursos financieros para la prevención y atención de desastres ⁹	
Convención Patrimonio de la Humanidad	Establece una lista de sitios denominados Patrimonios de la Humanidad con la finalidad de reconocer a los patrimonios naturales y culturales más excepcionales de la tierra, promueve la identificación, conservación, preservación y transmisión a las futuras generaciones de este patrimonio ⁷	Islas y Áreas Protegidas del Golfo de California; Sian Ka'an ¹⁸
Convenio sobre la Prevención de la Contaminación del Mar por Vertimiento de Desechos y otras Materias	Para promover el control de todas las fuentes de contaminación del medio marino , adoptar todas las medidas posibles para impedir la contaminación del mar por el vertimiento de desechos y otras materias que puedan constituir un peligro para la salud humana , dañar los recursos biológicos y la vida marina , reducir otros usos legítimos del mar	
Convenio Internacional sobre Responsabilidad Civil por Daños Causados por la Contaminación de las Aguas del Mar por Hidrocarburos	Unificar reglas , métodos, conceptos, fijar montos limitados para otorgar una indemnización adecuada a quienes sufran daños causados por la contaminación resultante de derrames o descargas de hidrocarburos procedentes de buques ¹⁴	
Convención para la Conservación y Desarrollo del Medio Marino de la Región del Gran Caribe (Convenio Cartagena)	Las Partes Contratantes adoptarán, individual o conjuntamente, todas las medidas adecuadas de conformidad con el derecho internacional y con arreglo al presente Convenio y a aquellos de sus protocolos en vigor en los cuales sean partes para prevenir, reducir y controlar la contaminación de la zona de aplicación del Convenio ¹⁵	

Protocolo de Cooperación para Combatir los Derrames de Hidrocarburos en la Región del Gran Caribe (del Convenio Cartagena)	Art. 3. Adopción de todas las medidas , tanto preventivas como correctivas, que sean necesarias para proteger el medio marino y costero de la Región del Gran Caribe contra los incidentes de derrame de hidrocarburos ; y establecerán y mantendrán o harán establecer y mantener los medios para hacer frente a los incidentes de derrame de hidrocarburos y se esforzarán por reducir el riesgo de ellos ¹⁵	
Protocolo Relativo a las Áreas y la Flora y Fauna Silvestres Especialmente Protegidas (del Convenio de Cartagena)	Art. 3. Tomarán las medidas necesarias para proteger, preservar y manejar de manera sostenible, dentro de las zonas de la Región del Gran Caribe: las áreas que requieren protección para salvaguardar su valor especial; y las especies de flora y fauna amenazadas o en peligro de extinción ¹⁵	Anexo III: Milleporidae todas las especies, Stylasteridae todas las especies, ANTIPATHARIA todas las especies, GORGONIACEA todas las especies, SCLERACTINIA todas las especies, <i>Strombus gigas</i> ¹⁵
Protocolo relativo a la Contaminación Procedente de Fuentes y Actividades Terrestres (del Convenio de Cartagenas)	Art. 3. Adoptarán medidas adecuadas para prevenir, reducir y controlar la contaminación de la zona de aplicación del Convenio procedente de fuentes y actividades terrestres , utilizando a estos efectos los medios más prácticos a su disposición y de conformidad con sus capacidades. En el Anexo II se menciona que cada Parte Contratante deberá asegurar que los sistemas domésticos de aguas residuales que se descarguen en aguas de Clase I (con arrecifes) sean tratadas por un sistema nuevo o existente de aguas residuales domésticas en que los efluentes satisfagan diversos límites relacionados a los parámetros de total sólidos suspendidos, demanda bioquímica de oxígeno, DBO5, pH, grasas y aceites, coliformes fecales y sustancias flotantes ¹⁵	
Protocolo Kioto	Objetivo principal: que los países industrializados reduzcan en forma gradual sus emisiones de GEI con relación al nivel de 1990 ¹⁰	
Declaración de Río sobre Medio Ambiente y el Desarrollo	Principio 11. Los Estados deberán promulgar leyes eficaces sobre el medio ambiente . Las normas, los objetivos de ordenación y las prioridades ambientales deberían reflejar el contexto ambiental y de desarrollo al que se aplican ¹¹	
Agenda 21	Capítulo 17: protección de los océanos y costas y al uso y desarrollo racional de los recursos vivos. Programa de Turismo Sustentable en México (generar el desarrollo sustentable de la actividad turística y mejorar las condiciones en los destinos turísticos de México, instrumento para mejorar los efectos del turismo en el ámbito municipal y eleva el nivel de vida de los pobladores de los destinos turísticos ⁴	Estrategia Nacional para un desarrollo sustentable del turismo y la recreación en las áreas protegidas de México, por medio de la aplicación efectiva de los Programas de subsidio y la coordinación con otras instancias gubernamentales, no gubernamentales y el sector privado)
Programa El Hombre y la Biósfera (MAB) Reservas de la Biósfera	Designa Reservas de la Biósfera s que son áreas geográficas representativas de la diversidad de hábitats del plantea, cumplen con tres funciones: conservación de los ecosistemas y la variación genética, fomento del desarrollo económico y humano sostenible , y de ejemplos de educación y capacitación en cuestione locales, regionales, nacionales y mundiales de desarrollo sostenible ¹²	Arrecife Alacranes, Banco Chinchorro, Sistema Arrecifal Veracruzano e Isla Cozumel ¹³
Código de Conducta para la Pesca Responsable de la Organización de las Naciones para la Agricultura, la Pesca y la Alimentación	Art. 6.8 Todos los hábitats críticos para la pesca en los ecosistemas marinos y de agua dulce (zonas húmedas, manglares, arrecifes , lagunas, zonas de cría y desove) se deben proteger y rehabilitar en la medida de lo posible y cuando sea necesario.	

1	CONABIO (2016)	8	("Convención sobre el Comercio Internacional de Especies Amenazadas de Flora y Fauna Silvestres", 1983)	15	Ambiente,(2006)
2	Ramsar (s.f.a)	9	(Gobierno de la República, 2015)	16	Ramsar (s.f.b)
3	Ramsar (2016)	10	(Naciones Unidas, 1998)	17	(Veracruzana et al., 2009)
4	(SECTUR, 2013)	11	Naciones Unidas (s.f.)	18	UNESCO (s.f.b)
5	(Naciones Unidas, 1982)	12	UNESCO (s.f.)		
6	(Resolution Conf. 11.10 CoP15, s/f)	13	Conanp (s.f.)		
7	UNESCO (s.f.a)	14	García Carolina (s.f.)		

5.2.7.4. Anexo IV leyes, normas, reglamentos, estrategias y programas nacionales relacionados directamente a la capacidad de adaptación o resiliencia de estos SSE arrecifales

Ley, norma, reglamento, estrategia o programa	Implementación nacional relacionada a los arrecifes	Ejemplo de acción establecida a raíz de la ley, norma o
Ley General de Cambio Climático (LGCC)	Art. 26 XI. Conservación de los ecosistemas y su biodiversidad, dando prioridad a los humedales, manglares, arrecifes , dunas, zonas y lagunas costeras, que brindan servicios ambientales, fundamental para reducir la vulnerabilidad; Art. 30 XVIII. Fortalecer la resistencia y resiliencia de los ecosistemas terrestres, playas, costas y zona federal marítima terrestre, humedales, manglares, arrecifes , ecosistemas marinos y dulceacuícolas, mediante acciones para la restauración de la integridad y la conectividad ecológicas ; Art. 34 III. d) Fortalecer los esquemas de manejo sustentable y la restauración de bosques, selvas, humedales y ecosistemas costero-marinos, en particular los manglares y los arrecifes de coral ¹	Estrategia Nacional de Cambio Climático 10-20-40: Instrumento rector de la política nacional para enfrentar los efectos del cambio climático y transitar hacia una economía competitiva, sustentable y de bajas emisiones de carbono, integrado por: 1) pilares de política nacional de cambio climático, 2) adaptación a los efectos del cambio climático (conservar y usar de forma sustentable los ecosistemas y mantener los servicios ambientales que proveen) y 3) desarrollo bajo en emisiones; su visión a 40 años: la conservación y el uso sustentable de los ecosistemas ayuda a la resiliencia de los mismos al cambio climático y Niveles adecuados de resiliencia a nivel local) ICAS (visión a 40 años de ENCC: sociedad rural poco vulnerable) ²
Ley General de Pesca y Acuicultura Sustentables (LGPAS)	Tiene por objeto regular, fomentar y administrar el aprovechamiento de los recursos pesqueros y acuícolas en el territorio nacional y las zonas sobre las que la nación ejerce su soberanía y jurisdicción para propiciar el desarrollo integral y sustentable de la pesca y la acuicultura . Art. 2. III. Establecer las bases para la ordenación, conservación, la protección, la repoblación y el aprovechamiento sustentable de los recursos pesqueros y acuícolas, así como la protección y rehabilitación de los ecosistemas en que se encuentran dichos recursos ³	
Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA)	Art. 20 BIS 6. La Secretaría podrá formular, expedir y ejecutar, en coordinación con las dependencias competentes, programas de ordenamiento ecológico marino. Estos programas tendrán por objeto el establecer los lineamientos y previsiones a que deberá sujetarse la preservación, restauración, protección y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales existentes en áreas o superficies específicas ubicadas en zonas marinas mexicanas , incluyendo las zonas federales adyacentes ⁴	
Ley General de Vida Silvestre (LGVS)	Art. 1 Establecer la concurrencia del Gobierno Federal, de los gobiernos de los Estados y de los Municipios, en el ámbito de sus respectivas competencias, relativa a la conservación y aprovechamiento sustentable de la vida silvestre y su hábitat en el territorio de la República Mexicana y en las zonas en donde la Nación ejerce su jurisdicción ⁵	
Ley de Hidrocarburos	Art. 41. El Ejecutivo Federal establecerá Zonas de Salvaguarda en las áreas de reserva en las que el Estado determine prohibir las actividades de Exploración y Extracción de Hidrocarburos ; en las Áreas Naturales Protegidas no se otorgarán Asignaciones ni Contratos para la Exploración y Extracción de Hidrocarburos. Art. 42. Corresponde a la Secretaría de Energía proponer al Ejecutivo Federal, con base en los dictámenes técnicos, el establecimiento de las Zonas de Salvaguarda ⁶	Decreto por el que se establece la zona de salvaguarda denominada Arrecifes de Coral del Golfo de México y Caribe Mexicano ³¹
Ley de Vertimientos en las Zonas Marinas Mexicanas	La presente ley es de jurisdicción federal, tienen por objeto el control y la prevención de la contaminación o alteración del mar por vertimientos en las zonas marinas mexicanas, Art. 3. Es vertimiento VI La colocación de materiales u objetos de cualquier naturaleza, con el objeto de crear arrecifes artificiales ⁷	

Ley Federal del Mar	Art. 6o La soberanía de la Nación y sus derechos de soberanía, jurisdicciones y competencias dentro de los límites de las respectivas zonas marinas, conforme a la presente Ley, se ejercerán según lo dispuesto por la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos, el derecho internacional y la legislación nacional aplicable, respecto a II El régimen aplicable a los recursos marinos vivos , inclusive su conservación y utilización , IV El aprovechamiento económico del mar y V La protección y preservación del medio marino , inclusive la prevención de su contaminación ⁸	
Ley de Aguas Nacionales	Regular la explotación, uso o aprovechamiento de dichas aguas, su distribución y control, así como la preservación de su cantidad y calidad para lograr su desarrollo integral sustentable. Art. 2. Las disposiciones de esta Ley son aplicables a las aguas de zonas marinas mexicanas en tanto a la conservación y control de su calidad, sin menoscabo de la jurisdicción o concesión que las pudiere regir. Art. 17. No se requerirá concesión para la extracción de aguas marinas interiores y del mar territorial, para su explotación, uso o aprovechamiento, salvo aquellas que tengan como fin la desalinización, las cuales serán objeto de concesión. Art. 29 Bis 4. La concesión, asignación o permiso de descarga podrán revocarse en los siguientes casos III. Descargar en forma permanente o intermitente aguas residuales en contravención a lo dispuesto en la presente Ley en cuerpos receptores que sean bienes nacionales, incluyendo aguas marinas. Art 88. Las personas físicas o morales requieren permiso de descarga expedido por "la Autoridad del Agua" para verter en forma permanente o intermitente aguas residuales en cuerpos receptores que sean aguas nacionales o demás bienes nacionales, incluyendo aguas marinas ⁹	
Ley de Responsabilidad Ambiental (LRAM)	Regula la responsabilidad ambiental que nace de los daños ocasionados al ambiente, así como la reparación y compensación de dichos daños. Art. 12 Será objetiva la responsabilidad ambiental, cuando los daños ocasionados al ambiente devengan directa o indirectamente de II El uso u operación de embarcaciones en arrecifes de coral ¹⁰	
Ley de Navegación y Comercio Marítimos (LNCM)	Art. 77 C. La SEMARNAT, coordinará con la SEMAR, los programas de prevención y control de la contaminación marina . Art. 167. Cuando una embarcación, aeronave, artefacto naval, carga o cualquier otro objeto se encuentre a la deriva, en peligro de hundimiento, hundido o varado y a juicio de la SEMAR, pueda constituir un peligro o un obstáculo para la navegación, la operación portuaria, la pesca u otras actividades marítimas relacionadas con las vías navegables, o bien para la preservación del ambiente , deberá llevarse a cabo lo siguiente: II. Previa notificación de la orden al propietario o naviero, en los supuestos en que exista una posible afectación al ambiente marino, la SEMAR estará obligada a obtener una opinión de la autoridad ambiental competente. Artículo 269.- Únicamente se admitirá el embargo de embarcaciones o artefactos navales por los siguientes créditos III. Operaciones de asistencia o salvamento o todo contrato de salvamento, incluida, si corresponde, la compensación especial relativa a operaciones de asistencia o salvamento respecto de una embarcación que, por sí mismo o por su carga, amenace causar daño al medio ambiente ; IV. Daño o amenaza de daño por la embarcación al medio ambiente , el litoral o intereses conexos; medidas adoptadas para prevenir, minimizar o eliminar ese daño; indemnización por ese daño; los costos de las medidas razonables de restauración del medio ambiente efectivamente tomadas o que vayan a tomarse; pérdidas en que hayan incurrido o puedan incurrir terceros en relación con ese daño ¹¹	
Ley de Puertos	Art. 41. El administrador portuario se sujetará a un programa maestro de desarrollo portuario, el cual será parte integrante del título de concesión y deberá contener: II. La Secretaría deberá solicitar las opiniones de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales en lo que se refiere a la ecología y de impacto ambiental ¹²	

Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010	Enlista las especies en alguna condición de riesgo en la República Mexicana ¹³	Especies enlistadas en esta norma <i>Chromis limbaughi</i> , <i>Acropora cervicornis</i> y <i>Acropora palmata</i> , <i>Pomacanthus zonipectus</i> e <i>Isotichopus fuscus</i>
Norma Oficial Mexicana NOM-006-PESC-1993	Regula el aprovechamiento de todas las especies de langosta en las aguas de Jurisdicción Federal del Golfo de México y mar Caribe, así como del Océano Pacífico incluyendo el Golfo de California ¹⁴	Establecimiento de períodos de veda para tres especies (<i>Panulirus inflatus</i> , <i>Panulirus interruptus</i> y <i>Panulirus gracilis</i>) en cinco zonas ³²
Norma Oficial Mexicana NOM-007-SAG/PESC-2015	Para regular el aprovechamiento de las poblaciones de erizo rojo y morado en aguas de jurisdicción federal del Océano Pacífico de la costa oeste de Baja California ¹⁵	Establecimiento de períodos de veda para <i>Strongylocentrotus franciscanus</i> en Baja California y Baja California Sur ³²
Norma Oficial Mexicana NOM-008-PESC-1993	Establece el ordenamiento y el aprovechamiento de las especies de pulpo en las aguas de jurisdicción federal del Golfo de México y mar Caribe ¹⁶	Establecimiento de períodos de veda para cuatro especies (<i>Octopus vulgaris</i> , <i>Octopus maya</i> , <i>Octopus bimaculatus</i> y <i>Octopus hubbsorum</i>) en tres zonas ³²
Norma Oficial Mexicana NOM-013-PESC-1994	Regula el aprovechamiento de las especies de caracol en aguas de jurisdicción federal de los estados de Campeche, Quintana Roo y Yucatán ¹⁷	Establecimiento de veda permanente para cinco especies (<i>Lobatus gigas</i> , <i>Pleuroploca gigantea</i> , <i>Busycon sp</i> , <i>Xancus sp</i> y <i>Strombus costatus</i>) en Litoral del Estado de Yucatán ³²
Norma Oficial Mexicana NOM-05-TUR-2003	Establece los requisitos mínimos de seguridad a que deben sujetarse las operadoras de buceo para garantizar la prestación del servicio, promoviendo que las empresas operadoras de buceo estén formalmente constituidas y brinden seguridad al turista, respeto a los recursos naturales y patrimonio cultural en el desarrollo de la actividad ¹⁸	
Norma Oficial Mexicana 005-PESC-1993	Norma para regular el aprovechamiento de las poblaciones de las distintas especies de abulón en aguas de jurisdicción federal de la Península de Baja California ¹⁹	Establecimiento de veda permanente para cinco especies (<i>Haliotis corrugata</i> , <i>Haliotis fulgens</i> , <i>Haliotis sorenseni</i> , <i>Haliotis cracherodii</i> y <i>Haliotis rufescens</i>) en la Península de Baja California ³²
Norma oficial Mexicana 022-SEMARNAT-2003	Norma que establece las especificaciones para la preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar. Art. 3.36 Definición de humedal costero: ecosistemas costeros de transición entre aguas continentales y marinas, cuya vegetación se caracteriza por ser halófito e hidrófito, estacional o permanente, y que dependen de la circulación continua del agua salobre y marina. Asimismo, se incluyen las regiones marinas de no más de 6 m de profundidad en relación con el nivel medio de la marea más baja ²⁰	
Norma Oficial Mexicana-029-PESC-2006	Pesca responsable de tiburones y rayas . Especificaciones para su aprovechamiento . Art. 4.3.4 La pesca dirigida a tiburones y rayas no podrá realizarse en: b) En una franja marina de cinco kilómetros de ancho alrededor de las zonas arrecifales coralinas, que se especifican en el Apéndice Normativo “E” de la presente Norma ²³	El apéndice normativo establece seis zonas arrecifales en el Golfo de México y Caribe, y una zona arrecifal del Océano Pacífico y Golfo de California ²³
Norma Oficial Mexicana-009-PESC-1993	Establece el procedimiento para determinar las épocas y zonas de veda para la captura de las diferentes especies de la flora y fauna acuáticas , en aguas de jurisdicción federal de los Estados Unidos Mexicanos ²¹	Establecimiento de veda permanente del coral blando (<i>Plexaura homomalla</i>) en el Mar Caribe ³²
Norma Oficial Mexicana-049-SAG/PESC-2014	Determina el procedimiento para establecer zonas de refugio para los recursos pesqueros en aguas de jurisdicción federal de los Estados Unidos Mexicanos ²²	Acuerdo para establecer una red de zonas de refugio pesquero en el área de Sian Ka'an ²⁵
Norma Oficial Mexicana-064-SAG/PESC/SEMARNAT-2013	Tiene como propósito evitar el uso de sistemas y métodos de pesca , que impliquen el deterioro de los recursos pesqueros y la fauna asociada. 4.1.3.1. Prohíbe el uso de chinchorros playeros en zonas de arrecifes, y 4.1.12. Prohíbe el uso de redes y palangres o cimbras en arrecifes de coral ²⁴	

Norma Oficial Mexicana-017-PESC-1994	Para regular las actividades de pesca deportivo-recreativa. 4.20. Quienes realicen actividades de pesca deportivo-recreativa, en ningún caso podrán realizar los siguientes actos: 44.20.3 Alterar o destruir arrecifes . 4.22 Los responsables o prestadores de servicios deberán anclar o fijar a una distancia mínima de 15 metros a partir de la línea perimetral de los arrecifes coralinos y no fijar o anclar bajo ninguna circunstancia en el mismo ²⁶	
Programa Especial de Cambio Climático (PECC) 2014-2018	Objetivo 2: conservar, restaurar y manejar sustentablemente los ecosistemas garantizando sus servicios ambientales para la mitigación y adaptación al cambio climático ²⁷	
	estrategia 2.1.4 Reforzar acciones que coadyuven en la protección y conservación del medio ambiente marino. Estrategia 2.2.6 Aumentar superficie de ANPs marino, costeras y terrestres y otras modalidades de conservación dando prioridad a regiones vulnerables al cambio climático. Estrategia 2.1.6 Implementar medidas de conservación y restauración para especies en categorías de riesgo con mayor vulnerabilidad al cambio climático. Estrategia 2.1.9 Instrumentar Programas de Adaptación al Cambio Climático de Áreas Naturales Protegidas, marino, costeras y terrestres y sus zonas de influencia. Estrategia 2.2.1 Promover la conectividad ecológica en las ANPs a través de: corredores biológicos, restauración integral y otras modalidades de conservación. Estrategia 2.2.2 Identificar hábitats prioritarios y evaluar su conectividad para la conservación de biodiversidad ante el cambio climático, estrategia 2.4.1 Desarrollar e incorporar criterios de cambio climático en regulaciones, esquemas de administración y manejo acordes con el Código de Conducta para la Pesca Responsable. Estrategia 2.2.4 Aplicar instrumentos para el manejo sustentable de la biodiversidad en territorios prioritarios promoviendo la igualdad de oportunidades entre hombres y mujeres, estrategia 2.3.6 Impulsar, con perspectiva de género, proyectos de turismo comunitario sustentable de naturaleza en ANPs y/o en zonas vulnerables. Estrategia 3.4.5 Impulsar proyectos productivos, turísticos y de conservación del medio ambiente especialmente para las mujeres indígenas y del sector rural, estrategia 5.5. Incorporar la perspectiva de género en las políticas ambientales y de sustentabilidad, incluyendo el marco jurídico en materia ambiental Líneas. Estrategia 2.4.9 Desarrollar criterios de cambio climático para la evaluación de impacto ambiental de proyectos de obra en ecosistemas costero ¹³	Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas. Proyecto: "Desarrollo de Programas Piloto de Adaptación al Cambio Climático en Áreas Naturales Protegidas del Sureste de México", con la meta de para cinco áreas, entre las cuales incluye ANPs con arrecifes: Reserva de la Biósfera Arrecifes de Sian Ka'an, Parque Nacional Arrecifes de Xcalak, Reserva de la Biosfera Banco Chinchorro
Estrategia Nacional sobre Especies Invasoras en México	Contribuir a la conservación del capital natural y el bienestar humano a través de acciones orientadas a la prevención , el control y la erradicación de especies invasoras en México mediante la participación coordinada, proactiva y responsable de todos los actores involucrados. Menciona que <i>Pterois volitans</i> y <i>P. miles</i> han sido registrados en 8 ANPs y como caso específico de urgente actuación (recomienda investigación del posible desplazamiento de masas de huevo por cruceros) ²⁸	
Programas Estatales de Acción ante el Cambio Climático	Instrumento de apoyo para el diseño de políticas públicas sustentables y acciones en materia de cambio climático, en el orden del gobierno estatal	Programa Veracruzano ante el Cambio Climático, dentro del eje de acción 5 (Costas) se tiene por objetivo el de establecer un programa regional para la conservación y rehabilitación de los humedales, lagunas costeras, arrecifes y dunas, también el diseño y desarrollo de infraestructura de protección ante un incremento del nivel del mar ²⁹
Plan de Acción Climática Municipal	Crear capacidades entre los tomadores de decisiones de los municipios sobre cambio climático y sus impactos, así como promover políticas públicas a nivel local	Plan Acción Climática de Cozumel, también ubicado en el mismo sistema arrecifal, señala que los huracanes, tormentas y depresiones tropicales ocasionan impactos en la biodiversidad y

					ecosistemas costeros que a su vez repercuten en el sector turismo ³⁰
1	LGCC, 2012	13	Norma Oficial Mexicana NOM-059-SEMARNAT-2010	24	Norma Oficial Mexicana-064-SAG/PESC/SEMARNAT-2013
2	("Estrategia Nacional de Cambio Climático", 2015)	14	Norma Oficial Mexicana NOM-006-PESC-1993	25	DOF (2012)
3	LGPAS, 2018	15	Norma Oficial Mexicana NOM-007-SAG/PESC-2015	26	Norma Oficial Mexicana-017-PESC-1994
4	LGEEPA (1988)	16	Norma Oficial Mexicana NOM-008-PESC-1993	27	Gobierno de la República. (2014)
5	LGVS (2000)	17	Norma Oficial Mexicana NOM-013-PESC-1994	28	Comité Asesor Nacional sobre Especies Invasoras (2010)
6	Ley de Hidrocarburos (2014)	18	Norma Oficial Mexicana NOM-05-TUR-2003	29	Universidad Veracruzana (2009)
7	Ley de Vertimientos en las Zonas Marinas Mexicanas (2014)	19	Norma Oficial Mexicana 005-PESC-1993	30	Plan acción climática de Cozumel 2011-2013. (s/f).
8	Ley Federal del Mar (1986)	20	Norma oficial Mexicana 022-SEMARNAT-2003	31	DOF (2016)
9	Ley de Aguas Nacionales (1992)	21	Norma Oficial Mexicana-009-PESC-1993	32	SAGARPA (2018)
10	Ley de Responsabilidad Ambiental (2013)	22	Norma Oficial Mexicana-049-SAG/PESC-2014		
11	Ley de Navegación y Comercio Marítimos (2006)	23	Norma Oficial Mexicana-029-PESC-2006		
12	Ley de Puertos (1993)				

