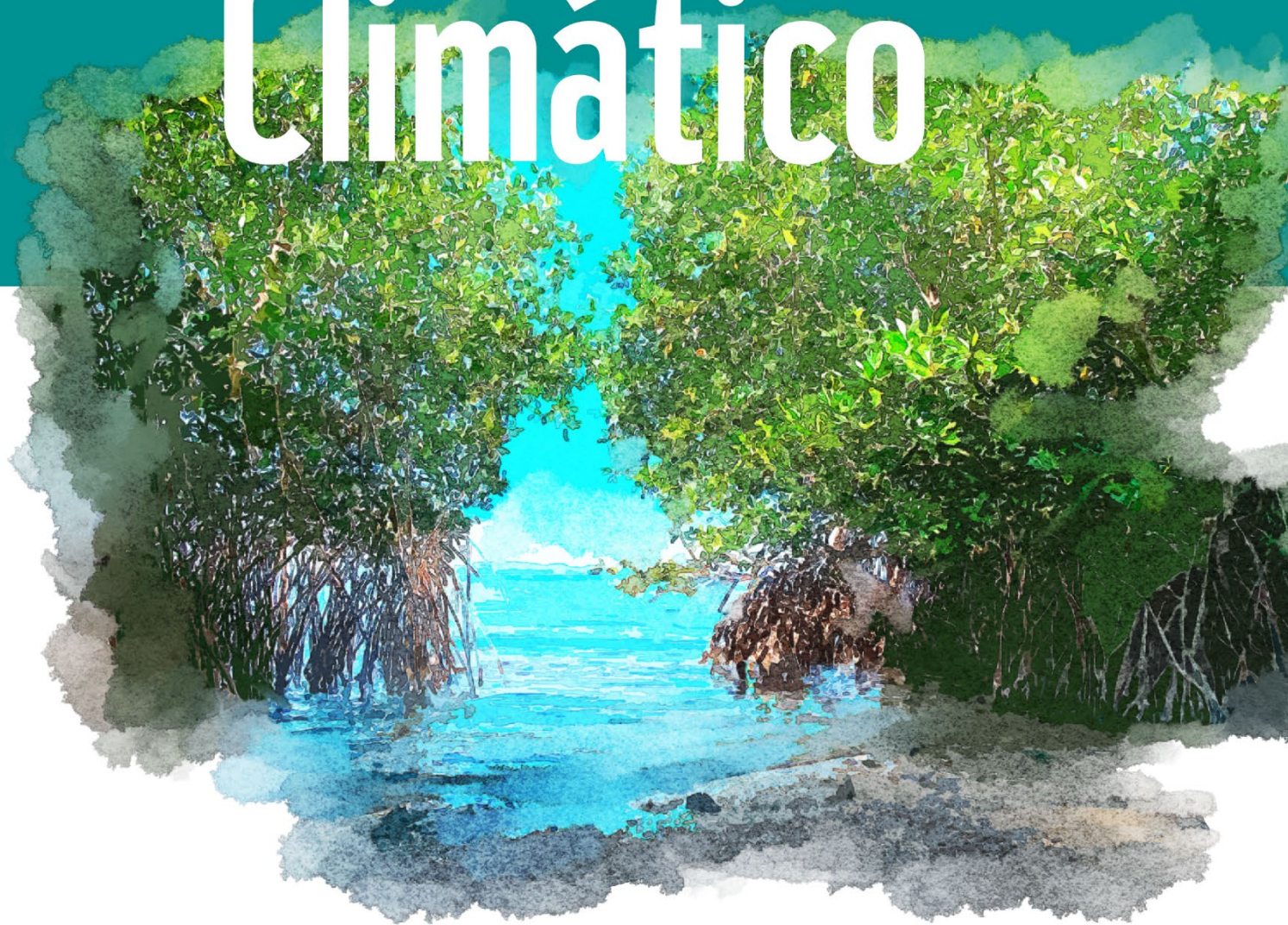


Diagnóstico del Estado del Ambiente Marino-Costero
del Pacífico de Costa Rica

Informe temático

Cambio Climático



MINISTERIO DE
AMBIENTE Y ENERGÍA

GOBIERNO
DE COSTA RICA



Aliados por
el manejo sostenible
del Pacífico



Contenido

1. Introducción	5
2. Metodología	5
3. Elementos conceptuales de contexto	6
4. Descripción de los impactos ambientales y socioeconómicos	8
2.1 Efectos sobre los recursos costeros por subregión en el Pacífico de Costa Rica	9
2.1.a. Pacífico norte	9
2.1.b. Pacífico central	9
2.1.c. Pacífico sur	10
2.2 Vínculos del cambio climático con el Declive de la calidad del agua marina	10
2.3. Vínculos del cambio climático con el Declive de la biodiversidad	14
2.3.1. Manglares	15
2.3.2. Litorales arenosos	16
2.3.3. Arrecifes de coral	16
2.3.4. Pastos Marinos	18
2.3.5. Tortugas Marinas	19
2.3.6. Mamíferos marinos	20
2.4. Vínculos del cambio climático con el Declive en la pesquería	21
5. Cambio climático en Costa Rica	24
6. Hallazgos, conclusiones y recomendaciones	29
7. Referencias	32
Anexo 1.	49
Indicadores de cambio climático para el GEM PACA	49
pH	49
Temperatura superficial del mar	49
Aumento del nivel del mar	49
Índice de riesgo climático	50
Índice de Niño Oceánico	51

Siglas y Acrónimos

Acrónimo	Organización
CNE	Comisión Nacional de Emergencia
CTICC	Comité Técnico Interministerial de Cambio Climático
CIMAR	Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología
CMNUCC	Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio climático
DCC	Dirección de Cambio Climático
ENOS	Fenómeno del Niño Oscilación del Sur
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GEM PACA	Gran Ecosistema Marino del Pacífico Costero Centroamericano
IMN	Instituto Meteorológico Nacional
IPCC	Panel Intergubernamental para el Cambio Climático
MINAE	Ministerio de Ambiente y Energía
MIDEPLAN	Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica
MIO	Módulo de Información Oceanográfica
NDC	Comunicación Determinada a nivel Nacional
OMI	Organización Marítima Internacional
OMM	Organización Meteorológica Mundial
ONI	Índice de Niño Oceánico
PTE / PTO	Pacífico Tropical Este / Pacífico Tropical Oriental
PNUD	Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo
RCP	Vías de Concentración Representativas
SINAC	Sistema Nacional de Áreas de Conservación
SINAMECC	Sistema Nacional de Métrica de Cambio Climático
SINAMOT	Sistema Nacional de Monitoreo de Tsunamis
SSP	Vías Socioeconómicas Compartidas
TSM	Temperatura Superficial del Mar
WWF	Fondo Mundial para la Naturaleza
ZCIT	Zona de Convergencia Intertropical

Resumen ejecutivo

El documento analiza los impactos del cambio climático en los ambientes costeros del Pacífico de Costa Rica, dentro del marco del Gran Ecosistema Marino del Pacífico Costero Centroamericano (GEM PACA). Este ecosistema, vital para el desarrollo de la economía azul en la región, enfrenta desafíos relacionados con el deterioro ambiental, desigualdad social y una gobernanza inadecuada. El informe, elaborado como parte del Proyecto Pacífico Sostenible, se centra en cómo el cambio climático agrava problemas ambientales compartidos con Panamá, como el declive de la calidad del agua marina, la biodiversidad y las pesquerías.

El análisis combina una revisión exhaustiva de literatura científica y consultas con especialistas, abordando fenómenos como la acidificación oceánica, el aumento del nivel del mar, olas de calor marinas y la desoxigenación. Estos factores generan efectos adversos en ecosistemas clave como manglares, arrecifes de coral, litorales arenosos y pastos marinos. Además, se evidencia que el cambio climático intensifica las amenazas socioeconómicas, afectando comunidades costeras dependientes de la pesca, agricultura y turismo.

El informe detalla los vínculos entre las dinámicas climáticas y las corrientes marinas, destacando cómo estos factores potencian problemas transfronterizos debido a la conexión estructural del océano. Por ejemplo, el desplazamiento de especies marinas y el cambio en la calidad del agua impactan directamente en la sostenibilidad de actividades pesqueras y en la biodiversidad regional.

Costa Rica ha avanzado en establecer marcos regulatorios y políticas para abordar el cambio climático, como la Estrategia Nacional de Cambio Climático y el Plan Nacional de Descarbonización. Sin embargo, el documento concluye que se requieren acciones más robustas y coordinadas para mitigar los impactos climáticos y mejorar la resiliencia de los ecosistemas y comunidades costeras en la región del GEM PACA.

1. Introducción

El Gran Ecosistema Marino del Pacífico Costero Centroamericano (GEM PACA) se extiende desde el centro-sur de México hasta el Golfo de Guayaquil, Ecuador, abarcando una superficie de aproximadamente 1,996,659 km². Esta región cuenta con importantes recursos marinos y costeros, los cuales proveen servicios ecosistémicos a la región y permiten el desarrollo de la economía azul para las comunidades que habitan el litoral. Asimismo, las problemáticas sociales como la pobreza, desigualdad social, migración, exclusión, violencia y narcotráfico ponen en evidencia la necesidad de desarrollar enfoques de gobernanza integrales y participativos. Estos problemas visibilizan el papel de grupos sociales que han sido históricamente marginados de las políticas de desarrollo aplicadas en la región.

El Proyecto Pacífico Sostenible es una iniciativa de los países de la región del Pacífico Costero Centroamericano, implementada por el Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) a través del socio ejecutor Fondo Mundial para la Naturaleza (WWF, por sus siglas en inglés) y es financiada por el Fondo Mundial para el Medio Ambiente (GEF). El Proyecto tiene el mandato de desarrollar e implementar un Sistema de Información Colaborativo, que incluya un conjunto de indicadores para medir el estado del GEM PACA, en aspectos sociales, ambientales, económicos, de gobernanza y de cambio climático. El objetivo medular es lograr la gobernanza marina transfronteriza necesaria para tratar la actual gestión inadecuada de los recursos compartidos, con la finalidad de gestionar los desafíos que enfrenta el GEM PACA.

El presente informe temático sobre el “Análisis de los impactos del cambio climático en los ambientes costeros del Pacífico de Costa Rica” se enmarca en el proceso de Diagnóstico Nacional del ambiente marino y costero del Pacífico de Costa Rica para el desarrollo del Análisis de Diagnóstico Transzonal de los ecosistemas del GEM PACA, liderado por el Proyecto Pacífico Sostenible. El Análisis se fundamenta en los resultados de los Análisis de los problemas nacionales de Costa Rica y los Análisis de los problemas transzonales para la región y los problemas compartidos con Panamá, que corresponden a los informes 1, 2 y 3 para el Diagnóstico Nacional de Costa Rica y a los resultados del Taller Binacional Panamá-Costa Rica.

El informe se desarrolla presentando elementos conceptuales que permitan establecer los vínculos, relaciones y sinergias que el cambio climático tiene con los problemas ambientales identificados para la región del GEM PACA, en particular aquellos que se comparten con Panamá. A partir de una revisión de literatura se presentan los impactos del cambio climático para el Pacífico de Costa Rica y los vínculos entre este fenómeno y los problemas ambientales compartidos con Panamá. El documento cierra con los hallazgos relevantes sobre la gestión del cambio climático en Costa Rica. El Anexo 1 presenta una actualización sobre la información para Costa Rica acerca de los indicadores de cambio climático para el GEM PACA.

2. Metodología

El informe temático se fundamenta en una revisión, análisis y comprensión de las relaciones entre el cambio climático, la variabilidad en el clima y los problemas ambientales

compartidos identificados para Costa Rica y Panamá. Se busca responder a la pregunta clave:

¿Cómo el cambio climático se vincula e intensifica los problemas ambientales identificados para los ecosistemas marino-costeros en la región del GEM PACA?

El abordaje metodológico involucró una búsqueda intensiva de información en diferentes bases de datos por medio de palabras clave. Esta información se filtró para utilizar solo literatura con fundamento científico y de acceso libre. Las referencias de literatura utilizadas para el análisis son documentos técnicos temáticos (globales, regionales o nacionales), artículos científicos, informes nacionales (o a escala de la región de interés), políticas, evaluaciones de riesgo, entre otros. Para complementar y validar esta información se mantuvieron conversaciones con especialistas, técnicos, funcionarios públicos e investigadores de diferentes ramas.

3. Elementos conceptuales de contexto

Las variaciones constantes en el clima son causadas por procesos naturales o antrópicos y se conocen como variabilidad climática (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2013a). Uno de los eventos climáticos que genera variaciones naturales en el clima es El Niño Oscilación del Sur (ENOS). Se trata de un fenómeno meteorológico periódico que altera la distribución de calor en la atmósfera y la hidrosfera en la región del Pacífico tropical (Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica [IMN], 2008). El cual tiene una gran influencia en la formación de eventos meteorológicos y en la climatología para Costa Rica y la región ecuatorial y tropical (ESA 2023; IMN 2008; Ormaza-González 2016). ENOS presenta una fase cálida que para la vertiente del Pacífico representa una reducción en la precipitación (con tendencia a sequías según la magnitud del evento), una reducción en los afloramientos de aguas ricas en nutrientes y un aumento en la temperatura atmosférica y la sensación térmica de calor (IMN, 2008; DCC MINAE, 2021a).

Es importante tener en cuenta que el ENOS y otros eventos climáticos no están relacionados al cambio climático (IMN, 2008). La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) lo define como “un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera e hidrosfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. El término se utiliza principalmente para describir los cambios recientes y observados en el clima que se han acelerado desde la Revolución Industrial debido a la actividad humana, como la quema de combustibles fósiles, la deforestación y la agricultura intensiva (IPCC 2013b; 2019a; 2021). Una de sus manifestaciones más evidente es el calentamiento global por el aumento sostenido en la temperatura atmosférica y oceánica (IPCC 2013b; 2021). Otros efectos de este fenómeno incluyen la acidificación oceánica, el aumento del nivel del mar o el aumento en la intensidad y frecuencia de eventos meteorológicos extremos (IPCC 2019b; 2021).

Algunos otros fenómenos meteorológicos relacionados con el clima son los vientos alisios, los huracanes, las tormentas, precipitaciones y sequías, y la misma brisa marina, entre otros (Dirección de Cambio Climático de Costa Rica – Minae [DCC MINAE], 2021). De acuerdo con su magnitud y duración estos fenómenos se pueden convertir en eventos climáticos extremos, con condiciones meteorológicas muy inusuales (IPCC, 2013a, IPCC, 2019a;

DCC MINAE, 2021). Estos eventos extremos también se denominan anomalías climáticas y pueden incluir aumentos sostenidos en la temperatura superficial del mar, de la atmósfera o tratarse de temporadas de huracanes más largas y fuertes de lo usual (IPCC, 2013a; IPCC, 2019a; IPCC, 2021). Los eventos extremos ejercen presión sobre la hacienda pública, al afectar carreteras, puentes, acueductos y otra infraestructura relevante (DCC MINAE, 2022).

Los Gobiernos y el sector público, la academia, la comunidad científica, organismos internacionales y regionales, el sector privado, la sociedad civil y actores sectoriales consideran que el cambio climático tiene un impacto significativo en Centroamérica y está empeorando muchos de los desafíos sociales, económicos y ambientales de la región (Barahona et al., 2022; Banco Interamericano de Desarrollo [BID], Ministerio de Ambiente y Energía [MINAE], Sistema Nacional de Áreas de Conservación [SINAC] y Dirección de Cambio Climático [DCC], 2015; DCC-MINAE, 2022; Lazo Vega, 2020; Magrin et al., 2014; Ministerio de Ambiente [MiAmbiente], 2020, 2021, 2022; Ministerio de Salud [MINSAL], 2021; Organización Meteorológica Mundial [WMO], 2024). El incremento de la temperatura, sequías, inundaciones, erosión costera, pérdida de biodiversidad, aumento de enfermedades por vectores y el aumento del nivel del mar, son algunos de los efectos directos de la variabilidad y cambio climático que están afectando a la República de Panamá (MiAmbiente 2022). En Costa Rica, también se comparten los efectos directos sobre la biodiversidad, la agricultura, la salud humana y la infraestructura (Gobierno de Costa Rica [GCR], 2018; DCC-MINAE, 2022; Costa Rica, 2021) y se considera que este fenómeno acentúa otras problemáticas sociales y económicas (DCC MINAE, 2022; MiAmbiente 2022; WMO 2024).

En las últimas décadas, para la región centroamericana, se han reportado eventos de aumentos de la temperatura del mar (con olas de calor) y acidificación de los océanos, lo que ha provocado blanqueamiento de corales, cambios en los patrones de precipitación y subida del nivel de mar (Magrin et al., 2014; von Schuckmann et al., 2024). De acuerdo con la Organización Meteorológica Mundial [WMO] (2024), el año 2023 fue el más cálido jamás registrado, el contenido de calor oceánico alcanzó su nivel más alto en los últimos 65 años y el aumento del nivel del mar llegó a un nuevo récord. La acidificación global ha aumentado continuamente durante los últimos 37 años (1985-2022), con una tasa observada de disminución del pH del océano de $-0,017$ unidades de pH por década (von Schuckmann et al., 2024b). La evolución de estas tendencias no es uniforme a escala regional en los océanos y los impactos se presentan de manera diferenciada de acuerdo con características locales (IPCC, 2019; IPCC, 2023; von Schuckmann et al., 2024).

Para la Región del GEM PACA se han identificado a el declive de la calidad del agua, el declive en la pesquería y el declive de la biodiversidad como los principales problemas ambientales compartidos entre Panamá y Costa Rica y los problemas ambientales transfronterizos para la región identificados en el diagnóstico realizado para Costa Rica son contaminación por sedimentos, químicos y plásticos, y la pesca ilegal y no regulada (GEF, WWF, PNUD 2024b). Los peligros meteorológicos y climáticos exacerbaron estas problemáticas durante el año 2023 en muchas partes del mundo (WMO 2024) y se proyecta que el clima futuro aumentará la gravedad de los impactos sobre los sistemas naturales y humanos (IPCC, 2023). Para Latinoamérica y el Caribe se reportaron 67 peligros meteorológicos, hidrológicos y climáticos durante el 2023 (CRED, 2023 en OMM, 2024), con 909 víctimas mortales documentadas y daños económicos estimados en 21 000

millones de dólares. Es probable que estos estimados sean mayores por falta de reportes y de información para algunos países. Para la región, el cambio climático y las perturbaciones socioeconómicas son los principales factores de inseguridad alimentaria aguda (por efecto sobre el sector agrícola y pesquero) y del aumento en el riesgo para la salud humana, ligados ambos a efectos indirectos sobre sistemas clave como el hídrico o el energético, con repercusiones adicionales sobre los medios de vida en zonas y poblaciones marginadas (Organización Meteorológica Mundial [OMM], 2024).

La conexión estructural para que estos problemas identificados sean considerados de naturaleza compartida y transfronteriza, con efectos simultáneos en dos o más países, está dada por la columna de agua y las dinámicas de su movimiento para la región del PTO. Se entiende que los recursos marinos móviles se desplazan por la columna de agua entre los países en distintas fases del ciclo de vida; que los nutrientes, contaminantes y diferentes partículas suspendidas en el agua se mueven con las corrientes marinas; y que el deterioro de los ecosistemas, aunque localizado, tiene efecto sobre poblaciones, recursos y flujos de biomasa y energía en zonas distantes que están conectadas por la columna de agua. Las dinámicas de las corrientes marinas para la región del PTO están influenciadas entre otras cosas por los movimientos estacionales de la ZCIT.

Por ejemplo, las corrientes marinas superficiales durante el primer trimestre del año presentan un patrón de movimiento distinto al del resto del año. En esta época la ZCIT está al norte y la dinámica del PTO es manejada por el esfuerzo del viento alisio del Caribe que pasa a través de los pasos topográficos de Centroamérica (Lizano, 2008), asociado con un afloramiento de aguas ricas en nutrientes al norte de la subregión Pacífico norte, el Domo térmico (Alfaro, 2008; Lizano, 2008). Cuando la ZCIT está al sur, el afloramiento frente al Golfo de Papagayo (o Domo térmico) desaparece, los vientos alisios del sur se intensifican y el afloramiento de Ecuador-Perú se muestra más intenso (Lizano, 2008). Con lo cual es factible considerar que existe un flujo continuo y estacional en la columna de agua marina en la región del GEM PACA, debido a las corrientes marinas e influenciado por eventos climáticos y meteorológicos (como el ENOS).

4. Descripción de los impactos ambientales y socioeconómicos

Esta sección describe los vínculos, relaciones y sinergias del cambio climático con los problemas ambientales compartidos con Panamá. Para una descripción de estos problemas y sus impactos ver GEF, WWF, PNUD (2024b). Como contexto, se presenta el efecto que tienen los peligros climáticos sobre los recursos marino-costeros para la región del Pacífico de Costa Rica. Esta información se muestra a escala subregional considerando, las amenazas y peligros climáticos, los elementos expuestos, los factores de vulnerabilidad y los ejes de desarrollo que varían para cada subregión.

