



CENTRO DE INVESTIGACIONES BIOLÓGICAS
DEL NOROESTE, S.C.

Programa de Estudios de Posgrado

**BASES PARA LA PLANEACIÓN ESPACIAL DE LA ZONA
COSTERA DE LOS MUNICIPIOS DE GUAYMAS Y EMPALME,
SONORA, MÉXICO: ENFOQUE BASADO EN EL ECOSISTEMA.**

T E S I S

Que para obtener el grado de

Maestra en Ciencias

Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales
(Orientación en Biología Marina)

Presenta

Andrea Escamilla Trejo

La Paz, Baja California Sur, enero de 2023.

ACTA DE LIBERACIÓN DE TESIS

En la Ciudad de La Paz, B. C. S., siendo las 11 horas del día 28 del Mes de noviembre del 2022, se procedió por los abajo firmantes, miembros de la Comisión Revisora de Tesis avalada por la Dirección de Estudios de Posgrado y Formación de Recursos Humanos del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., a liberar la Tesis de Grado titulada:

"Bases para la planeación espacial de la zona costera de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora, México: enfoque basado en el ecosistema"

Presentada por la alumna:

Andrea Escamilla Trejo

Aspirante al Grado de MAESTRO EN CIENCIAS EN EL USO, MANEJO Y PRESERVACIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES CON ORIENTACIÓN EN **Biología Marina**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron su **APROBACIÓN DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

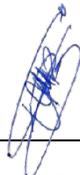
LA COMISIÓN REVISORA



Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Director de Tesis



Dra. Luz María Cruz García
Co-Tutora de Tesis



Dra. Thelma Michelle Ruiz Ruiz
Co-Tutora de Tesis



Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro,
Directora de Estudios de Posgrado y
Formación de Recursos Humanos.

La Paz, Baja California Sur, a 30 de noviembre de 2022.

Los miembros del comité de tesis del (la) estudiante ANDREA ESCAMILLA TREJO del Programa de Maestría en Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales, revisamos el contenido de la tesis y otorgamos el Vo.Bo. dado que la tesis no representa un plagio de otro documento como lo muestra el reporte de similitud realizado:

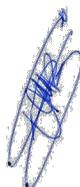
- Herramienta antiplagio: iThenticate
- Filtros utilizados: Citas y bibliografía
- Porcentajes de similitud: 17 % (Máximo 20% para tesis Posgrado)
Se muestra captura de pantalla

Guaymas y		Citas excluidas Bibliografía excluida	17% SIMILAR
Resumen de Coincidencias			
Coincidencia 1 de 9			
1	Internet 166 palabras Copiado el 17-Oct-2022 cibnor.repositorioinstitucional.mx		2%
2	Internet 113 palabras Copiado el 28-May-2019 www.gustavoybarra.com		1%
3	Internet 83 palabras Copiado el 16-Nov-2020 archive.org		1%
4	Internet 66 palabras Copiado el 23-Oct-2022 digaohm.semar.gob.mx		1%
5	Internet 56 palabras Copiado el 13-Dic-2020 dof.gob.mx		1%
6	Internet 46 palabras Copiado el 15-Dic-2006 www.paot.org.mx		1%

Firmas del comité



Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Director de Tesis



Dra. Thelma Michelle Ruiz Ruiz
Co-Tutora de Tesis



Dra. Luz María Cruz García
Co-Tutora de Tesis

Conformación de Comités

Comité Tutorial

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C.
Director de Tesis

Dra. Luz María Cruz García
Universidad Autónoma de Baja California Sur
Co-Tutora de Tesis

Dra. Thelma Michelle Ruiz Ruiz
Universidad de Guadalajara
Co-Tutora de Tesis

Comité Revisor de Tesis

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Dra. Luz María Cruz García
Dra. Thelma Michelle Ruiz Ruiz

Jurado de Examen

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Dra. Luz María Cruz García
Dra. Thelma Michelle Ruiz Ruiz

Suplente

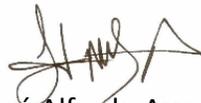
M. C. María Sara Burrola Sánchez

Resumen

En la zona costera, la creciente demanda de espacio para el desarrollo de las actividades humanas sin planeación ambiental tiene implicaciones en la pérdida progresiva de ecosistemas costeros y de sus servicios a la sociedad. El objetivo de este estudio es conocer la diversidad, amenazas y riesgos ecológicos de los ecosistemas costeros de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora, México, para aplicarse en procesos de planeación de la zona costera. El área de estudio comprende el escenario costero de Guaymas y Empalme, Sonora. El procedimiento metodológico consistió en: 1) delimitar la zona costera de Guaymas-Empalme a partir de los límites políticos municipales, las subcuencas hidrológicas costeras y la isóbata de -100 m, 2) elaborar un mapa con la ubicación espacial de los ecosistemas y las actividades humanas, y 3) determinar el riesgo ecológico de los ecosistemas mediante la información brindada por expertos a través de encuestas. Para la delimitación de la zona costera de Guaymas y Empalme se consideró el desarrollo de las principales actividades, además de las influencias costeras en la región (pesca, acuacultura, infraestructura costera, navegación y transporte marítimo, y turismo). Esta zona costera es diversa en ecosistemas costeros: playas - dunas costeras, ambiente bentónico, ambiente pelágico, ambientes rocosos, manglar, pastos marinos, islas y cuerpos de agua costeros. Esto exhibe su potencial de servicios ecosistémicos, destacando provisión de recursos pesqueros, mantenimiento de la biodiversidad, escenarios de recreación y esparcimiento, protección costera y reciclaje de nutrientes, entre otros. Sin embargo, se observó que las amenazas principales comprenden vertimientos al mar de aguas residuales sin tratamiento, generación y aporte de basura, pesca ilegal y la infraestructura, las cuales establecen interacción sinérgica con efectos del cambio climático. Ante estas amenazas, los manglares, cuerpos de agua costeros y ambientes rocosos presentaron mayor riesgo. Este conocimiento puede aplicarse en procesos de planeación espacial como los ordenamientos ecológicos o del territorio que contribuyan a la sostenibilidad ambiental de la zona costera de Guaymas y Empalme.

Palabras clave: ecosistemas costeros, riesgo ecológico, manejo costero, planeación espacial costera.

ORCID: 0000-0001-8146-2335.



Vo.Bo. Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Director de Tesis

Summary

In coastal zones, the growing demand for space for the development of human activities without environmental planning has implications in the progressive loss of coastal ecosystems and their services to society. The objective of this study is to understand the diversity, threats, and ecological risks of the coastal ecosystems of the Guaymas and Empalme municipalities in Sonora, Mexico so they can be included in coastal zone planning processes. The study area is comprised of the coastal region of Guaymas and Empalme, Sonora. The study was conducted by: 1) delimiting the coastal zone of Guaymas-Empalme based on the municipal political limits, the coastal hydrological sub-basins, and the -100 m isobath, 2) mapping the spatial location of the ecosystems and human activities, and 3) establishing the ecological risk of the ecosystems through information provided by experts using surveys. For the delimitation of the coastal zone of Guaymas and Empalme, the development of the main activities and coastal influences in the region (fishing, aquaculture, coastal infrastructure, navigation and maritime transportation, and tourism) were considered. The coastal zone is diverse in its coastal ecosystems: beaches - coastal dunes, benthic environments, pelagic environments, rocky environments, mangroves, seagrasses, islands, and coastal water bodies. The results show these ecosystems' potential for ecosystem services, with emphasis in the provision of fishery resources, maintaining biodiversity, recreation and leisure, coastal protection, and nutrient recycling, among others. However, the main threats were identified as dumping of untreated wastewater into the sea, generation and input of garbage, illegal fishing, and infrastructure, all of which are in synergy with the effects of climate change. Mangroves, coastal water bodies, and rocky environments were at higher risk from these threats. The knowledge gained from this research can be applied in spatial planning processes such as ecological or territorial planning that will contribute to the environmental sustainability of Guaymas and Empalme's coastal zone.