5.2.7.5. Anexo V instrumentos de gestión de conservación y manejo de los SSE arrecifales que permiten aumentar su resiliencia o adaptación al CC

Instrumento de gestión	¿Qué establece?	Ejemplo internacional	Ejemplo nacional
Zonas de Refugio Pesquero (ZRP)	Estrategia para conservar la biodiversidad de especies pesqueras y asociadas que ofrecen importantes beneficios biológicos como: reducción de la mortalidad por pesca, protección a los procesos de reproducción y crianza, repoblamiento, dispersión larval, incremento de tallas y recuperación de cadenas tróficas y hábitats , En cuestiones económicas y sociales, las ZRP también sirven para: incrementar el volumen y valor de la captura, la certificación de pesquerías sustentables, el desarrollo de actividades alternativas (ecoturismo), el mantenimiento de la actividad pesquera y una mayor participación activa de las comunidades ¹	<u>Parque Marino Gran Barrera Arrecifal (Australia)</u> , la autoridad del parque rezonificó el parque marino en 2004 después de recibir evaluaciones científicas que cuestionaban si el sistema de zonificación anterior estaba cumpliendo los objetivos de conservación. La nueva estrategia de zonificación conserva una selección representativa de hábitat. Las zonas de no captura que están fuera de los límites de la pesca se ampliaron para cubrir el 33% del parque marino, frente al 4.5% ²	<u>Zona de Refugio Pesquero en Akumal</u> , decretado en 2015. Ante el reporte de científicos de un decline de hasta el 60% de la densidad de peces en la zona, se decreta este refugio como resultado de un proceso colaborativo entre la organización civil y la cooperativa de pescadores de Tulum; representa una oportunidad sin precedentes para proteger los recursos marinos, involucrar a una multitud de usuarios en torno a un objetivo común y vincular medidas adicionales de conservación, restauración y gestión costera integral en la región ⁴ <u>Red de Zonas de Refugio Pesquero en Chinchorro y Punta Herrero</u> : establecimiento, por acuerdo oficial, de zonas en donde no podrán llevarse a cabo actividades de pesca comercial, ni de consumo doméstico de especies de flora y fauna acuáticas, con excepción de una zona, donde sólo se permitirá la pesca de angosta, además la pesca deportivo-recreativa únicamente podrá llevarse a cabo bajo la modalidad de captura y liberación; en un futuro se determinará la permanencia, modificación de estas zonas conforme a evaluaciones por medio de una opinión técnica ⁵ <u>Refugios pesqueros en Isla Natividad</u> , en 2006 la Sociedad Cooperativa de Producción Pesquera Buzos y Pescadores de Isla Natividad decidió cerrar a la pesca dos bloques de su concesión pesquera para crear este tipo de refugios para

			evaluar si su uso permite recuperar las pesquerías de abulón azul y amarillo, que han sido diezgadas por condiciones oceanográficas como resultado del cambio climático. Tras cuatro años de estudiar el establecimiento de los refugios, se ha encontrado que en los sitios pesqueros la población de abulón ha disminuido dramáticamente aun cuando la cooperativa ha reducido la cuota de captura, mientras que en los refugios las poblaciones han permanecido constantes y se ha estabilizado la estructura de tallas de abulones ³
Manejo Basado en Exosistemas	Enfoque que conjunta a los principales componentes y servicios del ecosistema, tanto estructurales como funcionales, en el manejo pesquero; valora el hábitat y adopta una perspectiva de multiespecies, se compromete a comprender los procesos del ecosistema; su objetivo es reconstruir y sostener poblaciones, especies, comunidades biológicas y ecosistemas marinos con altos niveles de productividad y diversidad biológica sin comprometer a la amplia gama de bienes y servicios de los ecosistemas marinos a la vez que proporcionan alimentos, ingresos y recreación para los humanos ⁶²		<u>Proyecto Pesquerías de pequeña escala en el Alto Golfo de California (PANGAS)</u> , desarrollado por una alianza interdisciplinaria entre universidades, OSC, centros de investigación, nacionales y de EUA, en el cual se llevan a cabo estudios de ciencias sociales y naturales, además de trabajar con los pescadores locales; el cual da a pie a estrategias de manejo integradas y fundadas en el manejo basado en ecosistemas, sirviendo como un modelo para el manejo de recursos marinos de la región 8. Uno de los principales logros del proyecto ha sido la creación de capacidades para dialogar y pensar en distintos idiomas/canales del conocimiento ⁹
			<u>Proyecto Humedales</u> , iniciativa de cooperación internacional en la cual el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) otorgó al Gobierno de México a donación para hacer frente al cambio climático en la zona del Golfo de México y Mar Caribe y desarrollar e implementar medidas de adaptación al cambio climático en sitios piloto con el fin de reducir la vulnerabilidad de las poblaciones que habitan y hacen uso de los servicios ambientales de los humedales; el sitio piloto "Humedal Punta Allen: Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an, Estado de Quintana Roo", en donde se implementaron medidas de rehabilitación hidrológica y diseño e implementación del repoblamiento de arrecifes de coral resistentes a altas temperaturas ⁶⁶
Fideicomiso	Fondo destinado a pagar por la restauración y mantenimiento, basada en información científica que asegura la salud de los arrecifes y las playas; obtenido por medio de la colecta de la industria del turismo y por el pago de un seguro en caso de que un evento climático dañe el área ⁶	No existe para arrecifes, México es pionero. Existen ejemplos de indemnización, en E.U.A cuando cuando ocurre un derrame de petróleo u otras sustancias peligrosas que dañan los arrecifes de coral se aplica el Programa de Evaluación y Restauración de Daño de Recursos Naturales a través de la evaluación del valor perdido por el daño a los ecosistemas y del costo de la restauración ¹⁷	Fondo fiduciario respaldado por los gobiernos locales y propietarios de hoteles en la costa del Caribe mexicano, el cual financiará proyectos para conservar los arrecifes y las playas en forma continua así como después del impacto de un huracán; el fideicomiso recibirá fondos de los impuestos que generan los hoteles y la industria del turismo y contará con un seguro para los arrecifes de coral y las playas en caso de eventos climáticos extremos con el fin de conservar estos sistemas naturales que agregan valor a los negocios y a las comunidades. Este proyecto podría marcar el comienzo de una nueva etapa hacia la resiliencia climática ⁷

Áreas Marinas Protegidas	Cualquier área de terreno intermareal o submareal, junto con las aguas suprayacentes y la flora, fauna, características históricas y culturales asociadas, que ha sido designada por la ley u otro medio eficaz para proteger parte o todo el entorno adjunto ⁵⁶	<u>Great Barrier Reef Marine Park</u> , Los gobiernos de Australia y Queensland han estado trabajando juntos para la protección y conservación a largo plazo del Parque Marino de la Gran Barrera de Coral desde su inicio en 1975 ⁵⁸	27 Áreas Naturales Protegidas con comunidades y arrecifes coralinos en México ⁵⁷
			<u>Proyecto Resiliencia para ANP</u> , proyecto innovador en su tipo en abordar agendas conjuntas de resiliencia, áreas protegidas y cambio climático, ejecutado por la CONANP implementado con el apoyo del PNUD en México y cofinanciado por un donativo del GEF, implementado en Parque Nacional Costa Occidental Isla Mujeres Punta Cancún, Punta Nizúc y Manglares de Nichupté, Parque Nacional (PN) Arrecifes de Puerto Morelos y Reserva de la Biosfera Archipiélago Revillagigedo
Red de Áreas Marinas Protegidas	El papel de una red de áreas marinas protegidas es conectar y proteger las áreas necesarias para reforzar el funcionamiento de los ecosistemas de modo que la salud general del océano no se vea comprometida por los usos humanos 14. También las MPAs can increase the resilience of coralreef communities to natural disturbances, including coral bleaching, coral diseases, and storms ²⁹	<u>Sistema de Áreas Marinas Protegidas del Triángulo de Coral</u> , a través de la implementación de redes de AMPs incorporando características ecológicas, sociales y de gobernanza ¹⁵	<u>Proyecto Red de reservas marinas para la Región de las Grandes Islas, Golfo de California</u> , con el objetivo principal de proteger especies de invertebrados y peces asociados a los arrecifes rocosos costeros, con especial atención a especies amenazadas y comerciales, y los hábitats importantes para su desarrollo; incorporado variables sobre los posibles efectos del cambio climático y siendo uno de los proyectos más robustos a nivel mundial, desde el punto de vista de información científica generada ¹⁶
		<u>Reef Resilience Network</u> , conecta a los administradores de recursos marinos con información, expertos, recursos y oportunidades de desarrollo de habilidades para acelerar y aprovechar soluciones para mejorar la conservación y restauración de los arrecifes de coral y las pesquerías de arrecifes en todo el mundo ²⁸	<u>Resiliencia en Áreas Protegidas</u> es un proyecto ejecutado por la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) implementado con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) en México y cofinanciado por un donativo del Fondo Mundial para el Medio Ambiente Mundial (GEF) con el objetivo de reducir los impactos negativos del cambio climático sobre la biodiversidad de las Áreas Protegidas mexicanas, establecido en Parque Nacional (PN) Costa Occidental Isla Mujeres Punta Cancún, Punta Nizúc y Manglares de Nichupté y en Parque Nacional Arrecifes de Puerto Morelos (etapa piloto) ⁷⁰
Ciencia ciudadana	Producción científica basada en la participación , consciente y voluntaria, de miles de ciudadanos para generan grandes cantidades de datos ; la E-Ciencia Ciudadana o ciber ciencia se refiere a la participación de ciudadanos legos en proyectos científicos por medio del uso de las tecnologías ³¹	<u>The Reef Citizen Science Alliance</u> , es una red que fomenta la colaboración, el desarrollo de capacidades, el avance y la acción para la ciencia ciudadana que beneficia a los Arrecifes de Queensland y su visión para el futuro es una barrera resistente apoyada por una red de programas de ciencia ciudadana sostenibles, colaborativos e innovadores ³²	<u>Naturalista, Monitoreo de Arrecifes Coralinos: blanqueamiento</u> , plataforma digital en colaboración de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad con iNaturalist.org con el objetivo de que el público en general registre fotografías sobre la biodiversidad mexicana; específicamente para el blanqueamiento de corales, la información vertida en este proyecto será utilizada para apoyar al SATCoral (sistema de alerta temprana de blanqueamiento de coral de CONABIO) en la cual los registros deben estar con georreferencia y dentro de la especie o grupo Scleractinia ³⁴

		<u>Observatorio Pro arrecifes</u> , tiene como objetivo colaborar para mejorar la efectividad de la conservación de los arrecifes en Colombia por medio de la capacitación a los miembros de la comunidad de buzos y pescadores artesanales para recoger sistemáticamente datos científicos ³⁵	<u>Proyectos de monitoreo y evaluación de ciudadanos dirigidos por Comunidad y Biodiversidad AC</u> , colaboran ciudadanos de comunidades costeras localizadas en tres regiones del país (Océano Pacífico, Golfo de California y arrecife Mesoamericano para participar de manera activa en la evaluación y monitoreo de los recursos naturales de su región, lo cual ha permitido elaborar diversos materiales de difusión y divulgación científica ⁶⁴
		<u>Bleach Patrol</u> , nuestro objetivo es monitorear la decoloración de coral en todo el mundo a través de científicos ciudadanos que trabajan juntos para estudiar y proteger los arrecifes de coral, en colaboración con la Universidad de Columbia y la World Surf League ⁷²	
Restauración ecológica	Implementación de diferentes métodos con el fin de mitigar amenazas y recuperar los arrecifes degradados , con el objetivo de asistir la recuperación del ecosistema que ha sido degradado, dañado o destruido en cuanto a su composición de especies, estructura de la comunidad, función ecológica y conectividad con ecosistemas adyacentes ¹⁸	<u>Proyecto de restauración de arrecifes coralinos ante el cambio climático en las Seychelles</u> , se identifica la gran dependencia de las comunidades humanas a los servicios ambientales que proveen. Con el objetivo de incrementar su resiliencia y reducir la vulnerabilidad de estas comunidades ante tormentas, inundaciones y la elevación del mar ²¹	<u>Programa de Restauración de <i>Acropora palmata</i> en el Sistema Arrecifal Veracruzano</u> , proyecto que desarrolla técnicas específicas de viveros de coral y metodologías de trasplante; los resultados muestran que los viveros diseñados son eficientes en la fijación y estabilización de fragmentos con una sobrevivencia >80% desde la fijación, y del 100% a partir de su estabilización en sitios someros ¹⁹
Bases de datos/metadatos	Sitio web en donde se conjuntan los datos e información relacionados a ciertos temas o ecosistemas. Una base de metadatos está compuesta por información sobre datos existentes, en lugar de los datos en sí ⁴²	<u>ReefBase</u> , reúne el conocimiento disponible sobre los arrecifes de coral en un repositorio de información. Su objetivo es facilitar los análisis y el monitoreo de la salud de los arrecifes de coral y la calidad de vida de las personas que dependen de los arrecifes, y apoyar las decisiones informadas sobre el uso y manejo de los arrecifes de coral ⁴¹	<u>Metadatos de investigación marina en México</u> , tiene como objetivo crear una base de metadatos respecto a toda la información de investigación marina desarrollada en México, originado de distintas maneras, por ejemplo: datos de tesis, literatura gris, o capturados por pescadores o voluntarios ⁴²
Plan de respuesta ante eventos de blanqueamiento masivo	Para responder al reto de eventos de blanqueamiento masivo, puede incluir estrategias de; sistema de alerta temprana, respuesta a incidentes, acciones de manejo y comunicación estratégica ⁶⁷	<u>Plan de Respuesta al Blanqueamiento del Coral</u> (Great Barrier Reef Marine Park Authority), presentado en 2002 y revisado y redefinido anualmente por el Grupo de Cambio Climático del Parque ⁶⁷	

Alertas de Blanquimiento	Sistema con datos que proporcionan las condiciones ambientales actuales del arrecife para identificar rápidamente las áreas en riesgo de blanqueamiento de coral o modelos que predicen la probable ocurrencia de las condiciones de estrés térmico cuando ocurren blanqueamiento de coral a corto y mediano plazo (semanas a meses), generalmente basado en monitoreos de satélites ⁶⁸	NOAA Coral Reef Watch, su misión es utilizar sensores remotos y herramientas in situ para monitorear, modelar y reportar casi en tiempo real y a largo plazo las condiciones ambientales físicas de los ecosistemas de arrecifes de coral, presenta 5 niveles de estrés que van desde sin estrés a alerta de blanqueamiento nivel 2 ⁶⁸	Sistema de Alerta Temprana de blanqueamiento de Corales (CONABIO), proyecto que forma parte del SATCoral, el cual recopila información obtenida por voluntarios para ser un sistema que emite alertas de posibles blanqueamientos, también se basa en la temperatura superficial del mar (SST) para detectar anomalías que indican el sobre calentamiento del agua sobre los umbrales. La SST se estima a partir de imágenes satelitales del sensor MODIS ⁶⁹
Boyas de amarre	Las boyas de amarre de uso diario (DMBs por sus siglas en inglés) se han implementado como una alternativa al anclaje en los arrecifes, las cuales dañan el arrecife y otras comunidades bentónicas ⁶⁵	Boyas de amarre en las Islas de Hawái, si bien esta herramienta reduce el impacto del anclaje en los sitios populares de recreación, éstas son efectivas cuando se realizan esfuerzos de monitoreo y mantenimiento continuos con el fin de mantenerlas en condiciones de uso deseables ⁶⁵	Instalación de boyas para la restauración, protección y manejo de los ecosistemas del Sistema Arrecifal Veracruzano, se colocaron boyas en las proximidades de los arrecifes de Veracruz en las zonas prioritarias y de mayor intensidad de buceo deportivo y recreativo ⁷¹
Análisis de omisión y vacíos (gap análisis) de acuerdo con la CDB	Identificar sitios de alta importancia para la conservación de la biodiversidad costera y oceánica de México bajo el Convenio sobre la Diversidad Biológica, el cual establece que se deben realizar análisis de vacíos y omisiones en conservación (gap analysis) para identificar en dónde se deben enfocar los esfuerzos de conservación sobre una base técnica y no como respuestas ad hoc ⁵⁵ ; Requerimiento del Plan de Acción, acción 1.1.5. ⁶¹	Análisis de omisión marino de Hawái, Los principios del análisis son identificar aquellas áreas o hábitats que no están en conservación mediante la recopilación de la información disponible sobre la distribución de especies y hábitats ⁵⁹	Regiones Marinas Prioritarias, sitios de alta prioridad determinados en la masa enfocada en la vegetación costera y marina como el Corredor Pesquero Tijuana-Ensenada, que señala que el zargazo como especies clave para su consideración como sitio prioritario ⁶⁰
Control especies invasoras	La invasión de especies no autóctonas en los ecosistemas marinos pueden ser ecológicamente dañinas y económicamente costosas si se establecen en nuevos hábitats (incluyen diversos organismos como algas, invertebrados y vertebrados) ⁵²	Evaluaciones de impacto y estrategias de manejo para el pez león invasivo en el Atlántico, proyecto de la NOAA. Realizar evaluaciones biológicas y ecológicas del pez león para determinar su impacto en los hábitats de los arrecifes y las economías del Atlántico, interpretación de los resultados de los estudios biológicos y ecológicos, la identificación de lagunas de datos, el mapeo de la distribución del pez león y la asistencia en el desarrollo de planes de manejo ⁵⁴	Estrategia Regional para el control del Pez León en el Arrecife Mesoamericano, Las acciones descritas en la estrategia propuesta se orientan principalmente a la búsqueda de la coordinación interinstitucional e intersectorial, la educación y sensibilización a los diversos actores y sectores, el control asociado a fortalecer la capacidad en la captura del pez león y las técnicas para manejarlo, así como incentivos y el mercadeo y publicidad para promover el consumo humano de la especie ⁵³
Arrecifes artificiales	Recientemente se han implementado como una estrategia de manejo de los ecosistemas marinos, la evidencia indica que aumenta la productividad secundaria y representan un uso complementario de manejo pesquero al incrementar las oportunidades de pesca ³⁶ , Perkol-Finkel et al. (2006) mencionan que estos deben poseer características	Artificial Reefs in Madagascar, en la Bahía de Ranobe y en la aldea de Anakao para aumentar las poblaciones de peces e invertebrados en un intento por revertir las capturas de pesca en declive, proporcionar a los pescadores sitios de pesca alternativos para redirigir la presión de la pesca de los	Barco Hundido en la costa de Michoacán, Ramírez-Ortíz et al. (2011) reportan que este arrecife artificial muestra una gran complejidad estructural del hábitat que le confiere la capacidad de albergar un mayor número de comunidades ícticas arrecifales, con abundancias relativas considerables siendo idóneo para el refugio, alimentación y desarrollo de estas comunidades ³⁷

	estructurales similares a las de los arrecifes naturales adyacentes ³⁹	arrecifes de coral sobreexplotados y regenerar los hábitats de arrecifes en parches degradados ³⁸	<u>Arrecifes artificiales en bosque de kelps (Macrocystis pyrifera) en el Sur de California</u> , Construcción y diseño de 61 arrecifes artificiales que permitan el establecimiento de las macroalgas como estrategia de mitigación ante la pérdida de los bosques de kelps, encontrando que un sustrato arrecifal con poco relieve con una cantidad moderada de arena puede funcionar para el establecimiento de este tipo de arrecifes artificiales con macroalgas ⁷³
Co-manejo	Arreglo institucional entre los usuarios locales de un territorio o conjunto de recursos naturales y/o grupos interesados en su conservación, y las agencias públicas a cargo de la administración de estos recursos, implica una repartición de responsabilidades y competencias y una clara definición entre el ejercicio de la autoridad pública y las pautas de uso, acceso, control y posterior manejo de los recursos . 11 Cinner et al. (2012) mencionan que para asegurar el comanejo alcance los niveles de equidad y legitimidad esperados a largo plazo, los administradores deben encontrar las formas de brindar beneficios en la calidad de vida a los pobres ⁴⁴	Corporación Giringun Aborigin Corporation, programa de co-manajeo dentro de la Gran Barrera Arrecifal Australiana. En 2005 se firmó un acuerdo entre la localidad y las instituciones de gobierno que protegen a esta área con los objetivos de desarrollar un régimen de manejo efectivo de la tierra y el mar continuo a través del establecimiento de asociaciones y programas de colaboración entre la comunidad Giringun y las agencias de manejo interesadas, así como obtener derechos de manejo indígenas reconocidos por el gobierno ¹²	<u>Sociedad Cooperativa de Mujeres en el Golfo</u> , fundada en 2000 por diez mujeres de Baja California con el interés de una cadena productiva, enfocándose en actividades de pesca y extracción de peces para acuario, siendo esta última su principal ingreso y motor para el desarrollo del grupo. Han colaborado con las agencias de gobierno (seguimiento a solicitudes de aprovechamiento y pesca, apoyo para desarrollar la cooperativa), OSC (búsqueda de fondos para capacitación asesoramiento para la búsqueda de mercados nacionales e internacionales) e instituciones de investigación (desarrollo de vínculos entre productores, comunidad, estudiantes e investigadores) ¹³
Acuicultura multitrófica	La acuicultura integral multitrófica es un sistema que implica el cocultivo de organismos en niveles tróficos complementarios, de modo que los desechos de uno puedan ser reciclados y utilizados por otros organismos ⁴⁵	<u>Acuicultura Integral Multitrófica con Gracilaria y Macrocystis</u> , Buschmann et al. (2008) mencionan que éstas algas marinas, con gran potencial económico, pueden ser cultivadas con actividades productivas para el salmón, el abulón y para el cultivo de organismos filtradores en Chile, como una oportunidad de desarrollar una actividad en donde los residuos sean reutilizados como nutrientes ⁴⁶	<u>Proyecto piloto de acuicultura multitrófica en Isla Natividad</u> , proyecto realizado en convenio con la UABCS en el laboratorio de Isla Natividad de la cooperativa de este sitio, para determinar cuál es el beneficio de cultivar dos especies naturalmente asociadas como el pepino y el abulón; presentado como uno de los primeros ejemplos del país donde una cooperativa pesquera lleva a cabo inversiones en el desarrollo de ciencia que fundamente el desarrollo de productos tecnológicos propios, originales y que le permitirán adaptarse a las nuevas condiciones naturales que en otros sitios están disminuyendo dramáticamente la producción y las ganancias económicas ⁴⁷
Turismo alternativo	Es una representación del desarrollo sostenible, proporciona una alternativa al turismo de masas con menos efectos negativos ambientales y resalta la importancia del desarrollo económico , incluye al turismo cultural, turismo de aventura y al ecoturismo ²⁵	Ecotourism Australia opera bajo los lineamientos y en conjunto con las autoridades del Parque Marino de la Gran Barrera Arrecifal a través de un programa de ecocertificación con estándares de manejo y auditoría ²⁶	López y Boncheva (2010) señalan que los peces en el Parque Nacional Cabo Pulmo Baja California Sur son un recurso muy importante para el desarrollo del ecoturismo de esta área e incluso mencionan la disposición por parte de los turistas a aportar recursos adicionales para la conservación de los peces ⁴⁰ .
Conocimiento local	Es el conocimiento que las personas en una comunidad determinada han desarrollado con el tiempo, y que continúan desarrollando, está basado en la experiencia, usualmente probado en periodos largos de tiempo, adaptado al ambiente y la cultura local, embebido en las prácticas comunales,	Incorporación del conocimiento local en un SIG para designar Áreas Marinas Protegidas en Oceanía, en las localidades de Roviana y Vonavona. Aswani y Lauer mencionan que los datos de conocimiento indígena y de pesca artesanal en conjunto con información biofísica en un SIG pueden ayudar a designar ANP	Sulub y Perera (2011) identificaron nuevos sitios de una agrupación de desove del pez <i>Epinephelus guttatus</i> , de gran importancia comercial en el mar Caribe, en el Parque Nacional Arrecife Alacranes por medio del conocimiento previo provisto por pescadores mediante entrevistas semi-estructuradas, información que será considerada en la conservación y programa de manejo del área ⁴⁹