A continuación, se elabora sobre los problemas ambientales identificados compartidos con Panamá y comunes para la región (declive de la calidad del agua de mar, declive de la biodiversidad y declive de las pesquerías). Estos problemas ambientales presentan patrones causales comunes, impulsados por una variedad de causas subyacentes interconectadas, cada una de las cuales contribuye al deterioro de los ecosistemas y que parecen estar ancladas a causas estructurales o raíz, como los modelos de desarrollo, la pobreza o falta de sensibilidad y educación (GEF, WWF, PNUD 2024c). El cambio climático

actúa como un catalizador de estas problemáticas, agudizando sus efectos y las relaciones entre las causas inmediatas, subyacentes y raíz.

2.1 Efectos sobre los recursos costeros por subregión en el Pacífico de Costa Rica

2.1.a. Pacífico norte

Las amenazas climáticas identificadas para esta subregión son el aumento del nivel del mar, las temperaturas extremas, lluvias y sequías intensas, y el aumento en la intensidad y frecuencia de ciclones tropicales. Los principales elementos costeros expuestos son las comunidades costeras, dependientes del sector agro y personas en condición de pobreza; las actividades, atractivos y servicios turísticos; la infraestructura vial y de servicios. Otros elementos relevantes son el sector agropecuario, la infraestructura energética y los clústeres tecnológicos. Los factores de vulnerabilidad contemplan la débil organización comunitaria, la falta de enfoque preventivo y de gestión de riesgo, limitadas fuentes de agua, alta dependencia en la actividad agrícola y turística, con pocos encadenamientos productivos y una infraestructura turística y de servicios no adaptada. Otros factores relevantes son el deterioro de los ecosistemas, las prácticas agrícolas no sostenibles y la falta de ordenamiento territorial. Los impactos esperados en esta subregión incluyen la disminución en la disponibilidad de agua, pérdida de infraestructura y servicios turísticos, afectación de ecosistemas costeros y terrestres, pérdida de cosechas y producción pecuaria, y disminución de la generación eléctrica. El Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica (MIDEPLAN) y la Contraloría General de la República han realizado estimaciones sobre los daños y pérdidas por efectos de eventos extremos de lluvia para el periodo de 1988-2018 con pérdidas entre los 10 000 y 50 000 millones de colones en casi todos los cantones. El sector agropecuario ha sido impactado principalmente por la sequía y por las lluvias extremas, estas últimas han afectado también la infraestructura vial y la infraestructura para vivienda y servicios (electricidad, acueducto y alcantarillado, telecomunicaciones, aeropuertos, entre otros) (DCC MINAE MIDEPLAN 2022a).

2.1.b. Pacífico central

Las amenazas climáticas para esta subregión son el aumento del nivel del mar, las temperaturas extremas, y lluvias y sequías más intensas. Los principales elementos costeros expuestos son las ciudades costeras, la infraestructura de servicios y activos turísticos, los ecosistemas marinos y terrestres (como activos turísticos), personas en condición de pobreza y familias con jefatura femenina. Los factores de vulnerabilidad incluyen la alta dependencia de la actividad turística y agropecuaria, falta de conocimiento sobre cambio climático y gestión de riesgos, limitadas oportunidades de empleo, falta de planificación y ordenamiento territorial, escasas fuentes de agua, y falta de un enfoque preventivo en el desarrollo de actividades empresariales. Los impactos esperados son deterioro de la calidad de servicios turísticos, disminución en la disponibilidad de agua, pérdida de infraestructura, pérdida de cosechas y producción pecuaria, y afectación a ecosistemas marino-costeros y terrestres. Las estimaciones sobre los daños y pérdidas asociados con eventos extremos de lluvia para el periodo de 1988 a 2018 muestran pérdidas entre 10 000 y superiores a 100 000 millones de colones para los cantones costeros. Los eventos extremos de sequía han impactado principalmente al sector

agropecuario y las precipitaciones extremas han tenido impacto sobre la infraestructura vial (con mayores pérdidas en el cantón de Parrita) y de servicios (como electricidad, acueductos y alcantarillados, telecomunicaciones, salud), para el sector agro, los ríos y quebradas (por deterioro de cuencas), y los aeródromos (DCC MINAE MIDEPLAN, 2022b).

2.1.c. Pacífico sur

Esta subregión es colindante con la zona norte del Pacífico de Panamá. Las amenazas climáticas para esta subregión son el aumento del nivel del mar, las temperaturas extremas, lluvias y sequías intensas, y el aumento en la intensidad y frecuencia de ciclones tropicales. Los elementos expuestos son las comunidades costeras, indígenas (que desarrollan actividades turísticas), personas en condición de pobreza y mujeres en labores de cuido; la infraestructura portuaria, turística y de alcantarillado sanitario; MiPymes turísticas, pequeños y medianos productores, comerciantes y empresarios, el depósito libre de Golfito y las fincas agrícolas y ganaderas. Los factores de vulnerabilidad incluyen la falta de oportunidades para emprendimientos, altos índices de pobreza, falta de ordenamiento territorial y de enfoque preventivo en la gestión de infraestructura y territorio; ecosistemas degradados, sistemas de aprovechamiento de aguas obsoletos, y poco estímulo a las MiPymes. Los impactos esperados son la disminución de la disponibilidad de agua potable, daños en infraestructura vial, portuaria, turística y comercial, pérdida de cosechas y producción pecuaria, y afectación de ecosistemas marino-costeros y terrestres. Las estimaciones de daños y pérdidas por eventos extremos de lluvia para el periodo 1988 a 2018 muestran pérdidas de entre 10 000 y superiores a 100 000 millones de colones para los cantones costeros. Los eventos de sequía han tenido mayor impacto sobre el sector agropecuario y las lluvias extremas han afectado la infraestructura vial y de vivienda, los ríos y quebradas (por deterioro ambiental), el sector agropecuario y el de la salud, y en menos medida la infraestructura para servicios (DCC MINAE MIDEPLAN 2022c).

2.2 Vínculos del cambio climático con el Declive de la calidad del agua marina

El cambio climático tiene un efecto directo sobre el declive de la calidad del agua en los océanos, que a su vez tiene efecto sobre el declive de la biodiversidad y las pesquerías. Las condiciones físicas y químicas de la columna de agua del medio marino, tales como la temperatura, salinidad, pH, oxígeno disuelto, transparencia y concentración de nutrientes, entre otros, determinan el tipo de comunidades que se pueden presentar en una región. Las variaciones estacionales en estas condiciones están relacionadas con procesos que ocurren a una mayor escala espacio temporal, y tienen influencia sobre las comunidades bentónicas y pelágicas (Giraldo et al., 2012). El cambio climático está modificando la forma en que los contaminantes (y larvas) se desplazan por el medio ambiente global, en gran medida modificando la química de los océanos y afectando la fisiología, la salud y la ecología alimentaria de la biota marina (Alva et al., 2017), principalmente con el aumento de la temperatura y la acidificación oceánica (IPCC 2019).

El aumento de la temperatura superficial del mar y en el pH derivan de las propiedades físicas y químicas del agua, como la capacidad para absorber calor (aumentando el nivel medio del mar) y la capacidad de absorción de CO₂ atmosférico que causa la acidificación oceánica, alterando las dinámicas en la columna de agua (IPCC 2014, 2019). Los cambios en la temperatura aumentan la estratificación de la columna, que limita la circulación de nutrientes en diferentes profundidades (Li et al., 2020; Lizano, 2019, 2020; Ying et al., 2022) ; considerando al incremento en la absorción de calor y al aumento de la temperatura

superficial del mar se han duplicado los eventos de olas de calor marinas desde 1982 (Carrasco et al., 2023; IPCC, 2019b).

Se ha reportado que estas anomalías térmicas, en conjunto con la acidificación, han causado eventos masivos de blanqueamiento de corales desde los años 80 para la región del Pacífico tropical, que se han asociado con el fenómeno de El Niño (Glynn et al., 2017; Hoegh-Guldberg et al., 2011). Estos cambios en la temperatura del agua también pueden favorecer la aparición de floraciones de algas nocivas (FAN) con efecto sobre la salud humana y de los ecosistemas (Piedra y Piedra 2007). La dinámica natural de las FAN se relaciona con cambios en la temperatura, luminosidad, salinidad del agua y afloramientos por dinámicas oceanográficas (Loza Álvarez et al., 2018). El aumento en su frecuencia está vinculado con aumentos en la concentración de nutrientes por agroquímicos, pesca con explosivos o químicos, contaminación por componentes orgánicos y la actividad portuaria (por la introducción de especies), (Freer y Vargas Montero 2003; Leiva y Soto 2010; Vargas Montero 2004). El cambio climático intensificará la frecuencia, duración, abundancia y diversidad de las floraciones de algas, incluso de aquellas que son nocivas (Ugarte et al., 2022).

El aumento en la concentración de nutrientes y otras partículas disueltas en la columna de agua marina (antibióticos, fármacos, pesticidas, o patógenos entre otros) está relacionado con el aumento en la escorrentía causada por precipitaciones más intensas. Según las proyecciones, la intensidad y variabilidad creciente en la precipitación agravarán el riesgo de inundaciones y sequías, lo que afecta la calidad del agua y agudiza la polución por múltiples causas (Bates et al., 2008). El exceso de agua lluvia se drena a las cuencas hidrográficas recogiendo residuos sólidos como plásticos y otros contaminantes como fertilizantes, que desembocan en la columna de agua marina. Para Costa Rica se estima que entre 60 % y 90 % de la contaminación marina se debe a algún tipo de plástico (Ross et al., 2018). En Panamá se reporta la descarga al mar de 102 299 toneladas de “basura” generada en tierra; por ejemplo, para el río Matías Hernández (cuyas aguas terminan en el Pacífico por el río Juan Díaz) los residuos flotantes de mayor presencia identificados en una barrera flotante fueron botellas plásticas, FOAM, envases de polietileno de alta densidad y textiles¹. En particular, Delvalle de Borrero y colaboradores (2020) manifiestan que el aumento en la concentración y tipos de polímeros para las costas de Panamá está influenciado por las corrientes marinas, los vientos, la proximidad al Canal de Panamá y otras actividades antrópicas.

Este plástico se deteriora en partículas de microplástico que se han convertido en un problema ambiental que contribuye al aumento de las concentraciones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y reduce la capacidad de secuestro de carbono de los océanos (Parvez et al., 2024; Shivika et al., 2023; Syama et al., 2024). Esto debido a que el fitoplancton reduce su capacidad fotosintética y el zooplancton altera sus patrones de consumo de fitoplancton (Parvez et al., 2024; Shivika et al., 2023). En presencia de altas concentraciones de micro plásticos el zooplancton aumenta su ingesta reduciendo la presión sobre el fitoplancton, lo que puede conducir a eventos de FAN (Parvez et al., 2024). Con lo cual, la ingesta de micro plástico por el zooplancton tiene el potencial para acelerar la desoxigenación de los océanos (Kvale y Oschlies 2022).

¹ MiAmbiente. Ley 1 y Ley 187 escudos contra el plástico. Disponible en: <https://miambiente.gob.pa/escudos-contra-el-plastico-ley-1-y-ley-187-mantienen-nuestros-mares-sanos-y-limpios/>

De igual forma, la presencia de plásticos y microplásticos en el océano reducen la capacidad de penetración de la luz en la columna de agua y sirven de estructuras para la colonización por bacterias y comunidades microbianas (fomentando la producción de materia orgánica). También, en presencia de agua de mar, este plástico libera lixiviados que aumentan la contaminación de la columna de agua y contribuyen con la reducción en la concentración de oxígeno (Parvez et al., 2024). Además, estudios recientes de laboratorio demuestran que la descomposición de los plásticos en el mar impulsa la acidificación de los océanos (Romero Castillo et al., 2023).

En este sentido, la interacción de variables climáticas (temperatura y pH) y bioquímicas (como nitrógeno y fósforo derivados de la escorrentía y lixiviados) están generando eutrofización en las zonas costeras, lo que implica un enorme consumo de oxígeno que, combinado con una ventilación baja (que limita la saturación de oxígeno), una marcada estratificación vertical de la columna de agua (que reduce la mezcla de oxígeno) y el aumento de la temperatura del océano (que reduce la capacidad del agua para retener oxígeno) están causando el aumento de las zonas bajas de oxígeno (hipóxicas) en zonas costeras del océano y en aguas abiertas (García-Soto et al., 2021; IPCC, 2019b; Laffoley y Baxter, 2019).

En las zonas hipóxicas donde los niveles llegan a ser tan bajos, que las especies no pueden sobrevivir (Altier y Gedan, 2015). Esto es especialmente notable en las zonas costeras donde se combina con la contaminación (Xiong et al., 2023) y se hace evidente el efecto, por ejemplo, con el aumento en la frecuencia, duración y abundancia de las FAN (Ugarte et al., 2022; Xiong et al. 2023). Altier y Gedan (2015) postulan que las variables de cambio climático contribuyen con la formación de zonas muertas por hipoxia al actuar sinérgicamente entre sí y con otros desencadenantes antrópicos reconocidos de hipoxia, como la eutrofización.

La desoxigenación del océano en aguas abiertas es causada por aumentos en la temperatura y el contenido de calor (que causa una menor solubilidad del oxígeno), una mayor estratificación de las capas de agua (que reduce la ventilación), un mayor consumo de oxígeno por aumento en las tasas metabólicas y de respiración de los organismos (Laffoley y Baxter, 2019). Los conjuntos de datos, que abarcan el período 1970-2010, indican que el mar abierto ha perdido oxígeno en un rango muy probable del 0,5% al 3,3 % en los 1 000 m superiores (IPCC, 2019b). Esta desoxigenación, en conjunto con el aumento en la frecuencia e intensidad de las olas de calor marino deterioran la calidad de la columna de agua marina para proveer hábitat. Regiones que históricamente han presentado concentraciones de oxígeno disuelto bajas se están expandiendo y nuevas regiones hipóxicas están apareciendo (Laffoley y Baxter, 2019). Para el PTO se han identificado dos grandes zonas con concentraciones de oxígeno bajas (ODZ, *Oxygen Depleted Zones* por sus siglas en inglés) (Figura 1), al norte se asocia con el Domo térmico de Costa Rica y con el afloramiento de Tehuantepec en México y hacia el sur con el afloramiento del Perú (Kwiecinski & Babbín, 2021).

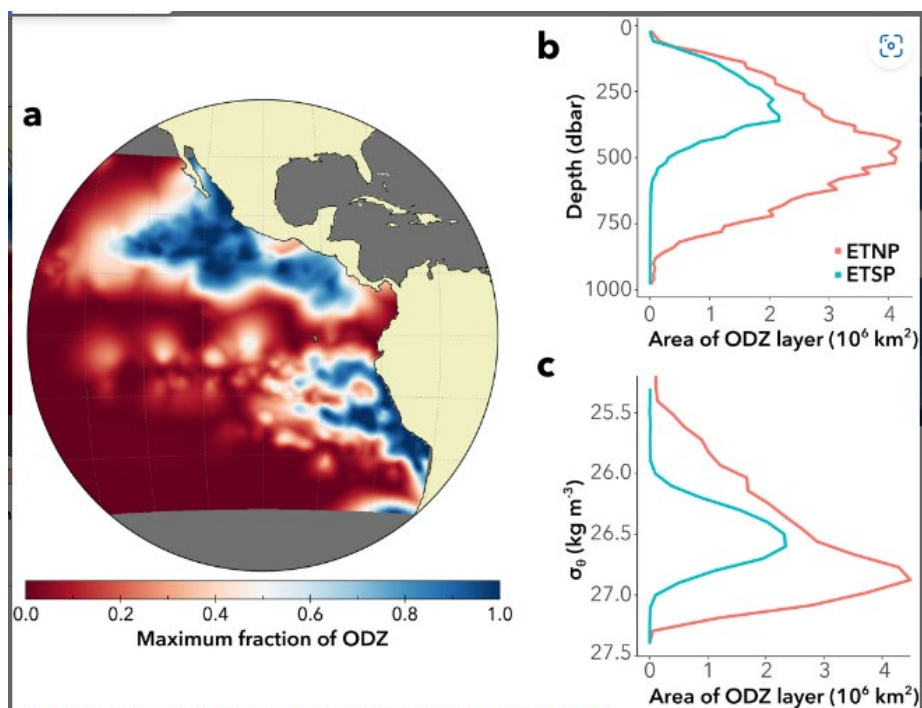


Figura 1. a) Fracción máxima de veces que una parcela de agua se identifica como parte de la zona con deficiencia de oxígeno, b y c) extensión del área horizontal de la zona anóxica con respecto a (b) la profundidad o (c) la densidad de las ODZ, en rojo la zona. Fuente: Tomado de Kwieciński & Babbín, (2021)

Las olas de calor marinas se definen como anomalías prolongadas de altas temperaturas del mar (por encima de un percentil basado en una línea base), que pueden ser identificadas por su duración, intensidad, tasa de evolución y alcance espacial (Carrasco et al., 2023; Lin et al., 2023; Zhang et al., 2023). Está reportado que el aumento en la frecuencia y duración de estos eventos están relacionados con la tendencia de aumento de la TSM (Carrasco et al. 2023; von Schuckmann et al. 2024). Para el Pacífico tropical se ha reportado que estos eventos están estrechamente relacionados con el fenómeno de El Niño (Carrasco et al., 2023; Lin et al., 2023) que aumenta la duración, intensidad y alcance de estas olas de calor en la región, cambiando las condiciones de la columna de agua (Oliver et al., 2018). Si bien estas anomalías pueden ser pronosticadas con meses de anticipación² sus impactos ecológicos y socioeconómicos son de amplio alcance (Lin et al., 2023; von Schuckmann et al., 2024; Zhang et al., 2023).

Las olas de calor marinas afectan negativamente a la columna de agua, especies, procesos ecológicos, ecosistemas, biomas y servicios ecosistémicos (Carrasco et al., 2023; von Schuckmann et al., 2024; Zhang et al., 2023), y no se limitan a la superficie del mar, alcanzan el océano profundo y la atmósfera por conexiones remotas que contribuyen con sequías severas o precipitaciones intensas y las olas de calor terrestres (Zheng et al., 2023). Todo esto tendrá un efecto sobre el desarrollo de medios de vida como la pesca o el turismo (Centro de Servicios de Gestión Meteorológica [CSGM], 2020; García-Soto et al., 2021; IPCC, 2022; Li et al., 2020; Ying et al., 2022).

² Lindsey R. (2022). Today's seasonal climate models can predict ocean heat waves months in advance. Science information for a climate smart nation. Disponible en: <https://www.climate.gov/news-features/featured-images/today%E2%80%99s-seasonal-climate-models-can-predict-ocean-heat-waves-months>

Finalmente, al aumento de las concentraciones de CO₂ atmosférico, que se disuelve en el agua del océano causa la producción de ácido carbónico (H₂CO₃) al disociarse en bicarbonato (HCO₃) y iones de hidrógeno y altera el pH del océano, se le conoce como acidificación oceánica (IPCC, 2013; 2014a; 2019b). Esta problemática ambiental es de tal magnitud que se contempla en el ODS 14: Vida submarina, específicamente en la meta SG14.3: *minimizar y abordar los impactos de la acidificación de los océanos*. Esta absorción actual de CO₂ altera el sistema de carbonatos de la columna de agua del océano, amenazando los ecosistemas marino-costeros, así como a las comunidades humanas de las que dependen (von Schuckmann et al., 2024). Los efectos en cascada y las sinergias con otros estresores climáticos no están del todo bien estudiados, lo que aumenta la incertidumbre sobre la magnitud y alcance de los impactos de la acidificación sobre la columna de agua, la biodiversidad y las pesquerías.

La región del Pacífico tropical presenta una alta variabilidad decadal e interanual en el pH, que puede o no estar asociada con los fenómenos de surgencias y afloramientos de aguas frías influenciados por las dinámicas oceanográficas naturales (Ishii et al., 2020; Yasunaka et al., 2019). El Pacífico norte de Costa Rica se ha reportado como una zona de mayor acidificación, asociada con la surgencias y afloramientos en golfo de Papagayo (Domo térmico) (Sánchez-Noguera et al., 2018). La tendencia a largo plazo de la pCO₂ es positiva para todo el Pacífico con una tasa promedio de $1,8 \pm 0,1 \mu\text{atm año}^{-1}$; a lo largo del ecuador la tendencia es $> 2 \mu\text{atm año}^{-1}$, vinculada con el forzamiento ocasionado por la Oscilación Decenal del Pacífico (Yasunaka et al., 2019).

2.3. Vínculos del cambio climático con el Declive de la biodiversidad

El cambio climático es un propulsor del declive de la biodiversidad, los ambientes marino-costeros son especialmente sensibles por ser hábitats de transición. Los diferentes ecosistemas (como manglares, litorales arenosos, arrecifes de coral, o pastos marinos) son impactados directamente por los peligros climáticos para el ámbito terrestre y marino, como el aumento de la temperatura (atmosférica y oceánica) y la acidificación del mar. En particular, la acción del cambio climático reduce la capacidad de recuperación de estos ecosistemas, que al actuar en sintonía con estresores antrópicos (como contaminantes) reducen aún más esta resiliencia.