Keywords: *coastal ecosystems, ecological risk, coastal management, coastal spatial planning.*

ORCID: 0000-0001-8146-2335.



Vo.Bo. Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga
Director de Tesis

Dedicatoria

A mis papás, porque durante toda mi carrera profesional siempre estuvieron presentes mostrándome su apoyo incondicional, deseando lo mejor para mí. Sin importar dónde me encuentre o a dónde vaya, sé que ustedes me van a acompañar para guiarme, protegerme y ayudarme en lo que necesite. Los amo.

A mis hermanas, porque me apoyaron en cada momento difícil que enfrenté antes y durante la maestría. Igual que mis papás, ustedes también me acompañaron a donde fuera, mostrándome su cariño e interés en mí. Son mis compañeras y cómplices de vida, y me alegra saber que siempre podré contar con ustedes. Las amo.

A mis sobrinos, Flavio y Anette. Todavía están muy pequeños para comprender lo mucho que significan para mí, pero espero que con el tiempo pueda demostrarlo. A pesar de no haber tenido suficiente tiempo, los momentos que lograba compartir con ustedes me llenaban de tal felicidad que podía suavizar y dejar pasar cualquier angustia. Los amo mucho, mucho.

A mi novio, porque confiaste en mí desde que comenzamos a recorrer juntos este camino de la ciencia. Es un orgullo presenciar lo mucho que hemos crecido y hasta donde hemos llegado, aceptando con cariño nuestras manías, y mejorando mutuamente. Eres mi soporte y fuente de motivación para ser mejor persona. Aquí culmina un éxito más que celebro contigo, pero inicia un nuevo sendero hacia una vida juntos. Te amo.

A mis tíos Oly y Jorge, porque siento su cariño y alegría con cada uno de mis logros, y siempre están al pendiente de mí. Los quiero mucho.

A mi flor de desierto. Aprecio y atesoro cada instante que compartimos. Esta tesis también es tuya. Siempre ocuparás un lugar especial en mi corazón.

A mí misma, porque superé una prueba más, y con ello cumplí mi sueño de estudiar lo que más me apasiona, en mi lugar favorito de toda la vida.

Agradecimientos

Al Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., por ser mi institución receptora para cursar la Maestría en Ciencias en el Uso, Manejo y Preservación de los Recursos Naturales y por los apoyos otorgados para concluir mis estudios de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por otorgarme la beca no. 779963/2020 para realizar mis estudios de maestría.

A la Dra. Gracia Alicia Gómez Anduro, Directora de Estudios de Posgrado, y a todo el personal administrativo por su apoyo y atenciones para realizar el presente proyecto.

A mi Director de Tesis, Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga. Gracias por aceptarme como su tesista y apoyarme durante todo este proceso, que, con paciencia, calidez humana y profesionalismo me guió con motivación en cada paso hacia la conclusión de este proyecto. Gracias por su compromiso hacia mí como su estudiante, por sus consejos y el espacio que me brindó para tomar en cuenta mis ideas.

A mi Comité Tutorial, Dra. Thelma Michelle Ruiz Ruiz y Dra. Luz María Cruz García, por su apoyo en la elaboración del presente trabajo. Agradezco su tiempo, su dedicación y sus valiosos aportes al manuscrito de tesis.

A Julio Egrén Félix Domínguez y al Laboratorio de Modelación Espacial y Sensores Remotos (CIBNOR) por su apoyo para la elaboración de la encuesta digital que permitió el análisis de riesgos ecológicos de los ecosistemas costeros.

A Gil Ezequiel Ceseña Beltrán y al Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica (CIBNOR) por su apoyo en el asesoramiento para el análisis espacial de clasificación de los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme.

A la M. C. Elia Inés Polanco Mizquez (CEDO) por su apoyo en la elaboración del mapa con la ubicación espacial de los ecosistemas y actividades humanas en la zona costera de Guaymas y Empalme. Mis más sinceros agradecimientos por su disponibilidad, así como por tomarse el tiempo de atender esta actividad con prontitud y gran profesionalismo.

Al Geol. Mar. Gustavo Padilla Arredondo por su contribución en la identificación y ubicación de los tipos de costa que componen el litoral de los municipios de Guaymas y Emapalme.

A los maestros y doctores responsables de los cursos que tomé durante mis estudios de maestría. Gracias por compartir sus conocimientos que enriquecieron el entendimiento de mi trabajo, me orientaron en la investigación y guiaron mi formación como científica.

A mi familia, por mostrarme su apoyo para realizar mis actividades de la maestría. Gracias por festejar conmigo mis alegrías y mis logros, por acompañarme y estar al pendiente de mí. Verlos, escucharlos y pasar tiempo con ustedes siempre fue el motor que me impulsaba para continuar lejos de casa.

A mi novio Daniel Mateo Rangel Reséndez, por acompañarme en esta segunda carrera que realizamos juntos. Gracias por tu paciencia al explicarme constantemente sobre los procesos en los sistemas de información geográfica y apoyarme en diferentes actividades relacionadas. Gracias.

A mi amiga y compañera Paula Sternberg Rodríguez. Gracias por las sesiones de trabajo juntas, por tus consejos y motivación que me ayudaron a seguir adelante con mi proyecto de maestría. Gracias por recorrer de inicio a fin este proceso conmigo.

A mis amigos de maestría. Gracias por ayudarme a llevar a cabo el proceso de tesis de una manera divertida, adquiriendo experiencias que no hubiera sido posible hacerlo sola.

A mis amigos de siempre, Mateo, Iván, Lili, Andrea y Larry, porque de alguna u otra manera, a larga distancia o cerca de mí, estuvieron apoyándome con sus palabras, consejos y conocimientos. Iván, fuiste de gran apoyo para mí, gracias porque sin dudar y sin tener que pedírtelo estuviste disponible para ayudarme, lo aprecio mucho.

Contenido	
Resumen	i
Summary	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Contenido	vi
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	ix
1. INTRODUCCIÓN	1
2. ANTECEDENTES	4
2.1 Ecosistemas costeros en Guaymas y Empalme, Sonora.....	4
2.1.1 Playas - dunas costeras	4
2.1.2 Ambientes rocosos.....	6
2.1.3 Ambiente bentónico	7
2.1.4 Ambiente pelágico	7
2.1.5 Islas.....	8
2.1.6 Cuerpos de agua costeros.....	9
2.1.7 Pastos marinos.....	11
2.1.8 Manglares	12
2.2 Servicios ecosistémicos	13
2.3 Planeación espacial marina y costera.....	14
2.3.1 Delimitación costera	15
2.3.2 Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión costera	18
2.4 Presiones antropogénicas en los ecosistemas costeros.....	18
2.4.1 Presiones antropogénicas por actividades en la zona conurbada Guaymas-Empalme, Sonora	20
2.4.1.1 Playas - dunas costeras	20
2.4.1.2 Ambientes rocosos	21
2.4.1.3 Ambiente bentónico.....	21
2.4.1.4 Ambiente pelágico	21
2.4.1.5 Islas.....	21
2.4.1.6 Cuerpos de agua costeros	22
2.4.1.7 Pastos marinos	23
2.4.1.8 Manglares.....	23
2.5 Riesgo ecológico	23
3. JUSTIFICACIÓN	26
4. HIPÓTESIS	27
5. OBJETIVOS	28
5.1 Objetivo general	28
5.2 Objetivos particulares.....	28
6. MATERIAL Y MÉTODOS	29
6.1 Área de estudio.....	29
6.1.1 Fisiografía	30
6.1.2 Hidrología.....	30
6.1.3 Clima	31
6.1.4 Actividades productivas.....	31