	dinámico y cambiante, retenido por algunos individuos a por la comunidad ¹⁰	con mejores soluciones de manejo a problemas socio-ambientales ⁴⁸	
Manejo integral de zona costera (MIZC)	Es un enfoque para desarrollar e implementar los usos ambientales, culturales y económicos sostenibles de la zona costera , su objetivo es coordinar todos los usos y actividades en la zona costera, tanto para los sectores públicos como privados de acuerdo a un conjunto de políticas y prácticas de manejo de recursos, puede incluir áreas de cuencas ⁵¹	Revisión de los procesos de captación relevantes para la región de la Gran Barrera de Coral.	
Ordenamientos Pesqueros	Proceso integrado de acopio de información, análisis, planificación, consulta, adopción de decisiones , asignación de recursos y formulación y ejecución, así como imposición cuando sea necesario, de reglamentos o normas que rijan las actividades pesqueras para asegurar la productividad de los recursos y la consecución de otros objetivos, implica un conjunto amplio y complejo de tareas encaminadas a conseguir los máximos beneficios para los usuarios locales, el país o la región, mediante la utilización sustentable de los recursos acuáticos vivos a los que tienen acceso ⁶³		<u>Programa de Ordenamiento Pesquero Ribereño</u> , tiene por objetivo propiciar un sector pesquero ribereño ordenado, a través de la identificación, registro e integración al marco legal de pescadores, así como establecer las políticas de desarrollo de las pesquerías, conciliando la práctica pesquera con el marco legal ⁶³
Manejo sustentable de especies marinas de importancia económica	Manejo planificado para generar bienes útiles para la vida humana sin exceder el uso de la misma, tomando en cuenta las necesidades de las generaciones futuras garantizando el equilibrio de los ecosistemas y generando beneficios a la población humana ²²	<u>The Sustainable Marine Aquarium</u> , de la Universidad de Queensland. Dedicado a las especies que pueden reproducirse en cautiverio por medio de arrecifes artificiales y de la compra de peces a productores locales o por medio de la colecta de larvas del medio. Aunque no opera con comunidades propone un modelo de manejo sustentable especies de ornato ²⁴	<u>Manejo sustentable de la pesquería de langosta del Caribe Mexicano</u> (Sian Ka'an y Banco Chinchorro), en el cual se promueve la sostenibilidad de la pesquería a través de la colaboración y siguiendo estándares internacionales de certificación como guía para evaluar el progreso en el manejo, seis cooperativas involucradas y en 2016, la pesquería obtuvo la calificación de "mejor opción" por parte del Seafood Watch Institute del Monterey Bay Aquarium ²³
Unidades de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre (UMA)	Instrumentos cuyo enfoque principal es el manejo y uso sustentable de los recursos naturales , promueven esquemas alternativos de manejo de especies de vida silvestre compatibles con el cuidado del ambiente, mediante el uso responsable y regulado de los recursos naturales renovables		<u>Corallium, UMA establecida en la comunidad de Miradores, municipio de Emiliano Zapata Veracruz.</u> Dedicada a la propagación, preservación, conservación, repoblamiento y biorremediación del coral, prioridad en el desarrollo de las especies acuáticas nacionales y de Veracruz; primera UMA nacional en corales ⁵⁰

1 <https://www.gob.mx/conapesca/documentos/zonas-de-refugio-pesquero-en-mexico>
2 <http://webservices.itcs.umich.edu/drupal/mebm/?q=node/56>
3 <http://www.alianzakanankay.org/es/ejemplos-exitosos/titulo/>

http://www.healthyreefs.org/cms/wp-content/uploads/2015/07/Bolet%C4%97n-ABR-JUN2015_INGLE%C4%97S.pdf
 RED DE ZONAS DE REFUGIO PESQUERO EN AGUAS MARINAS DE JURISDICCION FEDERAL UBICADAS EN LAS AREAS DE BANCO CHINCHORRO Y PUNTA HERRERO EN EL ESTADO DE QUINTANA ROO
<https://global.nature.org/content/insuring-nature-to-ensure-a-resilient-future>
 Lanzamiento del fideicomiso para el manejo de la zona costera Quintana Roo, México. The Nature Conservancy
<http://cobi.org.mx/lineas-estrategicas/reservas-marinas/pangas/>
 Munguia-Vega et al 2015 PANGAS: An interdisciplinary Ecosystem- Based Research Framework for Small-Scale Fisheries in the Northern Gulf of California
<http://www.fao.org/docrep/007/y5610e/y5610e01.htm>
 Saravia 2011 El comanejo y la participación de la sociedad civil en las áreas protegidas de Centroamérica
 Nursey 2009. Co-management and protected area management: Achieving effective management of a contested site, lessons from the Great Barrier Reef World Heritage
 Un ejemplo de co-manejo pesquero en el Golfo de California: Caso de estudio cooperativa pesquera "Mujeres del Golfo"
 Scientific Guidelines for Designing Resilient marine protected area networks
 Developing Marine Protected Area Networks in the Coral Triangle: Good Practices for Expanding the Coral Triangle Marine Protected Area System
 CONABIO 2014. Quinto Informe Nacional de México ante el Convenio sobre la Diversidad Biológica (CDB)
 AIDA 2015 La importancia de los arrecifes de coral en México
 Ensayo Revisión y estado del arte de la restauración ecológica de arrecifes coralinos
 Evaluación de técnicas de viveros y trasplantes para la restauración del coral Acropora palmata (
 Restauración y manejo de sitios arrecifales impactados por fenómenos naturales y antrópicos en el Parque Nacional Arrecife Alacranes
 USAID, 2017. Restoring Coral Reefs in the Face of Climate Change in the Seychelles Adaptation Approach Project at a Glance
 Marco conceptual del manejo de recursos naturales
<http://cobi.org.mx/project/manejo-sustentable-de-la-pesqueria-de-langosta-del-caribe-mexicano-sian-kaan-y-banco-chinchorro/>
<http://www.cleanerfish.com/>
 Models and Alternative Strategies in the Context of Sustainable Development. Alternative Tourism
<https://www.ecotourism.org.au/membership/members-of-ecotourism-australia/protected-area-managers-members/the-great-barrier-reef-marine-park-authority/>
<http://resilienciamexico.com/proyecto-resiliencia/>
<http://www.reefresilience.org/about-us/>
 Mellin et al., 2016. Marine protected areas increase resilience among coral reef communities
http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1850-00132014000300002
<http://greatbarrierreefcitizenscience.org.au/about-us>
<http://www.naturalista.mx/projects/monitoreo-de-arrecifes-coralinos-blanqueamiento>
<https://icri-colombia.es.tl/Ciencia-Ciudadana.htm>
 Becker et al., 2017. Monitoring of reef associated and pelagic fish communities on Australia's first purpose built offshore artificial reef
 RamírezOrtiz et al. 2011. Estructura comunitaria de la ictiofauna en arrecifes rocosos y artificiales de la costa de Michoacán , México
<https://www.reefdoctor.org/projects/conservation/coral-reefs/artificial-reefs/>
 Can artificial reefs mimic natural reef communities? The roles of structural features and age 2006
 Ictiofauna como recurso ecoturístico en Cabo Pulmo B.C.S.
<http://www.reefbase.org/About.aspx>
<https://jepa.shinyapps.io/marmetadatamexesp/>
<http://www.conama2016.org/web/generico.php?idpaginas=&lang=es&menu=257&id=1044&op=view>
 cinner 2012. Comanagement of coral reef social-ecological systems
 Feasibility study for integrated multitrophic aquaculture in southern Australia
 Buschmann et al 2008. Opportunities and challenges for the development of an integrated seaweed-based aquaculture activity in Chile: Determining the physiological capabilities of Macrocystis and Gracilaria as biofilters
 Acuicultura multi-trófica en Isla Natividad: Una alternativa innovadora en México desde la perspectiva del sector pesquero
 Incorporating Fishermen's Local Knowledge and Behavior into geographical information Systems (gis) for Designing marine Protected areas in Oceania
 Validación de una Agrupación de Desove de Mero Payaso, Epinephelus guttatus, en Parque Nacional Arrecife Alacranes Frente a la Costa Norte de la Península de Yucatán, México
<http://www.masnoticias.mx/en-veracruz-se-instalo-la-primera-unidad-de-manejo-ambiental-de-corales-marinos/>
<http://www.reefresilience.org/coral-reefs/management-strategies/integrated-approaches/icm/>
 Global Threats to Coral Reefs: Coral Bleaching, Global Climate Change, Disease, Predator Plagues, and Invasive Species
 Estrategia Regional para el control del Pez León en el Arrecife Mesoamericano
<https://coastalscience.noaa.gov/project/management-strategies-lionfish-atlantic/>
 Taller para la determinación de sitios prioritarios oceánicos y costeros para la conservación
 Kelleher, G, above n 35, page xi; Resolution 17.38 of the IUCN General Assembly, 1988, reaffirmed in Resolution 19.46, 1994
<http://www.somac.org.mx/corales-y-arrecifes/>
<http://www.gbrmpa.gov.au/about-us/gbr-intergovernmental-agreement>
 Hawaii Marine Gap Analysis , Noelani Puniwai , Hawaii Natural Heritage Programme
 Corredor pesquero Tijuana Ensenada
<https://www.cbd.int/protected-old/gap.shtml>
 The ecosystem approach to fisheries (FAO, 2003). The ecosystem approach to fisheries
 Política de Ordenamiento para la Pesca y Acuicultura Sustentables, en el marco de Programa Rector de Pesca y Acuicultura
 Ciencia ciudadana: ¿Qué es?, ¿Cómo participan las comunidades?
 Natural Resource Assessment Near Day Moorings: Hawaii Island
 Proyecto de adaptación de humedales costeros del Golfo de México ante los impactos del cambio climático
 Coral Bleaching Response Plan

68 <https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/index.php>
69 <http://www.naturalista.mx/projects/monitoreo-de-arrecifes-coralinos-blanqueamiento>
70 <http://resilienciamexico.com/areas-naturales/>
71 Instalación de boyas para la restauración, protección y manejo de los ecosistemas del Sistema Arrecifal Veracruzano
72 <http://www.ldeo.columbia.edu/bleachpatrol/>

5.3. CAPÍTULO 3. Evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de Sian Ka'an y Mahahual ante el incremento de la temperatura superficial oceánica

Resumen

Se realizó un ejercicio para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de coral de Sian Ka'an y Mahahual ante el incremento de la temperatura superficial oceánica. Se accedieron a diversas bases de datos para obtener los valores de los indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación para obtener la vulnerabilidad ecológica y la vulnerabilidad social de estas dos áreas. Para la dimensión ecológica, para la exposición, se resaltan seis puntos arrecifales en Sian Ka'an con una exposición Muy Alta. Para el *ISE* los puntos arrecifales de Sian Ka'an presentan mayor proporción en las categorías Alto en comparación con los puntos arrecifales de Mahahual, que presentan mayores proporciones en las categorías de Medio. El *IRPE* en Mahahual muestra a la mayoría de los puntos arrecifales dentro de la categoría de Medio y en Sian Ka'an la mayoría de estos arrecifes aparecen dentro de la categoría Baja. Se observa una mayor cantidad de puntos arrecifales con Vulnerabilidad Ecológica mayor en Sian Ka'an que en los puntos arrecifales de Mahahual. En cuanto a la Vulnerabilidad Social fue mayor en Mahahual que en Sian Ka'an; específicamente para el *ISS* los puntos arrecifales de Mahahual se encuentran dentro de una categoría de sensibilidad mayor que los puntos arrecifales de Sian Ka'an. Para el *ICAS*, se observa que en Mahahual no existen herramientas de manejo relacionadas a las áreas protegidas (marinas o terrestres), sitios Ramsar o refugios pesqueros. El índice de Presiones Locales (*IPL*) es mayor en Mahahual que en Sian Ka'an, en donde la mayoría se presentan en la categoría Baja. Para el índice de Ecosistemas Asociados, *IEA*, (asociado a los manglares), fueron similares en ambos sitios. Este ejercicio demuestra lo importante de la aplicación del modelo ya que sus resultados permiten marcar prioridades de manejo o de comparar el efecto de políticas públicas como son las ANP.

Palabras clave: vulnerabilidad ecológica, vulnerabilidad socioeconómica, SST, Caribe Mexicano

5.3.1. Introducción

La región arrecifal del Caribe mexicano es la más reconocida de México donde los arrecifes coralinos se distribuyen casi continuamente desde la Isla de Holbox hasta la frontera marina política con Belice (Santander *et al.*, 2018). En esta región se encuentra el Sistema Arrecifal Mesoamericano (SAM), la segunda barrera arrecifal más grande del mundo (Sarukhán *et al.*, 2009); este sistema abarca aproximadamente 1,000 km desde México hasta Honduras y la mayor parte de este cinturón está formado por arrecifes de franja e insulares caracterizados por tener una laguna que los separa de la costa (Jordán y Rodríguez, 2003). En 2016, se decretó como Área Natural Protegida a la Reserva de la Biosfera del Caribe Mexicano (RBCM), la cual constituye el ANP más grande de México ya que cuenta con una extensión de más de 5 millones de hectáreas y contiene lineamientos generales para su conservación y de actividades de impacto como el turismo náutico, pesca, dragado de canales de navegación y extracción de arena (DOF, 2016).

En esta región se han observado declines drásticos de especies de corales desde la década de 1970 por diversas razones de origen humano (Rodríguez-Martínez, Banaszak, McField, Beltrán-Torres, & Álvarez-Filip, 2014). Una de ellas es el turismo, ya que en la costa del Caribe se caracteriza por ser una industria en expansión que depende económica y ecológicamente de la barrera de arrecife Mesoamericano. Por ejemplo, Quintana Roo es el estado que tiene el mayor número de cuartos de hotel de todo México (Baker, Rodríguez-Martínez, & Fogel, 2013). Por otro lado, en la región, Scott *et al.* (2012) estimaron la vulnerabilidad de la infraestructura turística advirtiendo que, ante un escenario del aumento en el nivel del mar de un metro, para esta región, el 29% de propiedades del complejo se inundaría parcial o totalmente, entre un 49% y 60% de las propiedades del complejo correrían el riesgo de sufrir daños por erosión de la playa asociados con el mismo escenario, impactando a las economías nacionales.

Por lo tanto, la conservación de los sistemas arrecifales en la costa de Quintana Roo debe ser considerada como una medida prioritaria de mitigación ante los efectos del Cambio Climático (CC), ya que los servicios que estos ecosistemas proveen para la economía local son muy importantes; solamente la protección de la zona litoral que los arrecifes proveen es fundamental para la preservación de la infraestructura hotelera y por lo tanto para la viabilidad de esta industria (Blanchon *et al.* 2011). Además, en el contexto de políticas públicas, la Ley General de Cambio Climático (Congreso de la Unión., 2012) tiene como uno de sus objetivos reducir la vulnerabilidad de la población y los ecosistemas del país frente a los efectos adversos del cambio climático, así como crear y fortalecer las capacidades nacionales de respuesta al fenómeno.

El monitoreo de los sistemas arrecifales es una necesidad para planificar su conservación y manejo. La vulnerabilidad y el grado de amenaza de los arrecifes en la región del Gran Caribe ante las presiones relacionadas a la sobrepesca, desarrollo costero, contaminación terrestre y contaminación marina ha sido estimada por Burke (2005) quien indica que casi dos tercios de los

arrecifes de esta región están amenazados por el impacto de dichas actividades humanas. La evaluación de la exposición y del impacto del aumento de la temperatura del agua utiliza algunos índices monitoreados sistemáticamente por la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOOA por sus siglas en inglés) e incluyen a la anomalía de la temperatura superficial, HotSpots de blanquimientos de coral, el grado de acumulación del calor semanal y las alertas de blanqueamiento de coral (NOOA, 2011).

Por lo anterior, en este capítulo se resuelve la pregunta que se planteó en un inicio: ¿cómo es la vulnerabilidad ante el CC de los sistemas arrecifales? y en este capítulo se presenta un ejercicio con los resultados de la evaluación de los arrecifes coralinos del Caribe mexicano en Sian Ka'an y Mahahual ante el incremento de la temperatura superficial oceánica por medio de índices de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación para el sistema ecológico y para el sistema socio-ecológico. Asimismo, se exponen los resultados de los índices de presiones locales y de ecosistemas asociados a estos arrecifes coralinos con la finalidad de conocer su vulnerabilidad socio-ecológica. Todo ello basado en el modelo metodológico teórico del capítulo dos de esta tesis.

5.3.2. Métodos

5.3.2.1. Zona de estudio

Los arrecifes de este estudio se ubican en la región del Caribe Mexicano, en dos áreas: Complejo de Sian Ka'an y Mahahual en el estado de Quintana Roo. Sian Ka'an colinda con el municipio de Tulum y cuenta con dos Áreas Naturales Protegidas (Reserva de la Biosfera Arrecifes de Sian Ka'an y Reserva de la Biosfera Sian Ka'an); Mahahual se encuentran dentro del municipio de Othón Blanco y no cuenta con este tipo de figura de ANP (Figura 1).

Los puntos arrecifales por evaluar se obtuvieron de la Base de Datos Mundial ReefBase (<http://www.reefbase.org/main.aspx>) con base a la disponibilidad de sitios con registro de blanqueamiento que contaban con coordenadas, fecha (mes y año), y porcentaje de blanqueamiento (obtenido con la misma metodología de monitoreo de transectos de 1000 m² basados en el Programa Regional de Monitoreo Sinóptico del Sistema Arrecifal Mesoamericano). Se seleccionaron 21 puntos arrecifales para Sian Ka'an y 25 puntos arrecifales en Mahahual que se observan en la Figura 1 y en el Anexo I se presentan sus coordenadas.

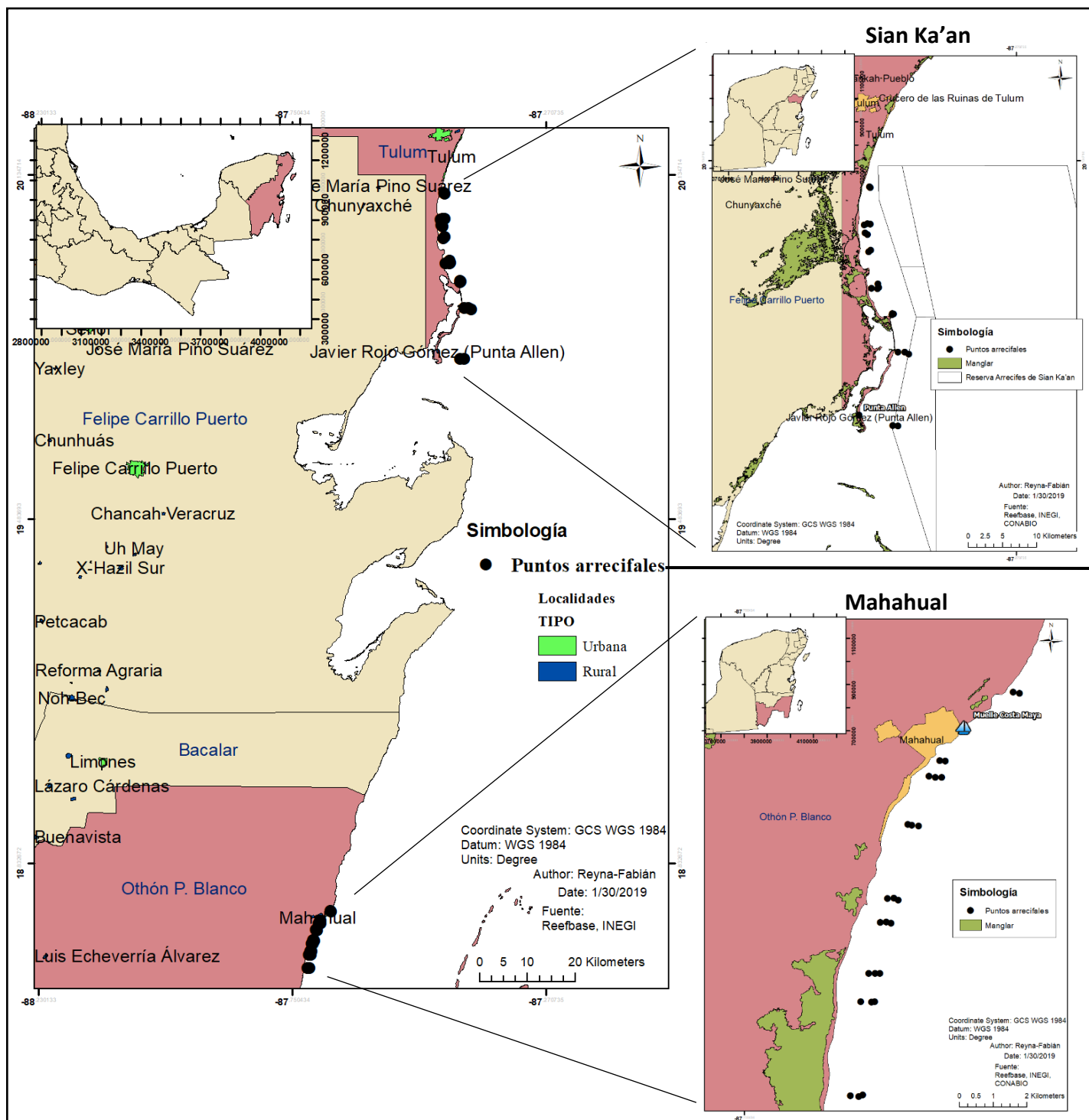


Figura 1. Mapa de localización de los puntos arrecifales para Sian Ka'an y Mahahual en el estado de Quintana Roo.

Mahahual

En la Figura 1, se muestran los puntos arrecifales utilizados para este estudio en Mahahual (círculos sólidos negros), éstos se encuentran aledaños a la localidad de Mahahual, señalada en color anaranjado, que cuenta con una población de 920 personas, de las cuales 483 son hombres y 437 mujeres (Municipio de Othón Blanco, 2018); se observan los manglares presentes en la zona (en verde). Esta localidad cuenta con una política de aprovechamiento regulada por el Programa Director de Desarrollo Urbano cuyos usos compatibles son: asentamiento humano y turismo; usos condicionados: industria, manejo de flora y fauna; y usos incompatibles: acuacultura, agrícola, área natural, corredor natural, forestal, minería, pecuario y pesca; cuenta con un muelle para cruceros (Villanueva *et al.*, 2014). Este muelle de cruceros, denominado Costa Maya (señalado en la Figura 1), es el segundo puerto en el país con mayor atraque de barcos y el primer muelle en todo el Caribe especialmente diseñado para cruceros (Palafox-Muñoz *et al.*, 2014). Costa Maya es parte de un proyecto amplio cuyo objetivo inicial fue atraer el desarrollo económico y sustentable a esta zona; sin embargo, su ejecución se ha caracterizado por generar un escenario de notable disparidad social y marginación, así como un rápido cambio en el paisaje físico y social del área. Es importante señalar que la comunidad de Mahahual, de ser una localidad netamente pesquera pasó a ser una población dependiente del turismo de cruceros; pero este mercado de trabajo local es dependiente a los días de flujo turístico y se disipa cuando no hay arribo de cruceros (López, 2012).

Los arrecifes en Mahahual son muy variados, inmediato al asentamiento poblacional de Mahahual se encuentra un arrecife marginal con una laguna arrecifal que se extiende sin interrupción por varios kilómetros hacia el sur, con una cresta arrecifal muy somera e incluso se han observado personas caminando y pescando sobre ésta en mareas bajas (Cinner, 2000).