Por ejemplo, la acidificación impacta directamente en los esqueletos y conchas de los organismos calcáreos tales como: corales, algas, moluscos y algunos tipos de plancton (CMEP, 2017; Dupont y Pörtner, 2013; IPCC, 2022; Johnson et al., 2019). Estos organismos se encuentran en la base de la cadena alimenticia de muchas otras especies que están en los niveles superiores, donde muchas de ellas son de interés comercial (García-Soto et al., 2021; IPCC, 2022; Ying et al., 2022). Además, estos ecosistemas y su biodiversidad están sometidos a las amenazas antrópicas, que se magnifican con el calentamiento global y el aumento de los GEI.

La costa del Pacífico de Panamá se caracteriza por estar compuesta por ambientes diversos que incluyen costas rocosas, arenosas y fangosas, así como bosques de manglares, pequeños bancos de pastos marinos aislados y arrecifes de coral (Maté, 2003). Estos ecosistemas también están presentes en la Costa Pacífica de Costa Rica (Cortés y Wehrtmann, 2009). Ambas costas presentan la influencia de afloramientos que condicionan las características oceanográficas y fisicoquímicas de estos ambientes. Al este del golfo de Panamá se encuentra el afloramiento del golfo de Panamá (Maté 2003) y al norte de Costa

Rica, el afloramiento del Golfo de Papagayo (domo térmico) (Lizano, 2008). En ambos casos, estos afloramientos traen aguas frías ricas en nutrientes (Lizano, 2008; Maté, 2003; Randall et al., 2020). En particular, para el Golfo de Panamá se ha identificado que estas aguas frías regulan las condiciones térmicas permitiendo una recuperación más rápida de los corales debido a un mayor crecimiento, y sobrevivencia al compararlos con los arrecifes del golfo de Chiriquí cercano a la frontera con Costa Rica (Randall et al., 2020).

A continuación, se detallan los efectos y sinergias del cambio climático que ejercen presión sobre ecosistemas marino-costeros calve (manglares, litorales arenosos, arrecifes de coral, y pastos marinos) y un grupo taxonómico migratorio clave (las tortugas marinas) para ejemplificar cómo el cambio climático se vincula e intensifica el declive de la biodiversidad.

2.3.1. Manglares

El rango de distribución de los manglares está limitado por el rango de temperatura para la fotosíntesis (de 28 a 32 °C) y por las bajas temperaturas marinas que limitan la flotación de los propágulos del mangle (Ward et al., 2016). Aumentos en la temperatura atmosférica superiores a los 32 °C reducen la productividad del bosque; a los 35 °C se puede entrar en estrés hídrico, que afecta la estructura radicular y el establecimiento de plántulas; y a temperaturas superiores a los 38 °C ya no hay fotosíntesis en absoluto (Ward et al., 2016). La mayoría de los manglares producen la máxima cantidad de retoños cuando la temperatura media del aire es de 25°C. La producción de hojas se detiene a temperaturas ambientales menores de 15°C y se ve afectada a temperaturas superiores a 25°C (Cambers et al., 2008).

El aumento de la temperatura del agua puede causar eutrofización y reducir la disponibilidad de luz, oxígeno, carbono y nutrientes en la columna de agua (que es parte del hábitat de manglar) para especies estuarinas (Cambers et al., 2008) (Para mayores detalles sobre cambios en la calidad del agua ver sección anterior). En conjunto con una mayor evapotranspiración y los cambios en la precipitación, el aumento de la temperatura causa alteraciones de la columna de agua, como la salinización, que resulta en una menor tasa de reclutamiento de plántulas, sobrevivencia, crecimiento y una reducción de la capacidad fotosintética (Cambers et al., 2008). Esto reduce la capacidad del ecosistema para recuperarse ante eventos extremos y amenazas antrópicas. Por otro lado, los eventos extremos y el aumento del nivel del mar causan pérdida de hábitat por la erosión de márgenes (Cambers et al., 2008; Ward et al., 2016) y aumentan la carga de contaminantes sólidos y líquidos que llegan al ecosistema por escorrentía.

Para Costa Rica los cambios en los usos de la tierra han hecho que la cobertura del manglar sea cada vez menor (Cárdenes, 2003). En Panamá, el Ministerio de Ambiente (MiAmbiente) estima que en la última década se han perdido más de 9 mil hectáreas de bosque de mangle debido a la expansión de la frontera agrícola y el desarrollo de infraestructura para ganadería, cultivo de camarón y turismo³. En particular, para este ecosistema el cambio climático reduce su capacidad de resiliencia y en conjunto con amenazas antrópicas y sus impactos favorecen el declive de la biodiversidad que allí se encuentra.

³ La Prensa. Disponible en: <https://www.prensa.com/sociedad/en-una-decada-panama-perdio-9-mil-17-hectareas-de-manglares/>

2.3.2. Litorales arenosos

La mayoría de las playas del Pacífico de Costa Rica experimentan procesos de erosión costera y retroceso de la línea de costa (Lizano, 2013). Las playas de mayor erosión en el Pacífico de Costa Rica son las que están expuestas al oleaje de mar abierto, no dentro de golfos o bahías. En los deltas o desembocaduras de ríos se esperan grandes cambios por la alteración de fuentes y sumideros de sedimentos (ríos Tárcoles, Parrita, Paquita o Savegre). Por otro lado, muchos residentes costeros del Pacífico reportan que “el mar empezó a meterse desde hace poco más de 50 años” (Lizano, 2013). En Panamá MiAmbiente advierte sobre la pérdida de zonas costeras e islas (tanto en el Pacífico como en el Caribe) para el año 2050 debido a efectos del cambio climático (MiAmbiente 2020; 2021). Observaciones recientes muestran que estos fenómenos se acentúan durante ciclos de mareas extraordinarias en conjunción con el aumento del nivel del mar, el ENOS y tormentas locales o remotas (Lizano y Lizano 2010; Lizano 2013).

En conjunto con la erosión costera y la pérdida de playas, se debe considerar la acidificación de las playas. Debido a la acidificación oceánica y a el aumento del nivel del mar hay un aumento en la penetración de las olas sobre los litorales y un aumento en los niveles freáticos por infiltración (que también lleva a la salinización de cuerpos de agua de uso potable). Estudios realizados en las Islas Canarias han mostrado cómo la acidificación oceánica tiene un efecto negativo sobre la meiofauna en sustratos arenosos (Gonzales Delgado, 2024). Esta acidificación del mar tendrá un efecto sobre los litorales arenosos y la biodiversidad que allí habita, al cambiar la química en las playas y modificar la relación con agentes patógenos para diferentes especies, como las tortugas marinas (Patricio et al., 2021).

Los impactos de esta erosión y la acidificación de las playas incluyen la pérdida de hábitat para biodiversidad (BIOMARCC SINAC, 2013; Drews y Fonseca, 2009) y turismo de playa y mar (Drews y Fonseca 2009; Picón et al., 2014), la pérdida de infraestructura vial pública (Aragón Valle et al., 2019; BIOMARCC SINAC, 2013; Ruiz et al., 2019), y afectaciones a desarrollos y poblados (Drews y Fonseca, 2009; Lizano Araya y Lizano Rodríguez, 2020; Lizano Araya y Lizano Rodríguez, 2023; Picón et al., 2014).

2.3.3. Arrecifes de coral

Se ha reportado que las anomalías térmicas relacionadas con cambio climático, en conjunto con la acidificación, han causado eventos masivos de blanqueamiento desde los años 80 para la región del Pacífico tropical, asociadas con el fenómeno de El Niño (Glynn et al., 2017; Hoegh-Guldberg et al., 2011). Bajo escenarios de cambio climático, cuando el CO₂ atmosférico se duplique, y ocurra una anomalía térmica de 2 a 3°C, sostenida durante más de dos meses, en la época más cálida del año, los arrecifes de coral en la región del Pacífico Tropical Oriental pueden perderse por completo (Manzello et al., 2017).

Los arrecifes de coral son ecosistemas clave para la biodiversidad marina (Dao et al., 2021; Hoegh Guldberg et al., 2017). La mayoría se encuentran en aguas claras y someras de la franja tropical, donde experimentan limitados cambios estacionales en la temperatura del agua (de 4 a 5°C) y una temperatura máxima promedio de 30°C (Dao et al., 2021; Kleypas et al., 1999)⁴. El estrés térmico causado por aumentos en la temperatura ocasiona la

⁴ Este promedio puede variar de acuerdo con la ubicación geográfica y la geomorfología de la ubicación del arrecife (Dao et al. 2021).

pérdida de las zooxantelas en los pólipos de coral que forman arrecifes en un evento conocido como blanqueamiento (Claar et al., 2018). La pérdida de estos simbioses reduce la capacidad metabólica de los corales y puede ocasionar su muerte si se mantiene por un tiempo prolongado (Claar et al., 2018; Schoepf et al., 2015). El estrés térmico inicia cuando el agua se calienta por más de un par de días seguidos (2 a 3) en 1°C más que la temperatura promedio más alta del mes más caliente del verano (Glynn & D'Croz 1990; Schoepf et al., 2015).

La vitalidad de los corales se reduce significativamente a 30-32°C, si este aumento de la temperatura se mantiene durante un periodo de 10 semanas se inicia el blanqueamiento, si el aumento es sostenido por más de tres meses la mortalidad parcial o total del coral será el resultado (Claar et al., 2018; Dao et al., 2021; Glynn & D'Croz, 1990; Goreau & Hayes, 2005; Kleypas et al., 1999; Schoepf et al., 2015)⁵. En condiciones normales de temperatura (21-29°C) (Dao et al., 2021; Glynn & D'Croz, 1990; Guan et al., 2015) esta vitalidad se mantiene alta (Glynn & D'Croz, 1990). Actualmente, el cambio climático, en conjunto con el fenómeno de El Niño, ha cambiado el régimen de temperatura superficial del mar hacia condiciones menos ventajosas para este ecosistema clave (Dao et al., 2021). Bajo escenarios moderados de emisiones de GEI (RCP 4.5) es muy probable que la gran mayoría de los arrecifes de coral tropicales desaparezcan para el periodo 2040 a 2050 (Brown et al., 2019; Hoegh Gulderberg et al., 2017).

El aumento de las concentraciones de CO₂ atmosférico que se disuelve en el océano causa la producción de ácido carbónico (H₂CO₃), que se disocia en bicarbonato (HCO₃) y iones de hidrógeno alterando el pH oceánico (IPCC, 2013b). Los iones libres de hidrógeno y de carbonato (CO₃²⁻) forman nuevo bicarbonato, reduciendo la concentración de aragonito y calcita (que son fundamentales para la formación de esqueletos calcáreos de diferentes organismos (Dupont y Pörtner, 2013; IPCC, 2103b). Para una gran variedad de taxa se ha observado que la sensibilidad varía según la especie, el rasgo fisiológico observado, la etapa en el ciclo de vida, y el tiempo de exposición, con efectos adversos sobre la tasa de crecimiento, desarrollo, sobrevivencia, reproducción y comportamiento (Kroeker et al., 2010; Paula et al., 2019). La acidificación tiene efectos sobre las larvas de los corales (y otras especies marinas); bajo condiciones de acidificación estas reducen su consumo de oxígeno (reduciendo su metabolismo), detienen su metamorfosis y desarrollo luego de una exposición prolongada de 2 horas a 7 días (lo que impide el reclutamiento y la colonización de nuevos espacios reduciendo la resiliencia) (Nakamura, 2011).

El aumento de la temperatura oceánica genera la expansión térmica del agua, que en conjunto con el derretimiento de la criósfera causan el aumento del nivel del mar (Brown et al., 2019; Hoegh Gulderberg et al., 2017). Este aumento de nivel puede beneficiar la cobertura de coral vivo al favorecer el área para crecimiento vertical y atenuar el aumento estacional de la temperatura superficial del mar (Brown et al., 2019; Perry et al., 2018). Sin embargo, bajo escenarios climáticos moderados (RCP 4.5) y pesimistas (RCP 8.5) la capacidad de recuperación a eventos estacionales de estrés se reduce en los corales por la acción conjunta del aumento de la temperatura y la acidificación oceánica El aumento del

⁵ Estos límites pueden variar entre especies (Goreau y Hayes 2005), por el tipo de simbiote y por ubicación la geográfica (Schoepf et al. 2015; Dao et al. 2021)

nivel del mar, bajo condiciones de cambio climático, tendrá impactos negativos sobre estos ecosistemas () (Perry et al., 2018; van Woesik et al., 2015).

Los arrecifes de coral del PTO han mostrado ser resilientes al estrés térmico o la acidificación de manera individual, cuando estas anomalías climáticas se combinan el resultado puede ser la pérdida de la estructura del arrecife, como ocurrió al sur de las islas Galápagos una década después del evento de El Niño 1982-1983 (Manzello et al., 2010; Romero Torres et al., 2020). Los estudios han demostrado que el estrés térmico acumulativo explica el 31% de la tasa anual general de cambio de la cubierta de coral vivo en el PTO, lo que sugiere que estos arrecifes se han adaptado al estrés térmico (Romero Torres et al., 2020). Por ejemplo, Randall y colaboradores (2020) identificaron que las aguas frías del afloramiento del golfo de Panamá ofrecen condiciones temporales y localizadas que favorecen la recuperación, sobrevivencia y tasas de recuperación de los corales mientras la temperatura superficial del mar continúa aumentando.

Sin embargo, bajo escenarios de cambio climático moderado (RCP 4.5 y RDP 6.0), cuando el CO₂ atmosférico se duplique, los arrecifes de coral en la región del PTO bajo una anomalía térmica de 2 a 3°C sostenida durante más de dos meses en la época más cálida del año pueden perderse por completo (Manzello et al., 2017). En Costa Rica las evaluaciones recientes sobre los arrecifes de coral indican que hay una mayor recuperación luego de anomalías climáticas en AMP donde el impacto humano es menor (como la RB Isla del Caño) en contraposición con aquellas donde hay mayor impacto humano (como PN Marino Ballena) (Cortés, 2007).

Sin embargo, estresores antrópicos como el aumento en la concentración de microplásticos puede ser aún más nocivos en sinergia con el cambio climático. Los microplásticos tienen efecto sobre la fisiología, el crecimiento, y la salud de los corales por ingesta y por adhesión al tejido del pólipo (Huang et al., 2021). Los microplásticos alteran la relación mutualista entre el coral y las zooxantelas, inhibiendo el inicio de la relación simbiótica, reduciendo la capacidad fotosintética de las zooxantelas, e induciendo eventos de blanqueamiento no relacionados con temperatura (Parvez et al., 2024). Esta relación sinérgica entre cambio climático y microplásticos puede ser devastadora para el declive de la biodiversidad en los arrecifes de coral, ya que se ha observado que los corales blanqueados incorporan una mayor cantidad de micro plásticos que aquellos que están sanos, reduciendo aún más su resiliencia (Okubo et al., 2020).

2.3.4. Pastos Marinos

Los pastos marinos habitan cercanos a límite de tolerancia de estrés térmico, aumentos de 2 a 3 °C por encima de las temperaturas más altas del verano tendrán efectos en la reproducción, tasa de crecimiento y otras funciones fisiológicas (Birchenough, 2017; Short y Neckles, 1999). También, la reacción de los pastos marinos a la radiación UV-B puede variar desde la inhibición de la actividad fotosintética, como se observa en las plantas terrestres y las algas marinas, hasta el aumento del costo metabólico de producir compuestos bloqueadores de los rayos UV-B dentro del tejido vegetal, y los efectos de esta radiación probablemente serán mayores en los trópicos y en los océanos australes (Short y Neckles, 1999).

Los efectos del cambio climático sobre las praderas marinas siguen siendo en gran medida inciertos (Birchenough, 2017). El aumento del nivel del mar puede reducir la luz solar

disponible para los lechos de pastos marinos (actuando de manera sinérgica con otros estresores como los residuos sólidos flotantes) y así reducir su productividad (Nurse et al., 2014). Por ejemplo, los micro plásticos pueden afectar directamente a las praderas marinas al bloquear la transferencia de luz y nutrientes, afectando la renovación de sus brotes u hojas, degenerando las raíces y provocando estrés oxidativo (Kouk y Daniel, 2024). Por otro lado, el aumento de la temperatura oceánica puede inhibir el mecanismo fotosintético cuando se superan los 40 °C (Campbell et al., 2006)⁶.

En este mismo sentido, el enriquecimiento de CO₂ del océano puede tener un efecto positivo en la fotosíntesis y el crecimiento, se ha demostrado que la actividad fotosintética de las densas praderas marinas aumenta el pH local, equilibrando potencialmente una disminución del pH debido a la acidificación oceánica proyectada (Bjork y Beer, 2009). Por otro lado, la acidificación puede aumentar la producción y la biomasa de algas epífitas en las hojas de pastos marinos, reduciendo su capacidad fotosintética (Beer y Koch, 1996). Aunque, investigaciones recientes indican que ante la acidificación inminente del océano estos hábitats pueden servir como refugios para larvas de algunos erizos marinos (Ravaglioli et al., 2024).

A nivel mundial, los hábitats de pastos marinos están disminuyendo como resultado de los impactos antropogénicos, incluido el cambio climático (Brodie et al., 2020). Dentro de estos la actividad turística se ha identificado como de alto impacto sobre los ecosistemas marinos, en particular para las praderas de fanerógamas el uso de anclas y la contaminación son de las principales amenazas (Caparros Martínez et al., 2022). Esto es particularmente sensible para ecosistemas que ubicados en cercanía de zonas bajo desarrollo urbano (Brodie et al., 2020).

2.3.5. Tortugas Marinas

La exposición a los cambios en la temperatura superficial del mar y del aire afectan a las tortugas marinas en dos grandes áreas, la reproducción y la ecología del forrajeo (Hawkes et al., 2009; Wyneken et al., 2013). Estas especies son quizás más vulnerables al cambio climático en sus playas de anidación, donde los impactos esperados variarán desde la pérdida de hábitat (por erosión) y la disminución del éxito reproductivo, hasta la feminización de las poblaciones (por aumento en la temperatura ambiental y del mar) (Hawkes et al., 2009; Patricio et al., 2021; Wyneken et al., 2013). Sus requerimientos de hábitat para anidar varían por especie, aunque todas necesitan playas libres de obstáculos, de berma ancha, accesibles desde el mar y estables para excavar (Lutz y Musick, 1996; Lutz et al., 2002). Estas playas también deben ser adecuadas para la incubación de los huevos (en términos de humedad relativa del nido y temperatura) y estar cercanas a corrientes oceánicas para facilitar la dispersión de las crías (Lutz et al., 2002). Durante el periodo de incubación el sexo de las tortugas es determinado por la temperatura ambiental del nido; temperaturas entre 28 °C y 31 °C se consideran óptimas con igual proporción de sexos (Lutz y Musick, 1996). Temperaturas menores a este rango óptimo producen machos y temperaturas superiores producen hembras, a partir de los 33 °C aumenta la probabilidad de

⁶ A estas temperaturas oceánicas gran parte de la vida marina es inviable.

malformaciones genéticas y la mortalidad de fetos y neonatos⁷ (Lutz et al., 2002; Hawkes et al., 2009; Patricio et al., 2021, Wyneken et al., 2013).

Otros efectos sobre las playas de anidación están relacionados con el aumento del nivel del mar y los procesos de erosión costera, con impactos físicos que incluyen aumento en la frecuencia de inundaciones, la infiltración salina costera y la pérdida de playa (Hawkes et al., 2009; Wyneken et al., 2013). La erosión de playas disminuye el área para el establecimiento de nidos exitosos y el aumento de la altura de la marea (o la altura de ola significativa) puede saturar la arena cambiando las condiciones de incubación o inundar los nidos ahogando los embriones (Hawkes et al., 2009; Patricio et al., 2021). El aumento del nivel del mar y de la escorrentía por precipitaciones más intensas pueden acarrear mayor concentración de residuos sólidos que pueden obstruir el acceso a la playa. Incluso, la acidificación del mar tendrá un efecto sobre la fase de anidación al cambiar la química de incubación en las playas y modificar la relación con agentes patógenos, a lo largo de todo el ciclo de vida de las tortugas (Patricio et al., 2021).