6.2 Metodología	31
6.2.1 Delimitación de la zona costera.....	31
6.2.2 Elaboración de mapa con delimitación espacial los ecosistemas costeros, clasificación de los tipos de costa e identificación espacial de actividades humanas.....	34
6.2.3 Análisis del riesgo ecológico y amenazas a los ecosistemas costeros.....	39
6.2.4 Propuesta de lineamientos para la planeación espacial de la zona costera del municipio de Guaymas.....	43
7. RESULTADOS.....	44
7.1 Delimitación de la zona costera de Guaymas y Empalme.....	44
7.2 Ubicación y cobertura de los ecosistemas costeros.....	45
7.3 Amenazas y riesgo ecológico de los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme	47
7.3.1 Amenazas a los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme	48
7.3.2 Interacciones sinérgicas.....	50
7.3.3 Riesgo Ecológico.....	51
8. DISCUSIÓN.....	53
8.1 Delimitación de la zona costera de Guaymas y Empalme.....	53
8.2 Los ecosistemas en la zona costera de Guaymas y Empalme	54
8.3 Amenazas y riesgos ecológicos en los ecosistemas de la zona costera de Guaymas y Empalme	58
8.4 Lineamientos para la planeación espacial de la zona costera.....	64
9. CONCLUSIONES.....	67
10. LITERATURA CITADA	69
11. ANEXOS	79
Anexo A Encuesta acerca de la zona costera de Guaymas y Empalme, Sonora, México.....	79
Anexo B Amenazas e influencias identificadas en los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme, Sonora, México.....	98
Anexo C Interacciones sinérgicas entre los efectos del cambio climático y las actividades e influencias antropogénicas en los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme, Sonora, México.	101

Lista de figuras

Figura 1. Playa San Francisco	5
Figura 2. Playa La Manga	5
Figura 3. Costa rocosa en Paseo Mar Bermejo.	7
Figura 4. Isla El Peruano.....	9
Figura 5. Bahía San Carlos.....	10
Figura 6. Bahía Bacochibampo.....	11
Figura 7. <i>Zostera marina</i> en estero El Soldado	12
Figura 8. Manglar en estero El Soldado	13
Figura 9. Criterios ambientales utilizados para la delimitación de la zona costera.	16
Figura 10. Actividades antropogénicas en ecosistemas costeros a nivel mundial	19
Figura 11. Localización del área de estudio, indicando la zona costera de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora.....	29
Figura 12. Criterios específicos de delimitación de la zona costera de Guaymas y Empalme.	32
Figura 13. Procedimiento metodológico para la delimitación de la zona costera.	32
Figura 14. Escenas Sentinel-2 utilizadas para la clasificación de los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme, Sonora.....	35
Figura 15. Delimitación de la zona costera de Guaymas y Empalme	44
Figura 16. Ubicación espacial de los ecosistemas identificados en la zona costera de Guaymas y Empalme.....	45
Figura 17. Composición del perfil de las personas que respondieron la encuesta (A) y años de experiencia expresados (B)	47
Figura 18. Principales actividades e influencias humanas detectadas en los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme	48
Figura 19. Sinergias resultantes entre los efectos del cambio climático y actividades e influencias antropogénicas en la zona costera de Guaymas y Empalme.....	50
Figura 20. Puntaje de vulnerabilidad y efecto de las amenazas a los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme	51
Figura 21. Estimación de riesgo ecológico de los ecosistemas costeros. La línea punteada indica el valor promedio estimado de riesgo ecológico	52
Figura 22. Nivel de incertidumbre asociada a la evaluación ecológica de los ecosistemas costeros.	52
Figura 23. Actividades e influencias antropogénicas que establecen interacciones sinérgicas con aumento del nivel medio del mar	101
Figura 24. Actividades e influencias antropogénicas que establecen interacciones sinérgicas con calentamiento global.....	101
Figura 25. Actividades e influencias antropogénicas que establecen interacciones sinérgicas con acidificación del océano.	102
Figura 26. Actividades e influencias antropogénicas que establecen interacciones sinérgicas con eventos extremos del clima	102

Lista de tablas

Tabla 1. Funciones y servicios de los ecosistemas costeros	13
Tabla 2. Sectores de alta aptitud y sus principales atributos en la unidad de gestión ambiental costera UGC10-Guaymas/Sonora Sur	17
Tabla 3. Principales amenazas a los ecosistemas costeros con alto riesgo ecológico descritos en estudios recientes	25
Tabla 4. Subcuencas del Río Mátape	30
Tabla 5. Subcuencas hidrológicas costeras en los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora..	33
Tabla 6. Imágenes de satélite Sentinel-2 utilizadas para la clasificación de ecosistemas de la zona costera	34
Tabla 7. Listado de clases y su referencia para el proceso de clasificación.....	36
Tabla 8. Componentes de la encuesta para el análisis del riesgo ecológico	40
Tabla 9. Sistema de evaluación de la vulnerabilidad del ecosistema y el efecto de las actividades antropogénicas.....	42
Tabla 10. Representatividad de la zona costera a partir de la clasificación realizada y los usos del suelo y vegetación reportados por la serie VII del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018) en el área de estudio	46
Tabla 11. Actividades e influencias principales para cada tipo de ecosistema presente en la zona costera de Guaymas y Empalme	49
Tabla 12. Servicios potenciales de los ecosistemas en la zona costera de Guaymas y Empalme.	55
Tabla 13. Listado comparativo entre la clasificación realizada y los usos del suelo y vegetación reportados por la serie VII de Instituto Nacional de Estadística y Geografía en el área de estudio (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018)	62

1. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas costeros pueden ser considerados como las redes biológicas con la mayor diversidad de especies existentes, que puede ser explicada gracias a su posición geográfica y su fisiografía (Lara-Lara *et al.*, 2008b; Chatterjee, 2017).

Según su ubicación con respecto a la plataforma continental, los ecosistemas costeros se dividen en dos zonas, la zona marina y la zona costera, ésta última compuesta por una porción continental, una porción marina y una porción insular (Lara-Lara *et al.*, 2008a).

La gran variabilidad que distingue a los ecosistemas costeros en función de su composición y estructura permite la generación de servicios ecosistémicos que son altamente aprovechados para el desarrollo de actividades productivas, de recreación y para el bienestar humano (Lara-Lara *et al.*, 2008a). En general, estos ecosistemas ofrecen servicios de provisión, regulación y culturales a través de producción de alimento, mantenimiento de la biodiversidad, turismo, instalaciones para transporte marino y puertos, protección de la costa, calidad del agua y funciones hidrológicas, que en esencia pueden variar en cantidad y valoración según la naturaleza del ecosistema (Arkema *et al.*, 2015; Chatterjee, 2017; Ricaurte *et al.*, 2017; Santos Saldanha y Da Silva Costa, 2019).

No obstante, durante la última década la creciente demanda de espacios costeros ha ocasionado la degradación de estos ecosistemas y la pérdida de los servicios que brindan (de Andrés *et al.*, 2017), asociado a un posible incremento del 30 % del cambio de uso de suelo para distintas actividades económicas (Ricaurte *et al.*, 2017), lo cual podría representar el 75 % de la población mundial viviendo en zonas costeras hacia el año 2025 (Lara-Lara *et al.*, 2008b).

Las presiones al ambiente en las zonas costeras son generadas por actividades humanas desarrolladas principalmente en los sectores de agricultura, acuicultura, pesquería, turismo, urbanización, transporte marítimo, desarrollo industrial y minería (Newton *et al.*, 2020). Como resultado, los ecosistemas costeros del Golfo de California están siendo amenazados principalmente por altas concentraciones de nutrientes e incrementos en las proliferaciones algales nocivas, los cuales han provocado alteraciones en la composición y estructura de los

ecosistemas debido a la mortalidad de los organismos y la reducción de la productividad (Lluch-Cota *et al.*, 2007).

En particular, los ecosistemas costeros de Sonora están fuertemente presionados por su transformación a la agricultura, uso pecuario, minería, urbanización y desarrollos costeros (Martínez-Yrizar *et al.*, 2010).