Sian Ka'an

En la misma Figura 1 se observan los puntos arrecifales para Sian Ka'an se encuentran aledaños a la Reserva de la Biosfera Arrecifes de Sian Ka'an (delimitada en negro), la localidad más cercana es Tulum, este municipio cuenta con una población total de 26,263 personas (INEGI, 2011). A diferencia de Mahahual, las comunidades de pescadores en Sian Ka'an son los principales asentamientos humanos dentro de la reserva, se establecieron en la década de 1970, estas comunidades han desempeñado un papel clave en el desarrollo de la industria pesquera en el estado de Quintana Roo siendo la langosta su principal recurso económico, además extraen el caracol rosado, tiburón y algunos peces de escama como *Gerres spp* y *Lutjanus spp* (Velez *et al.*, 2014). Existen cinco sociedades cooperativas de producción pesquera que operan en el Complejo Sian Ka'an que se han establecido en una colonia y dos campamentos con un total de 528 habitantes; además de la pesca, en los últimos años se ha observado un incremento importante de la industria del turismo, principalmente en la parte sur en Punta Allen (CONANP, 2014).

En esta zona, el arrecife de la Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an abarca 110 km de longitud y su desarrollo a lo largo de la costa es muy variable. Las aguas que rodean estos arrecifes son oligotróficas, con alta transparencia y por lo tanto buena penetración de la luz con buena visibilidad hasta cerca de los 70 m de profundidad; los arrecifes bordeantes de Sian Ka'an presentan una zonación similar al patrón típico de la región caribeña, el cual consta de una laguna arrecifal, la cresta arrecifal y el arrecife frontal (Gutiérrez *et al.*, 1993; Núñez-Lara y Arias-González, 1998). En este sistema arrecifal del Complejo Sian Ka'an se encuentran dos especies del género *Acropora*: *Acropora palmata* y *Acropora cervicornis* de las cuales sus poblaciones han experimentado una considerable reducción de su extensión original en las últimas; en la parte terrestre se encuentra la Reserva de la Biosfera Sian Ka'an en donde los tipos de vegetación terrestre más importantes son: selva mediana subperennifolia, selva mediana subcaducifolia y selva baja caducifolia, también existen asociaciones de menor extensión, de distribución irregular, como manglar (señalado en verde), sabana, tinal, chechenal, tasistal, carrizal-sabal-tular y dunas costeras (CONANP, 2014).

5.3.2.2. Modelo metodológico de evaluación, índices e indicadores

Con base en la información de los índices e indicadores existentes para esta región arrecifal se accedieron a diversas bases de datos para obtener los valores de los indicadores de modelo metodológico para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de los puntos arrecifales. En la Tabla 1 se sintetizan los índices e indicadores, su significado, la escala temporal y espacial y la fuente de obtención para el sistema ecológico (renglones verdes), para el sistema socio-económico (renglones azules), para las presiones locales (renglones amarillos) y para los ecosistemas asociados (renglones morados). En los siguientes apartados se detallan cada uno de éstos.

Tabla 1. Resumen de índices e indicadores para evaluar la vulnerabilidad socio-ecológica de los arrecifes de Sian Ka'an y Mahahual, se presenta qué mide, la fuente de obtención de los datos, la escala temporal y espacial de los datos utilizados y la categorización para cada uno de los índices.

	Índice/Subíndice	¿Qué mide?	Fuente	Temporal/ espacial	Categorías
Sistema Ecológico	Índice Exposición Ecológica <i>IIE</i>	Nivel de exposición de los arrecifes de coral en sitios que podrían verse afectadas negativamente ante el incremento sostenido de la SST <i>IIE</i> = DHW reportada para el mes y año del blanqueamiento	1. Coral Reef Watch (DHW) NOAA 2. ReefBase (año blanqueamiento)	Año / ráster 5 km	Muy Alto (70.01-74.00) Alto (53.01-70.00) Medio (19.01-53.00) Bajo (2.01-19.00) Muy Bajo (0.00-2.00) * Quiebre natural
	Índice Sensibilidad Ecológica <i>ISE</i>	Nivel que los corales resultan afectados negativamente (blanqueamiento) ante el incremento sostenido de la SST <i>ISE</i> = %blanqueamiento reportado	ReefBase (porcentaje blanquimiento por transectos 1000m ²)	Reporte mes y año/localidad	Muy Alto (60-100) Alto (35-60) Medio (25-35) Bajo (11-25) Muy Bajo (6-11) *Reporte
	Índice Impacto Potencial Ecológico <i>IIPE</i>	Nivel del impacto del aumento sostenido de la SST sobre los arrecifes de coral. <i>IIPE</i> = <i>IEE</i> / <i>ISE</i>			Extremadamente Alto Muy Alto Alto Medio Bajo Muy Bajo Extremadamente Bajo *Matriz decisión
	Índice Recuperación Potencial Ecológica <i>IRPE</i>	Capacidad del arrecife de coral para ajustarse ante el aumento de la SST a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas <i>IRPE</i> = <i>IRHI</i> / <i>ICH</i>			Muy Alto Alto Medio Bajo Muy Bajo *Matriz decisión
	Índice de Salud Arrecifal <i>IRHI</i>	Medición de la salud arrecifal <i>IRHI</i> = Cobertura coral + Macroalgas carnosas + Peces comerciales + Peces herbívoros	Healthy Reefs for Healthy People	2016/ localidad	Muy Alto (4.2-5) Alto (3.4-4.2) Medio (2.6-3.4) Bajo (1.8-2.6) Muy Bajo (1-1.8) *Reporte

Sistema Socio-Económico	Índice Complejidad Hábitat <i>ICH</i>	Denota la rugosidad del fondo de superficie real de un sustrato en comparación con su área de proyección horizontal Complejidad de Habitat= $1 - (dm / Lt)$	Arias-González <i>et al.</i> (2011) transectos 18 m	2011/ Mahahual, Sian ka'an (Boca Paila, Yuyum y Punta Allen)	Alto (0.8) Medio (0.7) Bajo (.065) *Propia
	Índice Vulnerabilidad Ecológica <i>IVE</i>	Nivel de vulnerabilidad de los elementos ecológicos de los arrecifes de coral ante el incremento de la SST <i>IVE=IPE/IRPE</i>			Extremadamente Alta Muy Alta Alta Media Baja Muy Baja Sin Vulnerabilidad *Matriz decisión
	Índice Sensibilidad Social <i>ISS</i>	Nivel que las sociedades dependientes de los arrecifes de corales resultan afectadas negativamente ante el incremento de la SST <i>ISS= ISCUNAM / ISIINECC</i>			Extremadamente Alto Muy Alto Alto Medio Bajo Muy Bajo Extremadamente Bajo *Matriz decisión
	Indicador Sensibilidad Climática UNAM <i>ISCUNAM</i>	Grado en el que un municipio se puede ver afectado por un estrés, son las condiciones humanas y ambientales que pueden empeorar o disminuir los impactos por el cambio climático <i>ISCUNAM= Población/Salud/ Sector</i>	UNIATMOS UNAM	Municipal (Tulum y Othón Blanco)	Muy Alto (80.01-100) Alto (60.01-80) Medio (40.01-60) Bajo (20.01-40) Muy Bajo (0-20) *UNIATMOS
	Indicador Sensibilidad Inundaciones INECC <i>ISIINECC</i>	Porcentaje de la población municipal que se encuentra en zonas inundables en cada cuenca <i>ISIINECC insumos= Cuencas hidrológicas (CONAGUA,2015), límite municipal (INEGI, 2010), zonas inundables (INEGI, 2010) y localidades (INEGI, 2010)</i>	INECC, SEMARNAT	2015/ Municipal (Tulum y Othón Blanco)	Muy Alta (0.555-0.98) Alta (0.345-0.55) Media (0.196-0.34) Baja (0.135-0.19) Muy Baja (0.00-0.13) *Quiebre natural
	Índice Capacidad Adaptación Social <i>ICAS</i>	Capacidad de las sociedades dependientes de los arrecifes de corales para ajustarse ante el cambio climático global a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas <i>ICAS= ICASUNAM / ICMRN</i>			Extremadamente Alto Muy Alto Alto Medio Bajo Muy Bajo Extremadamente Bajo *Matriz decisión

	Índice de Capacidad de Adaptación Social UNAM <i>ICASUNAM</i>	Capacidad adaptativa de una sociedad refleja su capacidad de modificar sus características o comportamientos para enfrentar de una mejor manera o anticiparse a los factores que impulsan el cambio <i>ICASUNAM</i> = Capital humano/Capital social/Capital financiero/Capital natural	UNIATMOS UNAM	Municipal (Tulum y Othón Blanco)	Muy Alto (80.01-100) Alto (60.01-80) Medio (40.01-60) Bajo (20.01-40) Muy Bajo (0-20) *UNIATMOS
	Indicador Capacidad Manejo Recursos Naturales <i>ICMRN</i>	Mide la capacidad de manejo de los recursos naturales, de los arrecifes, por medio del uso de herramientas implementadas por el gobierno mexicano, por los acuerdos internacionales implementados en estos ecosistemas o implementados por la sociedad	CONANP y CONABIO	Diversos	Muy Alto (6-7) Alto (4-5) Medio (3-4) Bajo (1-2) Muy Bajo (0) *Matriz decisión
	Vulnerabilidad Socio-Económica	Nivel de vulnerabilidad de las comunidades dependientes de estos los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático <i>IVS</i> = <i>ISS</i> / <i>ICAS</i>			Extremadamente Alta Muy Alta Alta Media Baja Muy Baja Sin Vulnerabilidad *Matriz decisión
Presiones Locales	Índice Presiones Locales <i>IPL</i>	Nivel de impacto de las actividades humanas aledañas a los arrecifes de coral que impactan directamente a estos ecosistemas y son impactos relativamente localizados <i>IPLB</i> = Desarrollo costero/ Contaminación proveniente cuenca/ Contaminación marina y daño/ Sobrepesca	Burke <i>et al.</i> , 2011	2011/ ráster (vecino más cercano)	Muy Alto Alto Medio Bajo *Reporte
Ecosistemas Asociados	Índice Ecosistemas Asociados <i>IEA</i>	Nivel de los impactos, climáticos y no climáticos, de las actividades humanas sobre los ecosistemas asociados y aledaños (terrestres y marinos) a los arrecifes de coral (ecosistemas terrestres, manglares y pastos marinos). En este caso el índice de antropización en la zona costera asociada a los manglares del estado de Quintana Roo, el cual está basado en el mapa de uso del suelo y vegetación de la zona costera asociada a los manglares del estado	CONABIO	2015/ ráster 500 m	Muy Alto Alto Medio Bajo Muy Bajo *Quiebre natural

Índice Exposición Ecológica *IEE*

Representa el nivel de exposición y presencia de los arrecifes de coral en sitios que podrían verse afectadas negativamente ante el incremento sostenido de la SST. De todos los 46 puntos arrecifales se obtuvo el índice Degree Heating Week máximo (DHWmax) del año en que se reportó blanqueamiento de los productos satelitales del Coral Reef Watch Satellite Monitoring de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA por sus siglas en inglés) con resolución de 5km de la página: <ftp://ftp.star.nesdis.noaa.gov/pub/sod/mecb/crw/data/5km/v3.1/nc/v1.0/daily/dhw/>.

Este índice representa el estrés por calor que se ha acumulado en un área durante las últimas 12 semanas (3 meses) por encima de la temperatura umbral de blanqueamiento, las unidades utilizadas son “grados Celsius -semanas” que combina la intensidad y duración del estrés térmico en un solo número. Para cada punto arrecifal se tomó el valor de la DHWmax del pixel, en caso de que este punto se encontrara muy cercano a la costa y sin valor se tomó el valor del pixel vecino más cercano.

IEE = DHWmax del año reportado con blanqueamiento

Una vez determinado el valor del IIE para cada punto arrecifal se determinaron cinco categorías de exposición determinadas por el quiebre natural del valor del IEE de los 46 puntos arrecifales:

Muy Alto: 70.01-74.00

Alto: 53.01-70.00

Medio: 19.01-53.00

Bajo: 2.01-19.00

Muy Bajo: 0.00-2.00

Los años con reporte de blanqueamiento de los puntos utilizados en este estudio incluyen 2004, 2005 y 2006.

Índice Sensibilidad Ecológica *ISE*

Nivel que los corales resultan afectados negativamente (blanqueamiento) ante el incremento de la SST. De la misma base de datos de ReefBase para los puntos arrecifales se obtuvo el porcentaje de blanqueamiento para determinar la sensibilidad de los puntos arrecifales, incluye los 46 puntos arrecifales de este estudio de 1998 a 2005:

ISE = % blanqueamiento reportado

Las categorías para este índice se obtuvieron del mismo ReefBase, porcentaje de blanqueamiento, de la siguiente manera:

Muy Alto: 60%-100%

Alto: 35%-60%

Medio: 25%-35%

Bajo: 11%-25%

Muy Bajo: 6%-11%

Índice Impacto Potencial Ecológico *IIFE*

Nivel del impacto que tiene la exposición y la sensibilidad sobre los arrecifes de coral.

$$IIFE = IEE / ISE$$

Las categorías para este índice se obtuvieron mediante la siguiente matriz de decisión:

IEE/ISE	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Muy Bajo	Extremadamente Bajo	Muy Bajo	Bajo	Medio	Medio
Bajo	Muy Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio
Medio	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto
Alto	Medio	Medio	Alto	Alto	Muy Alto
Muy Alto	Medio	Medio	Alto	Muy Alto	Extremadamente Alto

Índice Recuperación Potencial Ecológico *IRPE*

Capacidad del arrecife de coral para ajustarse ante el aumento de la SST a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas. Se compone por los dos subíndices *IRHI* e *ICH*.

$$IRPE = IRHI / ICH$$

Las categorías para este índice se obtuvieron mediante la siguiente matriz de decisión:

IRHI/ICH	Alto	Medio	Bajo
Muy Alto	Muy Alto	Alto	Alto
Alto	Alto	Alto	Medio
Medio	Medio	Medio	Medio
Bajo	Medio	Bajo	Bajo
Muy Bajo	Bajo	Bajo	Muy Bajo

Índice de Salud Arrecifal *IRHI*

Mide la salud arrecifal, incluye cuatro indicadores: Indicador Coral Vivo, Indicador Macroalgas, Indicador Peces Herbívoros e Indicador Peces Comerciales. Se obtuvieron los valores del Índice de Salud Arrecifal del último monitoreo para Quintana Roo de la organización Healthy Reefs (McField *et al.*, 2018). El valor del *IRHI* para los puntos arrecifales de este estudio se obtuvieron de los valores del *IRHI* reportados de los arrecifes más cercanos por esta organización, categorizados de la siguiente manera:

Muy Bueno
Bueno
Regular
Pobre
Crítico

Índice Complejidad Hábitat *ICH*

Denota la rugosidad del fondo de superficie real de un sustrato en comparación con su área de proyección horizontal y se relaciona positivamente al número de especies y corales. Se obtuvo del trabajo Arias-González *et al.* (2011), el valor *ICH* para los 46 puntos arrecifales se determinó por su cercanía a los sitios de este trabajo con valores entre 0.00-1.00.

$$ICH = 1 - (dm / Lt)$$

Donde

dm= es la distancia en el transecto de línea de la cadena, desde su comienzo hasta su final

Lt= es el largo de la cadena

Las siguientes tres categorías finales del *ICH* se determinaron por el quiebre natural del valor del *ICH* de los 46 puntos arrecifales:

Alto: 0.8
Medio: 0.7
Bajo 0.65

Índice Vulnerabilidad Ecológica *IVE*

Nivel de vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante el incremento sostenido de la SST. Se compone del índice de impacto (*IIPE*) y del índice de respuesta ecológica (*IRPE*).

$$IVE = IIPE / IRPE$$

Las categorías para este índice se obtuvieron mediante la siguiente matriz de decisión:

<i>IIPE/IRPE</i>	Muy Alto	Alto	Medio	Bajo	Muy Bajo
Extremadamente Bajo	Sin Vulnerabilidad	Extremadamente Baja	Muy Baja	Media	Media
Muy Bajo	Extremadamente Baja	Extremadamente Baja	Muy Baja	Meda	Media
Bajo	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja	Media	Media
Medio	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
Alto	Media	Media	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
Muy Alto	Media	Media	Muy Alta	Extremadamente Alta	Extremadamente Alta
Extremadamente Alto	Media	Media	Muy Alta	Extremadamente Alta	Completamente Vulnerable

Índice Sensibilidad Social /ISS

Nivel en que las sociedades humanas dependientes de los arrecifes de corales resultan afectadas negativamente ante los factores de estrés asociados al cambio climático. Se compone por los dos subíndices *ISCUNAM* e *ISIINEEC* que se detallan a continuación.

$$ISS = ISCUNAM / ISIINEEC$$

Las categorías para este índice se obtuvieron mediante la siguiente matriz de decisión:

<i>ISCUNAM / ISIINEEC</i>	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Muy Bajo	Extremadamente Bajo	Muy Bajo	Bajo	Medio	Medio
Bajo	Muy Bajo	Bajo	Bajo	Medio	Medio
Medio	Bajo	Bajo	Medio	Alto	Alto
Alto	Medio	Medio	Alto	Alto	Muy Alto
Muy Alto	Medio	Medio	Alto	Muy Alto	Extremadamente Alto

Indicador Sensibilidad Climática UNAM *ISCUNAM*

Grado en el que un municipio se puede ver afectado por un estrés, son las condiciones humanas y ambientales que pueden empeorar o disminuir los impactos por el cambio climático. Se conforma por el índice de sensibilidad presentado en el Atlas Climático de la UNAM (Monterroso *et al.*, 2014) para los municipios con los que colindan los puntos arrecifales, Tulum para los puntos arrecifales de Sian Ka'an y Othón Blanco para los puntos arrecifales de Mahahual. Este indicador incorpora a las siguientes variables: población (porcentaje de población municipal con jefe de familia femenino, porcentaje de población municipal indígena, porcentaje de población municipal en pobreza alimentaria), salud (porcentaje municipal de niños con baja talla al nacer, porcentaje municipal de niños con bajo peso al nacer y porcentaje de personas sin acceso a servicios de salud), y productivo (porcentaje de superficie municipal en actividades primarias, porcentaje de superficie municipal que no cuenta con riego y porcentaje de población municipal dedicada a actividades primarias).

$$ISCUNAM = \text{Población} / \text{Salud} / \text{Sector Productivo}$$

Incluye a las siguientes categorías obtenidas del mismo atlas de vulnerabilidad determinadas en el mismo atlas:

Muy Alta (81-100)

Alta (61-80)

Media (41-60)

Baja (21-40)

Muy Baja (0-20)

Indicador Sensibilidad Inundaciones INECC *ISIINECC*

Porcentaje de la población municipal que se encuentra en zonas inundables en cada cuenca. Se obtuvo del Atlas Nacional de Vulnerabilidad publicado por el INECC (SEMARNAT e INECC, 2015), específicamente el componente de sensibilidad de asentamientos humanos a inundaciones, se asignó el valor de la sensibilidad a los puntos arrecifales de los municipios de Tulum (puntos arrecifales Sian Ka'an) y Othón Blanco (puntos arrecifales Mahahual).

Las categorías finales del *ISIINECC* se determinaron por el quiebre natural del valor de este indicador de todos los municipios de Quintana Roo en:

Muy Alta (0.555-0.98)

Alta (0.345-0.55)

Media (0.196-0.34)

Baja (0.135-0.19)

Muy Baja (0.00-0.13)

Índice Capacidad de Adaptación Socio-Económica *ICAS*

Capacidad de las comunidades dependientes de los arrecifes de corales para ajustarse ante los factores de estrés asociados al cambio climático a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas, se compone de dos índices:

$$ICAS = ICASUNAM / ICMRN$$

Para determinar la categoría final del *ICAS* se utilizó la siguiente matriz de decisión para obtener sus categorías.

<i>ICASUNAM/ICMRN</i>	Muy Alta	Alta	Media	Baja	Muy Baja
Muy Alta	Extremadamente Alta	Muy Alta	Alta	Media	Media
Alta	Muy Alta	Alta	Alta	Media	Media
Media	Alta	Alta	Media	Baja	Baja
Baja	Media	Media	Baja	Baja	Muy Baja
Muy Baja	Media	Media	Baja	Muy Baja	Extremadamente Baja

Índice de Capacidad de Adaptación Social UNAM *ICASUNAM*

Capacidad adaptativa de los municipios para enfrentar de una mejor manera o anticiparse a los factores que impulsan el cambio. Se conforma por el índice de capacidad adaptación presentado en el Atlas Climático de la UNAM (Monterroso *et al.*, 2014) para los municipios con los que colindan los puntos arrecifales, Tulum para los puntos arrecifales de Sian Ka'an y Othón Blanco para los puntos arrecifales de Mahahual. Este indicador incorpora a las siguientes variables: capital humano (% cambio en población al 2030, % población en el municipio que sabe leer, % de población de 5 a 14 años que asiste a la escuela y % de población total alfabeta en el municipio),

capital social (% de unidades de producción en un municipio que están organizadas, % de unidades de producción en un municipio que no tienen litigio por la tierra, % de unidades de producción en un municipio que señalaron no tener falta de capacitación, % de unidades de producción en un municipio que señalaron no tener problemas para producir), capital financiero (% de unidades de producción en un municipio que señalaron no tener dificultad para acceder a créditos, % de Unidades de Producción en un municipio que reciben remesas de país extranjero, % de Unidades de Producción en un municipio que señalaron tener ahorros, % de Unidades de Producción en un municipio que señalaron tener crédito, % de población que recibe más de 2 salarios mínimos mensuales de ingreso y Cambio porcentual en el PIB del 2000 al proyectado en 2030), y capital natural (Relación de superficie municipal con bosque o selva y Relación de hectáreas reforestadas en el municipio en el 2005); incluye a las siguientes categorías determinadas en el mismo atlas:

Muy Alta (81-100)

Alta (61-80)

Media (41-60)

Baja (21-40)

Muy Baja (0-20)

Indicador Capacidad Manejo Recursos Naturales /ICMRN

En la Tabla 2 se presentan los criterios para construir este indicador. El primer criterio se refiere a los sitios de humedales de importancia internacional (RAMSAR), el segundo se refiere a las Zonas de Refugios pesqueros que tienen el objetivo de conservar y contribuir al desarrollo de los recursos pesqueros y preservar el ambiente que lo rodea (Niparajá, WWF, & Fundación Carlos Slim, s/f), el tercer criterio a las ANP terrestre de cualquier orden (federal, estatal, municipal o privada); el cuarto criterio está relacionado a este mismo tema de áreas protegidas pero es específico a Áreas Marinas Protegidas.

El quinto criterio se refiere al proyecto Resiliencia para Áreas Protegidas que tiene por objetivo reducir los impactos negativos del cambio climático sobre la biodiversidad de las Áreas Protegidas mexicanas (Resiliencia México, s/f). El sexto criterio, está relacionado a la Estrategia de Cambio Climático para Áreas Protegidas (ECCAP) que tiene por objetivo incorporar el componente del cambio climático en las políticas y acciones de la Comisión Nacional de Áreas Protegidas (CONANP) y ha implementado el proyecto “Desarrollo de Programas Piloto de Adaptación al cambio climático en Áreas Naturales Protegidas del Sureste de México (March *et al.*, 2011), éste criterio considera si los puntos arrecifales se encuentran dentro de estas áreas piloto o no. En el último criterio, criterio 7, se considera si los puntos arrecifales se encuentran dentro de las 70 Regiones Marinas Prioritarias (Sitios Prioritarios Marinos) áreas costeras y oceánicas consideradas

prioritarias por su alta biodiversidad, por la diversidad en el uso de sus recursos y por su falta de conocimiento sobre biodiversidad (Arriaga *et al.*, 1998).

Tabla 2. Criterios para construir el *ICMRN* y su categorización.