Aunque la mayoría de las investigaciones sobre cambio climático y tortugas marinas se han centrado en la fase terrestre de su historia de vida, se esperan también alteraciones y cambios en la fase marina, como cambios en la periodicidad reproductiva, en los rangos de distribución latitudinales y en el éxito de forrajeo (Patricio et al., 2021). La mayor preocupación sobre el cambio climático está relacionada con el aumento de la temperatura ambiental, pues las poblaciones puedan llegar a estar completamente feminizadas (con el aumento sostenido de un 1 °C), sobre todo en poblaciones donde los machos ya son escasos. Sin embargo, los otros estresores climáticos (como cambios en la precipitación, aumento del nivel del mar y cambios en la frecuencia e intensidad de eventos hidrometeorológicos) tendrán también efectos sobre las diferentes fases de desarrollo de estos reptiles. Por ejemplo, los incrementos en la temperatura oceánica tendrán impacto sobre la productividad primaria del mar, la composición de presas para los predadores tope (como las tortugas) y los hábitats de alimentación (como arrecifes de coral y pastos marinos), que podrían alterar los actuales rangos de hogar y distribución además de los patrones de migración entre áreas de forrajeo y reproducción (Patricio et al., 2021; Wyneken et al. 2013).

2.3.6. Mamíferos marinos

Los mamíferos marinos incluyen a los Cetáceos, Odontocetos, Sirénidos y otros miembros de los carnívoros (como osos polares, nutrias y focas). Son posibles de encontrar en casi todos los ecosistemas marinos y oceánicos, con hábitos costeros, semipelágicos y grandes migraciones (Robinson et al., 2005). Para el Pacífico de Costa Rica se ha confirmado la presencia en aguas oceánicas y costeras de 19 especies de Cetáceos, algunas residentes costeras, otras residentes estacionales y ocasionales, con hábitos semipelágicos y migratorios (Martínez-Fernández et al., 2011; Oviedo et al., 2015).

La investigación científica en Costa Rica se ha centrado sobre tres especies de cetáceos con hábitos migratorios y semipelágicos: delfín manchado (*Stenella attenuata*), delfín nariz de botella (*Tursiops truncatus*), ballena jorobada (*Megaptera novaeangliae*) (Martínez, 2004; Martínez-Fernández et al., 2011). Especies que también son reportadas para el

⁷ En el contexto del cambio climático es extremadamente importante determinar el límite térmico superior letal para hacer mejores proyecciones sobre el éxito de eclosión (Patricio et al. 2021).

Pacífico de Panamá (May Collado et al., 2018). En ambos países la industria de avistamientos de cetáceos está en rápido crecimiento (Martínez, 2005; May Collado et al., 2018), en Costa Rica se reportan ganancias superiores al millón de dólares anuales desde finales de la década de los 90 (Martínez, 2004; Martínez-Fernández et al., 2011).

En general, se cree que la distribución y preferencias de hábitat para los mamíferos marinos están determinadas por características oceanográficas físicas y químicas que definen la calidad del agua y la disponibilidad de presas (Robinson et al., 2005). Para las aguas costeras de Costa Rica la presencia del delfín manchado se relaciona con cambios de salinidad y transparencia del agua, mientras que la presencia de la ballena jorobada estuvo relacionada con el oleaje y la temperatura superficial del agua (Martínez-Fernández et al., 2011). A escala global se ha identificado a la contaminación acústica, las colisiones con barcos, los enredos en artes de pesca, la calidad del agua y la “basura” marina como las principales amenazas antrópicas para este grupo taxonómico (Oldach et al., 2022). Siendo la calidad del agua un factor determinante para su distribución y presencia en aguas costeras.

El cambio climático afecta las características físicas, químicas y biológicas de los océanos y las costas, con efecto sobre el medio marino, el ecosistema y las especies marinas, entre estos los cetáceos (Robinson et al., 2005; Simmonds e Isaac, 2007; van Weelden et al., 2021). Estos efectos incluyen cambios en la abundancia, distribución, época y alcance de las migraciones, estructura de la comunidad, presencia y composición de especies de competidores y depredadores, disponibilidad y distribución de presas, época de reproducción, éxito reproductivo y, en última instancia, supervivencia (Evans y Bjorge, 2013; Learmonth et al., 2007; Robinson et al., 2005; van Weelden et al., 2021). Los efectos directos e indirectos y las sinergias entre estos estresores son altos y los efectos en cascada requieren de mayor investigación con un enfoque integral.

Las especies migratorias están sujetas a una amplia gama de influencias ambientales, con una alta probabilidad de verse afectadas por el cambio climático en algún momento de sus ciclos de vida (Robinson et al., 2005). Los efectos del cambio climático dependerán de la escala temporal y geográfica, así como de la longevidad, los ciclos reproductivos y la distribución geográfica, siendo particularmente difíciles de predecir por las complejas interacciones entre los procesos oceánicos y el clima (Learmonth et al., 2007; Robinson et al., 2005; van Weelden et al., 2021). Por ejemplo, el aumento en la incidencia de enfermedades infecciosas asociadas con eventos de “epizootis” en mamíferos marinos, que se relacionan con variables climáticas como la temperatura superficial del mar, ha aumentado en las últimas décadas hasta convertirse en algo común y con efectos sobre la supervivencia de estas especies (Sanderson y Alexander, 2020).

2.4. Vínculos del cambio climático con el Declive en la pesquería

El cambio climático global reducirá la producción primaria neta (PPN) de los océanos, la biomasa de la biota del nivel trófico superior y las capturas pesqueras potenciales en el futuro, especialmente en el PTO (IPCC, 2019b; Lotze et al., 2019; Tagliabue et al., 2020). Los vínculos, relaciones, sinergias positivas y efectos interconectados entre el cambio climático y diferentes factores antrópicos, que causan el declive en la calidad del agua marina y que derivan en el declive de la biodiversidad, tienen efecto sobre las pesquerías. Es probable que los impactos asociados al cambio climático sobre la estructura y la función

de las redes alimentarias marinas, con los consiguientes cambios en el transporte, el destino y los efectos de los contaminantes y larvas, tengan repercusiones significativas para las poblaciones humanas que dependen de los recursos pesqueros para su alimentación, recreación o cultura (Alva et al., 2017).

El cambio climático también está modificando la distribución de las poblaciones de peces compartidas entre las Zonas Económicas Exclusivas (ZEE) de los países vecinos y la alta mar (Palacios-Abrantes et al., 2022). Nuestra capacidad de adaptación, mediante el monitoreo y la proyección del stock pesquero sigue siendo un desafío debido a las discontinuidades de datos en las observaciones biológicas, la falta de disponibilidad de datos y el desajuste entre los datos y las distribuciones reales de las especies (Maureaud et al., 2020). Por otro lado, los modelos a escala de paisaje que proyectan los impactos del cambio climático sobre las capturas pesqueras potenciales se basan en variables como la temperatura, la presión de oxígeno, y la PPN, sin considerar las posibles sinergias con la acidificación y/o el esfuerzo de captura (FAO, 2018). Esta redistribución está ocurriendo a un paso acelerado, y la escala temporal de estos cambios transfronterizos determinará cómo afectará el cambio climático a la gobernanza de las pesquerías internacionales (Palacios-Abrantes et al., 2022).

Por ejemplo, los modelos predicen que para el 2030 el 23 % de los stocks transfronterizos se habrán redistribuido y las ZEE globales experimentarán un cambio promedio del 59% en la proporción de capturas de poblaciones transfronterizas (Palacios-Abrantes et al., 2022). Las simulaciones de escenarios de cambio climático (RCP 8.5 y RCP 2.6) elaborados por Clarke y colaboradores (2020) muestran que para el 2050 la idoneidad del hábitat (considerando a la temperatura y la presión de oxígeno como limitantes) para las especies que componen las pesquerías pelágicas pequeñas en el PTO se reduce hasta un 46% y que la mayor reducción ocurre en la región de América Central. El particular, los modelos para los stocks de atunes (22 especies) muestran que, en promedio, los límites de distribución del hábitat del atún se han desplazado hacia los polos 6,5 km por década en el hemisferio norte y 5,5 km por década en el hemisferio sur (Erauskin-Extramiana et al., 2019).

En el PTO las pesquerías locales de pequeña escala presentan los mayores cambios en la idoneidad de hábitat y composición de especies, con una rotación de hasta un 80% y bajo escenarios RCP 8.5, se proyecta un desplazamiento de especies de 30 a 60 km por década hacia el sureste para aquellas que actualmente se encuentran en la mitad sur y la región ecuatorial del PTO (Clarke et al., 2020). La reducción en la idoneidad del hábitat, los cambios en la composición de especies en las comunidades y los desplazamientos son algunos de los impactos que las sinergias entre los estresores climáticos están causando sobre la biodiversidad. Los desplazamientos hacia el ecuador reflejan movimientos hacia hábitats más fríos, característicos de los sistemas de surgencia ecuatorial y los desplazamientos hacia aguas costeras menos profundas indican una compresión del hábitat asociada con la expansión de las zonas mínimas de oxígeno (Clarke et al., 2022).

Evaluaciones realizadas por un panel de científicos (Cerutti Pereira et al., 2024) para el grupo de los condrictios muestran que las especies costeras, en particular las que dependen de las zonas de crianza costeras, son las más vulnerables al cambio climático. El calentamiento de los océanos, en combinación con la acidificación y la posible desoxigenación, tendrá efectos generalizados sobre las especies de condrictios del PTO,

pero las especies costeras también pueden enfrentarse a cambios en los aportes de agua dulce, la salinidad y el aumento del nivel del mar. Esta vulnerabilidad, relacionada con el clima, se ve agravada por otros factores antropogénicos, como la sobrepesca y la degradación del hábitat, que ya se están produciendo en la región (Cerutti Pereira et al., 2024).

En particular para el PTO la presión de oxígeno es la limitante que mayor influencia ejerce sobre la distribución y composición del ecosistema pelágico (la columna de agua), lo que es relevante considerando que la distribución del oxígeno está cambiando en el océano (FAO, 2018). Por otro lado, se identificó a la temperatura como la variable más influyente sobre la cantidad de biomasa en la composición de las capturas pesqueras (Clarke et al., 2022). Con lo cual, *“el calentamiento superficial hace que las especies se vayan más profundo, y ahora los palangreros están comenzando a pescar más profundo también, siguiendo a los stocks pesqueros. Al mismo tiempo la zona mínima de oxígeno limita la profundidad máxima a la cual los peces pueden llegar (a máximo 400 mt aproximadamente con variaciones por localidad). Los atunes / tiburones les gusta estar en esa franja angosta por la alta densidad de presas que también se comprime ahí. Los pescadores saben esto. A pesar de que la reducción en las capturas los empuja cada vez a aguas más lejos de la costa, aún existe este fenómeno que hace que puedan pescar en zonas en donde los pelágicos se comprimen en una franja angosta (la temperatura superficial actúa como límite superior y las zonas hipóxicas como el límite inferior). Si este aumento en la facilidad de captura de pelágicos no se toma en cuenta, es más fácil sobreexplotar el recurso”⁸*

De acuerdo con la FAO (2018), las pesquerías costeras de pequeña escala y con múltiples especificidades podrían considerarse altamente resilientes, porque pueden adaptarse rápidamente a cambios en las especies objetivo, las preferencias del mercado y la ubicación de nuevos bancos de pesca. Además, la redistribución de los campamentos pesqueros puede ser más rápida y fácil que la reubicación de la infraestructura de las pesquerías industriales de gran escala. Sin embargo, estas pesquerías de pequeña escala son sumamente sensibles porque muchas de las especies más importantes dependen en mayor o menor medida de los arrecifes de coral, los manglares y las praderas marinas, que son ecosistemas vulnerables y en algunos casos ya amenazados y en declive. Además, los pescadores no industrializados dependen más estrechamente de los ingresos a corto plazo, su capacidad para influir en los mercados es más limitada que la de las industrias de gran escala bien organizadas, y la gestión y la aplicación de las normas son más complejas (FAO, 2018).

Para el sector pesquero en Costa Rica el cambio climático representa un reto complejo que comprende impactos ecológicos, socioeconómicos y para la operación pesquera en sí misma, considerando que muchas de las pesquerías de interés comercial para el Pacífico central están sobre explotadas (BIOMARC SINAC GIZ, 2013b). La actividad pesquera artesanal y de pequeña escala como se realiza en la actualidad es poco sostenible bajo escenarios de cambio climático. Los estresores climáticos están cambiando las áreas de distribución y la abundancia de las especies, alterando la estratificación de la columna de agua, causando olas de calor, aumentando la proliferación de FAN y especies invasoras, dañando la infraestructura portuaria, y generando condiciones del mar menos predecibles

⁸ Tayler Clarke, ((<https://scholar.google.co.cr/citations?user=hl4fhesAAAAJ&hl=en>) conversaciones personales (2024).

que aumentan el riesgo durante las jornadas de pesca, lo que resulta en un aumento de costos de mantenimiento y operación pesquera y una reducción de la productividad pesquera (Blasiak et al., 2017; Cheung et al., 2016; Clarke et al., 2020; Daw et al., 2009; INCOPECA, 2019; Lam et al., 2020; Moreno Diaz y Alfaro, 2018; Ramírez, 2014; Ross Salazar et al., 2018; Soto y Quiñónez, 2013) .

Por ejemplo, la pesquería de dorado (*Coryphaena hippurus*) en Costa Rica ha disminuido drásticamente en las últimas décadas por falta de una política pesquera para la regulación y manejo (Ramírez, 2014). Esta es una de las principales especies objetivo de la pesca comercial y deportiva en el país (INCOPECA, 2020). En condiciones de cambio climático, los modelos de distribución indican una contracción, reubicación y expansión de su hábitat hacia el sur de la línea ecuatorial lejos de aguas costarricenses (Izasa Toro et al., 2024). Sin embargo, el sector continuará operando, aunque aumenten los costos asociados con la operación (combustible, esfuerzo de captura, carnada, entre otros) y se reduzca la productividad pesquera y la rentabilidad de la actividad.

5. Cambio climático en Costa Rica

Durante la última década el país ha realizado avances importantes en el establecimiento de un marco regulatorio y una estructura de gobernanza que le permita una adecuada gestión del cambio climático. Algunos de los elementos de este marco son la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) 2010-2020; la creación de la Dirección de Cambio Climático (Decreto Ejecutivo No 364337 MINAET) en el 2011, la Política Nacional de Gestión de Riesgo 2016-2030, la Estrategia y Plan de Acción para la Adaptación del sector biodiversidad de Costa Rica al Cambio Climático del 2015, el Plan de Acción de la Estrategia Nacional de Cambio Climático, el Plan de Acción de Gestión de Riesgo, el Plan Nacional de Descarbonización, la Política Nacional de Adaptación, el Decreto Infraestructura Resiliente, la actualización de la Contribución Determinada a nivel Nacional y la Cuarta Comunicación Nacional ante la CMNUCC (DCC MINAE, 2021).

El marco regulatorio para cambio climático es apuntalado por el robusto marco normativo con el que el país cuenta para el sector ambiental. Dentro de este marco normativo se encuentra la Ley Orgánica del Ambiente No. 7554, la Ley de Biodiversidad No. 7788, la Ley Forestal No 7575, la Ley de Vida Silvestre No. 7317, la Ley de Aguas No. 276, Ley de Uso y Conservación del Suelo No. 7779. Otros instrumentos de política pública relevantes para la gestión de los recursos marinos y costeros para Costa Rica, que presentan consideraciones climáticas, son la Política Nacional del Mar 2013-2028 y el Plan Nacional de Residuos Marinos 2021-2030.

El país también cuenta con una institucionalidad para la gobernanza del cambio climático. Algunas de estas instituciones son:

- La **Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía de Costa Rica** (DCC), creada en el año 2010 mediante Decreto Ejecutivo N° 35669, es la dependencia encargada de coordinar y gestionar la política pública de cambio climático en Costa Rica.
- El **Instituto Meteorológico Nacional** (IMN), constituido oficialmente desde 1888, tiene por ley la observación y vigilancia del clima, en todas sus escalas cronológicas (tiempo, clima, variabilidad y cambio).

- El **Comité Técnico Interministerial de Cambio Climático (CTICC)**, creado por el Decreto Ejecutivo 36823-MINAET de 2011, funge como un órgano asesor y de apoyo al MINAE para el seguimiento de las acciones climáticas a nivel institucional. El CTICC tiene un carácter permanente y tiene por sede la Dirección de Cambio Climático (La Gaceta, 2011).
- El **Consejo Científico de Cambio Climático (4C)** fue creado por el Decreto Ejecutivo 40615-MINAE en el 2017 como órgano para asesorar al Gobierno en investigación científica y desarrollo tecnológico en cambio climático (La Gaceta, 2017a).
- El **Consejo Consultivo Ciudadano de Cambio Climático (5C)** fue creado por Decreto Ejecutivo 40616-MINAE en el 2017 como una plataforma de participación ciudadana para colaborar con la implementación de la Contribución Determinada a Nivel Nacional (La Gaceta, 2017b).
- El **Sistema Nacional de Métrica de Cambio Climático (SINAMECC)**, creado por Decreto Ejecutivo N° 41127-MINAE, es la plataforma oficial de coordinación y vinculación institucional y sectorial del Estado costarricense para facilitar la gestión y distribución de información en materia de cambio climático.
- El **Sistema Nacional para la Gestión del Riesgo**, bajo la rectoría de la Comisión Nacional de Emergencia (CNE), opera como instancia multistitucional a todos los niveles del Estado. Con Comités Regionales, Comités Municipales y Comités Locales para la Gestión del Riesgo, así como el Comité de Asesores Técnicos de la CNE son algunas de las instancias que conforman el sistema (Figura 2).



Figura 2. Organización de Costa Rica en caso de emergencias de acuerdo con la CNE. Fuente: Picado (2009)

Recientemente el país lanzó su Taxonomía de finanzas sostenibles, que contempla el ámbito del cambio climático⁹. Este sistema de clasificación define criterios claros y basados en ciencia, que permiten identificar actividades económicas que contribuyen con la transición hacia una economía sostenible, resiliente e inclusiva. Para la primera fase de este sistema se definieron los objetivos de mitigación y adaptación al cambio climático (MINAE SUGEF 2024a, 2024b). De igual forma, para octubre del 2024 se decretó por medio de la Ley No. 10533 la creación del Fondo Azul de los Servicios Ecosistémicos Marino-Costeros para la conservación y el desarrollo económico de las zonas costeras¹⁰. El objetivo de este mecanismo financiero es otorgar pagos a proyectos que, mediante acciones de conservación, uso sostenible, restauración investigación, recuperación y generación de capacidades, permitan conservar o incrementar los servicios ecosistémicos del mar y de los recursos marinos y costeros, y mejorar las condiciones de vida de los beneficiarios de los incentivos, especialmente en el caso de las comunidades costeras. El fondo se nutrirá de donaciones y créditos internacionales destinados a servicios ambientales. Además, se contempla la creación de un canon por el uso de los servicios ecosistémicos marino-costeros, así como aportes del presupuesto nacional y contribuciones de entidades privadas interesadas en la conservación marina¹¹.

Diferentes estudios y documentos oficiales sobre vulnerabilidad y cambio climático muestran cómo este fenómeno acentúa otras problemáticas que se traducen en impactos sociales, ambientales y económicos. Las manifestaciones de eventos climáticos extremos (como sequías y lluvias) pueden generar pérdidas y daños que abarcan entre 0.68% y 1.05% del Producto Interno Bruto (PIB) en un escenario conservador, y entre 1.64 % y 2.50% en un escenario de mayor riesgo (CGR 2017). El MIDEPLAN desarrolló la plataforma de visualización “Pérdidas Ocasionadas por Fenómenos Naturales” con la información segregada a nivel cantonal por tipo de viento, duración del evento, clase de zona, tipo de pérdida, entre otras variables (DCC MINAE, 2021a). Esta información cuantifica los impactos sectoriales por eventos climáticos y nos permite evidenciar con estadísticas macroeconómicas las sinergias negativas de los efectos del cambio climático.

Por ejemplo, el cambio climático afectará la salud humana principalmente al agravar problemas de salud ya existentes, aumentando el riesgo por olas de calor e incendios intensos, por desnutrición (por inseguridad alimentaria) y por deterioro en la calidad del agua y del aire (OPS OMS, 2018). En las zonas costeras de Costa Rica, para el sector salud, se resaltan el aumento o intensificación de enfermedades respiratorias crónicas (como el asma) y de transmisión vectorial (Ávila Agüero, 2009; IMN, 2008; Retana, 2008). De estas últimas resaltan el caso de las mareas rojas y el dengue, que presenta fluctuaciones poblacionales relacionadas con eventos de variabilidad climática (Retana, 2008).

⁹ Comunicado de prensa lanzamiento taxonomía finanzas sostenibles. Disponible en: https://www.sugef.fi.cr/informacion_relevante/boletin_financiero_trimestral/comunicados/Comunicado%20de%20prensa_Lanzamiento_Taxonomia%20de%20Finanzas%20Sostenibles%20de%20Costa%20Rica.pdf

¹⁰ Sistema Costarricense de Información Jurídica, Ley No 10533. Disponible en: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=102977&nValor3=142711&strTipM=TC

¹¹ Comunicado de prensa: Proyecto de Kattia Cambronero crea un fondo de pago por servicios ecosistémicos marino-costeros. Disponible en: https://delfino.cr/2024/04/aprobada-en-primer-debate-ley-para-reconocer-economicamente-las-labores-de-conservacion-marino-costeras?utm_source=chatgpt.com

Diferentes instrumentos de política pública, normativa y planificación que abordan el tema de cambio climático en Costa Rica (Política Nacional de Adaptación, Plan Nacional de Adaptación, Plan Nacional de Descarbonización, Plan Nacional de Desarrollo e Inversión Pública, Política Nacional de Biodiversidad y Plan de acción ante el cambio climático, Política Nacional de Ordenamiento Territorial, Política Nacional de Humedales, NDC, entre otros) reconocen la importancia de los ecosistemas marino-costeros para la adaptación al cambio climático y el desarrollo sostenible.