La mayoría de las lagunas costeras, estuarios y bahías de la región de Guaymas y Empalme, Sonora, son receptoras de aguas residuales urbanas, agrícolas, acuícolas e industriales (Barraza-Guardado *et al.*, 2013; Arreola-Lizárraga *et al.*, 2016; Ruiz-Ruiz *et al.*, 2016, 2017; Medina-Galván *et al.*, 2021) que descargan altas cantidades de nutrientes y residuos tóxicos (Osuna-Ramírez *et al.*, 2017), ocasionando cambios en el metabolismo y dinámica de nutrientes de los ecosistemas (Medina-Galván *et al.*, 2021).

En este contexto cobra relevancia la planeación espacial. En respuesta al incremento de los impactos y los conflictos sociales - económicos en la zona costera, resulta necesaria la implementación de una planeación espacial con enfoque basado en el ecosistema para alcanzar el uso sustentable de los servicios ecosistémicos costeros (Ortiz-Lozano *et al.*, 2017; Morzaria-Luna *et al.*, 2020) y la identificación de zonas con ecosistemas de mayor vulnerabilidad ante presiones antropogénicas a través del análisis de riesgo ecológico (Doubleday *et al.*, 2017). De manera que el proceso de planeación ha sido implementado como una solución a los efectos ocasionados por estresores ambientales (Morzaria-Luna *et al.*, 2020).

La planeación espacial es apoyada por tecnologías para el análisis e identificación de la distribución espacial y temporal de las actividades humanas dentro de las zonas costeras. Un ejemplo de ello son los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los cuales comprenden una variedad de herramientas geoespaciales útiles y confiables para la planeación costera (Portman, 2016). Por medio de los SIG se puede generar información espacial a través de representaciones gráficas, o mapas digitales, necesarios para resaltar un elemento importante en el desarrollo de políticas de aprovechamiento y conservación de los recursos naturales que se encuentran amenazados (Cruz García, 2015).

La presente tesis está orientada a generar conocimiento sobre la diversidad y cobertura de ecosistemas costeros en los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora, México, así como la determinación del riesgo ecológico que enfrentan ante las amenazas derivadas de los efectos del cambio climático y de diversas actividades productivas que incluyen movimiento de carga marítima, camaronicultura, turismo náutico, turismo de sol y playa, actividades pesqueras, desarrollo industrial y desarrollo urbano. Este conocimiento podrá aplicarse en procesos de planeación costera para el mejor uso, manejo y conservación de los ecosistemas costeros y sus servicios ecosistémicos.

2. ANTECEDENTES

2.1 Ecosistemas costeros en Guaymas y Empalme, Sonora

La zona costera se define como un espacio de interacción entre los ambientes marino, terrestre y atmosférico, con límites variables hacia tierra y hacia el mar. En México, la línea de costa comprende 17 entidades federativas con una extensión de 11,122 Km (descartando el territorio insular) y la zona costera se ha definido por una parte continental compuesta por 263 municipios, una parte marina delimitada por la isóbata de los -200 m, y una parte insular (Lara-Lara *et al.*, 2008b).

El litoral de Sonora tiene una extensión de 1,207.8 Km (Rangel-Buitrago *et al.*, 2020), donde los municipios de Guaymas y Empalme en Sonora, México, se caracterizan por un litoral de ≈175 Km, en una región semi-árida subtropical. Al interior de la zona costera que incluye a ambos municipios se localizan diversos ecosistemas costeros: playas arenosas, playas rocosas, manglares, islas, lagunas costeras, dunas costeras, ensenadas y bahías (Mata Ángeles, 2016).

2.1.1 Playas - dunas costeras

Las playas arenosas constituyen un depósito de sedimentos arrastrados por la corriente marina (Beatriz Benseny, 2011). Se pueden encontrar playas desde reflectivas hasta disipativas, incluyendo tipos intermedios; las reflectivas se caracterizan por zonas intermareales estrechas, arenas gruesas, pendientes pronunciadas y oleaje fuerte, y las disipativas con zonas intermareales amplias, arenas finas, pendientes planas y oleaje débil (Schlacher *et al.*, 2008; Barboza y Defeo, 2015).

Las playas comparten características físicas y biológicas con las dunas costeras (Schlacher *et al.*, 2008), siendo éstas últimas el límite terrestre de las playas, por lo que comúnmente ambos sistemas se abordan como una unidad de funcionamiento. El principal aporte de sedimento para la formación de los montículos característicos de las dunas costeras es la arena de la playa, la cual es transportada tierra adentro por el viento, que posteriormente es estabilizada con el desarrollo sucesivo de plantas herbáceas y arbustos bajos principalmente (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2013).

En Guaymas y Empalme destacan cuatro playas por su aptitud recreativa: Los Algodones, San Francisco, ambas ubicadas en la zona de San Carlos, Miramar en el municipio de Guaymas, y El Cochórit en el municipio de Empalme (Fig. 1, Fig. 2). Las cuatro playas poseen perfiles morfodinámicos de tipo intermedio, con predominancia de arena fina y media en el sedimento, además presentan alturas bajas de oleaje (< 1 m) y no hay corrientes de retorno pronunciadas (costa micromareal) (García-Morales, 2017).



Figura 1. Playa San Francisco.

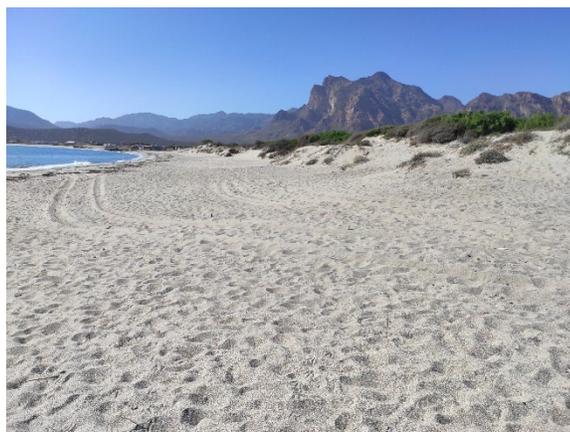


Figura 2. Playa La Manga.

2.1.2 Ambientes rocosos

Los sistemas rocosos son ambientes intermareales cuyo componente principal son rocas sometidas a condiciones físico-químicas a través del oleaje, las mareas, el viento y la luz del sol, interactuando entre sí para crear ambientes físicamente extremos para las especies (Fernández *et al.*, 2014). Los tipos de rocas presentes pueden ser de material duro como el granito o el basalto, o más suave como la piedra caliza, que se moldean a través de procesos erosivos generando patrones de zonación de la costa que resultan en hábitats diversos, como acantilados rocosos, arrecifes rocosos y playas rocosas que favorecen la diversidad biológica (Satyam y Thiruchitrambalam, 2018).

Los ambientes rocosos ofrecen la mejor enfilación para reconocer los puertos en Guaymas (Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología, 2022). Dentro de la región, estos ecosistemas están conformados por acantilados rodeados por piedras aisladas, y puntas rocosas con alturas registradas de 18 a 75 m asociadas a bahías y playas rocosas (Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología, 2022). El relieve que caracteriza los ambientes rocosos se compone de sistemas montañosos de morfología irregular debido a procesos erosivos, produciendo valles con depósitos de materiales poco consolidados al pie de las elevaciones (Administración Portuaria Integral de Guaymas S. A. de C. V., 2020). Las laderas forman pendientes entre 15° y 45°, y en la cercanía al mar pueden alcanzar 90° de inclinación, sobre los cuales ocasionalmente se presenta vegetación sarcocaula (Administración Portuaria Integral de Guaymas S. A. de C. V., 2020).