Criterio 1	Criterio 2	Criterio 3	Criterio 4	Criterio 5	Criterio 6	Criterio 7	Categorización <i>ICMRN</i>
¿El punto arrecifal se encuentra dentro o aledaño a un Sitio RAMSAR?	¿El punto arrecifal se encuentra dentro o cercano aledaño a una Zona de Refugio Pesquero?	¿El punto arrecifal se encuentra aledaño a un Área Natural Protegida?	¿El punto arrecifal se encuentra dentro o aledaño a un Área Marina Protegida?	¿El punto arrecifal forma parte del “Proyecto Resiliencia para Áreas Naturales Protegidas”?	¿El punto arrecifal forma parte del proyecto “Desarrollo de Programas Piloto de Adaptación al cambio climático en Áreas Naturales Protegidas del Sureste de México”?	¿El punto arrecifal forma parte del proyecto “Sitios Prioritarios Marinos” de la CONABIO?	Si cumple con el siguiente número de criterios, entonces el valor <i>ICMRN</i>
Si o No	Si o No	Si o No	Si o No	Si o No	Si o No	Si o No	6-7= Muy Alta 4-5= Alta 3-4= Media 1-2 = Baja 0 = Muy Baja

Índice Vulnerabilidad Socio-Económica *IVS*

Nivel de vulnerabilidad de las comunidades dependientes de estos los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático.

$$IVS= ISS / ICAS$$

Las categorías de esta Vulnerabilidad Socio-Económica para los puntos arrecifales se obtuvieron mediante la siguiente matriz de decisión:

<i>ISS/ICAS</i>	Extremadamente Alto	Muy Alto	Alto	Medio	Bajo	Muy Bajo	Extremadamente Baja
Extremadamente Bajo	Sin Vulnerabilidad	Extremadamente Baja	Muy Baja	Muy Baja	Media	Media	Media
Muy Bajo	Extremadamente Baja	Extremadamente Baja	Muy Baja	Baja	Media	Media	Media
Bajo	Muy Baja	Muy Baja	Muy Baja	Media	Media	Media	Media
Medio	Baja	Baja	Baja	Media	Alta	Alta	Alta
Alto	Media	Media	Media	Media	Muy Alta	Muy Alta	Muy Alta
Muy Alto	Media	Media	Media	Alta	Muy Alta	Extremadamente Alta	Extremadamente Alta
Extremadamente Alto	Media	Media	Media	Muy Alta	Muy Alta	Extremadamente Alta	Completamente Vulnerable

Índice Presiones Locales *IPL*

Nivel de impacto de las actividades humanas aledañas a los arrecifes de coral que impactan directamente a estos ecosistemas y son impactos relativamente localizados. Este indicador se tomó del trabajo de evaluación para los arrecifes de Burke, y colaboradores (2011), a nivel mundial, el cual incluye al desarrollo costero, contaminación proveniente de las cuencas terrestres, contaminación proveniente del océano y daño marino y sobrepesca. Los valores para los 46 puntos arrecifales de este trabajo se obtuvieron mediante el ráster presentado por el World Resources

Institute (<https://www.wri.org/resources/data-sets/reefs-risk-revisited>), se obtuvo el valor del pixel de cada punto arrecifal. Presenta las categorías del mismo reporte:

Muy Alto
Alto
Medio
Bajo

Índice Ecosistemas Asociados IEA

Nivel de los impactos, climáticos y no climáticos, de las actividades humanas sobre los ecosistemas asociados y aledaños (terrestres y marinos) a los arrecifes de coral (ecosistemas terrestres, manglares y pastos marinos). En este caso el índice de antropización en la zona costera asociada a los manglares del estado de Quintana Roo, el cual está basado en el mapa de uso del suelo y vegetación de la zona costera asociada a los manglares del estado. Se obtuvo a partir del mapa de la CONABIO para el índice de antropización en la zona costera asociada a los manglares del estado de Quintana Roo de 2015, el cual está basado en el mapa de uso del suelo y vegetación de la zona costera asociada a los manglares del estado (<http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>). Este índice de la CONABIO (Índice Integrado Relativo de Antropización, INRA), consiste en asignar pesos relativos (del 0 al 1) a diferentes usos de suelo identificables a nivel de paisaje y trazar una malla de subunidades de análisis en donde se establece un valor por celda de acuerdo con la presencia de usos de suelo, su superficie y a los diversos pesos asignados para estimar el índice en una malla de unidades de análisis de 500 m reportando la sumatoria de los valores de las UAS; los valores reportados se encuentran en un rango del 0 al 100, los valores de 0 representan UAS sin uso de suelo identificable a nivel de paisaje (es decir son vegetación) y los valores de 100 representan UAS con niveles de transformación más altos (CONABIO, 2018).

Los valores para los puntos arrecifales se tomaron del archivo ráster (celdas de 500 m) del pixel terrestre más cercano. Las categorías finales del IAM se terminaron por el quiebre natural del valor de este índice de los 46 puntos arrecifales después se categorizaron en cinco clases:

Muy Alto (5.42-17.85)
Alto (2.86-5.42)
Medio (1.73-2.86)
Bajo (0.18-1.73)
Muy Bajo (0-0.18)

Finalmente, se analizaron, porcentualmente, las categorías de los índices e indicadores por punto arrecifal y por zona para comparar la Vulnerabilidad Ecológica, la Vulnerabilidad Social, las Presiones Locales y los Ecosistemas Asociados entre Sian Ka'an y Mahahual.

5.3.3. Resultados y discusión

5.3.3.1. Índice Vulnerabilidad Ecológica IVE

En la Tabla 3 se muestran los valores para los índices de la Vulnerabilidad Ecológica (*IEE*, *ISE*, *IIPE* e *IRPE*) para todos los puntos arrecifales de este trabajo, en el Anexo I se presentan los valores para todos los índices e indicadores de este sistema ecológico. En proporción, el *IEE* de los puntos arrecifales de Mahahual (M01-M25) se presentan dentro de la categoría de exposición Alta (36% de los puntos arrecifales); para los puntos arrecifales de Sian Ka'an (S01-S21) las categorías con mayores proporciones de exposición incluyen a la exposición Muy Baja (52% de los puntos arrecifales).

Tabla 3. Valores de los índices de Exposición Ecológica (*IEE*), Sensibilidad Ecológica (*ISE*), Recuperación Potencial Ecológica (*IRPE*), Impacto Potencial Ecológico (*IIPE*), Índice de la Vulnerabilidad Ecológica (*IVE*), Índice Sensibilidad Social (*ISS*), Índice Capacidad de Adaptación Social (*ICAS*), Índice Vulnerabilidad Social (*IVS*), Índice Presiones Locales (*IPL*) e Índice Ecosistemas Asociados (*IEA*) de los 46 puntos arrecifales, los puntos que comienzan con M se encuentran en Mahahual y con S en Sian Ka'an.

Punto Arrecifal	<i>IEE</i>	<i>ISE</i>	<i>IIPE</i>	<i>IRPE</i>	<i>IVE</i>	<i>ISS</i>	<i>ICAS</i>	<i>IVS</i>	<i>IPL</i>	<i>IEA</i>
M01	Muy Bajo	Medio	Bajo	Medio	Muy Baja	Alto	Media	Media	Medio	Medio
M02	Muy Bajo	Muy Bajo	Extremadamente Bajo	Medio	Muy Baja	Alto	Media	Media	Medio	Medio
M03	Muy Bajo	Medio	Bajo	Medio	Muy Baja	Alto	Media	Media	Medio	Bajo
M04	Alto	Medio	Alto	Medio	Muy Alta	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M05	Alto	Medio	Alto	Medio	Muy Alta	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M06	Alto	Muy Alto	Muy Alto	Medio	Muy Alta	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M07	Alto	Medio	Alto	Medio	Alta	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M08	Alto	Medio	Alto	Medio	Alta	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M09	Alto	Muy Bajo	Medio	Medio	Media	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M10	Muy Bajo	Bajo	Muy Bajo	Medio	Muy Baja	Alto	Media	Media	Medio	Bajo
M11	Alto	Medio	Alto	Medio	Muy Alta	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M12	Muy Bajo	Bajo	Muy Bajo	Medio	Muy Baja	Alto	Media	Media	Medio	Bajo
M13	Alto	Muy Bajo	Medio	Medio	Media	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M14	Medio	Medio	Medio	Medio	Media	Alto	Media	Media	Medio	Alto
M15	Medio	Medio	Medio	Medio	Media	Alto	Media	Media	Medio	Alto
M16	Alto	Medio	Alto	Medio	Muy Alta	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M17	Bajo	Muy Alto	Medio	Medio	Media	Alto	Media	Media	Medio	Alto
M18	Bajo	Alto	Medio	Medio	Media	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M19	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Muy Baja	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M20	Muy Bajo	Medio	Bajo	Medio	Muy Baja	Alto	Media	Media	Medio	Muy Alto
M21	Muy Bajo	Muy Bajo	Extremadamente Bajo	Medio	Muy Baja	Alto	Media	Media	Medio	Medio
M22	Muy Bajo	Muy Bajo	Extremadamente Bajo	Medio	Muy Baja	Alto	Media	Media	Medio	Muy Alto
M23	Bajo	Alto	Medio	Medio	Media	Alto	Media	Media	Medio	Muy Bajo
M24	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alta	Alto	Media	Media	Medio	Bajo
M25	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo	Bajo	Media	Alto	Media	Media	Medio	Bajo
S01	Muy Bajo	Alto	Medio	Medio	Media	Bajo	Muy Alta	Muy Baja	Bajo	Bajo
S02	Muy Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Alta	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Medio
S03	Muy Bajo	Alto	Medio	Medio	Media	Bajo	Muy Alta	Muy Baja	Bajo	Muy Bajo
S04	Muy Bajo	Alto	Medio	Medio	Media	Bajo	Muy Alta	Muy Baja	Bajo	Muy Bajo
S05	Muy Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alta	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Medio
S06	Muy Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alta	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Alto

S07	Muy Bajo	Bajo	Muy Bajo	Bajo	Media	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Muy Bajo
S08	Muy Bajo	Muy Alto	Medio	Muy Bajo	Alta	Bajo	Alta	Muy Baja	Medio	Muy Bajo
S09	Muy Bajo	Muy Alto	Medio	Medio	Media	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Muy Bajo
S10	Alto	Muy Bajo	Medio	Medio	Media	Bajo	Muy Alta	Muy Baja	Bajo	Alto
S11	Alto	Muy Bajo	Medio	Medio	Media	Bajo	Muy Alta	Muy Baja	Bajo	Bajo
S12	Muy Alto	Alto	Muy Alto	Medio	Muy Alta	Bajo	Muy Alta	Muy Baja	Bajo	Muy Bajo
S13	Muy Bajo	Alto	Medio	Muy Bajo	Muy Alta	Bajo	Alta	Muy Baja	Medio	Muy Bajo
S14	Alto	Alto	Alto	Bajo	Muy Alta	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Medio
S15	Muy Alto	Medio	Alto	Bajo	Muy Alta	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Medio
S16	Muy Alto	Bajo	Medio	Bajo	Alta	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Muy Bajo
S17	Alto	Bajo	Medio	Bajo	Alta	Bajo	Muy Alta	Muy Baja	Bajo	Muy Bajo
S18	Muy Alto	Medio	Alto	Bajo	Muy Alta	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Muy Alto
S19	Muy Alto	Muy Alto	Extremadamente Alto	Bajo	Extremadamente Alta	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Bajo
S20	Muy Alto	Alto	Muy Alto	Bajo	Extremadamente Alta	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Alto
S21	Muy Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Muy Baja	Bajo	Alta	Muy Baja	Bajo	Alto

El *IIE* determinado en este trabajo se determinó con base a la disponibilidad de datos de fácil acceso, a lo cual Maina *et al.* (2011) comentan que los métodos para estimar algunos umbrales de atributos ambientales (como el blanqueamiento de coral) muchas veces dependen de la existencia de observaciones de las respuestas, por lo que se presentan limitaciones, además que se deben considerar otros impactos cumulativos. Para toda la región del Caribe, Hayes y Goreu (2008) señalan que esta región presenta la elevación de SST con mayores anomalías y frecuencia de aumentos. En este caso se construyó este índice considerando al aumento en la temperatura oceánica y su duración por encima de un umbral (Degree Heating Weeks), García y colaboradores (2014) mencionan que la temperatura, presentan cambios temporales a nivel local; además explican que vincular las múltiples dimensiones del CC a las amenazas y oportunidades para las especies, es sólo un primer paso hacia la comprensión de los efectos de éste en la biodiversidad.

Se resalta la importancia de otros parámetros que pueden ser utilizados para el *IEE*, por ejemplo Carricart-Ganivet *et al.* (2012) señalan que la especie de coral *Porites astreoides* tuvo una calcificación baja cuando la saturación de aragonita decreció en la zona del Caribe. También se ha reportado que en Cozumel los huracanes extremos han tenido impactos severos en los corales, por ejemplo, después del paso del huracán Wilma (2005) las géneros *Agaricia* y *Porites* sufrieron el mayor daño (Álvarez-Filip *et al.*, 2004); Fenner (1991) también menciona que después del paso del huracán Gilberto (1988), el daño mecánico del oleaje afectó principalmente a *Porites*, *Agaricia tenuifolia* y *Madracis mirabilis* en Cozumel. Incluir a un mayor número de variables y grupos de organismos para este índice podría afinar los resultados de este estudio. Para la zona de Punta Allen (Sian Ka'an), las proyecciones de huracanes indican que una mayor proporción de estos alcanzará categorías 3, 4 y 5 aunque es poco claro cuál será la trayectoria dominante de éstos. Se estiman importantes afectaciones a poblaciones naturales y humanas bajo estos escenarios de huracanes más intensos e inundaciones más frecuentes (Magaña *et al.*, 2011).

Para el *ISE*, los puntos arrecifales de Sian Ka'an presentan mayor proporción en las categorías Alto (43% de los puntos arrecifales), categoría del 35%-60% de blanqueamiento, en comparación con los puntos arrecifales de Mahahual, que presentan mayores proporciones en las categorías de

medio (48% de los puntos arrecifales), es decir con 25%-35% de blanqueamiento. Resalta el punto arrecifal M06 y M07 en Mahahual y el S08, S09 y S19 por la sensibilidad Muy Alta que presentan, 60%-100% de blanqueamiento. Eakin *et al.*, (2010) muestran para el Caribe en general, una relación positiva entre el estrés calorífico acumulado y la intensidad del blanqueamiento del coral durante el intenso estrés térmico del 2005, y señalan que este blanqueamiento y mortalidad de los corales tendrá consecuencias a largo plazo; también mencionan que la calcificación cesará a 30° C para *Porites* ssp. y a 35° C para *Montastraea* ssp. Incorporar evaluaciones a nivel especie o poblaciones, por medio de monitoreos de blanqueamiento, proveería un análisis con mayor detalle. Por ejemplo, para el Pacífico, en Bahía Banderas, Carriquiry *et al.*, (2001) y para el Golfo de California, Reyes-Bonilla y Carriquiry (2002) señalan que hubo una mortalidad del 95% de *Pollicipora* tras una temperatura de la SST $\geq 32^{\circ}\text{C}$ en diez semanas continuas de esta temperatura.

A nivel local, diversos factores de estrés pueden causar el blanqueamiento de los corales (tormentas, enfermedades, sedimentación, pesca con cianuro, herbicidas, metales pesados y cambios en la salinidad y temperatura); y a nivel regional, los eventos de blanqueamiento masivo están asociados al incremento de la temperatura (Marshall y Schuttenberg, 20006). Por ejemplo, Maina *et al.* (2008) modelaron la susceptibilidad de los arrecifes (blanquimiento y mortalidad) de coral ante las variables de corrientes, velocidad del viento, SST, radiación UV, Radiación Fotosintéticamente Activa y la concentración de clorofila en el Océano Índico, encontrando que la variabilidad de la SST, la UV, la temperatura máxima y la velocidad del viento con mayor influencia en estos modelos de susceptibilidad. Por lo que, sería ideal que se monitoreen este tipo de variables cuando se toman datos de blanqueamiento para saber a nivel local, cuales variables tienen mayor relación con estos eventos y a futuro como impactaran estos ecosistemas a este nivel. Además, para este índice de sensibilidad se tomaron los datos de la base de ReefBase, estos monitoreos fueron tomados a diversas profundidades y en este estudio el índice de exposición está determinado por la SST, temperatura superficial, por lo cual determinar la temperatura a la misma profundidad de los monitoreos de blanqueamiento sería lo adecuado.

También hay que señalar que estos indicadores son aproximaciones que en un futuro podrían cambiar debido al avance en el conocimiento, en este caso Baird *et al.* (2009) mencionan que hace falta investigación ecológica que explore las consecuencias del blanqueamiento a nivel de población, debido al papel relevante que tienen las algas simbioses con sus hospederos, de lo que se conoce relativamente poco.

Para el índice relacionado a la Recuperación Potencial Ecológica (*IRPE*), en Mahahual muestra a la mayoría de los puntos arrecifales dentro de la categoría de medio (92%), es decir que presentan una salud arrecifal (cobertura de macroalgas, cobertura de corales y biomasa de peces herbívoros) y una complejidad del hábitat relativamente media en comparación con los puntos arrecifales de Sian Ka'an, los cuales la mayoría aparecen dentro de la categoría baja (57%) para estos dos

componentes. Es importante señalar que ninguno de los puntos arrecifales de estas dos áreas presentó una categoría dentro de la respuesta ecológica alta o muy alta y que dos puntos en Sian Ka'an presentaron una respuesta Muy Baja. La importancia que este índice esté relacionado con diversos aspectos ecológicos (corales, macroalgas, peces herbívoros y peces comerciales) así como aspectos geológicos (complejidad del hábitat) se debe a que se ha señalado a los herbívoros como elementos clave sobre el control del crecimiento de las macroalgas, así como la repercusión de los instrumentos y políticas de manejo para proteger a los peces herbívoros con la finalidad de reducir el impacto perjudicial ante la proliferación de estas algas en el Caribe (Scuchley y Álvarez-Filip, 2017). Para el caso de peces con importancia económica en el Caribe, Alva-Basurto & Arias-González (2014) mencionan que bajo condiciones de estrés modeladas para blanqueamiento de coral, desoxigenación en peces y acidificación en organismos calcificadores se produce un decremento en la biomasa de peces.

En cuanto a la complejidad del hábitat, un estudio plantea diversos escenarios futuros de manejo de arrecifes de coral y el comportamiento que éstos tendrían ante los efectos del cambio climático y la sobrepesca (Rogers *et al.*, 2015). Estos autores plantean que existen diferencias muy marcadas en los impactos de las estrategias de manejo en arrecifes con gran complejidad estructural en contraste con aquellos de baja complejidad y sugieren que los arrecifes con menor complejidad estructural requieren estrategias de manejo que maximicen los servicios ecosistémicos que proveen. Por ello, se plantea la restauración como una herramienta de manejo que pudiera incrementar la abundancia del coral en ecosistemas con menor complejidad estructural. Graham y Nash (2013) encontraron una relación negativa entre la complejidad de los arrecifes y la cobertura de algas, lo cual también refleja la importancia de la complejidad estructural en el aumento de la herbívora e incluso, la cobertura de coral vivo muestra una correlación positiva con la complejidad. Incluso se ha relacionado a los impactos de la acidificación del océano con la pérdida de las pesquerías comerciales (Speers *et al.*, 2016).

En México, Ortiz-Lozano y colaboradores (2009) proponen una zonificación ecosistémica del Parque Nacional Sistema Arrecifal Veracruzano basada en sus elementos estructurales y funcionales e identifican diversas unidades ambientales, subsistemas y paisajes marinos por medio de la caracterización fisiográfica del área. También comentan que en México varias áreas protegidas marinas han contemplado la aproximación ecosistémica con objetivos de conservación, sin embargo, no se ha reflejado en su esquema de zonificación, instrumento básico para la aplicación de reglas y políticas de conservación. Por otro lado, Bozec *et al.* (2015) diseñaron un modelo que describe la dinámica de los corales y otros elementos bentónicos, bajo los disturbios relacionados al clima (huracanes y blanqueamiento) y su relación con la complejidad estructural. Estos autores señalan la importancia de los peces herbívoros en el mantenimiento de la complejidad estructural de los arrecifes del Caribe. A pesar de la importancia de esta complejidad

de hábitat, Alvarez-Filip *et al.* (2011b) mencionan que la complejidad arquitectónica o estructural de los arrecifes del Caribe ha declinado drásticamente durante los últimos 40 años. En conclusión, es importante incluir a la complejidad del hábitat en este tipo de evaluaciones como un elemento de recuperación potencial de estos ecosistemas ante la variabilidad climática esperada en diversas escalas temporales y espaciales; así como en el diseño de estrategias de manejo, conservación y adaptación de los sistemas arrecifales de México.

Para el Índice de Vulnerabilidad Ecológica (IVE), en la Figura 2 se observa la distribución de los puntos arrecifales para las dos áreas con su categoría para el IVE. Para Mahahual y Sian Ka'an en donde las categorías del IVE se señalan. En 2a), para los puntos arrecifales de Sian Ka'an, la mayoría de éstos se encuentran dentro de la Media (33%) y se observan dos puntos arrecifales (S19 y S20) dentro de la categoría Extremadamente Alta. Para los puntos arrecifales de Mahahual (Figura 2b), la mayoría de éstos (36%) se encuentran dentro de las categorías de vulnerabilidad Muy Baja; resaltan cinco puntos arrecifales en Mahahual con vulnerabilidad ecológica Muy Alta (M04, M05, M06, M11 y M16) distribuidos al centro de esta zona, pero ningún punto tiene la categoría más alta de vulnerabilidad ecológica (Extremadamente Alta). En general, el IVE es mayor en Sian Ka'an que en Mahahual.

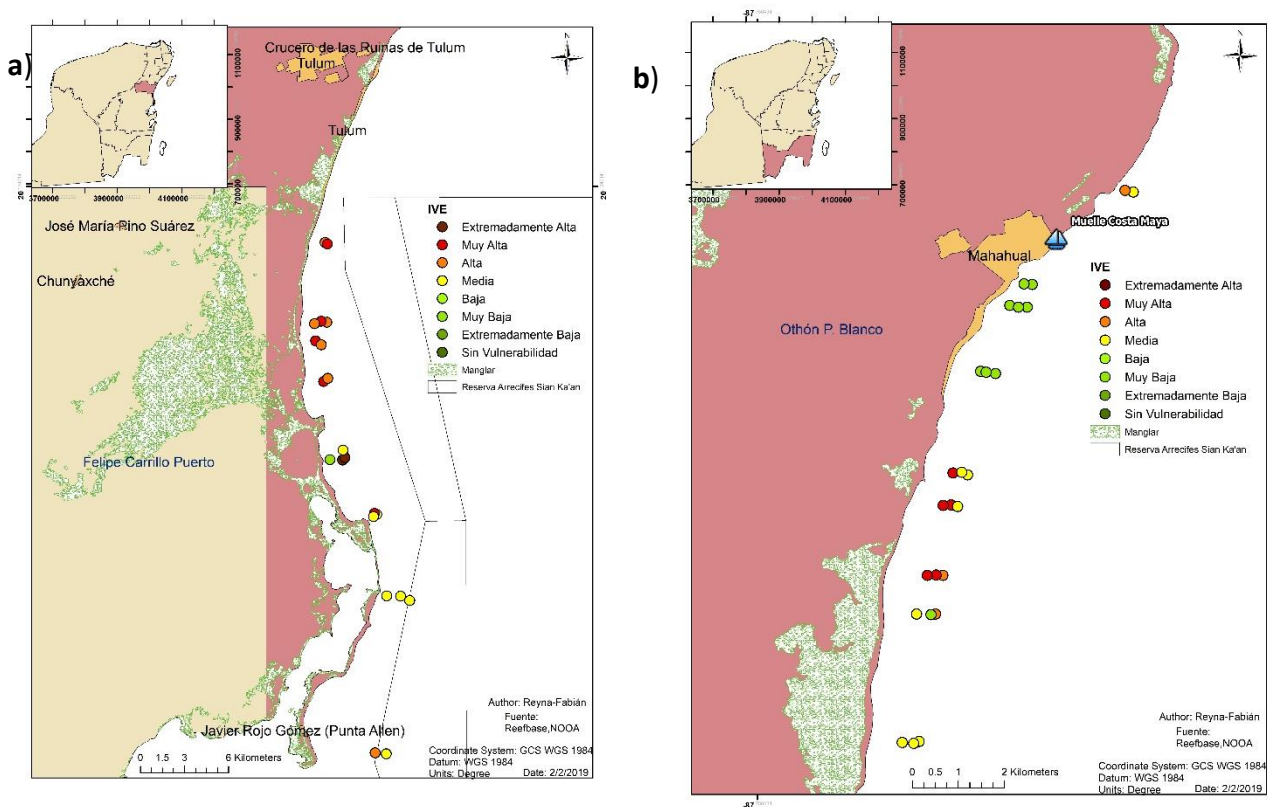


Figura 2. Mapa de distribución de las categorías del IVE para los puntos arrecifales en Sian Ka'an (a) y Mahahual (b).