En la región de la costa del Pacífico de Costa Rica las principales amenazas climáticas son el aumento del nivel del mar, las temperaturas extremas (olas de calor), lluvias y sequías extremas y los principales impactos se dan sobre la infraestructura vial y el sector agropecuario. La alta dependencia de la actividad agrícola, turística y pesquera es un factor de vulnerabilidad clave para la región.

Costa Rica presenta a la descarbonización de su economía y la conservación de la naturaleza como pilares del modelo de desarrollo del país y un medio para transformarlo a uno basado en la bioeconomía, el crecimiento verde, la inclusión y la mejora de la calidad de vida de la ciudadanía (PND, 2018).

Este marco de políticas climáticas en reducción de emisiones y en adaptación a impactos climáticos cuenta con instrumentos como una Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC 2009) con su respectivo Plan de acción de la ENCC; una Estrategia y plan de acción para la adaptación del sector biodiversidad de Costa Rica al cambio climático (2020-2025); un Plan Nacional de Descarbonización (2018- 2050); una Política Nacional de Adaptación con su Plan Nacional de Adaptación (2022-2026) y la actualización de su Contribución Determinada a nivel Nacional en el 2020.

Costa Rica tiene la meta de una economía descarbonizada en 2050, que haya alcanzado el nivel de emisiones más bajo posible (PND, 2018), contemplando actividades de reforestación y protección de ecosistemas costeros altos en carbono (entre otros) y la gestión de residuos como actividades vinculadas con ecosistemas marino-costeros.

La Política Nacional de Adaptación y el Plan Nacional de Adaptación presentan ejes de acción que son correspondientes entre ellos y abordan el fomento a las condiciones de resiliencia y la gestión de la biodiversidad, considerando los ecosistemas marino-costeros y el enfoque de EbA como esenciales en la implementación y mejoramiento de esta resiliencia.

Los océanos y el recurso hídrico son una de las áreas temáticas prioritarias en la NDC (2020) de Costa Rica. El compromiso en esta área es contar con ecosistemas oceánicos, marinos y costeros sanos, adaptados y resilientes. Para esto se proponen nueve contribuciones específicas para cumplirlo. Estas contribuciones específicas, como toda la NDC, están vinculadas con otros instrumentos de política pública que permiten amplificar y aumentar el impacto de los esfuerzos realizados.

El marco de políticas climáticas ha servido para retroalimentar otros procesos de planificación para el desarrollo. Por ejemplo, el Plan de Descarbonización fue un insumo para la construcción del Plan Nacional de Desarrollo de Inversiones Públicas (PNDIP). Este PNDIP (2023-2026) considera los ecosistemas y las comunidades marino-costeras de manera explícita en sus propuestas sectoriales para ambiente y energía; en particular, para

este sector se busca desarrollar instrumentos económicos verdes para la movilización de recursos financieros, la protección y conservación de la biodiversidad marino-costera y terrestre, promover la producción y consumo sostenible, entre otros. De manera específica este Plan de Desarrollo presenta un objetivo de reactivación de las zonas costeras a través de la Estrategia de recuperación azul. Esta intervención se encuentra incluida en el Plan Estratégico Nacional con metas al 2030 y contempla la ejecución de 14 proyectos, la cual está definida para todos los polos de desarrollo en la parte marino-costera (PNDIP 2023-2026).

Costa Rica cuenta con una Política Nacional de Gestión de Riesgos 2016-2030 que vincula los Objetivos de Desarrollo Sostenible con el Marco de Acción para la Reducción de Desastres de Sendai y los compromisos del Acuerdo de París sobre Cambio Climático. Esta Política sirve de base para la formulación del Plan Nacional de Gestión de Riesgos en tres periodos quinquenales y la Estrategia Nacional de Gestión Financiera del Riesgo de Desastres. Estos tres instrumentos de política pública enlazan las agendas de desarrollo sostenible y de adaptación y resiliencia al cambio climático desde ejes temáticos como el desarrollo de capacidades, las finanzas sostenibles, la generación de resiliencia e inclusión social, y la planificación y mecanismos e instrumentos para la reducción de riesgo.

El Plan Nacional de Adaptación (DCC MINAE 2022) incorpora las acciones priorizadas en los planes de adaptación regionales bajo una lógica de definición de prioridades a escala local y regional. Los 6 ejes propuestos contemplan las zonas y ecosistemas marino-costeros dentro de sus metas y lineamientos, 1 Gestión de conocimiento, 2 Servicios climáticos y desarrollo de capacidades, 3 Planificación territorial, costera y marina, 4 servicios e infraestructura pública resiliente, 5 Sistemas productivos adaptados y eco competitivos, 6. Inversión y seguridad financiera. En particular, para el sector de biodiversidad se debe garantizar el resguardo de refugios climáticos, una de sus metas propone que el 100% de las áreas de conservación con ecosistemas marino-costeros implementan medidas de adaptación.

En la Planificación Regional para el Pacífico (DCC MINAE Mideplan, 2022a; DCC MINAE Mideplan, 2022b; DCC MINAE Mideplan, 2022c) se proponen medidas de acuerdo con las vulnerabilidades y riesgos identificados a esa escala. Estas se pueden agrupar en gestión del recurso hídrico, destinos turísticos resilientes, integración de cambio climático en planificación y ordenamiento territorial, acceso a financiamiento para el clima, infraestructura resiliente, agricultura resiliente y energías renovable. No se identifican a esta escala medidas que aborden de manera directa los problemas ambientales identificados para el GEM/PACA en Costa Rica.

A escala cantonal las medidas y acciones se hacen más puntuales (Municipalidad de Puntarenas, 2021; Municipalidad de Nicoya, 2022; Municipalidad de La Cruz, 2022). Dentro de estas acciones se mencionan: mejorar la divulgación y comunicación sobre las consecuencias del cambio climático, identificar zonas de alto riesgo y desarrollar capacidades para abordar las manifestaciones de los peligros climáticos, establecer redes de coordinación y apoyo para atención de emergencias ante eventos climáticos extremos, desarrollar o fortalecer los sistemas de alerta temprana ante eventos climáticos, incluir variables climáticas en la planificación para el territorio y la gestión de riesgos, generar mecanismos financieros para la atención de emergencias de origen climático. Las áreas marinas protegidas, las áreas marinas de pesca responsable, los corredores biológicos y

otras medidas efectivas de conservación son iniciativas clave para la mitigación de los impactos del cambio climático. En estas áreas la gestión y reducción de amenazas no climáticas son una de las principales medidas para reducir el riesgo climático para la biodiversidad.

La investigación y el monitoreo son también respuestas clave en la lucha contra el cambio climático. Ambas deben hacerse tanto a escala de paisaje como a escala local y considerando los cambios de evolución rápida y lenta. Las acciones de investigación deben centrarse en los efectos del cambio climático sobre los hábitats críticos, las consecuencias de la alteración de variables climáticas sobre los ciclos de vida de especies de interés, las variaciones en los procesos, funciones y dinámicas ecológicas entre hábitats y especies por cambio climático. La investigación sobre cambio climático en Costa Rica se realiza en silos, para responder a necesidades sectoriales, intereses académicos y compromisos internacionales.

No hay programas de monitoreo a nivel institucional sobre variables climáticas para el ámbito marino costero, el seguimiento se da solo para el ámbito terrestre liderado por el IMN. Estas acciones de monitoreo para el ámbito marino y costero deben contemplar variables climáticas prioritarias como la temperatura superficial del mar, el nivel medio del mar, el pH, el oxígeno disuelto y la productividad primaria o contenido de nitratos y de impactos como el retroceso de línea de costa, y efectos sobre ecosistemas y especies clave o indicadores.

6. Hallazgos, conclusiones y recomendaciones

1. Impacto significativo del cambio climático en los ecosistemas marino-costeros

El cambio climático intensifica las problemáticas existentes en los ecosistemas del Pacífico costarricense, incluyendo la acidificación oceánica, el aumento del nivel del mar, olas de calor marinas y la desoxigenación del océano. Estos fenómenos, combinados con actividades humanas, agravan la pérdida de biodiversidad, la degradación de la calidad del agua y el declive en las pesquerías.

2. Efectos diferenciados según subregiones

Cada subregión del Pacífico de Costa Rica enfrenta desafíos específicos:

En el **Pacífico norte**, el aumento de temperaturas extremas y la escasez de agua afectan la agricultura y los ecosistemas costeros.

En el **Pacífico central**, los impactos en infraestructura turística y ecosistemas terrestres y marinos son más evidentes.

En el **Pacífico sur**, comunidades indígenas y costeras enfrentan una mayor vulnerabilidad debido a la pobreza, la falta de planificación territorial y el deterioro de la infraestructura básica.

3. Ecosistemas clave bajo amenaza

Manglares: El estrés térmico, la salinización y la pérdida de hábitat están reduciendo su resiliencia y biodiversidad.

Arrecifes de coral: La acidificación y el blanqueamiento masivo son una amenaza directa para su supervivencia.

Pastos marinos: El aumento del nivel del mar y los micro plásticos están afectando su fotosíntesis y regeneración.

Playas arenosas: La erosión y la acidificación están limitando su capacidad de sustentar especies como las tortugas marinas.

Especies migratorias: Las especies migratorias tienen una mayor probabilidad de verse afectadas por el cambio climático al aprovechar diferentes ecosistemas durante su ciclo de vida.

4. Deterioro de las pesquerías

El cambio climático está redistribuyendo especies pesqueras clave, reduciendo su hábitat adecuado y alterando las cadenas tróficas. Esto amenaza la sostenibilidad de las actividades pesqueras, especialmente las de pequeña escala, impactando a comunidades costeras dependientes de estas actividades.

5. Perspectiva para el futuro

El escenario climático proyectado, de no ser mitigado, apunta a una intensificación de los impactos en los ecosistemas marino-costeros y en las comunidades humanas dependientes, lo que subraya la urgencia de implementar medidas de adaptación robustas y sostenibles.

6. Necesidad de acción urgente y coordinada

El informe concluye que se requiere una acción integral que combine esfuerzos de gobernanza, adaptación comunitaria y restauración ecológica. El fortalecimiento de capacidades locales, la planificación territorial basada en riesgos climáticos y la colaboración internacional son esenciales para enfrentar los desafíos de manera efectiva.

7. Conexión transfronteriza de los problemas ambientales

Los problemas ambientales compartidos con Panamá, como la contaminación, la pesca no regulada y el declive de la biodiversidad, tienen una naturaleza transfronteriza debido a las dinámicas de corrientes marinas y la movilidad de especies. Esto subraya la necesidad de colaboración regional para abordar estos desafíos.

8. Vulnerabilidad socioeconómica y de gobernanza

Las comunidades costeras, especialmente aquellas con altos índices de pobreza y dependencia de recursos naturales, son altamente vulnerables. Además, las prácticas de gobernanza actuales no son suficientes para mitigar los impactos climáticos ni para promover una gestión sostenible de los recursos.

9. Avances en la gobernanza del cambio climático en Costa Rica

Aunque el país ha implementado marcos regulatorios como la Estrategia Nacional de Cambio Climático y el Plan Nacional de Descarbonización, el ámbito marino

costero no es una prioridad y se han identificado brechas en la coordinación interinstitucional y la implementación de políticas adaptativas eficaces. La respuesta para la adaptación se ha realizado principalmente por medio de proyectos que no necesariamente están alineados con políticas públicas o contemplan vínculos o sinergias entre sí.

10. Vincular problemas con soluciones específicas y multifactoriales

Se recomienda incluir enfoques que combinen acciones de protección, manejo y restauración ecológica (protección de manglares y arrecifes) con soluciones socioeconómicas (turismo sostenible, agricultura regenerativa, empleo verde en comunidades costeras), involucrando diversos actores para fortalecer la gobernanza local.

11. Aumentar la coordinación intersectorial

Se recomienda articular las políticas de cambio climático con las estrategias regionales y locales de desarrollo para maximizar sinergias y reducir conflictos entre sectores, buscando una intervención coordinada multisectorial, que incluya actores públicos, privados de la sociedad civil, la comunidad internacional y las comunidades locales.

12. Resaltar sinergias transfronterizas

Se sugiere impulsar iniciativas para fortalecer la gobernanza regional mediante acuerdos para la gestión integrada de recursos pesqueros o de corredores biológicos marino-costeros; combinando el monitoreo científico y la investigación aplicada con la acción comunitaria para abordar problemas compartidos, como la contaminación por plásticos y la pesca ilegal.

13. Fortalecer el enfoque adaptativo

Integrar explícitamente la necesidad de planificación territorial basada en riesgos climáticos como una herramienta para mitigar problemas como la erosión costera y los cambios en los ecosistemas pesqueros, adoptando un enfoque preventivo y basado en la resiliencia, que promueva la investigación y el monitoreo participativo para generar alertas tempranas ante eventos extremos.

14. Incorporar financiamiento y gobernanza

Se sugiere impulsar modelos de incentivos fiscales que promuevan la implementación de prácticas sostenibles y la reducción de la huella ambiental en la zona marino-costera como el Fondo Azul de los Servicios Ecosistémicos Marino Costeros en Costa Rica. Se recomienda movilizar recursos para el Fondo Azul de los Servicios Ecosistémicos Marino Costeros en Costa Rica, para asegurar financiamiento estable por medio de alianzas público-privadas, que prioricen las inversiones en tecnología sostenible y proyectos innovadores que impulsen la economía azul.

7. Referencias

- Alfaro E, Cortés J, Alvarado JJ, Jiménez C. (2012). *Clima y temperatura sub-superficial del mar en Bahía Culebra, Golfo de Papagayo, Costa Rica*. Revista de Biología Tropical Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/262471999_Clima_y_temperatura_sub-superficial_del_mar_en_Bahia_Culebra_Golfo_de_Papagayo_Costa_Rica
- Altieri H. and Gedan KB. (2015). *Climate change and dead zones*. Global Change Biology. 21 (4):1395–1406.
- Alva JJ, Cheung W, Ross P, Sumaila R. (2017). *Climate change contaminant interactions in marine food webs, towards a conceptual framework*. Global Change Biology. Vol 23 No 10. Disponible en: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/28212462/>
- Alvarado LF, Contreras W, Alfaro M, Jiménez S. (2012). *Escenarios de cambio climático regionalizados para Costa Rica*. San José, Costa Rica: IMN-MINAET-PNUD. Disponible en: <http://cglobalimn.ac.cr/documentos/publicaciones/EscenariosCambioClimatico/escenariosCCRegionalizados2012.pdf>
- Alvarado Gamboa LF. (2021). *Proyecciones de Cambio Climático regionalizadas para Costa Rica (Escenarios RCP-2.6 y RCP8.5)*. San José, Costa Rica: IMN-PNUD. Disponible en: <http://cglobalimn.ac.cr/documentos/publicaciones/ProyeccionesEscenariosClimaticos/offline/ProyeccionesEscenariosClimaticos.pdf>
- Alvarado Gamboa LF. (2024). Escenarios de cambio climático 2024. Departamento de Desarrollo, Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica, Ministerio de Ambiente y energía. Disponible en: <https://iki-cac.org/sites/default/files/content/documents/escenarios-de-cambio-climatico-de-costa-rica-imn.pdf>
- Anderson C, Alexander K. (2020). *Uncharted waters: Climate change likely to intensify infectious disease outbreaks causing mass mortality events in marine mammals*. Global Change Biology. Vol 26 No 8. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.15163>
- Aragón Valle E, Ruiz-Cubillo P, Cárdenes-Sandí G, Ureña R. (2019). *Caracterización geológica de la erosión costera en la Península de Nicoya y su impacto en la Ruta Nacional No. 160*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/339068027_Caracterizacion_geologica_de_la_erosion_costera_en_la_Peninsula_de_Nicoya_y_su_impacto_en_la_Ruta_Nacional_No_160/citation/download
- An SI, Kim JW, Im SH, Kim BK, Park JH. (2012). *Recent and future sea surface temperature trends in tropical pacific warm pool and cold tongue regions*. Climate Dynamics. Vol. 39, Pp. 1373–1383 Disponible en: <https://repository.kopri.re.kr/bitstream/201206/5662/1/110504.pdf>
- Anthony KRN, Kline DI, Diaz-Pulido G, Dove S, Hoegh-Guldberg O. (2008). *Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders*. Proceedings of the National Academy of Science of the United States. 105 (45) pp. 17442–17446 <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.0804478105>
- Ávila Agüero ML. (2009). *La salud y el cambio climático*. Acta Médica Costarricense. Vol 51. No 1. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-60022009000100001
- Barahona Mejia J, Garmencia Y, Villatla Pineda K, Aguilar Garcia J. (2022). *Efectos del cambio climático en Centroamérica*. Revista Iberoamericana de Bioeconomía y Cambio Climático. Vol 8 Num. 16. Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua. Disponible en: <https://portal.amelica.org/ameli/journal/394/3943529010/3943529010.pdf>

Bates, B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, Eds., (2008). *El Cambio Climático y el Agua*. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, Secretaría del IPCC, Ginebra, 224 pág Disponible en: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/climate-change-water-sp.pdf>

Bax, N, Carlton JT, Mathews A, Haedrich R, Howarth F, Purcell J, Riser A, Gray A. (2001). *The Control of Biological Invasions in the World's Oceans*. Conservation Biology. 15. 1234 - 1246. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/227605205_The_Control_of_Biological_Invasions_in_the_World's_Oceans

Beer S, Koch E. (1996). *Photosynthesis of seagrasses vs. marine macroalgae in globally changing CO2 environments*. Marine Ecology Progress Series 141: 199-204. Disponible en: <https://www.int-res.com/articles/meps/141/m141p199.pdf>

BID-MINAE-SINAC-DDC. (2015). *Estrategia y plan de acción para la adaptación del sector biodiversidad de Costa Rica al cambio climático (2015-2025)*. San José, Costa Rica. Disponible en: <https://www.sinac.go.cr/ES/docu/coop/proy/Estrategia%20de%20adaptaci%C3%B3n%20al%20cambio%20clim%C3%A1tico.pdf>

BIOMARCC-SINAC-GIZ. (2013a). *Análisis de vulnerabilidad de las zonas oceánicas y marino-costeras de Costa Rica frente al cambio climático*. San José-Costa Rica. 103 pags. Disponible en: <https://www.sinac.go.cr/ES/docu/ASP/Estudio%20Cient%C3%ADfico%20ST06%20Vulnerabilidad%20Cambio%20Clim%C3%A1tico%20BIOMARCC%202013.pdf>

BIOMARCC-SINAC-GIZ. (2013b). *Evaluación de las pesquerías en la zona media y externa del Golfo de Nicoya, Costa Rica*. San José-Costa Rica. 54 pags. Disponible en: <https://www.sinac.go.cr/ES/docu/ASP/Estudio%20Cient%C3%ADfico%20ST10%20Pesquerias%20Golfo%20Nicoya%20BIOMARCC%202013.pdf>

Blasiak R, Spijkers J, Tokunaga K, Pittman J, Yagi N, Österblom H. (2017). *Climate change and marine fisheries: Least developed countries top global index of vulnerability*. PLOS ONE, 12(6) Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0179632>

Brodie G, Holland E, De Ramon A, et al. (2020). *Seagrasses and seagrass habitats in Pacific small island developing states: Potential loss of benefits via human disturbance and climate change*. Marine Pollution Bulletin. Vol 160. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0025326X20306913>

Brown B, Dunne RP, Somerfield PJ, Edwards A, Simons W, Phongsuwan N, Putschim L, Sanderson L, Naeije MC. (2019). *Long-term impacts of rising sea temperature and sea level on shallow water coral communities over a ~40 year period*. Scientific Reports Vol. 9, article number 8826. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-019-45188-x>

Bjork M, Beer S. (2009). *Ocean acidification: could dense seagrass meadows resist?* Seagrass Watch. No. 37, 2-4 Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/230793399_Ocean_acidification_could_dense_seagrass_meadows_resist

CGR. (2017). *Presión sobre la Hacienda Pública en un contexto de variabilidad y cambio climático*. Contraloría General de la República. Costa Rica. Disponible en: <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2018/08/DFOE-AE-OS-01-2017.pdf>

Cambers G, Claro R, Juman R, Scott S. (2008). *Climate change impacts on coastal and marine biodiversity in the insular Caribbean: Report of Working Group II, Climate Change and Biodiversity in the Insular Caribbean*. Disponible en: <https://canari.org/publications/climate-change-impacts-on-coastal-and-marine-biodiversity-in-the-insular-caribbean-canari-technical-report-no-382/>