Entre los sitios reconocidos del sistema de ambientes rocosos en la región de Guaymas y Empalme (Fig. 3) se encuentran los picos Tetas de Cabra, Punta Paraderos, Punta Guillermo, Punta de la Cueva, Cabo Arco, Punta Mezquite, Cerro Bacochibampo, Punta San Rafael, Punta Colorado, Cabo Haro y Punta Narizón (Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología, 2022).



Figura 3. Costa rocosa en Paseo Mar Bermejo.

2.1.3 Ambiente bentónico

Los ambientes bentónicos, o fondos blandos, son ecosistemas donde el sustrato constituye el factor principal que define las condiciones ecológicas para el desarrollo de las comunidades asociadas de organismos, también conocidos como bentos (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, 2006). El sustrato se caracteriza por una baja complejidad topográfica y está conformado por partículas sedimentarias no consolidadas (arenas, arcillas, cienos y limos), encontrándose en un rango de profundidad de 0 a 1000 m (Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras, 2006).

En Guaymas y Empalme predomina el tipo de sedimento areno-limoso con alto contenido de arena que en promedio puede representar el 72 % del contenido total del sustrato (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016; Vargas González, 2018), y donde se han registrado diferentes especies de peces (baqueta, cabicucho, sardina y sabalote), crustáceos (jaiba, cangrejo y camarón), moluscos (almeja chocolata, caracol chino, callo de hacha y conito) (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2016) y poliquetos (Administración Portuaria Integral de Guaymas S. A. de C. V., 2020).

2.1.4 Ambiente pelágico

Los ecosistemas pelágicos se caracterizan por un sustrato constituido por masas de agua sobre las que actúan fuerzas físicas resultantes de procesos turbulentos que influyen en la distribución y hábitos de los organismos pelágicos (Bertrand *et al.*, 2014). La turbulencia del agua, en

combinación con los gradientes de salinidad, determina la formación de zonas o escalas a lo largo del gradiente de agua vertical ($\approx 1 - 10$ m) y horizontal ($\approx 1 - 100$ km) (Álvarez-Berastegui *et al.*, 2014; Bertrand *et al.*, 2014). En el margen este del Golfo de California, estos sistemas son enriquecidos por mecanismos de surgencias y corrientes de agua continentales, resultando en ambientes altamente productivos representados por grandes poblaciones de anchovetas y sardinas, jureles, atunes y sierras (Lara-Lara, 2007).

2.1.5 Islas

Las islas son sistemas aislados caracterizados por sus componentes bióticos y abióticos con procesos de desarrollo particulares, donde la dinámica de la vegetación define la estructura de la isla (Mueller-Dombois, 1992).

El componente abiótico puede desarrollarse a partir del medio marino o del medio terrestre, resultando en islas oceánicas e islas continentales que comparten materiales parentales de procedencia volcánica (Satyam y Thiruchitrambalam, 2018).

En cuanto al componente biótico, los primeros productores (plantas) arriban a las islas mediante agentes de dispersión, incluyendo el océano, aves marinas y el viento. Su establecimiento provee alimento y refugio para los animales asociados evolutivamente a los tipos de vegetación presentes (Satyam y Thiruchitrambalam, 2018).

El sistema insular de Guaymas y Empalme está conformado por aproximadamente 17 islas e islotes rocosos (Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología, 2022) compuestos por rocas ígneas intrusivas, lávicas, metamórficas, calizas y conglomerados (Administración Portuaria Integral de Guaymas S. A. de C. V., 2020). En promedio, las islas pueden alcanzar 29 m de altura, 239 m de largo y 90 m de ancho, y se encuentran asociadas a colinas de altura moderada, acantilados y arrecifes rocosos (Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología, 2022). Entre las islas e islotes más reconocidos se puede mencionar a Isla San Pedro Nolasco, Los Algodones, Isla Venado, Isla San Luis, Isla Blanca, Isla Lobos (Cabo Arco), isleta Chapetona, Isla del Medio, Isla Candelero, Isla Mellizas, Isla Pitahaya, Isla Pájaros, Isla San Vicente, Morro Inglés, Isla Almagre Grande y Muelle Sur (Fig. 4) (Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología, 2022).



Figura 4. Isla El Peruano.

2.1.6 Cuerpos de agua costeros

Los cuerpos de aguas costeros, como lagunas costeras y bahías, son reconocidos por su alta productividad explicada por su diversidad de productores primarios. La laguna costera es una depresión de la línea de costa por debajo del nivel máximo de la pleamar que se encuentra en comunicación efímera o permanente con el mar, separada de éste por una barrera de arena, y en algunos casos alimentada por un río (Kjerfve y Magill, 1989). Las bahías son de origen tectónico en forma de un entrante de la línea de costa que se conecta con el continente (Yip-Lee *et al.*, 2014), prolongándose hacia el interior con un perfil cóncavo (Kjerfve y Magill, 1989); se caracterizan por ser formaciones rocosas que proveen una barrera protectora contra el oleaje (Duffy, 2006).

Las lagunas costeras de Guaymas y Empalme han sido descritas como sistemas de baja profundidad (<2 m), con alta influencia marina (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2018) y una geomorfología restringida (Medina-Galván *et al.*, 2021) que, de acuerdo con la clasificación de Kjerfve y Magill (1989) presentan al menos dos canales de entrada, tienen circulación por mareas bien definida y corrientes de circulación altamente influenciadas por el viento. En cuanto a las bahías, éstas se caracterizan por profundidades regulares que varían entre 7 y 15 m, con un patrón de reducción hacia la línea de costa (Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología, 2022).

Las lagunas Guaymas, El Rancho, Empalme, Las Guásimas y Algodones han sido reconocidos en los municipios de Guaymas y Empalme por sus valiosos servicios de provisión de alimentos y reciclaje de nutrientes, necesarios para el soporte de actividades de pesca y acuicultura. No obstante, han sido objeto de estudio en múltiples ocasiones por su afectación a causa de las aguas residuales provenientes de granjas camaronícolas, urbanas e industriales (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2004, 2016b; Ruiz-Ruiz *et al.*, 2016; Reynaga-Franco *et al.*, 2017; Medina-Galván *et al.*, 2021). Por otro lado, el estero El Soldado es ampliamente reconocido por sus condiciones naturales que lo designan como un sistema prístino debido a que no es afectado significativamente por influencias antropogénicas (Salas Mejía, 2019); por ello posee un valor ecológico regional para la conservación de la biodiversidad a través de la provisión de sitios de refugio para organismos de uso comercial y con estatus de protección legal, además de proveer servicios de recreación para la ciudad de Guaymas y sus alrededores (Cervantes *et al.*, 1992; Dirección General del Boletín Oficial y Archivo del Estado, 2006).

Otros cuerpos de agua reconocidos en la región costera de este estudio son la ensenada San Francisco, ensenada de Baco-chibampo, Bahía Catalina y estero El Cocho-re (Fig. 5, Fig.6) (Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología, 2022).

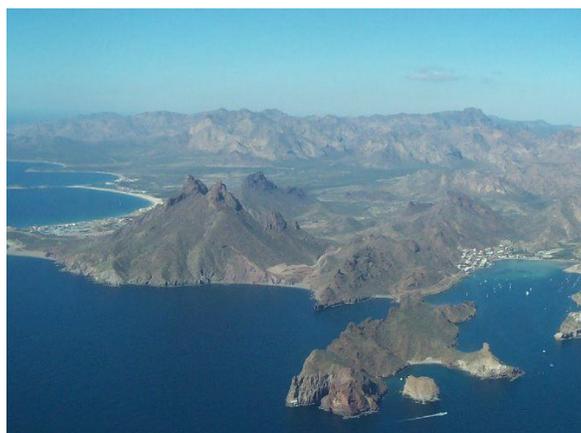


Figura 5. Bahía San Carlos.



Figura 6. Bahía Bacochibampo.