5.3.3.2. Índice Vulnerabilidad Socio-Económica IVS

Se utilizaron los datos municipales para la construcción de la mayoría de los índices e indicadores de la vulnerabilidad social por la disponibilidad inmediata y la frecuencia de toma de datos para evaluaciones futuras. Este tipo de datos pueden representar una ventaja, por su metodología y frecuencia temporal, en las evaluaciones de vulnerabilidad a escalas regionales. Sin embargo, para ejercicios a nivel local, estos representan una desventaja e idealmente estas evaluaciones deberían incorporar datos a escala local y ser tomados en el mismo momento temporal en la que se realizan los monitoreos ecológicos.

En la misma Tabla 3 se muestran los valores para los índices de la Vulnerabilidad Social y para los índices de la Sensibilidad Social (ISS) y para el de Capacidad de Adaptación Social (ICAS) para los puntos arrecifales de este trabajo y en el Anexo II se presentan los valores para cada índice e indicadores de esta dimensión.

Para el ISS, se observa que en Mahahual el 100% de los puntos arrecifales se encuentran dentro de una sensibilidad Alta, en contraste con Sian Ka'an, en donde todos se presentan en la categoría Baja. Estas categorías están determinadas principalmente por el subíndice de Sensibilidad de Inundaciones (ISIINECC), debido a que los puntos arrecifales de Mahahual presentan una categoría de sensibilidad Muy Alta en comparación con los arrecifes de Sian Ka'an que se presentan en una categoría Baja; este subíndice está definido por la sensibilidad de los asentamientos humanos por inundaciones.

A nivel especie, Martínez *et al.* (2011) mencionan que cinco especies de importancia económica pueden verse afectadas por los impactos del cambio climático: pargo rojo (familia Lutjanidae), cabrillas (familia Serranidae), langosta espinoza (genero *Panulirus*), caracol rosado (*Strombus gigas*), erizo (*Strongylocentrotus franciscanus*), lo cual tendría efectos en la sensibilidad de las comunidades dependientes de los arrecifes de coral. En Sian Ka'an, el caracol rosado representa una actividad económica importante (Velez *et al.*, 2014), el monitoreo de esta especie puede ser utilizado como un indicador de sensibilidad social para esta zona. Se han realizado monitoreos de las larvas de este organismo, observando una mayor abundancia de estas en Sian Ka'an que en Mahahual (Chávez *et al.*, 2012).

Para esta sensibilidad social y su relación con el blanqueamiento de los arrecifes de coral, Marshall y Schuttenberg (2006) mencionan que el conocimiento relacionado al nivel de dependencia de las comunidades pesqueras que tienen sobre los recursos de estos ecosistemas puede ayudar a los tomadores de decisiones a seleccionar estrategias inmediatas a blanqueamientos masivos que aminorarían los impactos económicos, y a su vez ayudarían a maximizar la calidad de vida de las personas. Por lo que en el momento de tomar datos ecológicos se deberían tomar este tipo de datos en las comunidades pesqueras.

En cuanto al índice relacionado a la Capacidad de Adaptación Socio-Económica (*ICAS*), se observa que en Mahahual todos los puntos arrecifales se encuentran dentro de la categoría de Media, mientras que para los puntos arrecifales de Sian Ka'an se encuentran dentro de categorías de mayor capacidad de adaptación social (Alta=67% y Muy Alta =34%). Este indicador está conformado por dos subíndices (*ICASUNAM* e *ICMRN*) que se detallan a continuación.

El primer subíndice, el índice de capacidad adaptación de la UNAM (*ICASUNAM*), incluye factores de relacionados a la educación, organización social, acceso a créditos y al estado de la vegetación primaria obtenidos para cada municipio. Se observa que los puntos arrecifales de Mahahual se presentan en una categoría más alta de capacidad de adaptación Muy Alta, en comparación con los puntos arrecifales de Sian Ka'an que se presentan en la categoría Alta. Adger, Brooks, Bentham, & Agnew (2004) mencionan que la educación se asocia con la pobreza y la marginalización, los miembros de la sociedad con menor educación y con menos habilidades son los más vulnerables a los impactos del clima en términos de calidad de vida y localización geográfica; además de ser los que menor voz política ante los gobiernos siendo la educación la base para el entendimiento científico del entorno físico y por ende la base del entendimiento del complejo mundo natural, de sus riesgos y de las respuestas ante éstos. Por lo que se propone que la alfabetización desempeñará un papel importante en la determinación del acceso a la información sobre la necesidad de adaptación y la asistencia disponible del gobierno para ayudar a las personas a buscar estrategias de adaptación ante la variabilidad climática y se debería mejorar en Sian Ka'an.

Relacionado a la educación proporcionada a una comunidad relacionado a la variabilidad climática, se ha documentado el caso de Isla Natividad como un ejemplo en donde su comunidad presenta una vulnerabilidad baja ante el cambio climático debido a que los residentes tienen acceso a la información, reciben asesorías de organizaciones civiles sobre posibles estrategias adaptativas, y no se muestran reacios a la eventual modificación de sus actividades pesqueras (Salinas Akhmadeeva *et al.*, 2017). También Hernández y colaboradores (2015) mencionan que Isla Natividad tiene una cooperativa pesquera organizada y unida, con interés en adquirir conocimientos sobre ecología y oceanografía, estrategias de mercado, sustentabilidad y legislación ambiental. Para las poblaciones humanas asentadas dentro de las ANP en Baja California Sur, Olmos Martínez & González Ávila (2013) señalan que éstas se han percatado y tienen el conocimiento empírico de cambios en el ambiente, derivados del cambio climático, y saben que les afecta tanto en aspectos económicos como sociales. Se resalta que el aprendizaje es un tema importante en la capacidad de adaptación social, debido a que los impulsos de aprendizaje e innovación provienen frecuentemente de personas que ven nuevas posibilidades y potencialidades, además, el desarrollo de competencias coloca al individuo al centro de su compromiso para obtener resultados, lo cual es un componente clave del enfoque de desarrollo de capacidades (SEMARNAT, CONABIO, 2017).

El segundo subíndice, relacionado a la capacidad del manejo de los recursos naturales (*ICMRN*), está determinado por los sitios RAMSAR, refugios pesqueros, establecimiento de Áreas Naturales Protegidas (marinas y terrestres), proyectos relacionados al impulso de la resiliencia y la capacidad de adaptación ante el impacto del cambio climático dentro de ellas y en las regiones prioritarias marinas. Se observa que los puntos arrecifales de Sian Ka'an se encuentran dentro de la categoría Alta (71%) y Muy Alta (29%), mientras que todos los puntos arrecifales de Mahahual se encuentran en la categoría de Baja debido a que en esta zona sólo se cumple el requisito de ser un área prioritaria para la conservación y en Sian Ka'an todos los puntos arrecifales cumplen con al menos cinco de los siete criterios. Relacionado al manejo de los recursos naturales y esta capacidad de adaptación al cambio climático, Adger *et al.* (2004) mencionan que esta capacidad dependerá en gran medida en la disponibilidad de los recursos naturales y de los ecosistemas que no están actualmente destinados a la agricultura debido al gran número de servicios ecosistémicos que prestan. La conservación de estos sitios es por tanto una prioridad a largo plazo, tiene el fin de preservar los ecosistemas como ayuda en la adaptación al cambio climático.

Acerca de los sitios Ramsar, estos humedales de importancia internacional se consideran como ecosistemas fundamentales en la conservación y el uso sustentable de la biodiversidad por sus importantes funciones (regulación de la fase continental del ciclo hidrológico, recarga de acuíferos y estabilización del clima local), valores (recursos biológicos, pesquerías y suministro de agua) y atributos (refugio de diversidad biológica, patrimonio cultural y usos tradicionales). En Quintana Roo se encuentran 13 sitios Ramsar (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017); en este estudio únicamente los puntos arrecifales de Sian Ka'an se encuentran aledaños a sitios Ramsar. Sian Ka'an reúne las condiciones para su designación como Humedal de Importancia Internacional con base en tres criterios; Criterio 1: presencia de los distintos tipos de humedales naturales, entre ellos los pantanos de agua dulce, los manglares y los arrecifes de coral, muchos de los cuales son únicos en la región. Criterio 2: el sitio sustenta numerosas especies animales y vegetales vulnerables y en peligro crítico, y Criterio 3: presenta una gran abundancia de formas de vida relacionadas con los humedales que muestra claramente la importancia de la zona para mantener la diversidad biológica de la región. En relación a la protección del arrecife de barrera de esta zona, ésta constituye una lección positiva sobre cómo la conservación de los hábitats puede contribuir a la preparación para hacer frente a los desastres y la reducción de los riesgos de estos ("Las Convenciones de Ramsar y del Patrimonio Mundial, convergencia hacia el éxito", 2016).

En cuanto a los refugios pesqueros, este tipo de herramienta de manejo se encuentran aledaños a siete puntos arrecifales en Sian Ka'an y no se presentan en ninguno de Mahahual. En todo Quintana Roo se encuentran 16 polígonos de estos refugios en cuatro localidades, los cuales representan una estrategia para conservar la biodiversidad de especies pesqueras y asociadas, que ofrecen importantes beneficios biológicos, económicos y sociales (Comisión Nacional de Acuacultura y

Pesca, s/f). Otra relevancia de estos sitios en México se centra en que además de conservar, restaurar y manejar sustentablemente los ecosistemas, pretenden garantizar sus servicios ambientales como elemento para contribuir a la mitigación y adaptación al cambio climático (El Debate, 2018). Los refugios pesqueros de Sian Ka'an representan una experiencia de ciencia ciudadana importante. Específicamente en el refugio Punta Herrero, la Sociedad de Producción Pesquera José María Azcorra participó en el establecimiento de la línea de base para conocer el estado biológico de los refugios pesqueros, en donde se observó la participación de los pescadores locales, la academia y las organizaciones de la sociedad civil. Esta línea de base representa información muy detallada de los peces, organismos bentónicos e invertebrados dentro y fuera de estos polígonos; además los equipos de buzos ya están capacitados para registrar datos no solo en los refugios pesqueros sino también en otras áreas (Fulton *et al.*, 2014).

Relacionado a las Áreas Protegidas, terrestres o marinas, se observa que éstas se encuentran únicamente aledañas a los puntos arrecifales de Sian Ka'an (Reserva de la Biosfera de Sian Ka'an y Reserva de la Biosfera Arrecifes de Sian Ka'an) y en Mahahual no se presenta ninguna de este tipo. Las Áreas Marinas Protegidas (AMP) no son por sí mismas totalmente efectivas en la conservación de sus recursos, a nivel mundial sólo cerca del 2% del total de AMP se encuentran en un estado adecuado de conservación (Mora, 2008). Incluso en países en desarrollo las AMP que incluyen arrecifes de coral han cumplido de manera limitada sus estrategias de conservación; la mayoría de los casos, se encuentra en un contexto socioeconómico complejo y poco entendido (Cinner, 2007). Si bien existe un debate relacionado a la eficacia de este tipo de áreas, Micheli *et al.* (2012) reportan que, en una reserva marina en México, Isla Natividad, incrementó la resiliencia de las poblaciones marinas de *Haliotis* spp. ante eventos de mortalidad marina asociados a eventos de hipoxia (posiblemente causados por la variabilidad climática). Asociado a las áreas protegidas marinas y su efectividad, (Ban *et al.*, 2017) reportan que la mejora en las tendencias de las pesquerías, a nivel mundial, está asociada a ellas con mayor tiempo de establecimiento y regulaciones más estrictas de manejo.

Este subíndice (ICMRN) incluye también al Proyecto Resiliencia para Áreas Naturales Protegidas y al proyecto “Desarrollo de Programas Piloto de Adaptación al cambio climático en Áreas Naturales Protegidas del Sureste de México”. El primero es un proyecto que conjunta las agendas de resiliencia, áreas protegidas y cambio climático, tiene presencia en 17 áreas protegidas y se ejecuta por medio de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas con el apoyo del Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo en México, ha sido cofinanciado por un donativo del Fondo Mundial para el Medio Ambiente; su objetivo es reducir los impactos negativos del cambio climático sobre la biodiversidad de las Áreas Protegidas mexicanas y se ha implementado en sólo dos Áreas Naturales Protegidas con arrecifes: en el Parque Nacional de Puerto Morelos y en el Parque Nacional Isla Mujeres, Punta Cancún y Punta Nizuc (Proyecto

Resiliencia, s/f). Para este caso ninguno de las dos zonas estudiadas se integra en este tipo de proyectos específicos que pudieran incrementar a este indicador *ICMRN*. Para el caso del segundo tipo de proyectos, la Reserva de la Biósfera Arrecifes de Sian Ka'an se incluye en las áreas protegidas federales que conforman el complejo en el Caribe de México en este proyecto; cuyo objetivo es desarrollar una metodología para el desarrollo de programas enfocados a diseñar e implementar medidas de adaptación ante los impactos que se esperan del cambio climático con base a las evidencias científicas y casos de estudio en distintas partes del mundo, y aprovechando la experiencia y conocimiento de investigadores, personal de la Comisión y pobladores locales (March *et al.*, 2011).

Finalmente, para el subíndice *ICMRN*, su último criterio se relaciona a las Regiones Marinas Prioritarias para la Conservación de la CONABIO, en específico a los Sitios Prioritarios Marinos, se observa que los puntos arrecifales de Mahahual y de Sian Ka'an se encuentran dentro de este tipo de regiones. En el caso de Mahahual, la Región Marina Prioritaria identificada se nombra: Humedales Costeros y Arrecifes de Xcalak-Mahahual, ésta identificada como un sitio prioritario para la conservación de la biodiversidad marina pero no están cubiertos por ninguna área protegida (CONABIO-CONANP-TNC-PRONATURA, 2007); para el caso de Sian Ka'an, el sitio prioritario marino es: Humedales Costeros y Arrecifes de Sian Ka'an. Estos sitios reconocen que los ecosistemas marinos son de importancia crítica, por el gran número de especies tanto endémicas como de distribución amplia y al mismo tiempo son sitios importantes de reproducción, anidación, descanso y alimentación de la fauna marina y aves migratorias (CONABIO, CONANP, TNC y Pronatura, 2007).

En este mismo subíndice, capacidad de manejo de recursos naturales (*ICMRN*), se pueden incluir a los Planes de Acción Climática Municipal, los cuales tienen como objetivo crear capacidades entre los tomadores de decisiones de los municipios sobre cambio climático y sus impactos, así como promover políticas públicas a nivel local (SEMARNAT & INECC, 2012). Como ejemplo del primero, el Plan Acción Climática de Cozumel, señala que los huracanes, tormentas y depresiones tropicales ocasionan impactos en la biodiversidad y ecosistemas costeros que a su vez repercuten en el sector turismo ("Plan acción climática de Cozumel 2011-2013", s/f). A un nivel mayor al municipal, el Programa Estatal de Quintana Roo presenta como una de las acciones de adaptación a los arrecifes coralinos en específico, mencionando que se debe proteger a los ecosistemas costeros, con énfasis en los manglares y en los arrecifes, así como promover y difundir la importancia de la conservación de los ecosistemas (Pereira *et al.*, 2013). En general, hay una falta de políticas y preparación en la población para la explotación de los recursos naturales que evite el deterioro de los ecosistemas (Monterroso *et al.*, 2014).

En general, para el *ICAS*, se puede incluir como un subíndice a la Capacidad de Refugios Temporales *per capita*. En Sian Ka'an Capacidad Total refugios temporales 5150 y la población

total del Municipio de Tulum es de 32,714 por lo cual este indicador sería de 0.15; en Mahahual la capacidad de los refugios temporales es de 6275 con una población total del municipio de Othón Blanco de 224,080 y el valor sería de 0.02 con valores tomados del INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017); por lo que un aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas tropicales las comunidades de Tulum tendrían una mayor capacidad de albergar personas ante estos fenómenos.

Resaltan los avances en el tema de adaptación en Tulum, con la propuesta del Programa de Adaptación ante la Variabilidad Climática y el Cambio Climático del Sector Turismo en la Riviera Maya. En él se analizaron tópicos relacionados con los aspectos físicos y las características sociodemográficas en la zona, así como los aspectos normativos e institucionales que podrían incrementar la vulnerabilidad de las regiones, la estructura y el funcionamiento de la sociedad, que representarían fortalezas o carencia de ellas en el proceso de incrementar la resiliencia del sistema social, así como los aspectos externos de mercado que podrían poner en riesgo el abasto de la población, ya que se enfrentaría a posibles eventos hidrometeorológicos (Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C., 2013).

En la Figura 3, se observa la distribución de los puntos arrecifales para las dos áreas con su categoría para el Índice de Vulnerabilidad Social (IVS) para Sian Ka'an y Mahahual, señalándose la distribución de sus categorías. Se observan los puntos arrecifales de Sian Ka'an (Figura 3a), estos caen en la categoría Muy Baja, y los de Mahahual (Figura 3b) en la categoría Media. En general, el IVS es mayor en Mahahual que en Sian Ka'an. Estas categorías se modificarían si se trabaja exclusivamente con datos a nivel local, sin embargo, estos indicadores reflejan aproximaciones de lo que sucede en esta dimensión de la vulnerabilidad social.

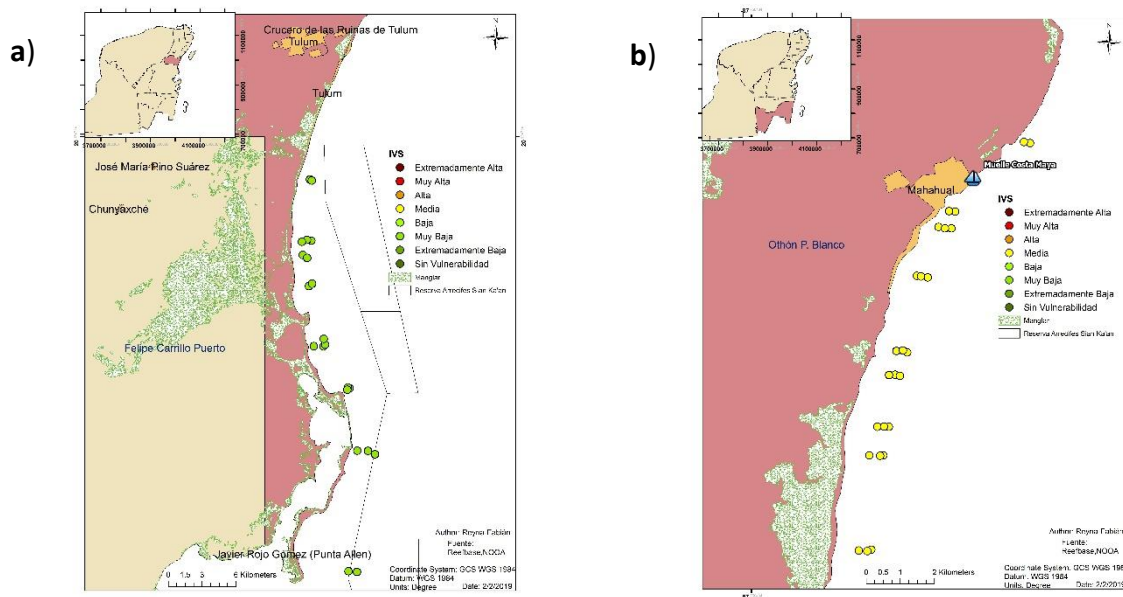


Figura 3. Mapa de distribución de las categorías del IVS para los puntos arrecifales en Sian Ka'an (a) y Mahahual (b).

5.3.3.3. Índice Presiones Locales IPL e Índice Ecosistemas Asociados IEA

En la Tabla 3 se presentan las categorías para este índice de todos los puntos arrecifales y en el Anexo III se presentan sus valores y detalles. Para Mahahual, todos los puntos se encuentran dentro de la categoría Medio (100%), para Sian Ka'an en Bajo (90%). En la Figura 4, en a) se observan las categorías para este índice en Sian Ka'an; las únicas categorías Medio se encuentra en la parte norte y la parte más cercana a la población de Tulum, disminuyendo a la categoría de Bajo en toda la parte sur. En la misma figura, en b) se observan la distribución homogénea de las categorías en todos los puntos para Mahahual.

Este índice se obtuvo del trabajo de Burke *et al.* (2011) y está asociado a las variables de contaminación marina, terrestre, desarrollo costero, y sobrepesca. En cuanto a la contaminación, marina y terrestre, se reporta que en la mayoría de las costas de la región del Gran Caribe la sufren (Beltrán *et al.*, 2005). Sin embargo, se reporta que Mahahual cuenta con tratamiento municipal de 100% de las aguas residuales provenientes del desarrollo turístico (Secaira Fajardo & Acevedo, 2017). Para la sobrepesca, éste se basa en la densidad poblacional cercana a los arrecifes de coral, las áreas de pesca del arrecife y la distancia a los sitios para la venta de los peces. Sin embargo, en México están registrados más de 250,000 pescadores ribereños quienes aportan el 23% de la producción pesquera a nivel nacional (DUKE University, Niparáj, & COBI, 2018), por lo cual contar con los datos de este tipo de actividad en este tipo de evaluaciones podría afinar el valor del índice IPL. Además (Aguilera *et al.*, 2015) señalan la importancia de la adaptación a las condiciones cambiantes de las pesquerías a pequeña escala (incluyendo la dinámica climática), esta adaptación les permite sobrevivir a los disturbios ambientales y sociales, así como beneficiarse de las condiciones cuando son óptimas. Estas pesquerías de pequeña escala locales pueden representar una oportunidad en la aplicación de políticas públicas de adaptación. Santander y colaboradores (2018) resaltan que la pesca y el turismo se lleva a cabo en toda la costa de México, pero que en el Caribe las actividades náuticas son de mayor importancia.

Este IPL debe ser tomado con precaución debido a su escala que ha sido desarrollado, para los arrecifes a nivel mundial y no significa que las presiones locales en ambas zonas de este estudio presenten niveles bajos de este tipo de presiones locales. Si bien revertir la reducción en la cobertura de coral requeriría una regulación internacional que limitara los impactos del cambio climático causados por las actividades humanas, los esfuerzos locales enfocados a limitar los impactos físicos directos en el arrecife, pueden ayudar a proteger y mejorar la estructura de los mismos (Alvarez-Filip *et al.*, 2011a). Por ejemplo, se ha observado que las poblaciones y la biomasa de peces herbívoros no está relacionada a la cobertura de macroalgas en Puerto Morelos

y que la cobertura de estas algas se relaciona principalmente a las condiciones ambientales favorables para su crecimiento (nutrientes). Por esto, los manejadores de los arrecifes de coral deberían enfocarse en el manejo de las aguas residuales para evitar estas condiciones y tendencia en el aumento de las macroalgas (Suchley & Alvarez-Filip, 2017). Por lo anterior se considera importante incluir este índice, *IPL*, en la evaluación de la vulnerabilidad de estos ecosistemas ante los factores asociados al cambio climático.

En cuanto al Índice de Ecosistemas Asociados (*IEA*), tomado de la CONABIO, incorpora cuestiones del estado de conservación de los manglares y cambios en la vegetación y uso de suelo. En la Tabla 3 se observan las categorías de este índice para cada punto arrecifal y en el Anexo III se detallan sus valores para cada punto arrecifal; para las dos zonas, Sian Ka'an y Mahahual, la mayoría de las categorías se encuentran en Muy Bajo (48% en ambas zonas). La Figura 4, en d) se observan las categorías de este índice para Mahahual, se observa que las categorías de Muy bajo están aledañas a la distribución de los manglares y las categorías de Muy Alto se encuentran aledañas a la localidad de Mahahual; a lo cual Hirales-Cota *et al.* (2010) mencionan que para los manglares del Mahahual y Xcalak se han perdido 1070 ha de bosque de manglar que, durante un periodo de 12 años, con una tasa anual de deforestación de 0.85%, tasa relativamente alta en comparación con otras regiones de México y señalan como el principal factor que ha disparado la disminución de la cobertura de éstos a la expansión de los usos antropogénicos del suelo (e.g., la construcción de poblados y caminos). Por otro lado, en la misma Figura 4 en c), se observa la distribución de las categorías de este índice para Sian Ka'an en donde no se observa ningún patrón espacial. Figueroa y colaboradores (2011) señalan que la tasa de cambio en la superficie transformada para la región de Sian Ka'an ha sido de cero durante 1993-2002, lo cual se observa en las categorías de Muy Bajo de este subíndice en la región. Se señala la importancia que este "Complejo Sian Ka'an" cuenta con dos ANP terrestres (Reserva de la Biosfera Sian Ka'an y el Área de Protección de Flora y Fauna Uaymil) delimitadas desde los 80 (CONANP, 2014). A futuro estas herramientas pueden influir en reducir la vulnerabilidad de los arrecifes de Sian Ka'an comparados con los de Mahahual.