Campbell SJ, McKenzie LJ, Kerville S. (2006). *Photosynthetic responses of seven tropical seagrasses to elevated seawater temperature*. Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, 330 (2), 455-468. Disponible parcialmente en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022098105003953>

Cárdenas G. (2003). *Evolución de los sistemas sedimentarios costeros y aluviales de la región de Parrita, Pacífico Central de Costa Rica*. Revista Geológica de América Central, 28, 69-76. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/geologica/article/view/7784/7439>

Carlton, J. T. (1996). *Marine bio invasions: The alternation of marine ecosystems by nonindigenous species*. Oceanography. 9: 36-43 Disponible en: https://www.doi.gov/sites/doi.gov/files/migrated/invasivespecies/isac/2011/upload/MarineBioinvasions_and_ClimateChange.pdf

Carlton J, College W, Linstrom S, Smith C, Smith J. (2010). *Marine bioinvasion and climate change. National Invasive species Awareness week*. Scripps Institution of Oceanography. Disponible en: https://www.doi.gov/sites/doi.gov/files/migrated/invasivespecies/isac/2011/upload/MarineBioinvasions_and_ClimateChange.pdf

Carranza E. (2013). *Coastal Management in Costa Rica under a changing climate*. Thesis submitted in fulfillment of the Master of Science degree awarded as a result of successful completion of the Erasmus Mundus Masters course in Environmental Sciences, Policy and Management. Disponible en: https://www.etd.ceu.edu/2013/carranza_elias.pdf

Cheung WWL, Jones MC, Reygondeau G, Stock CA, Lam VWY, Frölicher TL. (2016). *Structural uncertainty in projecting global fisheries catches under climate change*. Ecological Modelling, 325, 57-66. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304380016000053?via%3Dihub>

Cerutti Pereira F, Drenkard, E Espinoza M, Finucci B, et al. (2024). *Vulnerability of esatern tropical chondichtyans to climate change*. Global Change Biology. Vol 30 No 7. Disponible en: [Global Change Biology | Environmental Change Journal | Wiley Online Library](#)

Claar DC, Szostek L, McDevitt-Irwin JM, Schanze JJ. Baum, JK. (2018). *Global patterns and impacts of El Niño events on coral reefs: A meta-analysis*. PLoS One Collection Marine Fisheries. Disponible en: <https://journals.plos.org/plosone/article?id=10.1371/journal.pone.0190957>

Clarke T, Reygondeau G, Wabnitz C, Robertson R, Ixquiac-Cabrera M, López M, Ramírez Coghi R, del Río Iglesias JL, Wehrtmann I, Cheung W. (2020). *Climate change impacts on living marine resources in the Eastern Tropical Pacific*. Wiley Diversity and Distributions. Vol. 27 Issue 1. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/ddi.13181>

Clarke T, Wabnitz C, Frölicher T, Reygondeau G, Pauly D, Cheung W. (2022). *Linking observed changes in pelagic catches to temperature and oxygen in the Eastern Tropical Pacific*. Fish and Fisheries. Vol 23. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/361868212_Linking_observed_changes_in_pelagic_catches_to_temperature_and_oxygen_in_the_Eastern_Tropical_Pacific

Cortés J. (2007). *Arrecifes coralinos de Costa Rica: amenazas y recuperación*. Ambientico, No. 171. Disponible en: https://www.ambientico.una.ac.cr/wp-content/uploads/tainacan-items/5/17780/171_3-4.pdf

Cortés J, Wehrtmann I. (2009). *Diversity of Marine Habitats of the Caribbean and Pacific of Costa Rica*. En: Marine Biodiversity of Costa Rica, Central America. Wehrtmann & Cortés Eds. Disponible en:

<https://www.researchgate.net/publication/251118497> Diversity of Marine Habitats of the Caribbean and Pacific of Costa Rica

Cortés J, Enochs IC, Sibaja-Cordero J, Hernández L, et al. (2017). *Marine biodiversity of Eastern Tropical Pacific coral reefs*. In Glynn, P. W., Manzello, D., & Enochs, I. (Eds.), *Coral Reefs of the Eastern Pacific: Persistence and Loss in a Dynamic Environment*. *Coral Reefs of the World* 8 (pp. 203-250). Springer. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4>

Costa Rica. (2021). *Cuarta Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Primera Edición. Disponible en: <http://cglobalimn.ac.cr/documentos/publicaciones/ComunicacionesNacionales/cuartacomunicacion/offline/CuartaComunicacionCC2021.pdf>

CRED. (2023). *Base de Datos Internacional sobre Desastres EM-DAT*. Centro de Investigación de la Epidemiología de los Desastres. Disponible en: <https://public.emdat.be/>

Dao H, Vu H, Kay S, Sailley S. (2021). *Impact of Seawater Temperature on Coral Reefs in the Context of Climate Change. A Case Study of Cu Lao Cham – Hoi An Biosphere Reserve*. *Frontiers in marine Science*. Vol 8. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.704682/full>

Daw T, Adger WN, Brown K, Badjeck MC. (2009). *El cambio climático y la pesca de captura: repercusiones PTOenciales, adaptación y mitigación*. En K. Cochrane, C. De Young, D. Soto y T. Bahri (eds). *Consecuencias del cambio climático para la pesca y la acuicultura: visión de conjunto del estado actual de los conocimientos científicos*. FAO Documento Técnico de Pesca y Acuicultura, No 530. Roma, FAO. pp. 119–168. Disponible en: <https://www.fao.org/3/i0994s/i0994s02.pdf>

DCC. (2018). *Plan Nacional de Descarbonización 2018-2050*. Gobierno de Costa Rica, Dirección de Cambio Climático, Costa Rica. Disponible en: <https://cambioclimatico.minae.go.cr/wp-content/uploads/2019/11/PLAN-NACIONAL-DESCARBONIZACION.pdf>

DCC MINAE. (2021a). *A qué nos adaptamos y cómo nos adaptamos? Bases conceptuales para la adaptación al cambio climático en Costa Rica*. Dirección de Cambio Climático; Ministerio de Ambiente y Energía Proyecto Plan A: Territorios Resilientes ante el Cambio Climático. DCC-MINAE. San José, Costa Rica. 77pp. Disponible en: <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2021/09/Guia-de-Bases-conceptuales-para-la-adaptacion-al-cambio-climatico-en-Costa-Rica.pdf?x59939>

DCC MINAE. (2021b). *Guía para la priorización de medidas de adaptación al cambio climático utilizando el método Análisis Multicriterio*. Proyecto Plan A: Territorios Resilientes ante el Cambio Climático. Dirección de Cambio Climático; Ministerio de Ambiente y Energía. San José, Costa Rica. 41pp. Disponible en: <https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2021/09/Guia-de-Analisis-Multicriterio-Guia-para-la-priorizacion-de-medidas-de-adaptacion-al-cambio-climatico-utilizando-el-Metodo-de-Analisis-Multicriterio.pdf>

DCC-MINAE. (2022). *Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático de Costa Rica, 2022 - 2026*. Dirección de Cambio Climático; Ministerio de Ambiente y Energía San José, Costa Rica. 204pp. Disponible en: https://cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2022/04/NAP_Documento-2022-2026_VC.pdf

DCC MINAE Mideplan. (2022a). *Plan de Acción regional para la adaptación al cambio climático Región Chorotega 2022-2026*. Gobierno de Costa Rica. Plan A-Dirección de Cambio Climático. Disponible en: <https://cambioclimatico.minae.go.cr/wp-content/uploads/2022/05/Plan-de-Accion-ACC-Region-Chorotega .pdf>

DCC MINAE Mideplan. (2022b). Plan de Acción regional para la adaptación al cambio climático Región Pacífico Central 2022-2026. Gobierno de Costa Rica. Plan A-Dirección de Cambio Climático. Disponible en: https://cambioclimatico.minae.go.cr/wp-content/uploads/2022/05/Plan-de-Accion-ACC_Pacifico-Central_.pdf

DCC MINAE Mideplan. (2022c). Plan de Acción regional para la adaptación al cambio climático Región Brunca 2022-2026. Gobierno de Costa Rica. Plan A-Dirección de Cambio Climático. Disponible en: https://cambioclimatico.minae.go.cr/wp-content/uploads/2022/05/Plan-de-Accion-ACC_Region-Brunca_.pdf

Delvalle de Borrero D, Fábrega Duque J, Olmos J, *et al.* (2020). *Distribution of Plastic Debris in the Pacific and Caribbean Beaches of Panama*. Air, Soil and Water Research. Open access. Disponible en: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1178622120920268>

Drews C. Fonseca A. (2009). Aumento del nivel del mar por cambio climático en Playa Grande, Parque Nacional Las Baulas, Costa Rica. Informe técnico, WWF / Stereocarto, San José, Costa Rica, 20 p. Disponible en: <https://es.scribd.com/document/26830062/Aumento-del-nivel-del-mar-por-Cambio-Climatico-en-Playa-Grande-Parque-Nacional-Las-Baulas-Costa-Rica-Drews-Fonseca-2009>

Dupont S. Pörtner H. (2013). *Get ready for ocean acidification*. Nature. Vol 498. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/498429a>

Dutra L, Haywood M, Shalini D, Piovano S, Ferreira M, Jhonson J, Vitayaki V, Kinimnith S, Morris C. (2018). *Impacts of Climate Change on Corals Relevant to the Pacific Islands*. In book: *Impacts of Climate Change on Corals Relevant to the Pacific Islands*. Pacific Marine Climate Change Report Card: Science Review Publisher: Commonwealth Marine Economies Programme. https://assets.publishing.service.gov.uk/media/5b28fcf1e5274a191271796a/9_Corals.pdf

Espinoza Salas D. (2022). Propuesta de un Plan Específico de Cambio Climático en el Parque Nacional Isla San Lucas, Área de Conservación Pacífico Central, Puntarenas, para el periodo 2023-2028. Trabajo final de graduación sometido a consideración del Comité de Evaluación de Trabajos Finales de Graduación de la Escuela de Ciencias Ambientales de la UNA. Disponible en: [https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/25373/V3-FINAL%20DUNIA%20\(1\)%20\(1\)%20\(1\).pdf?sequence=1](https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/25373/V3-FINAL%20DUNIA%20(1)%20(1)%20(1).pdf?sequence=1)

Erauskin-Extramiana M, Arrizabalaga H, Hobday A, *et al.* (2019). *Large-scale distribution of tuna species in a warming ocean*. Global change biology. Vol 25, No 6. Disponible en: [Global Change Biology | Environmental Change Journal | Wiley Online Library](#)

Evans P, Bjorge A. (2013). *Impacts of climate change on marine mammals*. Marine Climate Change impacts partnership: Science Review. Pp 134-148 Disponible en: https://www.mccip.org.uk/sites/default/files/2021-08/2013arc_sciencereview_15_marm_final.pdf

FAO. (2018). *Impacts of climate change on fisheries and aquaculture, synthesis of current knowledge, adaptation and mitigation options*. FAO fisheries and aquaculture technical paper. Disponible en: [Impacts of climate change on fisheries and aquaculture: Synthesis of current ... - Food and Agriculture Organization of the United Nations - Google Books](#)

Freer E, Vargas M. (2003). Floraciones algales nocivas en la costa pacífica de Costa Rica: toxicología y sus efectos en el ecosistema y salud pública. Acta Médica Costarricense. Vol. 4 No. 5. Disponible en: <https://www.binasss.sa.cr/revistas/amc/v45n4/art06.pdf>

García-Soto C, Cheng L, Caesar L, Schmidt S, Jewett EB, Cheripka A, Rigor I, Caballero A, Chiba S, Báez JC, Zielinski T and Abraham JP. (2021). *An Overview of Ocean Climate Change Indicators: Sea Surface Temperature, Ocean Heat Content, Ocean pH, Dissolved Oxygen Concentration, Arctic Sea Ice Extent, Thickness and Volume, Sea Level and Strength of the AMOC (Atlantic Meridional*

Overtuning Circulation). *Frontiers in Marine Science*. Vol. 8. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2021.642372/full#h58>

GCR. (2018). *Política Nacional de Cambio Climático*. Gobierno de Costa Rica. Dirección de Cambio Climático; Ministerio de Ambiente y Energía San José, Costa Rica. Disponible en: <https://repositorio-snp.mideplan.go.cr/handle/123456789/84>

GCR NDC. (2020). *Contribución Nacionalmente Determinada de Costa Rica*. Gobierno de Costa Rica. Dirección de Cambio Climático; Ministerio de Ambiente y Energía San José, Costa Rica. Disponible en: <https://cambioclimatico.minae.go.cr/wp-content/uploads/2021/01/Contribucion-Nacionalmente-Determinada-de-Costa-Rica-2020-Version-Completa.pdf>

GEF, WWF, PNUD. (2024). *Elaboración de un diagnóstico del ambiente marino costero del Pacífico de Costa Rica, para el desarrollo del análisis de diagnóstico transzonal (ADT)*. Producto 1. San José, Costa Rica. 162 pp.

GEF, WWF, PNUD. (2024b). *Elaboración de un diagnóstico del ambiente marino costero del Pacífico de Costa Rica, para el desarrollo del análisis de diagnóstico transzonal (ADT)*. Producto 3. San José, Costa Rica. 162 pp.

Giraldo, A, Valencia B, Acevedo A, Rivera-Gómez M. (2012). *Columna de Agua*. En: *Isla Gorgona, paraíso de biodiversidad y ciencia* (pp.27-44). Programa editorial Universidad del Valle. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Alan-Giraldo-2/publication/266387245_Columna_de_Agua/links/542f1c240cf27e39fa994f72/Columna-de-Agua.pdf

Glynn PW, D'Croz LD. (1990). *Experimental evidence for high temperatures stress as the cause of El Niño coincidental coral mortality*. *Coral Reefs* 8, 181–191. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00265009>

Glyn P, Mones A, Podestá GP, Colbert A, Colgan M. (2017). *El Niño-Southern Oscillation: effects on Eastern Pacific coral reefs and associated biota*. En *Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific: Persistence and loss in a dynamic environment*, 251-290. Disponible en: https://d1wqtxts1xzle7.cloudfront.net/78728286/978-94-017-7499-4_8-libre.pdf?1642187564=&response-content-disposition=inline%3B+filename%3DEl+Nino+Southern+Oscillation+Effects+on.pdf&Expires=1731272521&Signature=KXWJPqCGmMdGFC5ZEw6dnKAUXGI8ly~T21uyYU0YTpl8vicuw7qWs0GwIAYAs7lw0r2Tr9J7-q0zLE4qrf4va9oWKxPJ-p6bvKmia5fb6owXywFoaE88vooiKwjy9LZjlwstebjE7ZoMYTsUTudtYmhnsvjP5lo9RA5bh0xQ4duQzLEwajgOqqD1touiCw8aFMNUxwXWCwoalu9C-wPVnEllsb3TuZ80UX0ID4toV7h6mvqyjcJQ4os4oDCLT2fCgBBqczS~ogx-AR6UfPtZBsU1j9wojWoGz8maWA-4J3NObsWLxA~2ScRPk7zAYCTarIP8X5VQU0vgkuckFg3YYw &Key-Pair-Id=APKAJLOHF5GGSLRBV4ZA

González-Delgado S, Nuñez J, Hernandez JC. (2024). *Estudio preliminar sobre el efecto de la acidificación natural en las comunidades meiofaunales de sustratos arenosos*. *Revista Scientia Insularum*. No. 5. Disponible en: <https://www.ull.es/revistas/index.php/scientia-insularum/article/download/4959/4359>

Goreau T, Hayes R, McAllister D. (2005). *Regional patterns of sea surface temperature rise: implications for global ocean circulation changes and the future of coral reefs and fisheries*. *World resource review*. Vol 17 No 3. Disponible en: https://www.researchgate.net/profile/Thomas-Goreau/publication/242145207_Regional_patterns_of_sea_surface_temperature_rise_implications_for_global_ocean_circulation_change_and_the_future_of_coral_reefs_and_fisheries/links/0deec5

[2cfffad928023000000/Regional-patterns-of-sea-surface-temperature-rise-implications-for-global-ocean-circulation-change-and-the-future-of-coral-reefs-and-fisheries.pdf](#)

Hamlington, B.D., Frederikse, T., Thompson, P.R., Willis, J.K., Nerem, S., Fasullo J.T. (2020). Past, Present, and Future Pacific Sea-Level Change. *Earth's Future*, No. 8. Disponible en: <https://doi.org/10.1029/2020EF001839>

Hartley M, Suarez K. (2022). *Exportación de servicios turísticos: ¿un sector estratégico para enfrentar el cambio climático en Costa Rica?* Revista EAN. No 1 Esp. Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/206/20670460004/html/>

Hawkes LA, Broderick AC, Godfrey MH, Godley B. (2009). *Climate change and marine turtles*. *Endangered Species Research* 7:137-154. Disponible en: <https://www.int-res.com/articles/esr2009/7/n007p137.pdf>

Ho DT, Schanze JJ. (2020). *Precipitation-induced reduction in surface ocean pCO₂: Observations from the eastern tropical Pacific Ocean*. *Geophysical Research Letters*, 47. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2020GL088252>

Hoegh-Guldberg O, Andréfouët S, Fabricius K, Diaz-Pulido G, Lough J, Marshall P, Pratchett MS. (2011). *Vulnerability of coral reefs in the tropical Pacific to climate change*. In book: *Vulnerability of Tropical Pacific Fisheries and Aquaculture to Climate Change* (pp.251-296) Publisher: Secretariat of the Pacific Community, Noumea, New Caledonia. Editors: JD Bell, JE Johnson, AJ Hobday. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers13-07/010058146.pdf

Hoegh-Guldberg, O., R. Cai, E.S. Poloczanska, P.G. Brewer, S. Sundby, K. Hilmi, V.J. Fabry, and S. Jung, (2014). *The Ocean*. In: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1655-1731. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap30_FINALpdf

Hoegh-Guldberg O, Poloczanska ES, Skirving W, Dove S. (2017). *Coral Reef Ecosystems under Climate Change and Ocean Acidification*. *Front. Mar. Sci.* 4:158. Disponible en: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fmars.2017.00158/full>

Huang, W., Chen, M., Song, B., Deng, J., Shen, M., Chen, Q., et al. (2021). *Microplastics in the coral reefs and their potential impacts on corals: A mini review*. *Science of the Total Environment*, Vol. 762. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.1>

ICT. (2022). *Plan Nacional De Turismo*. Instituto Costarricense de Turismo. Disponible en: <https://www.ict.go.cr/pdf/Plan%20nacional%20de%20turismo%202022-2027.pdf>

IMN. (2008). *Segunda Comunicación Nacional: efectos del clima, su variabilidad y cambio climático sobre la salud humana en Costa Rica*. Ministerio de Salud. Disponible en: <http://cglobalimn.ac.cr/documentos/publicaciones/CambioClimatico/EfeClimaVarCamClimaticoSaludHumanaCR.pdf>

IMN. (2011). *Análisis de riesgo actual del sector hídrico de Costa Rica ante el cambio climático para contribuir al desarrollo humano*. Departamento de Climatología e Investigación Aplicada / Instituto Meteorológico Nacional Disponible en: <http://cglobalimn.ac.cr/documentos/publicaciones/AnaRiAcSeHiCRCC/offline/download.pdf>

INCOPESCA. (2019). *Programa de Desarrollo Sostenible de la Pesca y acuicultura en Costa Rica*. Estudio de Prefactibilidad Borrador V.1.10. Disponible en: <https://faolex.fao.org/docs/pdf/cos194517.pdf>

INCOPESCA. (2020). *Edad y crecimiento de dorado Coryphaena hippurus capturado por la flota palangrera costarricense en el Pacífico*. Informe final Disponible en: https://www.incopesca.go.cr/investigacion/otras_investigaciones/08-informe_edad_crecimeinto_dorado.pdf

IPCC. (2013a). *Glosario*. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf

IPCC. (2013b). *The physical science basis contribution of working group i to the fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/09/WG1AR5_Frontmatter_FINALpdf

IPCC. (2014a). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad – Resumen para responsables de políticas*. Contribución del Grupo de trabajo II al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. Organización Meteorológica Mundial, Ginebra, Suiza, 34 págs. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/ar5_wgII_spm_es-1.pdf

IPCC. (2014b). *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, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 157 págs. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/SYR_AR5_FINAL_full_es.pdf

IPCC. (2019a). *El cambio climático y la tierra, resumen para responsables de políticas. Informe especial del IPCC sobre el cambio climático, la desertificación, la degradación de las tierras, la gestión sostenible de las tierras, la seguridad alimentaria y los flujos de gases de efecto invernadero en los ecosistemas terrestres*. Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2020/06/SRCCL_SPM_es.pdf

IPCC. (2019b). *Resumen para responsables de políticas*. En: Informe especial del IPCC sobre el océano y la criósfera en un clima cambiante. Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA. Disponible en: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/>