2.1.7 Pastos marinos

Los pastos marinos son considerados como uno de los ecosistemas costeros más productivos. Están compuestos por plantas con flores, polen y semillas que crecen sobre sustratos suaves dentro de la capa fótica del medio marino y zonas estuarinas influenciadas por la acción turbulenta del agua (Barbier *et al.*, 2011).

En las zonas costeras, los pastos marinos pueden formar poblaciones monoespecíficas (una especie) o mixtas (varias especies), donde su distribución, abundancia y funcionamiento ecológico están reguladas por factores fisicoquímicos, incluyendo salinidad, nutrientes, cantidad de luz, sustrato y concentración de carbono orgánico (Herzka *et al.*, 2020).

En Sonora, los ecosistemas de pastos marinos están representados por praderas de la especie *Zostera marina*, que ha sido registrada en el municipio de Guaymas (López Calderón *et al.*, 2013), particularmente en el estero El Soldado, donde la dinámica de desarrollo es estacional con manchones de *Z. marina* durante la temporada otoño-invierno (Fig. 7).



Figura 7. *Zostera marina* en estero El Soldado.

2.1.8 Manglares

Los ecosistemas de manglar son bosques costeros que habitan ambientes salinos intermareales con variaciones en función de factores geomorfológicos (sedimentación, procesos costeros y erosión), hidrológicos (aporte y calidad de agua), geofísicos (nivel del mar, clima y mareas) y biológicos (adaptaciones, migraciones e interacciones específicas) (Rodríguez Zúñiga *et al.*, 2018).

Los manglares pueden clasificarse en manglares de franja, manglares ribereños y manglares de cuenca, diferenciándose en la hidrología, ciclado de nutrientes y productividad. Los manglares de franja son los más expuestos a los efectos por las mareas y a la fuerza proveniente del mar, y es común la presencia de neumatóforos y raíces de apoyo; los manglares ribereños son alimentados por agua de río y mareas, por lo cual la salinidad es moderada, y suele haber una alta productividad; mientras que los manglares de cuenca generalmente se encuentran atrás de los otros dos tipos de manglares, así que en ocasiones son inundados por las mareas, son de baja productividad y de moderada a baja salinidad (Ewel *et al.*, 1998).

En México se ha descrito al mangle negro (*Avicennia germinans*) como el más abundante, ubicado en la parte posterior del manglar; en la porción interna del manglar se localiza el mangle rojo (*Rhizophora mangle*), ocasionalmente unido al mangle blanco (*Laguncularia racemosa*) (Fig. 8) (Cervantes *et al.*, 1992).



Figura 8. Manglar en estero El Soldado.

2.2 Servicios ecosistémicos

Los ecosistemas costeros proveen una gran variedad de servicios, o beneficios, que los humanos aprovechan, como: provisión de alimentos y materias primas, regulación, recreación, culturales, mantenimiento de la biodiversidad, protección de la línea de costa, reciclaje de nutrientes, mantenimiento de buena calidad del agua, entre otros, los cuales pueden variar en cantidad y valoración según la naturaleza de cada ecosistema (Tabla 1) (Arkema *et al.*, 2015; Chatterjee, 2017; Ricaurte *et al.*, 2017; Santos Saldanha y Da Silva Costa, 2019).

Tabla 1. Funciones y servicios de los ecosistemas costeros (Tomado y adaptado de Haines-Young y Potschin, 2017).

Tipo de función	Descripción	Servicios
Provisión	Son todos los productos materiales y/o energéticos obtenidos de los recursos bióticos y abióticos.	Materia prima
		Producción alimenticia
Regulación y mantenimiento	Procesos ecológicos en los que organismos y los factores abióticos median el ambiente que tiene influencia sobre la salud humana, incluyendo su seguridad y comodidad.	Protección costera
		Control de erosión
		Captación de agua
		Purificación de agua
		Mantenimiento de vida silvestre
		Mantenimiento de pesquerías

		Flujo de nutrientes
		Almacenamiento de carbono
Cultural	Productos no materiales que influyen en el estado físico y mental de las personas.	Turismo y recreación
		Educación e investigación

2.3 Planeación espacial marina y costera

El manejo ambiental se refiere a un conjunto de acciones a largo plazo que controlan y guían las interacciones humano-ambiente con el fin de proteger la salud y bienestar de los humanos, así como la calidad ambiental (Portman, 2016). El manejo ambiental suele ser apoyado por el uso de enfoques tecnológicos que proveen una perspectiva interdisciplinaria que convergen en un plan de solución diseñado estratégicamente para la protección ambiental, desarrollado a partir de la formulación de objetivos, análisis de información y la implementación/evaluación de políticas para el cumplimiento de los objetivos (Portman, 2016).

La planeación espacial marina es un elemento del manejo de ecosistemas, y se puede definir como el proceso de análisis e identificación de la distribución espacial y temporal de las actividades humanas dentro de áreas marinas (Charles y Douvere, 2009). Este proceso de planeación ha sido implementado como una solución a los efectos ocasionados por estresores ambientales, incluyendo la reducción de los impactos ambientales y promover el uso sustentable de los servicios ecosistémicos en el océano y las zonas costeras (Morzaria-Luna *et al.*, 2020).

El manejo con enfoque basado en el ecosistema (MBE) analiza las interacciones que se establecen en un sistema que involucra a los humanos y a los servicios ecosistémicos, haciendo énfasis en las actividades antropogénicas que tienen influencias sobre la salud del sistema con base en la mejor información científica disponible, permitiendo desarrollar el entendimiento de los impactos para así alcanzar el uso sustentable de los servicios y conservar su integridad (Douvere, 2008; Ortiz-Lozano *et al.*, 2017; Oakley *et al.*, 2018; Lombard *et al.*, 2019).

El MBE implica un manejo adaptado multiescalar y a largo plazo que considera al ecosistema completo, reconociendo a los humanos como una parte integral con potencial de afectación, de manera que el MBE enfatiza la protección de la estructura, funcionalidad y procesos clave del

ecosistema, tomando en cuenta la interconectividad entre sistemas y reconociendo la importancia de las interacciones entre especies y los servicios ecosistémicos (Charles y Douvere, 2009).

El marco que rige el proceso de MBE está diseñado a partir de componentes sociales, económicos y ambientales distribuidos en grupos de manejo para la gobernanza, toma de decisiones e implementación que se apoyan de herramientas no espaciales y espaciales (Morzaria-Luna *et al.*, 2020).

2.3.1 Delimitación costera

El establecimiento de los límites marinos y terrestres en zonas costeras es indispensable en el proceso de manejo y planeación de los ecosistemas (Milanés Batista *et al.*, 2017), en particular para delinear el contexto en la toma de decisiones de manejo y su implementación (Morzaria-Luna *et al.*, 2020). Para la demarcación y delimitación de las zonas costeras Milanés Batista *et al.* (2017) refiere el uso de unidades de gestión ambiental costera que incluyen criterios funcionales y naturales analizados mediante Sistemas de Información Geográfica; los criterios funcionales están asociados con el componente humano, mientras que los criterios naturales tienen como base los componentes y complejos físico-naturales de los ecosistemas (Fig. 9).