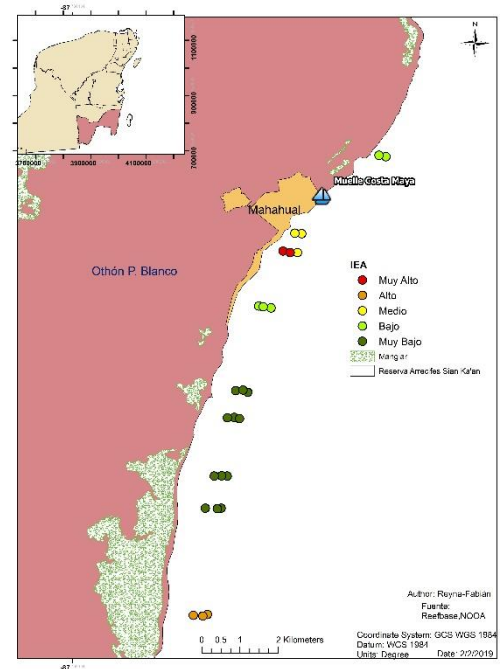
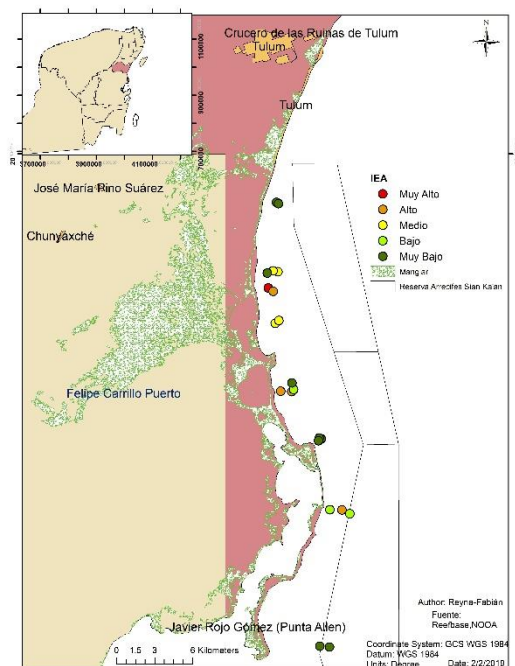
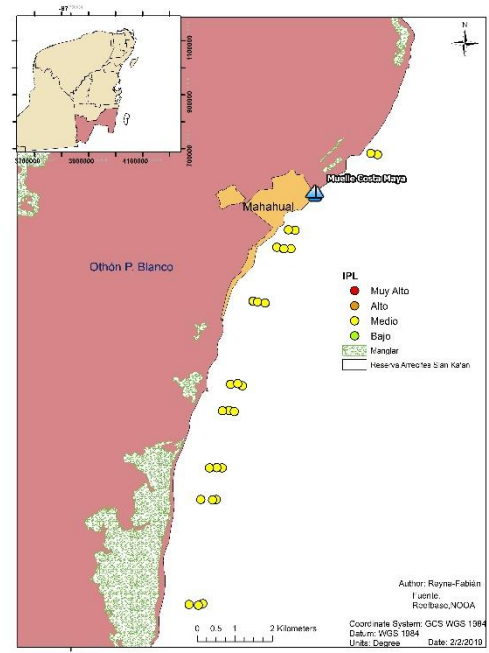
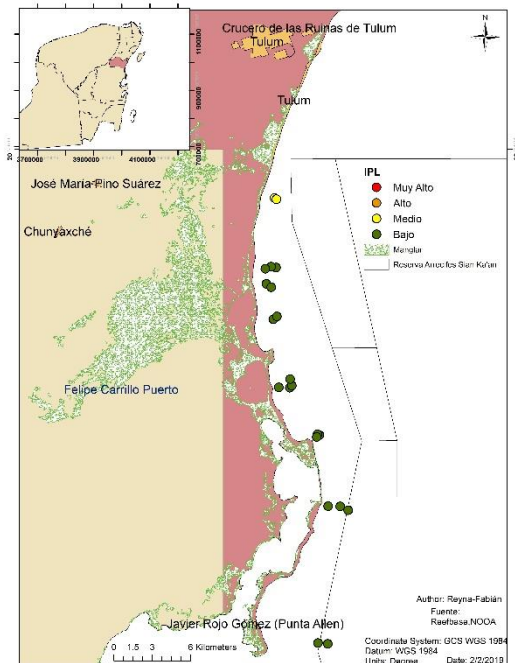


Figura 4. Mapa de distribución de las categorías del IPL para los puntos arrecifales en Sian Ka'an a) y Mahahual b) y de las categorías del IEA para Sian Ka'an en c) y Mahahual en d).

Para el *IVE* e *IVS*, se observan cuatro grupos (Tabla 4), para el primero se propone atender con prioridad los elementos de la vulnerabilidad ecológica, para el segundo a ambos elementos (ecológicos + socioeconómicos), para el tercero a la socioeconómica y el último a ninguno. Dentro del primer grupo todos los puntos arrecifales se encuentran en Sian Ka'an, dentro del segundo y tercer grupo los de Mahahual y en el último grupo sólo se encuentra un punto arrecifal en Sian Ka'an.

Grupo	<i>IVE</i>	<i>IVS</i>	Prioridad atención	Puntos arrecifales
1	Extremadamente Alta	Muy Baja	Vulnerabilidad Ecológica	S20, S19, S18, S14, S15, S12, S13, S02, S05, S06, S08, S16, S17, S01, S11, S03, S04, S07, S09, S10
	Muy Alta	Muy Baja		
	Alta	Muy Baja		
	Media	Muy Baja		
2	Muy Alta	Media	Vulnerabilidad Ecológica + Vulnerabilidad Socioeconómica	M05, M11, M04, M06, M16, M07, M08, M24, M14, M15, M17, M18, M23, M25
	Alta	Media		
	Media	Media		
3	Muy Baja	Media	Vulnerabilidad Socioeconómica	M21, M01, M02, M03, M10, M12, M19, M20, M22
4	Muy Baja	Muy Baja	Ninguna	S21

5.3.4. Conclusiones y recomendaciones

Fue posible aplicar el modelo en un conjunto de arrecifes coralinos y estimar su vulnerabilidad ante el incremento de la temperatura. Para la dimensión ecológica, para el *IEE* se resaltan cuatro puntos arrecifales en Mahahual (M12-M15) y tres puntos en Sian Ka'an (S03, S08 y S19) con una exposición Muy Alta. Para el *ISE* los puntos arrecifales de Sian Ka'an presentan mayor proporción en las categorías Alto y Muy Alto (14%) en comparación con los puntos arrecifales de Mahahual, que presentan mayores proporciones en las categorías de Medio y Muy Bajo. El índice de Respuesta Ecológica, *IRPE*, en Mahahual muestra a la mayoría de los puntos arrecifales dentro de la categoría de Medio y en Sian Ka'an la mayoría de estos arrecifes aparecen dentro de la categoría Baja. Se observa una mayor cantidad de puntos arrecifales con Vulnerabilidad Ecológica, *IVE*, mayor en Sian Ka'an que en los puntos arrecifales de Mahahual.

En cuanto a la Vulnerabilidad Social, *IVS*, fue mayor en Mahahual que en Sian Ka'an; específicamente para el *ISS* los puntos arrecifales de Mahahual se encuentran dentro de una

categoría de sensibilidad mayor que los puntos arrecifales de Sian Ka'an. Para el ICAS, se observa que en Mahahual no existen herramientas de manejo relacionadas a las áreas protegidas (marinas o terrestres), sitios Ramsar o refugios pesqueros.

Para el índice de Presiones Locales (IPL), Sian Kan cuenta con menores presiones locales en comparación con Mahahual. El índice de Ecosistemas Asociados, IEA, las dos zonas presentan categorías bajas; sin embargo, Sian Ka'an cuenta con dos ANP terrestres que permitirían en un futuro mantener esta categoría en comparación con Mahahual que no cuenta con este tipo de herramientas para evitar el cambio de uso del suelo.

Recomendaciones para:

- Índice Exposición Ecológica:
 - ✓ Incluir las respuestas de diversos grupos de organismos (bentónicos y de peces) ante el incremento de sostenido de la SST para obtener valores de exposición más detallados que muestren el comportamiento a nivel ecosistema.
- Índice Sensibilidad Ecológica:
 - ✓ Al realizar monitoreos de blanqueamiento tomar datos *in situ* de temperatura, de las especies y los géneros de corales con blanqueamiento, la luz UV, las corrientes y la velocidad del viento. Además, se recomienda mantener un monitoreo continuo hasta observar la recolonización de zooxantelas o la mortalidad de los corales.
- Índice Recuperación Potencial Ecológica:
 - ✓ Al realizar monitoreos de blanqueamiento incorporar los datos de biomasa de los herbívoros (peces y otros grupos), del porcentaje de cobertura de macroalgas. También determinar la complejidad del hábitat (e.g. por la metodología de Arias *et al.*, 2011).
- Índice Sensibilidad Social, Índice Capacidad Adaptación Social:
 - ✓ Monitorear las especies de importancia económica que sean sensibles a los efectos de estrés aso al CC, por ejemplo, el caracol rosado, la langosta y erizos. Determinar el grado de dependencia de las comunidades pesqueras para estimar la sensibilidad social ante eventos masivos de blanqueamiento.
 - ✓ Levantamiento de datos a la misma escala que lo que se hace en ecología, es decir a nivel localidad humana para tener datos que puedan utilizarse como indicadores a la misma escala, especialmente si se trabaja a escala local.
 - ✓ Crear nuevos indicadores relacionados con los impactos de eventos meteorológicos extremos que puedan estar asociados a la variabilidad climática como ejemplo, número de muertes o personas afectadas por los desastres asociados al cambio climático (Adger *et al.*, 2004).

Para las áreas de estudio de este trabajo:

- Se recomienda hacer una evaluación participativa para identificar de indicadores a nivel local con Personal Parque de las ANP, las OSC, gobierno, academia, pescadores y sociedad en general.
- Revisar las presiones locales asociadas a la pesca, contaminación marina, contaminación terrestre y desarrollo costero en Mahahual.

En general, se recomienda impulsar herramientas que permitan la interfase ciencia-política-sociedad, en específico se recomienda la creación de un observatorio ciudadano regional con el objetivo de fomentar lazos inter y transdisciplinarios, además de facilitar la traducción de la ciencia a la política ambiental efectiva relacionada a estos SSE.

El uso de los indicadores en este trabajo se basó en la disponibilidad de éstos, en este tipo de ejercicios se debe considerar las limitaciones de las diversidades de las escalas espaciotemporales de éstos. Sin embargo, estos indicadores son aproximaciones que permiten determinar el estado de la vulnerabilidad y las consecuencias de las acciones de manejo de estos sistemas socio-ecológicos. Este ejercicio demuestra lo importante de la aplicación del modelo ya que sus resultados permiten marcar prioridades de manejo o de comparar el efecto de políticas públicas como son las ANP.

5.3.5. Referencias

- Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. (2013). Propuesta de Programa de Adaptación ante la Variabilidad Climática y el Cambio Climático del Sector Turismo en la Riviera Maya: Tulum, Quintana Roo. Recuperado a partir de <http://www.sectur.gob.mx/wp-content/uploads/2014/09/PROGRAMA-TULUM.pdf>
- Adger, W. N., Brooks, N., Bentham, G., & Agnew, M. (2004). New indicators of vulnerability and adaptive capacity. *Tyndall Centre for Climate Change Research Technical Report 7*, 5(January), 128. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2004.12.010>
- Aguilera, S. E., Cole, J., Finkbeiner, E. M., Le Cornu, E., Ban, N. C., Carr, M. H., ... Broad, K. (2015). Managing small-scale commercial fisheries for adaptive capacity: Insights from dynamic social-ecological drivers of change in mMonterey Bay. *PLoS ONE*, 10(3), 1–22. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0118992>
- Alva-Basurto, J. C., & Arias-González, J. E. (2014). Modelling the effects of climate change on a Caribbean coral reef food web. *Ecological Modelling*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2014.06.014>

- Alvarez-Filip, L., Gill, J. A., Dulvy, N. K., Perry, A. L., Watkinson, A. R., & Côté, I. M. (2011a). Drivers of region-wide declines in architectural complexity on Caribbean reefs. *Coral Reefs*, 30(4), 1051–1060. <https://doi.org/10.1007/s00338-011-0795-6>
- Alvarez-Filip, L., Gill, J. A., Dulvy, N. K., Perry, A. L., Watkinson, A. R., & Côté, I. M. (2011b). Flattening of Caribbean coral reefs: region-wide declines in architectural complexity. *Coral Reefs*, 30(4), 1051–1060. <https://doi.org/10.1007/s00338-011-0795-6>
- Álvarez-Filip, L., Millet-Encalada, M., & Reyes-Bonilla, H. (2009). Impact of hurricanes Emily and Wilma on the coral community of Cozumel Island, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 84(3), 295–306.
- Arias-González, J. E., Nuñez-Lara, E., Rodríguez-Zaragoza, F. A., & Legendre, P. (2011). Reefscape proxies for the conservation of Caribbean coral reef biodiversity Indicadores del paisaje arrecifal para la conservación de la biodiversidad de los arrecifes de coral del Caribe. *Ciencias Marinas*, 37(1), 87–96.
- Baird, Andrew H., Bhagooli, Ranjeet, Ralph, Peter J. y Takahashi, Shunichi (2009). Coral bleaching: the role of the host. *Trends in Ecology and Evolution*, 24(1): 16-20
- Baker, D. M., Rodríguez-Martínez, R. E., & Fogel, M. L. (2013). Tourism's nitrogen footprint on a Mesoamerican coral reef. *Coral Reefs*, 32(3), 691–699. <https://doi.org/10.1007/s00338-013-1040-2>
- Ban, N. C., Davies, T. E., Aguilera, S. E., Brooks, C., Cox, M., Epstein, G., ... Nenadovic, M. (2017). Social and ecological effectiveness of large marine protected areas. *Global Environmental Change*, 43, 82–91. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.003>
- Bozec, Y. M., Alvarez-Filip, L., & Mumby, P. J. (2015). The dynamics of architectural complexity on coral reefs under climate change. *Global Change Biology*, 21(1), 223–235. <https://doi.org/10.1111/gcb.12698>
- Burke, L. (2005). *Arrecifes en Peligro en el Caribe*.
- Burke, L., Reytar, K., Spalding, M., & Perry, A. (2011). *Reefs at Risk Revisited*. Washington, DC. Recuperado a partir de http://pdf.wri.org/reefs_at_risk_revisited.pdf
- Carricart-Ganivet, J. P., Cabañillas-Terán, N., Cruz-Ortega, I., & Blanchon, P. (2012). Sensitivity of Calcification to Thermal Stress Varies among Genera of Massive Reef-Building Corals. *Cahiers de Biologie Marine*, 53(1), 65–76. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0032859>
- Carriquiry, J. D., Cupul-Magaña, A. L., Rodríguez-Zaragoza, F., & Medina-Rosas, P. (2001). Coral Bleaching and Mortality in the Mexican Pacific During the 1997–98 El Niño and Prediction From a Remote Sensing Approach. *Bulletin of Marine Science*, 69(1), 237–249.
- Chávez et al. (2012). Abundancia y distribución de larvas de *Strombus gigas* (Mesogastropoda: Strombidae) durante el período reproductivo de la especie en el Caribe Mexicano. *Rev. Biol. Trop.*, 60 (1): 89-97.

- Cinner, J. (2000). *Socioeconomic Influences on Coastal Resource Use in Mahahual, Mexico*. University of Rhode Island.
- Cinner, J. E. (2007). Designing marine reserves to reflect local socioeconomic conditions: Lessons from long-enduring customary management systems. *Coral Reefs*, 26(4), 1035–1045. <https://doi.org/10.1007/s00338-007-0213-2>
- (CONABIO), C. N. para el C. y U. de la B., (CONANP), C. N. de Á. N. P., (TNC), T. N. C.-P. M., & Pronatura. (2007). Sitios Prioritarios Marinos para la Conservación de la Biodiversidad. CONABIO (2018). Mapa de índice de antropización en la zona costera asociada a los manglares de Quintana Roo, México (2015). Tomado de http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/?vns=gis_root/biodiv/monmang/manglegw
- CONABIO-CONANP-TNC-PRONATURA. (2007). Análisis de vacíos y omisiones en conservación de la biodiversidad marina de México: océanos, costas e islas. México. Recuperado a partir de <https://www.biodiversidad.gob.mx/pais/pdf/LibroGapMarino.pdf>
- CONANP (2014). Programa de Manejo Complejo Sian Ka'an: Reserva de la Biosfera Sian Ka'an, Área de Protección de Flora y Fauna Uaymil y Reserva de la Biosfera Arrecifes de Sian Ka'an.
- Crook, E. D., Potts, D., Rebolledo-Vieyra, M., Hernandez, L., & Paytan, A. (2012). Calcifying coral abundance near low-pH springs: Implications for future ocean acidification. *Coral Reefs*, 31(1), 239–245. <https://doi.org/10.1007/s00338-011-0839-y>
- DOF (2016). DECRETO por el que se declara Área Natural Protegida, con el carácter de reserva de la biosfera, la región conocida como Caribe Mexicano. Recuperado de: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5464450&fecha=07/12/2016
- DUKE University, Niparajá, & COBI. (2018). Diagnóstico nacional de organizaciones pesqueras. Resumen de resultados de las organizaciones. Recuperado a partir de http://niparaja.org/file/2018/07/NPJ-DNOP_folleto-WEB.pdf
- Eakin, C. M., Morgan, J. A., Heron, S. F., Smith, T. B., Liu, G., Alvarez-Filip, L., ... Yusuf, Y. (2010). Caribbean corals in crisis: Record thermal stress, bleaching, and mortality in 2005. *PLoS ONE*, 5(11). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0013969>
- Fenner, D. P. (1991). Effects of Hurricane Gilbert on coral reefs, fishes and sponges at Cozumel, Mexico. *Bulletin of Marine Science*, 48(3), 719–730.
- Figueroa, F., Sánchez-Cordero, V., Illoldi-Rangel, P., & Linaje, M. (2011). Evaluación de la efectividad de las áreas protegidas para contener procesos de cambio en el uso del suelo y la vegetación. ¿Un índice es suficiente? *Revista Mexicana de Biodiversidad*, 82(3), 951–963. [https://doi.org/10.16/S0010-0285\(02\)00520-0](https://doi.org/10.16/S0010-0285(02)00520-0)
- Fulton, S., García, C., Caamal, C., & Bourillón, L. (2014). *Reporte de la línea base de los refugios pesqueros en Quintana Roo*. Guaymas, Sonora, México.

- Garcia, R. A., Cabeza, M., Rahbek, C., & Araújo, M. B. (2014). Multiple dimensions of climate change and their implications for biodiversity. *Science*, 344(6183). <https://doi.org/10.1126/science.1247579>
- Graham, N. A. J., & Nash, K. L. (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs*, 32(2), 315–326. <https://doi.org/10.1007/s00338-012-0984-y>
- Hayes, R. L., & Goreau, T. J. (2008). Satellite-derived sea surface temperature from Caribbean and Atlantic coral reef sites , 1984-2003. *Internacional Journal Tropical Biology*, 56(May), 97–118.
- Healthy Reefs for Healthy People. (2018). *Mesoamerican reef report card An evaluation of ecosystem health*.
- Hernández-Velasco, A., Villaseñor, J. C., Torre, J., Suarez, A., & Espinoza, A. (2015). Isla Natividad Un bosque bajo el agua.
- Hirales-Cota, H., Espinoza-Avalos, J., Schmook, B., Ruiz-Luna, A., & Ramos-Reyes, R. (2010). Drivers of mangrove deforestation in Mahahual-Xcalak, Quintana Roo, southeast Mexico. *Ciencias Marinas*, 36(2), 147–159.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2017). Anuario estadístico y geográfico de Quintana Roo 2017. México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- Jordán Dahlgren y R. E. Rodríguez Martínez. (2003). “The Atlantic coral reefs of Mexico”. En Cortés, J. *Latin American Coral Reefs*. ELSEVIER. Países Bajos. Pp. 131-158.
- Las Convenciones de Ramsar y del Patrimonio Mundial, convergencia hacia el éxito. (2016). Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional. Recuperado a partir de https://www.ramsar.org/sites/default/files/documents/library/ramsar_whc_case_study_sian_kaan_s.pdf
- López Santillán, Ángeles A. (2012). Desarrollo turístico e inequidad: el caso de Mahahual en Costa Maya, Quintana Roo. En Marín Guardado, Gustavo, García de Fuentes, Ana y Daltabuit Godás, Magalí (eds). *Turismo, globalización y sociedades locales en la Península de Yucatán, México*. PASOS.
- Magaña, V., Gómez, L., Neri, C., Landa, R., León, C., & Ávila, B. (2011). Medidas de Adaptación al Cambio Climático en Humedales del Golfo de México. (V. Magaña, L. Gómez, C. Neri, R. Landa, C. León, & B. Ávila, Eds.).
- Maina, Joseph, Venus, Valentijn, McClanahan, Timothy R. y Ateweberhan, Mebrahtu (2008). Modelling susceptibility of coral reefs to environmental stress using remote sensing data and GIS models. *Ecological Modelling*, 3: 180-199.
- Maina, J., McClanahan, T. R., Venus, V., Ateweberhan, M., & Madin, J. (2011). Global gradients of coral exposure to environmental stresses and implications for local management. *PLoS ONE*, 6(8), e23064. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023064>

- March, I. J., Cabral, H., Echeverría, Y., Bellot, M., & Frausto, J. M. (2011). Adaptación al Cambio Climático en Áreas Protegidas del Caribe de México. *Adaptación al Cambio Climático en Áreas Protegidas del Caribe de México*, 109.
- March, I. J., Cabral, H., Echeverría, Y., Bellot, M., & Frausto, J. M. (2011). Adaptación al Cambio Climático en Áreas Protegidas del Caribe de México. México.
- Marshall P. y H. Schuttenberg (2006). A Reef Manager's Guide to Coral Bleaching.
- Martínez, A. Av. to climate change of marine and coastal fisheries in M., Manzanilla, N. S., & Hidalgo, J. Z. (2011). Vulnerability to climate change of marine and coastal fisheries in México. *Atmósfera*, 24(1), 103–123.
- Micheli, F., Saenz-Arroyo, A., Greenley, A., Vazquez, L., Espinoza Montes, J. A., Rossetto, M., & de Leo, G. A. (2012). Evidence that marine reserves enhance resilience to climatic impacts. *PLoS ONE*, 7(7). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0040832>
- Monterroso Rivas, A., Fernández Eguirarte, A., Trejo Vázquez, I., Conde Álvarez, A. C., Escandón Calderón, J., Villers Ruíz, L., & Gay-García, C. (2014). *Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Monterroso Rivas, A., Fernández Eguirarte, A., Trejo Vázquez, I., Conde Álvarez, A. C., Villers Ruíz, L., & Gay García, C. (2014). *Vulnerabilidad y adaptación a los efectos del cambio climático en México*. Centro de Ciencias de la Atmósfera. Programa de Investigación en Cambio Climático Universidad Nacional Autónoma de México.
- Mora, C. (2008). A clear human footprint in the coral reefs of the Caribbean. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 275(1636), 767–773. <https://doi.org/10.1098/rspb.2007.1472>
- Municipio de Othón Blanco. (2018). Plan Municipal de Desarrollo 2016-2018.
- Niparajá, WWF, & Fundación Carlos Slim. (s/f). Las primeras Zonas de Refugio en México. Experiencia del Corredor San Cosme a Punta Coyote. La Paz, Baja California Sur.
- Olmos Martínez, E., & González Ávila, M. E. (2013). Percepción de la población frente al cambio climático en áreas naturales protegidas de Baja California Sur, México. *Polis Revista Latinoamericana*, 35. <https://doi.org/10.4000/polis.9158>
- Ortiz-Lozano, L., Granados-Barba, A., & Espejel, I. (2009). Ecosystemic zonification as a management tool for marine protected areas in the coastal zone: Applications for the Sistema Arrecifal Veracruzano National Park, Mexico. *Ocean and Coastal Management*, 52(6), 317–323. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2009.03.004>
- Palafox-Muñoz, Alejandro; Aguilar-Aguilar, Arturo y Escalera-Briceño, Alejandro (2014). El turismo de cruceros en la región de El Caribe. *Revista Iberoamericana de Turismo*, 4(2): 40-53

- Pereira, A., Prezas, B., Olivares, J., Fragoso, P., & Niño, C. (2013). Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático del Estado de Quintana Roo (PEACC-QR). Recuperado a partir de <http://sema.qroo.gob.mx/index.php/component/content/article/475>
- Plan acción climática de cozumel 2011-2013. (s/f).
- Reyes-Bonilla, H., Carriquiry, J., Leyte-Morales, G. E., & Cupul-Magaña, A. L. (2002). Effects of the El Niño-Southern Oscillation and the Anti-El Niño event (1997-1999) on coral reefs of the western coast of Mexico. *Coral Reefs*, 21(4), 368–372. <https://doi.org/10.1007/s00338-002-0255-4>
- Rodríguez-Martínez, R. E., Banaszak, A. T., McField, M. D., Beltrán-Torres, A. U., & Álvarez-Filip, L. (2014). Assessment of *Acropora palmata* in the mesoamerican reef system. *PLoS ONE*, 9(4). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096140>
- Rogers, A., Harborne, A. R., Brown, C. J., Bozec, Y., Castro, C., Chollett, I., ... Mumby, P. J. (2015). Anticipative management for coral reef ecosystem services in the 21st century. *Global Change Biology*, 21, 504–514. <https://doi.org/10.1111/gcb.12725>
- Salinas Akhmadeeva, I. A., Reyes-Bonilla, H., Izquierdo Guerrero, T., Cruz-Piñón, G., Vázquez Vera, L., & Walther Mendoza, M. (2017). Vulnerabilidad de las comunidades costeras en el estado de Baja California Sur, ante los efectos del cambio climático. *El Sudcaliforniano*.
- Santander-monsalvo, J., Espejel, I., & Ortiz-lozano, L. (2018). Distribution , uses , and anthropic pressures on reef ecosystems of Mexico. *Ocean and Coastal Management*, 165(617), 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.08.014>
- Scott, D., Simpson, M. C., & Sim, R. (2012). The vulnerability of Caribbean coastal tourism to scenarios of climate change related sea level rise. *Journal of Sustainable Tourism*, 20(6), 883–898. <https://doi.org/10.1080/09669582.2012.699063>
- Secaira Fajardo, F., & Acevedo, C. A. (2017). Importancia de los arrecifes y dunas en la protección de la costa. Serie técnica: el papel de los sistemas naturales en la dinámica costera en el Caribe mexicano y el impacto de las actividades humanas en su condición actual. The Nature Conservancy. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.33171.68647>
- SEMARNAT, CONABIO, C. Y. C. (2017). Visión Nacional de Manejo Integrado del Paisaje y Conectividad. <https://doi.org/10.1007/BF00323771>
- SEMARNAT, & INECC. (2012). *Quinta Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Recuperado a partir de <http://unfccc.int/resource/docs/natc/mexnc5s.pdf>
- SEMARNAT, & INECC. (2015). Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático: Ficha Técnica por Problemática para la Evaluación de la Vulnerabilidad de los asentamientos humanos por inundaciones Unidad de agregación : Municipal Justificación.