IPCC. (2021). *Resumen para responsables de políticas. En: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press. Disponible en: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WG1_SPM_Spanish.pdf

Isaza-Toro E, Selvaraj J, Giraldo A. (2024). *Modelo de distribución geográfica del pez Coryphaena hippurus (Perciformes: Coryphaenidae) según el cambio climático en el Pacífico Oriental Tropical* Revista de Biología Tropical 72. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/379894240_Modelo_de_distribucion_geografica_del_pez_Coryphaena_hippurus_Perciformes_Coryphaenidae_segun_el_cambio_climatico_en_el_Pacifico_Oriental_Tropical

Ishii M, Rodgers KB, Inoue HY, Toyama K, Sasano D, Kosugi N, Ono H, Enyo K, Nakano T, Iudicone D, Blanke B, Aumont O, Feely R. (2020). *Ocean acidification from below in the tropical pacific*. Global Biogeochemical Cycles. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019gb006368>

Kroeker K.J, Kordas RL, Crim RN, Singh GG. (2010). *Meta-analysis reveals negative yet variable effects of ocean acidification on marine organisms*. Ecological Letters. Vol. 13, 1419–1434. Disponible en: https://cobblab.eas.gatech.edu/ocean_acid/Kroeker%20et%20al%202010.pdf

Kuok H, Daniel T. (2024). *Microplastics in Seagrass Ecosystems: A Review of Fate and Impacts*. Research in Ecology. 6. 41-53. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/382762342_Microplastics_in_Seagrass_Ecosystems_A_Review_of_Fate_and_Impacts

Kvale K, Oschlies A. (2022). *Recovery from microplastic-induced marine deoxygenation may take centuries*. Nature Geoscience, vol 16. Disponible en: <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01096-w>

Kwiecinski, J. V., & Babbitt, A. R. (2021). A high-resolution atlas of the eastern tropical Pacific oxygen deficient zones. Global Biogeochemical Cycles. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1029/2021GB007001>

Laffoley D, Baxter JM. (2019). *Ocean deoxygenation: everyone's problem, causes, impacts, consequences and solutions*. Full report. UICN. Disponible en: <https://portals.iucn.org/library/sites/library/files/documents/2019-048-En.pdf>

Lam V, Allison E, Bell J, Blythe J, Cheung W, Frölicher W, Gasalla M, Rashid Sumaila U. (2020). *Climate change, tropical fisheries and prospects for sustainable development*. Nature Reviews. Disponible en: http://www.labpesq.io.usp.br/images/publicacoes/Lam_et_al_2020.pdf

Lazo Vega MA. (2020). *Centroamérica y el cambio climático, de la planificación a la acción*. Realidad y reflexión. Año 20 No. 51. Instituto de ciencia, tecnología e innovación. Disponible en: <http://ri.ufg.edu.sv/jspui/bitstream/11592/9461/1/9845-Texto%20del%20art%C3%ADculo-34954-2-10-20200625.pdf>

Learmonth JA, Macleod CD, Santos MB, et al. (2007). *Potential Effects Of Climate Change On Marine Mammals*. En: Oceanography and Marine Biology: An Annual Review (pp.431-464) Edition: Volume 45. Publisher: CRC Press Editors: R. N. Gibson, R. J. A. Atkinson, J. D. M. Gordon. Disponible en: [\(PDF\) Potential Effects Of Climate Change On Marine Mammals](#)

Lee S, Karnauskas K, Heede U, L'heureux M. (2023). *How the pattern of trends across the tropical Pacific Ocean is critical for understanding the future climate*. National Oceanic and Atmospheric Administration. Science and information for climate smart nation. ENSO Blog. Disponible en: <https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/how-pattern-trends-across-tropical-pacific-ocean-critical-understanding>

Leiva J, Soto S. (2010). *Las mareas rojas en Costa Rica*. Revista Médica de Costa Rica y Centroamérica. LXVII 595. Disponible en: <https://www.medigraphic.com/pdfs/revmedcoscen/rmc-2010/rmc105c.pdf>

Lida Y, Takatani Y, Kojima A, Ishi M. (2021). *Global trends of ocean CO₂ sink and ocean acidification: an observation-based reconstruction of surface ocean inorganic carbon variables*. Journal of Oceanography Vol 77, 323–358 Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10872-020-00571-5>

Lizano O. (2007). *Climatología del viento y oleaje frente a las costas de Costa Rica*. Ciencia y Tecnología, 25 (1-2), 43-56 Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/cienciaytecnologia/article/view/2215/2176>

Lizano O. (2013). *Erosión en las playas de Costa Rica, incluyendo la Isla del Coco*. Intersedes Vol. 14 No. 27. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2215-24582013000100001

Lizano Araya MA, Lizano Rodríguez O. (2020). *Escenarios ante el aumento del nivel del mar por cambio climático para la localidad del Cocal, Puntarenas, Costa Rica*. GeoFocus, revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica, No. 26, 3–20. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7939047>

Lizano Araya M, Lizano Rodríguez OG. (2023). *Escenarios de inundación ante el aumento del nivel del mar por Cambio Climático, para las Playas del Coco, Tamarindo y Sámara, Costa Rica*. Entorno Geográfico, (25). Disponible en: <https://entornogeografico.univalle.edu.co/index.php/entornogeografico/article/view/11903>

Lizano MA. Lizano OG. (2010). *Creación de escenarios de inundación en la Ciudad de Puntarenas ante el aumento del nivel del mar*. InterSedes. Universidad de Costa Rica, XI(21), 215-229. Disponible en: <https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/intersedes/article/view/1010/1071>

Lotze HK, Tittensor DP, Bryndum-Buchholz A, Eddy TD, *et al.* (2019). *Global ensemble projections reveal trophic amplification of ocean biomass declines with climate change*. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, No. **116** Vol 26. Disponible en: <https://doi.org/10.1073/pnas.1900194116>

Loza Álvarez S, Benavides-Morera R, Brenes-Rodriguez CL, Saxon B. (2018). Estructura del fitoplancton en las épocas seca y lluviosa en el golfo de Papagayo, Costa Rica. Revista Ciencias Marinas y Costeras, vol. 10, núm. 2. Costa Rica Disponible en: <https://www.redalyc.org/journal/6337/633766164001/633766164001.pdf>

Lutz P, Musick J. (Ed). (1996). *The biology of sea turtles*, Volumen 1. CRC press first edition.

Lutz P, Musick J, Wyneken J. (Ed). (2002). *The biology of sea turtles* volume 2. CRC press. First edition. Disponible parcialmente en: https://books.google.co.cr/books?hl=es&lr=&id=9H_LBQAAQBAJ&oi=fnd&pg=PP1&dq=sea+turtle+biology&ots=mfUFMXiCld&sig=bBB3xGOJaK5mucMSviOXH1nNeWw#v=onepage&q=sea%20turtle%20biology&f=false

Magrin GO, Marengo JA, Boulanger JP, Buckeridge MS, *et al.* (2014). *Central and South America, Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Volume II: Regional Aspects*. V. Barros y otros (eds.), Cambridge, Cambridge University Press. Disponible en: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WGIIAR5-Chap27_FINAL.pdf

Manzello, D. P. (2010). *Coral growth with thermal stress and ocean acidification: lessons from the eastern tropical Pacific*. Coral reefs, 29(3), 749-758. https://www.researchgate.net/profile/Derek-Manzello/publication/227127495_Coral_growth_with_thermal_stress_and_ocean_acidification_Lessons_from_the_eastern_tropical_Pacific/links/00b7d534bf98477797000000/Coral-growth-with-thermal-stress-and-ocean-acidification-Lessons-from-the-eastern-tropical-Pacific.pdf

Manzello, D., Mark Eakin, C., Glynn, P.W. (2017). *Effects of Global Warming and Ocean Acidification on Carbonate Budgets of Eastern Pacific Coral Reefs*. In: Glynn, P., Manzello, D., Enochs, I. (eds) Coral Reefs of the Eastern Tropical Pacific. Coral Reefs of the World, vol 8. Springer, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-7499-4_18

Martínez D. (2004). *Cetáceos en Costa Rica, ignorancia vs conservación*. Revista Ambientico. No. 22. Disponible en: https://www.ambientico.una.ac.cr/wp-content/uploads/tainacan-items/5/13780/134_22.pdf

Martínez-Fernández D, Montero A, May-Collado LJ. (2011). Cetáceos de las aguas costeras del Pacífico norte y sur de Costa Rica. Rev. biol. trop vol.59 n.1. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442011000100024

Maté JL. (2003). *Corals and coral reefs of the Pacific coast of Panamá*. En: *Latin American coral reefs*. Elsevier Science . Ed, Jorge Cortés. Pp 387-417. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780444513885500187>

Maureaud A, Frelat R, Pécuchet L, Shackell N, et al. (2020). *Are we ready to track climate-driven shifts in marine species across international boundaries? - A global survey of scientific bottom trawl data*. *Global Change Biology*. Vol 27 No 2. Disponible en: [Global Change Biology | Environmental Change Journal | Wiley Online Library](#)

May Collado LJ, Amador-Caballero M, Casas JJ, et al. (2018). Ecology and Conservation of Cetaceans of Costa Rica and Panama. In: Rossi-Santos, M., Finkl, C. (eds) *Advances in Marine Vertebrate Research in Latin America*. Coastal Research Library, vol 22. Springer. Disponible parcialmente en: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-56985-7_12

MiAmbiente. (2020). *Segunda Contribución Determinada a Nivel Nacional de Panamá CDN2*. Dirección de Cambio Climático, Ministerio de Ambiente. Disponible en: <https://unfccc.int/sites/default/files/NDC/2024-06/Segunda%20Contribuci%C3%B3n%20Determinada%20a%20Nivel%20Nacional CDN2.pdf>

MiAmbiente. (2021). *Índice de vulnerabilidad al Cambio Climático de la República de Panamá*. Dirección de Cambio Climático, Ministerio de Ambiente. Disponible en: <https://dcc.miambiente.gob.pa/wp-content/uploads/2021/07/Indice de Vulnerabilidad al Cambio Climatico.pdf>

MiAmbiente. (2022). *Plan de Acción climática de Panamá PNAC*. Dirección de Cambio Climático, Ministerio de Ambiente. Disponible en: <https://transparencia-climatica.miambiente.gob.pa/wp-content/uploads/2022/02/Plan-Nacional-de-Accion-Climatica.pdf>

MINSA. (2021). *Vulnerabilidad al Cambio Climático en la República de Panamá y su Repercusión en la Salud*. Ministerio de Salud, Gobierno de Panamá. Disponible en: https://www.minsa.gob.pa/sites/default/files/publicaciones/vulnerabilidad_al_cambio_climatico_en_la_republica_de_panamá_y_su_repercusion_en_la_salud_1.pdf

MIDEPLAN. (2022). *Plan Nacional de Desarrollo e Inversión Pública a “Rogelio Fernández Güell” 2023-2026*. Ministerio de Planificación Nacional y Política Económica. Disponible en: <https://observatorioplanificacion.cepal.org/sites/default/files/plan/files/PNDIP%202023-2026%20Main.pdf>

MINAE. (2000). *Primera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de Cambio Climático*. San José: Minae. 178 pp. Disponible en: https://unfccc.int/sites/default/files/resource/Costa%20Rica%20INC_Spanish.pdf

MINAE DCC. Sin fecha. *Plan A Territorios resilientes en Costa Rica*. Ficha técnica. Disponible en: https://cambioclimatico.minae.go.cr/wp-content/uploads/2021/09/PlanA_FichaDescriptiva-1.pdf

MINAE-IMN. (2014). *Tercera Comunicación Nacional a la Convención Marco de Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Ministerio del Ambiente y Energía, Instituto Meteorológico Nacional, GEF, PNUD. Disponible en: crinc3.pdf (cac.int)

Meyssignac, B., Salas y Melia, D., Becker, M., Llovel, W., & Cazenave, A. (2012). *Tropical Pacific spatial trend patterns in observed sea level: internal variability and/or anthropogenic signature?* *Climate of the Past*, 8(2), 787–802. <https://doi.org/10.5194/cp-8-787-2012>

Mora-Escalante R, Lizano O, Alfaro E, Rodríguez A. (2020). *Distribución de temperatura y salinidad en campañas oceanográficas recientes en el Pacífico Tropical Oriental de Costa Rica*. *Revista de*

Biología Tropical vol. 68 suppl.1. Disponible en:
https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442020000500177

Moreno Diaz ML, Alfaro E. (2018). *Valoración socioeconómica del impacto de la variabilidad climática sobre la pesca artesanal en Costa Rica*. UNICIENCIA Vol. 32, No. 1, pp. 18-31. Disponible en:
<https://www.scielo.sa.cr/pdf/uniciencia/v32n1/2215-3470-Uniciencia-32-01-18.pdf>

Municipalidad de La Cruz. (2022). *Plan de Acción para la Adaptación Climática del Cantón de La Cruz 2023-2030*. Proyecto Plan A: Territorios Resilientes ante el Cambio Climático. Municipalidad de La Cruz, Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía (DCC MINAE) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). San José, Costa Rica. Disponible en: <https://cambioclimatico.minae.go.cr/wp-content/uploads/2023/06/La-Cruz-Plan-de-Cantonal-de-Accion-para-la-Adaptacion-.pdf>

Municipalidad de Nicoya. (2022). *Plan de Acción para la Adaptación al Cambio Climático del Cantón de Nicoya 2022-2030*. Proyecto Plan A: Territorios Resilientes ante el Cambio Climático. Municipalidad de Nicoya, Dirección de Cambio Climático del Ministerio de Ambiente y Energía (DCC MINAE) y Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). San José, Costa Rica. Disponible en: <https://cambioclimatico.minae.go.cr/wp-content/uploads/2023/06/Nicoya-Plan-de-Cantonal-de-Accion-para-la-Adaptacion-.pdf>

Municipalidad de Puntarenas. (2021). *Plan de Acción para la Adaptación al Cambio Climático del Cantón de Puntarenas 2022-2031*. Proyecto Plan A: Territorios Resilientes ante el Cambio Climático. Municipalidad de Puntarenas y DCC-MINAE. San José, Costa Rica. Disponible en: <https://cambioclimatico.minae.go.cr/wp-content/uploads/2023/06/Puntarenas-Plan-de-Cantonal-de-Accion-para-la-Adaptacion-.pdf>

Nakamura, M., Ohki, S., Suzuki, A., & Sakai, K. (2011). *Coral larvae under ocean acidification: survival, metabolism, and metamorphosis*. PLoS One, 6(1), e14521. <https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0014521&type=printable>

Nawrotzki R, Tebeck M, Harten S, Blankenagel V. (2023). *Climate change vulnerability hotspots in Costa Rica: constructing a sub-national index*. Journal of Environmental Studies and Sciences Vol 13 (3). Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/370122767_Climate_change_vulnerability_hotspots_in_Costa_Rica_constructing_a_sub-national_index

NOAA. (2024). *ENSO recent evolution current status and predictions*. Update prepared by: Climate Prediction Center / NCEP 8 July 2024. Disponible en: https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/lanina/enso_evolution-status-fcsts-web.pdf

Oppenheimer, M., B.C. Glavovic, J. Hinkel, R. van de Wal, et al. (2019). *Sea Level Rise and Implications for Low-Lying Islands, Coasts and Communities*. In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 321-445. Disponible en: <https://doi.org/10.1017/9781009157964.006>.

OMM. (2024). *Estado del clima en América Latina y el Caribe*. Organización Meteorológica Mundial. OMM N° 135. Disponible en: <https://www.preventionweb.net/media/96057/download?startDownload=20241110>

OPS OMS. (2018). *Taller Subregional Salud en Planes Nacionales de Adaptación al Cambio Climático: Centroamérica*. Organización Panamericana de Salud y Organización Mundial para la Salud. Disponible en: <https://www.paho.org/es/file/50601/download?token=CKYTClkf>

Okubo N, Tamura-Nakano M, Watanabe T. (2020). *Experimental observation of microplastics invading the endoderm of anthozoan polyps*. Marine Environmental Research, Vol. 162. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2020.105125>.

Oldach E, Killeen H, Shukla P, Brauer E, Carter N, *et al.* (2022). Managed and unmanaged whale mortality in the California Current Ecosystem. Marine Policy. 140. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/359693290_Managed_and_unmanaged_whale_mortality_in_the_California_Current_Ecosystem

Oviedo L, Herrera-Miranda D, Pacheco-Polanco JD, *et al.* (2015). Diversidad de cetáceos en el paisaje marino costeros de Golfo Dulce, Península de Osa, Costa Rica. Rev. biol. trop vol.63 suppl.1. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442015000500395

Palacios Abrantes J, Frolicher T, Reygondeau G, Sumalia R, *et al.* (2022). *Timing and magnitude of climate-driven range shifts in transboundary fish stocks challenge their management*. Global change biology. Vol 28 No 7. Disponible en: [Global Change Biology | Environmental Change Journal | Wiley Online Library](https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb.15866)

Parvez, M., Ullah, H., Faruk, O. *et al.* (2024). *Role of Microplastics in Global Warming and Climate Change: A Review*. Water Air Soil Pollut **235**, 201. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-024-07003-w#citeas>

Patricio A, Hawkes L, Monsinjon J, Godley B, Fuentes M. (2021). *Climate change and marine turtles: recent advances and future directions*. Endangered species research. Vol 44. Disponible en: <https://www.int-res.com/articles/esr2021/44/n044p363.pdf>

Perry CT, Alvarez-Filip L, Graham NAJ. *et al.* (2018). *Loss of coral reef growth capacity to track future increases in sea level*. Nature 558, 396–400. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41586-018-0194-z#citeas>

Piecuch CG, Thompson PR, Ponte RM, Merrifield MA, Hamlington BD. (2019). *What caused recent shifts in tropical Pacific decadal sea-level trends?* Journal of Geophysical Research: Oceans. No. 124, 7575–7590. Disponible en: <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1029/2019JC015339>

Picón JC, Hernández A, Bravo J. (2014). *Cambio climático, transformaciones en la línea costera y turismo de sol y playa en la costa pacífico-norte costarricense*. AMBIENTICO. No 246. Disponible en: https://www.ambientico.una.ac.cr/wp-content/uploads/tainacan-items/5/25748/246_16-22.pdf

Piedra L, Piedra K (2007). *Previsible impacto del cambio climático sobre el manglar Guacalillo*, Costa Rica. Ambientico, No. 165. Disponible en: <https://repositorio.una.ac.cr/bitstream/handle/11056/27634/No.165%202007.%2081.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Primack, R., Rozzi, R., Feinsinger, P., Dirzo, R., & Massardo, F. (2001). *Fundamentos de conservación biológica: Perspectivas latinoamericanas*. Mexico: FCE. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/288654118_Fundamentos_de_Conservacion_Biologica_Perspectivas_latinoamericanas

Ramírez E. (2014). *Impacto del cambio climático en la pesquería*. Ambientico No 242. Disponible en: https://biocorredores.org/corredoresbiologicos/sites/default/files/docs/Ambientico_Vol246.pdf

Randall C, Toth L, Leichter J, *et al.* (2020). *Upwelling buffers climate change impacts on coral reefs of the eastern tropical pacific*. Ecological society of America. Vol 101, No. 2. Disponible en: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/ecy.2918>

Ravaglioli C, De Marchi L, Giannessi J, Pretti C, Bulleri F. (2024). *Seagrass meadows as ocean acidification refugia for sea urchin larvae*. Science of The Total Environment. Volume 906. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723060928#:~:text=In%20many%20coastal%20areas%2C%20vegetated,%2C%202021%3B%20Pfister%20et%20al.>

Retana JA. (2008). Vulnerabilidad del sector salud ante el cambio climático, el caso del dengue. Revista de ciencias ambientales. Vol 35. Disponible en: <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/ambientales/article/view/8157/9186>

Retana JA, Calvo M, Carvajal K, Sanabria N. (2020). *Descripción de riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos en los cantones de Puntarenas, San Carlos, Sarapiquí y Pococí*. MINAE, IMN, Dirección de Cambio Climático. Disponible en: <http://cglobalimn.ac.cr/documentos/publicaciones/RiesgoEventosHE-PuSCaSaPo/offline/RiesgoEventosHE-PuSCaSaPo.pdf>

Retana JA, Calvo M. (2020). *Riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos en los cantones de Bagaces, Tilarán, Abangares y los distritos de Lepanto, Cóbano y Paquera*. MINAE, IMN, Dirección de Cambio Climático. Disponible en: <http://cglobalimn.ac.cr/documentos/publicaciones/RiesgoEventosHE-BTACoLePa/offline/RiesgoEventosHE-BTACoLePa.pdf>

Retana JA, Calvo M, Sanabria N. (2020). *Descripción de riesgo ante eventos hidrometeorológicos extremos en el norte de Costa Rica. Cantones de La Cruz, Nicoya, Hojancha, Liberia, Carrillo, Cañas, Santa Cruz, Guatuso, Los Chiles y Upala*. MINAE, IMN, Dirección de Cambio Climático. Disponible en: <http://cglobalimn.ac.cr/documentos/publicaciones/RiesgoEventosHE-ZonaNorte/offline/RiesgoEventosHE-ZonaNorte.pdf>

Rixen T, Jiménez C, Cortez J. (2012). *Impact of upwelling events on the sea water carbonate chemistry and dissolved oxygen concentration in the Gulf of Papagayo (Culebra Bay), Costa Rica: Implications for coral reefs*. Revista de biología tropical Vol 60 Supp 2. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442012000600013

Robinson R, Learmonth JA, Hutson AM, Macleod C, et al. (2005). *Climate change and migratory species*. A Report for Defra Research Contract. Disponible en: [rr414.pdf](#)

Romero Torres M, Acosta A, Palaco Castro A; Eric A, et al. (2020). *Coral reef resilience to thermal stress in the Eastern tropical Pacific*. Global Change biology. Volume 7 No 7. Disponible en: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/gcb.15126>

Romera-Castillo C, Lucas A, Mallenco-Fornies R, Briones-Rizo M, Calvo E, Pelejero C. (2023). *Abiotic plastic leaching contributes to ocean acidification*. Science of the Total Environment, 854. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.158683>

Ross E, Blanco M, Castro M, Jiménez J, Quesada, A. (2018). *Informe del Estado de la Nación en Desarrollo Humano Sostenible; Uso y conservación de los recursos marinos y costeros*. Estado de la Nación. La defensoría de los habitantes, Consejo Nacional de Rectores. San José, Costa Rica. Informe técnico.