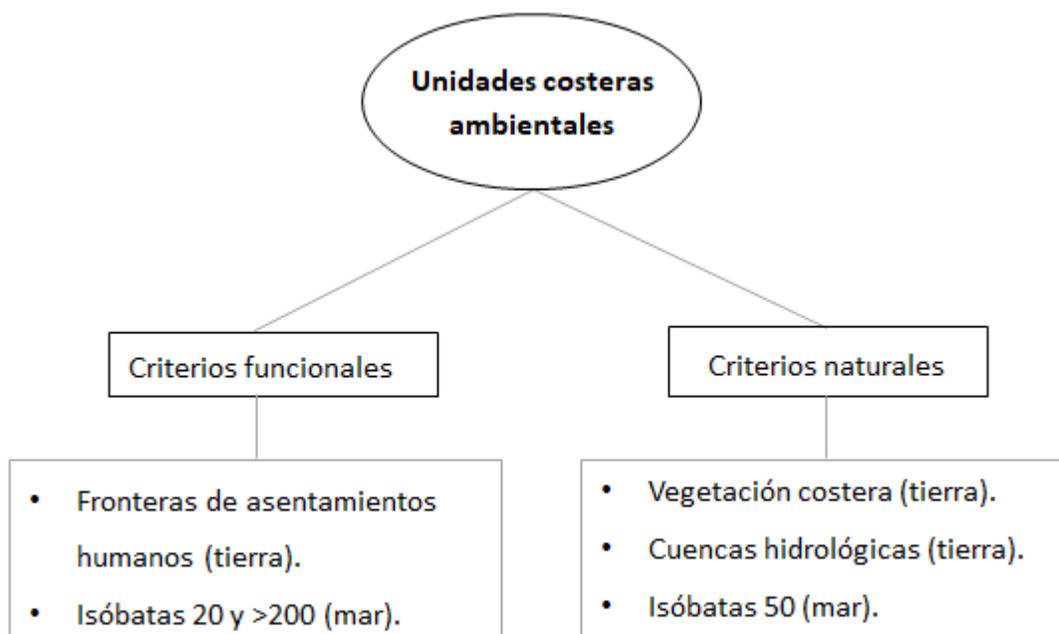


Figura 9. Criterios ambientales utilizados para la delimitación de la zona costera.

En el Proceso de Ordenamiento Ecológico Territorial en México, las unidades de gestión ambiental reflejan las siguientes políticas ambientales según corresponda (Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora, 2008):

- 1) Aprovechamiento sustentable. Se aplica a las áreas aptas para un uso o actividad económica de manera eficiente, socialmente útil y sin generar impactos negativos al ambiente.
- 2) Protección o preservación. Aplicable a los terrenos donde los ambientes naturales tienen características relevantes que permiten asegurar el equilibrio y la continuidad de los procesos evolutivos y ecológicos, y cuya permanencia es crítica para actividades económicas o ecológicas, por lo cual es necesario mantenerlas con mínimas perturbaciones.
- 3) Conservación. Está dirigida a los terrenos cuyos usos actuales o propuestos no interfieran con su función ecológica relevante; su inclusión en los sistemas de áreas naturales en el ámbito estatal y municipal es opcional.

- 4) Restauración. Aplica en áreas con procesos de deterioro ambiental en las cuales es necesaria la recuperación y restablecimiento de las condiciones que propician la evolución y la continuidad de los procesos naturales que tienen implicaciones económicas y/o ecológicas.

El Golfo de California cuenta con 15 unidades de gestión ambiental costera y 7 unidades de gestión ambiental oceánica. Los municipios de Guaymas y Empalme pertenecen a la unidad de gestión ambiental costera UGC10, donde los sectores predominantes, o de alta aptitud (áreas donde hay un mayor favorecimiento para el desarrollo de actividades productivas y de conservación), son conservación, pesca ribereña e industrial, y turismo (Tabla 2) (Diario Oficial de la Federación, 2006).

Tabla 2. Sectores de alta aptitud y sus principales atributos en la unidad de gestión ambiental costera UGC10-Guaymas/Sonora Sur.

Sector	Principales atributos
Conservación	Alta biodiversidad, zonas de distribución de aves marinas y de poblaciones prioritarias para la conservación conforme a la Ley General de Vida Silvestre (totoaba, tiburón peregrino, tiburón ballena, tiburón blanco, ballena jorobada y ballena azul), y áreas naturales protegidas incluyendo el Área de Protección de Flora y Fauna de las Islas del Golfo de California.
Pesca ribereña e industrial	Zonas de pesca de camarón, de escama, calamar, jaiba, corvina, pelágicos menores y tiburón costero.
Turismo	Zonas de distribución de aves y mamíferos marinos, playas, bahías, lagunas costeras, servicios asociados a la pesca deportiva, puertos y áreas naturales protegidas.

Por su parte, la Política Nacional de Mares y Costas de México (Diario Oficial de la Federación, 2018) en su metodología para definir el marco teórico de gestión de la zona costera mexicana, adoptó los límites político-administrativos para la porción continental considerando los

municipios costeros con frente de playa y los municipios sin acceso al mar, pero con influencia costera alta y media (vegetación costera); mientras que para la porción marina adoptó el criterio de la isóbata de los -200 m que delimita la plataforma continental.

2.3.2 Los Sistemas de Información Geográfica en la gestión costera

Los Sistemas de Información Geográfica comprenden diversas tecnologías que se definen a través de sistemas de posicionamiento global, la adquisición de datos mediante sensores remotos, la difusión de datos georeferenciados por medio de mapas y atlas, así como el análisis de la información geográfica con programas de geoprocésamiento (Goodchild, 2009).

Los SIG se utilizan en múltiples análisis espaciales para las zonas costeras, incluyendo la delimitación y demarcación de los límites costeros, identificación de las actividades humanas en aguas territoriales y cuencas (Milanés Batista *et al.*, 2017), obtención de información sobre las características físicas y ambientales de la zona costera, tendencias en el uso antrópico de los espacios costeros (áreas urbanas e industrias agrícolas y acuícolas) y la evaluación de la vulnerabilidad de los ambientes costeros (Hamylton, 2017).

2.4 Presiones antropogénicas en los ecosistemas costeros

Una amenaza costera es considerada como cualquier proceso (natural o antropogénico) que puede ocasionar afectaciones a la vida o a los servicios ecosistémicos, y su valoración varía en función de su frecuencia de ocurrencia e intensidad. La vulnerabilidad costera se define como la susceptibilidad de un sistema a los daños generados por una o varias amenazas (Rangel-Buitrago *et al.*, 2020).

El estado del ambiente, las funciones ecológicas y los servicios de gran valor para la sociedad en las zonas costeras han tenido un proceso de deterioro por efecto de distintas presiones antropogénicas (de Andrés *et al.*, 2017), incluyendo la pérdida de hábitat, sobre explotación de los recursos costero-marinos, eutrofización e hipoxia, cambios en los ciclos biogeoquímicos, contaminación de diversos tipos, aportes de nutrientes a cuerpos de agua costeros (Crain *et al.*, 2009; Newton *et al.*, 2020) acidificación del océano y enfermedades (Crain *et al.*, 2009). Estas

presiones pueden ser directas, por ejemplo, la interrupción del suministro de sedimento debido a la construcción de una presa; por otro lado, existen las presiones indirectas, que están asociadas principalmente a los efectos del cambio climático (incremento de la temperatura, acidificación del océano, cambios en los patrones de precipitación y el aumento del nivel medio del mar) (Newton *et al.*, 2020).

Las presiones al ambiente en las zonas costeras son generadas por actividades humanas desarrolladas principalmente en los sectores de agricultura, acuicultura, pesquería, turismo, urbanización, transporte marítimo, desarrollo industrial y minería (Newton *et al.*, 2020). En la Fig. 10 se muestra un resumen de las actividades que se han registrado en los ecosistemas de manglar, pastos marinos, pastizales de marismas, estuarios, lagunas, bahías, deltas y ríos a nivel mundial.