- Speers, A. E., Besedin, E. Y., Palardy, J. E., & Moore, C. (2016). Impacts of climate change and ocean acidification on coral reef fisheries: An integrated ecological-economic model. *Ecological Economics*, 128, 33–43. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2016.04.012>
- Suchley, A., & Alvarez-Filip, L. (2017). Herbivory facilitates growth of a key reef-building Caribbean coral. *Ecology and Evolution*, 7(24), 11246–11256. <https://doi.org/10.1002/ece3.3620>
- Velez, Mariana, Adlerstein, Sara y Wondolleck, Julia (2014). Fishers' perceptions, facilitating factors and challenges of community-based no-take zones in the Sian Ka'an Biosphere Reserve, Quintana Roo, Mexico. *Marine Policy*, 45: 171-181.
- Villanueva, Lourdes Castillo, Vera, María Angélica González, Cámara, Bonnie Campos, Torres, David Velázquez, Almada, José Luis Ferman, Gastelum, Alejandro García, Aguilar, María Luisa Hernández, Coral, Manuela Laguna y Tello, Mariela Yeladaqui (2014). Modelo de indicadores para la evaluación y monitoreo del desarrollo sustentable en la zona costera de Mahahual, Quintana Roo, México. *Perspectiva Geográfica*, 19(2): 309-330.

5.3.6. Anexos

5.3.6.1. Anexo I Valores de los índices de la Vulnerabilidad Ecológica

Punto Arrecifal	IEE	ISE	IIEPE	IRHI	ICH	Punto cercano Arias et al, 2011	Valor complejidad Arias et al., 2011	IRPE	IVE
M01	Muy Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Media
M02	Muy Bajo	Muy Bajo	Extremadamente Bajo	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Baja
M03	Muy Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Media
M04	Alto	Medio	Alto	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Media
M05	Alto	Medio	Alto	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Media
M06	Alto	Muy Alto	Muy Alto	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Alta
M07	Alto	Medio	Alto	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Media
M08	Alto	Medio	Alto	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Media
M09	Alto	Muy Bajo	Medio	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Baja
M10	Muy Bajo	Bajo	Muy Bajo	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Baja
M11	Alto	Medio	Alto	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Media
M12	Muy Bajo	Bajo	Muy Bajo	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Media
M13	Alto	Muy Bajo	Medio	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Media
M14	Medio	Medio	Medio	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Alta
M15	Medio	Medio	Medio	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Alta
M16	Alto	Medio	Alto	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Baja
M17	Bajo	Muy Alto	Medio	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Media
M18	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Media
M19	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Baja
M20	Muy Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Baja
M21	Muy Bajo	Muy Bajo	Extremadamente Bajo	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Baja
M22	Muy Bajo	Muy Bajo	Extremadamente Bajo	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Baja
M23	Bajo	Alto	Medio	Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Medio	Alta
M24	Bajo	Alto	Medio	Muy Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Bajo	Alta
M25	Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo	Muy Bajo	Alto	Mahahual	0.8	Bajo	Baja
S01	Muy Bajo	Alto	Medio	Medio	Medio	Punta Allen	0.7	Medio	Alta
S02	Muy Bajo	Bajo	Medio	Bajo	Medio	Yuyum	0.7	Bajo	Media
S03	Muy Bajo	Alto	Medio	Medio	Bajo	Boca Paila	0.65	Medio	Alta
S04	Muy Bajo	Alto	Medio	Medio	Medio	Punta Allen	0.7	Medio	Alta
S05	Muy Bajo	Alto	Medio	Bajo	Medio	Yuyum	0.7	Bajo	Alta
S06	Muy Bajo	Alto	Medio	Bajo	Bajo	Boca Paila	0.65	Bajo	Alta
S07	Muy Bajo	Bajo	Muy Bajo	Bajo	Bajo	Boca Paila	0.65	Bajo	Media
S08	Muy Bajo	Muy Alto	Medio	Muy Bajo	Medio	Yuyum	0.7	Muy Bajo	Extremadamente Alta
S09	Muy Bajo	Muy Alto	Medio	Medio	Bajo	Boca Paila	0.65	Medio	Alta
S10	Alto	Muy Bajo	Medio	Medio	Medio	Yuyum	0.7	Medio	Baja
S11	Alto	Muy Bajo	Medio	Medio	Medio	Yuyum	0.7	Medio	Baja

S12	Muy Alto	Alto	Muy Alto	Medio	Medio	Yuyum	0.7	Medio	Media
S13	Muy Bajo	Alto	Medio	Muy Bajo	Medio	Yuyum	0.7	Muy Bajo	Media
S14	Alto	Alto	Alto	Bajo	Bajo	Boca Paila	0.65	Bajo	Media
S15	Muy Alto	Medio	Alto	Bajo	Bajo	Boca Paila	0.65	Bajo	Media
S16	Muy Alto	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Boca Paila	0.65	Bajo	Media
S17	Alto	Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Boca Paila	0.65	Bajo	Media
S18	Muy Alto	Medio	Alto	Bajo	Medio	Punta Allen	0.7	Bajo	Alta
S19	Muy Alto	Muy Alto	Extremadamente Alto	Bajo	Bajo	Boca Paila	0.65	Bajo	Muy Alta
S20	Muy Alto	Alto	Muy Alto	Bajo	Medio	Yuyum	0.7	Bajo	Media
S21	Muy Bajo	Medio	Bajo	Bajo	Medio	Yuyum	0.7	Bajo	Baja

5.3.6.2. Anexo II Valores de los Índices de la Vulnerabilidad Social

Punto Arrecifal	ISCUNAM	ISIINECC	ISS	ICASUNAM	Ramsar?	Refugio pesqueros ≤ 3km?	ANP terrestres?	AMP?	PRANP?	ACCSANP?	SMP?	Total	ICMRN	ICAS
M01	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M02	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M03	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M04	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M05	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M06	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M07	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M08	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M09	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M10	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M11	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M12	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M13	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M14	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M15	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M16	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M17	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M18	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M19	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M20	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M21	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M22	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M23	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M24	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
M25	Media	Muy Alta	Alto	Muy Alta	No	No	No	No	No	No	Si	1	Baja	Media
S01	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	6	Muy Alta	Muy Alta

S02	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S03	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	6	Muy Alta	Muy Alta
S04	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	6	Muy Alta	Muy Alta
S05	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S06	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S07	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S08	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S09	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S10	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	6	Muy Alta	Muy Alta
S11	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	6	Muy Alta	Muy Alta
S12	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	6	Muy Alta	Muy Alta
S13	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S14	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S15	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S16	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S17	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	Si	Si	Si	No	Si	Si	6	Muy Alta	Muy Alta
S18	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S19	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S20	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta
S21	Media	Baja	Bajo	Alta	Si	No	Si	Si	No	Si	Si	5	Alta	Alta

5.3.6.3. Anexo III Valores de los índices de la Presión Local

Punto Arrecifal	IPL	Distancia píxel más cercano (km) CONABIO	IAP CONABIO	IEA
M01	Medio	0.01	2.05	Medio
M02	Medio	0.01	2.05	Medio
M03	Medio	0.11	0.99	Bajo
M04	Medio	0.33	0	Muy Bajo
M05	Medio	0.18	0	Muy Bajo
M06	Medio	0.48	0	Muy Bajo
M07	Medio	0.65	0	Muy Bajo
M08	Medio	0.73	0	Muy Bajo
M09	Medio	0.59	0	Muy Bajo
M10	Medio	0.44	0.99	Bajo
M11	Medio	0.28	0	Muy Bajo
M12	Medio	0.25	0.99	Bajo
M13	Medio	0.47	0	Muy Bajo
M14	Medio	0.28	3.83	Alto
M15	Medio	0.56	3.83	Alto
M16	Medio	0.71	0	Muy Bajo

M17	Medio	0.67	3.83	Alto
M18	Medio	0.48	0	Muy Bajo
M19	Medio	0.64	0	Muy Bajo
M20	Medio	0.26	17.85	Muy Alto
M21	Medio	0.16	2.05	Medio
M22	Medio	0.27	17.85	Muy Alto
M23	Medio	0.35	0	Muy Bajo
M24	Medio	0.01	1.73	Bajo
M25	Medio	0.01	1.73	Bajo
S01	Bajo	1.87	1.15	Bajo
S02	Bajo	1.19	2.54	Medio
S03	Bajo	3.96	0	Muy Bajo
S04	Bajo	0.18	0	Muy Bajo
S05	Bajo	1.38	2.86	Medio
S06	Bajo	0.99	5.42	Alto
S07	Bajo	1.09	0.18	Muy Bajo
S08	Medio	0.53	0	Muy Bajo
S09	Bajo	0.01	0	Muy Bajo
S10	Bajo	1.26	3.64	Alto
S11	Bajo	0.37	1.15	Bajo
S12	Bajo	0.26	0	Muy Bajo
S13	Medio	0.68	0	Muy Bajo
S14	Bajo	0.81	2.54	Medio
S15	Bajo	0.88	2.86	Medio
S16	Bajo	0.4	0	Muy Bajo
S17	Bajo	3.24	0	Muy Bajo
S18	Bajo	0.6	14.75	Muy Alto
S19	Bajo	1.26	1.54	Bajo
S20	Bajo	1.13	3.81	Alto
S21	Bajo	0.43	3.81	Alto

6. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES GENERALES

Capítulo 1

La revisión bibliográfica permitió mostrar que ya hay una tendencia internacional al uso de modelos dirigidos a evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes de coral desde la dimensión socio-ecológica. Se demuestra que en México ya se observa esta tendencia, hecho de gran relevancia puesto que se reconoce la codependencia de los arrecifes coralinos con las comunidades humanas asociadas o dependientes de estos ecosistemas. En general, la mayoría de los trabajos analizados presentan un modelo metodológico en el que incorporan la sensibilidad, la exposición y la capacidad de adaptación. A nivel nacional, la mayoría de los modelos presentados también son metodológicos, dirigidos principalmente a evaluar el impacto y la capacidad de adaptación, ésta última dirigida a las áreas naturales protegidas. Considerando las bases de datos y los motores de búsqueda seleccionados, quedan fuera importantes investigaciones de colegas que trabajan en los arrecifes en México, por lo que es importante hacer un ejercicio de reflexión acerca del tipo de literatura que se publica a nivel nacional, ¿cuáles son las posibles causas para que estos modelos no terminen en publicaciones de revistas indizadas?, ¿es realmente necesario publicar en revistas internacionales si un gran número de trabajos tienen como público meta a los tomadores de decisiones o manejadores de ANP? También sería necesario revisar los criterios hegemónicos de búsqueda que desarrollan muchos buscadores, los preferidos por el Sistema de Investigación Nacional, en lugar de valorar las formas de comunicación del conocimiento nacional.

Capítulo 2

Asimismo, se desprende de la interpretación de la base de datos generada, que en México se cuenta con indicadores de exposición, sensibilidad y capacidad de adaptación para los dos sistemas (ecológico y socio-económico) y por ello fue posible elaborar un marco metodológico teórico, con una propuesta de índices e indicadores, que permitirá evaluar la vulnerabilidad de los arrecifes ante el CC a nivel nacional o por regiones. El modelo propuesto incluye indicadores sobre especies de corales, peces, zooxantelas y otros organismos sensibles o resistentes a los factores de estrés asociados al CCG. Asimismo, incluye indicadores de comunidades humanas organizadas con gran potencial de capacidad de adaptación a este fenómeno. Por la proporción de trabajos analizados, se proponen más indicadores para el sistema ecológico que para el socio-económico (56 y 35 respectivamente) y las regiones del Caribe y del Golfo de California tienen el potencial de ser mejor evaluados ya que presentan el mayor número de indicadores potenciales para los dos sistemas. Es importante fomentar la generación de datos y monitoreo en las regiones con menor información de este tipo como en la región de Islas Revillagigedo.

Capítulo 3

Finalmente, se hizo un ejercicio donde se aplicó el modelo en la evaluación de la vulnerabilidad socio-ecológica en un conjunto de arrecifes coralinos y estimar su vulnerabilidad ante factores de estrés relacionados con el Cambio Climático. Se observó una mayor cantidad de puntos arrecifales con Vulnerabilidad Ecológica mayor en Sian Ka'an que en los puntos arrecifales de Mahahual, por lo contrario, la Vulnerabilidad Social es mayor en Mahahual que en Sian Ka'an. Se observó que en Mahahual no existen herramientas de manejo relacionadas a las áreas protegidas (marinas o terrestres), sitios Ramsar o refugios pesqueros lo que aumenta su vulnerabilidad. Este ejercicio demuestra lo importante de la aplicación del modelo ya que sus resultados permiten marcar prioridades de investigación y de manejo o de comparar el efecto de políticas públicas como son las ANP.

Las bases de datos continentales, atmosféricas y oceánicas desarrolladas en la UNIATMOS representaron un insumo importante para este estudio por su disponibilidad para la creación de índices e indicadores de vulnerabilidad de los municipios de México a los efectos de cambio climático; así como las variables oceanográficas de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, programa "Monitoreo de Arrecifes Coralinos". También al portal de geo información de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad; en donde se resalta la importancia del Sistema de Monitoreo de los Manglares de México.

Se recomienda incluir las respuestas de diversos grupos de organismos (bentónicos y de peces) ante el incremento sostenido de la SST para obtener valores de exposición más detallados que muestren el comportamiento a nivel ecosistema. Al realizar los monitoreos de blanqueamiento tomar datos *in situ* de temperatura, de las especies y los géneros de corales con blanqueamiento, la luz UV, las corrientes y la velocidad del viento, también los datos de biomasa de los herbívoros (peces y otros grupos), del porcentaje de cobertura de macroalgas y determinar la complejidad del hábitat. Para el sistema socioeconómico, determinar el grado de dependencia de las comunidades pesqueras para estimar la sensibilidad social ante eventos masivos de blanqueamiento, y la toma de datos a nivel localidad humana para tener datos que puedan utilizarse como indicadores a la misma escala que los ecológicos.

En esta investigación fue posible responder a las preguntas de investigación y elaborar un modelo conceptual y metodológico de evaluación de la vulnerabilidad de los arrecifes de coral ante los factores de estrés asociados al cambio climático.

Conclusiones:

Como en toda investigación, surgen nuevas preguntas de investigación, y en esta ocasión son más orientadas a cuestiones de interfaz ciencia-política-sociedad, ya que la disponibilidad y traducción

de datos para su uso común permitirá una sociedad mejor informada y por tanto tomará mejores decisiones, cuestión fundamental ante los eventos de CC. Por ejemplo: ¿Puede la ciencia ciudadana ser una herramienta que permita incrementar la resiliencia y capacidad de adaptación de los sistemas socio-ecológicos arrecifales en México? En algunos lugares del mundo se utilizó esta herramienta, por ejemplo, en Australia el proyecto Reef Citizen Science Alliance se ha identificado como una red que fomenta la ciencia ciudadana para promover la resiliencia futura de los arrecifes de coral de este sitio (<http://greatbarrierreefcitizenscience.org.au/about-us>). Otro ejemplo es Rescue a Reef, programa de ciencia ciudadana desarrollado por la Universidad de Miami, el cual está dedicado a la restauración de arrecifes por ciudadanos e investigadores que ha demostrado que la participación del público es una herramienta importante (<https://sharkresearch.rsmas.miami.edu/rescue-a-reef/>). Otros ejemplos de colaboración con instituciones académicas, es el proyecto Bleach Patrol; el cual tiene como objetivo el monitoreo del blanqueamiento del coral, a nivel mundial, por medio de la participación ciudadana para el estudio y protección de los arrecifes de coral promovido por la Universidad de Columbia y la World Surf League (<http://www.ldeo.columbia.edu/bleachpatrol/>). Para Latinoamérica, en Colombia, también se identificó una herramienta de este tipo, el Observatorio Pro-arrecifes, el cual tiene como objetivo mejorar la efectividad de la conservación de los arrecifes en Colombia por medio de la capacitación a los miembros de la comunidad para la toma sistemática de datos científicos (<https://icri-colombia.es.tl/Ciencia-Ciudadana.htm>). En México, la organización de la sociedad civil, Comunidad y Biodiversidad A.C., ha implementado proyectos con ciudadanos con el objetivo de capacitarlos para la toma de datos que permiten la evaluación y monitoreo de sus recursos naturales.

Se propone que la base de datos y el modelo propuesto se inserte en los objetivos de observatorios ciudadanos regionales en donde se fomenten investigaciones inter y transdisciplinarias, las cuales, además de dar continuidad a la generación de datos por parte de los científicos, se generaría un proceso de educación ambiental muy necesario y se facilitaría la traducción de la ciencia a políticas ambientales más efectiva. La relevancia del establecimiento de estos observatorios radica en la importancia de su uso como herramienta importante en momentos de blanqueamientos masivos, como ejemplo en México la plataforma de la agencia de gobierno Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), institución que pretende que la información del público en general, relacionada a eventos de blanqueamiento, sea utilizada para crear una alerta temprana para el país.

7. GLOSARIO

Adaptación: Proceso de ajuste al clima real o proyectado y sus efectos. En los sistemas humanos, la adaptación trata de moderar o evitar los daños o aprovechar las oportunidades beneficiosas. En algunos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar el ajuste al clima proyectado y a sus efectos (IPCC, 2014).

Cambio climático (CC): cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables (IPCC, 2014).

Capacidad de adaptación: Capacidad de un sistema para ajustarse al cambio climático a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas (IPCC, 2014).

Capacidad Adaptación Socio-Económica: Capacidad de las sociedades dependientes de los arrecifes de corales para ajustarse ante el cambio climático global a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas.

Exposición: Presencia de personas, medios de subsistencia, especies o ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales; infraestructura; o activos económicos, sociales o culturales en lugares y entornos que podrían verse afectados negativamente (IPCC, 2014).

Exposición Ecológica: Presencia de los arrecifes de coral en sitios que podrían verse afectadas negativamente ante los factores de estrés asociados al cambio climático.

Impactos: Los impactos generalmente se refieren a efectos en las vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras debido a la interacción de los cambios climáticos o fenómenos climáticos peligrosos que ocurren en un lapso específico y a la vulnerabilidad de las sociedades o los sistemas expuestos a ellos. Los impactos también se denominan consecuencias y resultados. Los impactos del cambio climático sobre los sistemas geofísicos, incluidas las crecidas, las sequías y la elevación del nivel del mar, son un subconjunto de los impactos denominados impactos físicos (IPCC, 2014).

Impacto Potencial: La exposición y la sensibilidad en combinación determinan el impacto potencial del cambio climático (GIZ,2016).

Impacto Potencial Ecológico: La exposición ecológica y la sensibilidad ecológica determinan el impacto potencial del cambio climático.

Mitigación: Intervención humana encaminada a reducir las fuentes o potenciar los sumideros de gases de efecto invernadero (IPCC, 2014).

Recuperación Potencial Ecológica: Capacidad del arrecife de coral para ajustarse ante el aumento de la SST a fin de moderar los daños potenciales, aprovechar las consecuencias positivas, o soportar las consecuencias negativas.

Resiliencia: Capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales de afrontar un fenómeno, tendencia o perturbación peligroso respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función esencial, su identidad y su estructura, y conserven al mismo tiempo la capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación (IPCC, 2014).

Resiliencia Socio-Ecológica: Capacidad de los sistemas ambientales de afrontar un fenómeno, tendencia o perturbación peligroso respondiendo o reorganizándose de modo que mantengan su función y su estructura.

Sensibilidad: Determina el grado en que un sistema está adverso o benéficamente afectado por la exposición a un cambio climático dado. La sensibilidad se forma típicamente por atributos naturales y/o físicos del sistema, incluyendo la topografía, la capacidad de los diferentes tipos de suelo para resistir la erosión, tipo de cobertura terrestre. Pero también se refiere a las actividades humanas que afectan a la constitución física de un sistema, como los sistemas de labranza, manejo del agua, agotamiento de recursos y presión de la población (GIZ, 2016).

Sensibilidad Ecológica: Determina el grado en que un sistema natural está adverso o benéficamente afectado por la exposición a un cambio climático dado.

Sensibilidad Socio-Económica: Determina el grado en que una comunidad humana está adversa o benéficamente afectada por la exposición a un cambio climático dado

Sistema Socio-Ecológico (SSE): Se considera a un SSE como un sistema social (y sus subsistemas y elementos) integrado a un sistema ecológico (y sus subsistemas y elementos), formando un conjunto inseparable, en el cual las relaciones recíprocas entre los componentes y subsistemas conducen la evolución del SES como un todo (Challenger, 2014).

Vulnerabilidad: Propensión o predisposición a ser afectado negativamente. La vulnerabilidad comprende una variedad de conceptos y elementos que incluyen la sensibilidad o susceptibilidad al daño y la falta de capacidad de respuesta y adaptación (IPCC, 2014).

Vulnerabilidad Ecológica: Propensión o predisposición de un sistema natural a ser afectado negativamente.

Vulnerabilidad Socio-Económica: Propensión o predisposición de una comunidad humana a ser afectada negativamente.