Ross Salazar, E., O. Lizano Rodríguez, D. Chacón Chaverri & M. Castro Campos. (2018). *Estudio de caso: adaptación de las comunidades costeras vulnerables ante las amenazas inminentes del cambio climático en el área de Paquera, Puntarenas*. Fundación MarViva. San José, Costa Rica. 67pp Disponible en: <https://fundecooperacion.org/wp-content/uploads/2020/10/Estudio-de-caso-MarViva.pdf>

Ruiz Cubillo, Paulo & Rodríguez, Natalia & Valverde, Joan & Naranjo, Ronald. (2019). *Erosión costera en el Pacífico central de Costa Rica, implicaciones en la ruta nacional 23, sección Caldera roble*. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/336809901_EROSION_COSTERA_EN_EL_PACIFICO_CENTRAL_DE_COSTA_RICA_IMPLICACIONES_EN_LA_RUTA_NACIONAL_N_23_SECCION_CALDERA_-_EL_ROBLE/citation/download

Sánchez-Noguera C, Stuhldreier, I, Cortés J, Jiménez C, Morales Á, Wild C, Rixen T. (2018). *Natural Ocean acidification at Papagayo upwelling system (north Pacific Costa Rica): implications for reef development*. Biogeosciences, 15, 2349–2360. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/324612390_Natural_ocean_acidification_at_Papagayo_upwelling_system_north_Pacific_Costa_Rica_Implications_for_reef_development

Seager R, Cane M, Henderson N, Lee DE, Abernathey R, Zhang H. (2019). *Strengthening tropical Pacific zonal sea surface temperature gradient consistent with rising greenhouse gases*. Nature Climate Change. No 9 vol 7 517-522. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/334012764_Strengthening_tropical_Pacific_zonal_sea_surface_temperature_gradient_consistent_with_rising_greenhouse_gases

Schoepf V, Stat M, Falter J, McCulloch MT. (2015). *Limits to the thermal tolerance of corals adapted to a highly fluctuating, naturally extreme temperature environment*. Scientific Reports Vol.5, article number 17639. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/srep17639>

Shivika S, Vikas S, Subhankar C. (2023). *Contribution of plastic and microplastic to global climate change and their conjoining impacts on the environment - A review*. Science of The Total Environment. Volume 875. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969723012433>

Short F, Neckles H. (1999). *The Effects of Global Climate Change on Seagrasses*. Aquatic Botany. 63. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/263082034_The_Effects_of_Global_Climate_Change_on_Seagrasses

Simmonds MP, Isaac SJ. (2007). *The impacts of climate change on marine mammals: early signs of significant problems*. Oryx. 2007;41(1):19-26. Disponible en: <https://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/B105EB0556C8CD009845D3350C7E7B8A/S0030605307001524a.pdf/the-impacts-of-climate-change-on-marine-mammals-early-signs-of-significant-problems.pdf>

SINAC. (2014). *Plan de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático para el Parque Nacional Marino Las Baulas de Guanacaste*. Área de Conservación Tempisque. Sistema Nacional de Áreas de Conservación Guanacaste-Costa Rica. 73 p. Disponible en: <https://chmcostarica.go.cr/sites/default/files/content/final%20PACCBaulas.pdf>

SINAC. (2015a). *Plan de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático para el Parque Nacional Manuel Antonio*. Área de Conservación Pacífico Central (Sistema Nacional de Áreas de Conservación) Costa Rica. 23 p. Disponible en: <https://chmcostarica.go.cr/sites/default/files/content/final%20PACCPManuel%20antonio.pdf>

SINAC. (2015b). *Plan de Mitigación y Adaptación al Cambio Climático para el Refugio Nacional de Vida Silvestre Playa Hermosa Punta Mala*. (Sistema Nacional de Áreas de Conservación) Área de Conservación Pacífico Central Costa Rica. 38 p. Disponible en: <https://chmcostarica.go.cr/sites/default/files/content/final%20PACCPHermosa%20Mala.pdf>

SINAC MINAET. (2008). *GRUAS II: Propuesta de Ordenamiento Territorial para la conservación de la biodiversidad de Costa Rica. Volumen 3: Análisis de Vacíos en la Representatividad e Integridad*

de la biodiversidad marina y costera. San José, CR. 60 pp. Disponible en: https://www.ucipfg.com/Repositorio/BAAP/BAAP06/Unidad3/Lectura4_GRUAS_III.pdf

SINAC MINAE. (2016). *Estrategia Nacional de Biodiversidad y su plan de Acción. Gobierno de Costa Rica*. Disponible en: <https://enbcr.go.cr/>

Solano J, Villalobos R. (Sin fecha). *Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica*. Instituto Meteorológico Nacional de Costa Rica. Unidad Gestión de Desarrollo. Disponible en: <https://www.imn.ac.cr/documents/10179/20909/Regionalizaci%C3%B3n+clim%C3%A1tica+de+Costa+Rica>

Soto, D y Quiñones, R. (2013). *Cambio climático, pesca y acuicultura en américa latina: PTOenciales impactos y desafíos para la adaptación*. Taller FAO/Centro de Investigación Oceanográfica en el Pacífico Sur Oriental (COPAS), Universidad de Concepción, Concepción, Chile. FAO Actas de Pesca y Acuicultura. No. 29. Roma, FAO. 335 pp. Disponible en: [https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/latin-america-and-caribbean/regional---latin-am-amp-caribbean/FAO.--2011.--CC-impact-on-Latin-American-Ocean-Aquaculture.-\[ESP\].pdf](https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/latin-america-and-caribbean/regional---latin-am-amp-caribbean/FAO.--2011.--CC-impact-on-Latin-American-Ocean-Aquaculture.-[ESP].pdf)

SUGEF MINAE. (2024a). *Taxonomía de finanzas sostenibles de Costa Rica: Preguntas y Respuestas Frecuentes*. Consulta pública. MINAE SUGEF. Disponible en: <https://www.sugevalfi.cr/Informacion-inversionistas/Documentosvarios/FAQTaxonom%C3%ADa%20de%20Finanzas%20Sostenibles%20de%20Costa%20Rica%20finalpdf>

SUGEF MINAE. (2024b). *Taxonomía de Finanzas Sostenibles de Costa Rica Documento técnico*. Documento sometido a consulta pública. Disponible en: https://www.sugevalfi.cr/Informacion-inversionistas/Documentosvarios/Documento%20te%CC%81cnico_Taxonomi%CC%81a%20de%20finanzas%20sostenibles%20CR_Consulta%20pu%CC%81blica.pdf

Syama S, Geetika B, Salom G, Thanga V, Thava P. (2024). *Microplastics and climate change: the global impacts of a tiny driver*. Science of The Total Environment. Volume 946. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0048969724043080>

Taglibue A, Barrier N, Du Pontavice H, Kiwiakowski L, et al. (2020). *An iron cycle cascade governs the response of equatorial pacific ecosystems to climate change*. Global Change Biology. Vol 26 No 11. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/gcb.15316>

Ugarte A, Romero J, Farías L, Sapiains R, Aparicio-Rizzo P, Ramajo, L, Aguirre C, et al. (2022). *Marea roja y cambio global: elementos para la construcción de una gobernanza integrada de las Floraciones de Algas Nocivas (FAN)*. Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR)2. 84 pp. Disponible en: https://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2022/11/INFORME_MareaRojayCambioGlobal_PrimerEdicion.pdf

Vargas Montero M. (2004). *Floraciones algales en Costa Rica, su relación con algunos factores meteorológicos y consideraciones sobre sus efectos socioeconómicos*. Tesis sometida a la consideración de la Comisión del Programa de Estudios de Posgrado en Gestión Integrada de áreas costeras tropicales de la Escuela de Biología de la Universidad de Costa Rica. Disponible en: <https://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr/server/api/core/bitstreams/7b5c6506-4cfc-4324-a8e3-94e5875bd295/content>

van Weelden C, Towers JR, Bosker T, (2021). *Impacts of climate change on cetacean distribution, habitat and migration*. Climate Change Ecology. Volume 1, Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666900521000095>

Van Woessik R, Golbuu, Y, Roff G. (2015). *Keep up or drown: Adjustment of western Pacific coral reefs to sea-level rise in the 21st century*. Royal Society Open Science. 2 (7). Disponible en:

<https://www.researchgate.net/publication/282222070> Keep up or down Adjustment of western Pacific coral reefs to sea-level rise in the 21st century

von Schuckmann, K., Moreira, L., Grégoire, M., Marcos, M., Staneva, J., Brasseur, P., Garric, G., Lionello, P., Karstensen, J., and Neukermans, G. (2024). *8th edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR8)*. Copernicus Publications, State Planet, 4-osr8. Disponible en: <https://sp.copernicus.org/articles/4-osr8/index.html>

von Schuckmann K, Moreira L, Cancet M, Gues F, et al.. (2024b). *The state of the global ocean. En 8th edition of the Copernicus Ocean State Report (OSR8)*. Copernicus Publications, State Planet, 4-osr8. Disponible en: <https://sp.copernicus.org/articles/4-osr8/1/2024/>

Ward R, Friess D, Day R, MacKenzie R. (2016). *Impacts of climate change on mangrove ecosystems: a region by region overview*. Ecosystem Health and Sustainability 2(4). Disponible en: <https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/ehs2.1211>

WBG. (2021). *Climate Risk Profile: Costa Rica*. The World Bank Group. Disponible en: https://climateknowledgeportalworldbank.org/sites/default/files/country-profiles/15989-WB_Costa%20Rica%20Country%20Profile-WEB.pdf

WMO. (2024). *State of the Global climate 2023*. World Meteorological Organization. Disponible en: https://library.wmo.int/viewer/68835/download?file=1347_Global-statement-2023_en.pdf&type=pdf&navigator=1

Wyneken J, Lohmann K Muisick J. (Ed). (2013). *The biology of sea turtles* Volume 3. CRC press. First edition. Disponibles parcialmente en: The Biology of Sea Turtles - Google Libros

Xiong J, Zheng Yi, Zhang J, et al. (2023). *Impact of climate change on coastal water quality and its interaction with pollution prevention efforts*. Journal of Environmental Management. Volume 325, Part B. Disponible parcialmente en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301479722021302#:~:text=Temperature%20rise%20also%20promotes%20algal,they%20are%20designed%20to%20be>

Yasunaka S, Kouketsu S, Strutton PG, Sutton AJ, Murata A, Nakaoka A, Nojiri Y. (2019). *Spatiotemporal variability of surface water pCO₂ and nutrients in the tropical Pacific from 1981 to 2015*. Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography. Volumes 169–170. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967064518302406>

Zamora Trejos P, Cortés J. (2009). *Los manglares de Costa Rica: el Pacífico norte*. Revista de Biología Tropical Vol. 57 No. 3. Disponible en: https://www.scielo.sa.cr/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0034-77442009000300003

Anexo 1.

Indicadores de cambio climático para el GEM PACA

pH

La información sobre el comportamiento y la variabilidad en el pH para la región del POT es escasa, hay desde estudios sobre tendencias globales de acidificación (Lida et al., 2020), sobre la variabilidad espacio-temporal de la concentración de CO₂ de 1981 a 2015 (Yasunaka et al., 2019), o sobre la variación regional en la acidificación por eventos de surgencias o afloramientos (Ishii et al., 2020) hasta observaciones sobre la reducción en la concentración de CO₂ de la capa de agua superficial inducidas por la precipitación (Ho y Schanze, 2020). Sin embargo, estos análisis presentan una escala amplia para la región del POT que no permite detectar las variaciones a una escala nacional, subnacional y menos local. Para Costa Rica la información es escasa, se colecta de acuerdo con el uso y la necesidad, no hay mandato institucional para darle seguimiento y las instancias del sector público con rectoría sobre los recursos marinos no cuentan con la capacidad instalada (equipo y personal). La información disponible está basada principalmente en datos tomados para el golfo de Papagayo asociados al fenómeno de surgencia del Domo térmico (Rixen et al., 2012; Sánchez Noguera et al., 2018) o resultados de expediciones oceanográficas cuyos informes y resultados son de difícil acceso. Los efectos en cascada y las sinergias con otros estresores climáticos no están bien estudiados del todo, lo que aumenta la incertidumbre sobre la magnitud y alcance de los impactos de la acidificación en los recursos marino-costeros del Pacífico de Costa Rica.

Temperatura superficial del mar

Los océanos han aumentado su temperatura desde 1970 absorbiendo más del 90 % del exceso de calor en el sistema climático (IPCC, 2019a). Los registros observados para la región del pacífico tropical son consistentes con una respuesta al aumento de las concentraciones de CO₂ (Seager et al., 2019). La tendencia de la TSM según los registros históricos y modelos climáticos es positiva, aunque no concluyente sobre dónde está ocurriendo a mayor velocidad este aumento en la temperatura (An et al., 2012; Lee et al., 2023). La variabilidad climática y las variaciones naturales en la circulación oceánica son lentas, las series actuales de datos disponibles son de corta duración y no permiten identificar con claridad las señales de calentamiento global en el océano (IPCC 2019b). Para Costa Rica la información publicada es escasa, basada en campañas oceanográficas recientes (Mora Escalante et al., 2020) y en datos puntuales para bahía Culebra al norte del país (Alfaro et al., 2012). El Módulo de Información Oceanográfica (MIO) del Centro de Investigación en Ciencias del Mar y Limnología (CIMAR), de la Universidad de Costa Rica presenta boletines trimestrales con gráficas y estadísticas que incluyen esta variable. Sin embargo, la información no es depositada en bases de datos y trimestralmente se está actualizando. No hay un registro sistemático para esta variable.

Aumento del nivel del mar

El calentamiento del océano incide en el aumento del nivel del mar por un proceso denominado “expansión térmica” que resulta en la ocupación de un mayor espacio (IPCC 2013; IPCC 2019b). Este aumento en el nivel del mar no es uniforme, presenta variaciones regionales hasta de un 30% (Oppenheimer, 2019). Para esta región se ha identificado una característica zonal con un aumento del nivel del mar superior al promedio en el Pacífico

tropical oeste y un aumento del nivel del mar inferior al promedio en el Pacífico tropical este y noreste (Meyssignac et al., 2012; Piecuch et al., 2019; Hamlington et al., 2020).

Costa Rica cuenta con un Análisis de vulnerabilidad de las zonas oceánicas y marino costeras frente al cambio climático que contempla el aumento del nivel del mar (BIOMARCC, SINAC, GIZ; 2013), estudios de caso por aumento del nivel del mar en playa Grande (Drews y Fonseca, 2009a), en Paquera de Puntarenas (Ross Salazar et al., 2018) y publicados en revistas científicas para el Cocal de Puntarenas (Lizano Araya y Lizano Rodríguez, 2020) y playas del Coco, Tamarindo y Sámara (Lizano Araya y Lizano Rodríguez, 2023). Algunos estudios sobre la erosión costera y su impacto sobre la infraestructura vial han sido desarrollados para la Ruta Nacional 160 (Aragón Valle et al., 2019) y Ruta Nacional 23 (Ruiz et al., 2019). Se estima que la red de caminos está expuesta al aumento del nivel del mar en un 17 % para el Pacífico y un 27 % para el Caribe, principalmente en los ramales que comunican comunidades costeras y puertos con las carreteras principales (BIOMARCC SINAC GIZ, 2013a). Una proporción del 70 % de la población costera para el Pacífico está expuesta al aumento del nivel del mar (BIOMARCC SINAC GIZ, 2013a). El Instituto Meteorológico Nacional (IMN) realiza el monitoreo, estudios y proyecciones de las condiciones climáticas para el país, aunque los reportes y publicaciones oficiales de la institución sobre Escenarios regionalizados para el país (Alvarado et al., 2012) y sobre Proyecciones regionalizadas (Alvarado Gamboa, 2021) para cambio climático no contemplan variables para el ámbito marino.

La subregión del Pacífico central cuenta con información sobre este indicador: “..la variación del nivel del mar muestra una tendencia al aumento de hasta 2,0-2,8 mm/año, dependiendo de la morfología y de los procesos tectónicos de las costas. Para el 2040 (escenario RCP8.5) se espera un aumento de 0,30 m lo que afectaría la Península y las islas del Golfo, también Punta Morales, Chomes y Puntarenas, Jacó, Parrita y Quepos” (DCC MINAE, 2022b).

El país cuenta también con el Sistema Nacional de Monitoreo de Tsunamis (SINAMOT). Dentro de este sistema operan los mareógrafos de Costa Rica. En la actualidad la información disponible sobre el SINAMOT menciona la existencia de tres mareógrafos que monitorean el nivel del mar (y llevan registro de la temperatura superficial del mar), dos en la costa del Pacífico: Quepos e isla del Coco¹². Quepos es el más antiguo y cuenta con registros digitales desde 1999. La información es de acceso público y se puede ver en la plataforma de la UNESCO para monitoreo del nivel del mar: (vínculo de acceso) [Quepos](#).

Índice de riesgo climático

Costa Rica ha realizado análisis de riesgo climático a nivel cantonal para evaluar la vulnerabilidad de los territorios ante los efectos del cambio climático. Estos análisis de riesgo climático cantonal forman parte del "Plan A: Territorios Resilientes ante el Cambio Climático" implementado por el Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE) de Costa Rica y la Dirección de Cambio Climático (DCC). El objetivo es emprender un proceso de evaluación del riesgo climático, principalmente enfocado en el nivel administrativo cantonal. Los cantones costeros de la provincia de Guanacaste que cuentan con análisis de riesgos son La Cruz, Liberia, Carrillo, Santa Cruz, Nicoya, Hojancha, Nandayure, Abangares y

¹² Mareógrafos de Costa Rica. Disponible en: <https://www.sinamot.una.ac.cr/index.php/nuestro-trabajo/mareografos-costarica>

Cañas (Retana et al., 2020). El cantón de Puntarenas cuenta con un análisis de riesgos (Retana et al., 2020) que profundiza en los distritos de Lepanto, Paquera y Cóbano (Retana y Calvo, 2020). No hay información sobre la aplicación de este índice en el resto de los cantones costeros del Pacífico.

Nawrotzki y colaboradores (2023) han construido un índice de vulnerabilidad al cambio climático a escala cantonal para Costa Rica. Las capas de información reflejan cambios en los extremos climáticos, el riesgo de inundaciones, la cobertura vegetal, el acceso a la infraestructura (densidad de carreteras) y a los servicios de salud (distancia a los hospitales), así como diversas características socioeconómicas (nivel de riqueza, tasas de empleo, remesas, tasa de alfabetización) y demográficas (mortalidad infantil). De acuerdo con los resultados, siete cantones costeros del Pacífico presentan una vulnerabilidad moderada, nueve una alta y solo un cantón baja vulnerabilidad (Nawrotzki et al., 2023).

Índice de Niño Oceánico

El Índice del Niño Oceánico (ONI) es utilizado para medir y monitorear las anomalías (desviaciones de la media) de la temperatura superficial del mar (SST) en una región específica del océano Pacífico ecuatorial (región Niño 3.4) (NOAA, 2024). Esta información es utilizada para identificar si un Evento de Oscilación del Sur presenta condiciones de Niño o de Niña. En general, este índice se utiliza para la predicción y monitoreo de los impactos climáticos asociados con el ENOS (NOAA 2024). En Costa Rica el IMN lo utiliza para desarrollar pronósticos y estrategias de adaptación climática. Sin embargo, su uso está poco extendido y son escasas las publicaciones que hagan evidente este uso.