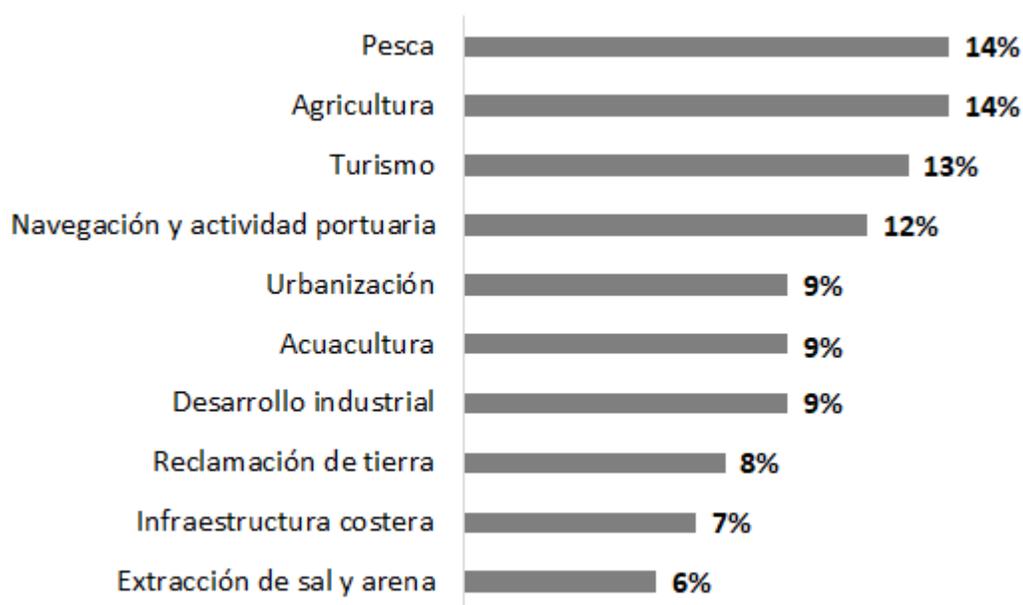


Figura 10. Actividades antropogénicas en ecosistemas costeros a nivel mundial (Tomado de Newton *et al.*, 2020).

2.4.1 Presiones antropogénicas por actividades en la zona conurbada Guaymas-Empalme, Sonora

En el Golfo de California, el impacto por las actividades humanas se ha asociado a variaciones climáticas que han provocado la generación de importantes presiones a los ecosistemas costeros. Entre las presiones antropogénicas destacan la generación de ambientes hipóxicos y anóxicos, los cuales alteran la distribución de peces e invertebrados, e incluso, pueden ocasionar el desplazamiento total de la macrofauna bentónica. Por otro lado, se ha registrado un incremento en las proliferaciones algales nocivas, llegando a provocar cambios en la estructura y composición de los ecosistemas debido a la mortalidad de las especies marinas y la reducción de la productividad (Lluch-Cota *et al.*, 2007).

En particular, los ecosistemas costeros de Sonora están fuertemente presionados por su transformación a la agricultura, uso pecuario, minería, urbanización y desarrollos costeros (Martínez-Yrizar *et al.*, 2010). Por su parte, la mayoría de las lagunas costeras, estuarios y bahías de la región son receptoras de aguas residuales urbanas, agrícolas, acuícolas e industriales (Barraza-Guardado *et al.*, 2013; Arreola-Lizárraga *et al.*, 2016b; Ruiz-Ruiz *et al.*, 2016, 2017; Medina-Galván *et al.*, 2021).

En la zona de Guaymas se han registrado actividades portuarias y plantas procesadoras de pescado que vierten aguas residuales con contaminantes, incluyendo sustancias como pesticidas y aditivos, así como metales pesados (Méndez *et al.*, 2002) con valores de acumulación que varían entre moderados y altos para cobre, zinc y plomo (índice de geo-acumulación entre 1 y 5) (Méndez *et al.*, 2004).

2.4.1.1 Playas - dunas costeras

Para los ecosistemas de playas - dunas costeras se identifican como estresores los residuos peligrosos (e. g. vidrio y clavos), basura doméstica, aguas residuales y contaminación por enterococos con registros que superan el nivel permisible por la norma NMX-AA-120-SCFI-2016 (García-Morales, 2017).

2.4.1.2 Ambientes rocosos

No existen estudios que demarquen las amenazas que enfrentan los ambientes rocosos en Guaymas y Empalme; sin embargo, Crowe *et al.* (2000) en su revisión acerca de los estresores ambientales que enfrentan los ambientes rocosos en diferentes lugares del mundo, identifica como amenazas principales el vertimiento de aguas residuales, contaminación por hidrocarburos, metales pesados, cultivo de mejillones, introducción de especies y la degradación del hábitat. Entre los impactos por las amenazas destacan el cambio en la estructura y composición de las comunidades de algas, crustáceos y moluscos (Crowe *et al.*, 2000).

2.4.1.3 Ambiente bentónico

Vargas *et al.* (2017) indican que en la zona costera de Guaymas los ambientes bentónicos son amenazados por la contaminación con metales pesados, especialmente el manganeso (Mn) asociada a aguas residuales de origen agrícola, camaronícola y urbano, y a actividades industriales (planta termoeléctrica, almacenamiento de óleos y refinación, carga y descarga de minerales). El estudio concluye que algunos sitios están contaminados por metales a niveles moderados y altos con efectos tóxicos moderados, por lo que es necesario tomar medidas de mitigación para evitar que la salud de los organismos sea afectada.

2.4.1.4 Ambiente pelágico

La creciente población en el Golfo de California con una mayor demanda por recursos alimenticios ha llevado algunas pesquerías a niveles de sobreexplotación, y han conducido un rápido desarrollo de actividades productivas agrícolas, acuícolas e industriales que descargan aguas residuales a la costa (Lara-Lara, 2007).

2.4.1.5 Islas

Las islas en la zona costera de Guaymas y Empalme han sido utilizadas para el establecimiento de campamentos pesqueros temporales, generando problemas de contaminación, introducción de especies exóticas y perturbación de la flora y fauna en general (Administración Portuaria Integral de Guaymas S. A. de C. V., 2020).

2.4.1.6 Cuerpos de agua costeros

De acuerdo con diferentes estudios (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2004, 2016a; Reynaga-Franco *et al.*, 2017; Ruiz-Ruiz *et al.*, 2017; Medina-Galván *et al.*, 2021), la amenaza principal que afecta a los cuerpos de agua costeros es el vertimiento de aguas residuales provenientes de granjas camaronícolas, desarrollos urbanos e industriales (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2004). Si bien se ha demostrado que en invierno es más alta la concentración de nutrientes (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2016; Arreola-Lizárraga, 2018; Medina Galván, 2021) por procesos de reciclaje internos y aportes del mar adyacente (Reynaga-Franco *et al.*, 2017), las aguas residuales pueden incrementar el flujo de nutrientes (nitrógeno y fósforo), aumentar la tasa neta de metabolismo acompañada por altos niveles de producción y respiración, incrementar el nivel de oxígeno disuelto y predomina el proceso de desnitrificación, transformando a los sistemas lagunares en ambientes susceptibles de eutrofización (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2004; Arreola-Lizárraga *et al.*, 2016; Medina-Galván *et al.*, 2021).

Por otro lado, las aguas residuales provenientes de la industria de pescado pueden aportar una moderada toxicidad al ecosistema receptor debido a su alto contenido de materia orgánica, pH ácido y una alta saturación de ácidos grasos contenidos en los aceites de pescado (Osuna-Ramírez *et al.*, 2017). Un estudio realizado en la ensenada La Salada en Guaymas reveló 13 cargas de contaminantes de aguas residuales urbanas vertidos al cuerpo de agua, de los cuales los sólidos suspendidos totales fueron el principal contaminante, seguido de una alta carga orgánica medida a través de las concentraciones de oxígeno (baja concentración) y nutrientes (nitrógeno y fósforo en alta concentración) (Vargas-González, 2012); estos resultados sugieren un riesgo de hipoxia y eutrofización del sistema lagunar (Vargas-González *et al.*, 2014). No obstante, una evaluación del estado trófico de la Bahía de Guaymas reveló que el sistema se encuentra en un estado aceptable de eutrofización debido a tasas de renovación del agua de pocos días (Ruiz-Ruiz *et al.*, 2016); sin embargo, se ha señalado la falta de un control adecuado en el tratamiento de aguas residuales, lo que podría desencadenar un proceso de deterioro y una pérdida de los servicios ecosistémicos (Vargas-González, 2012), siendo necesario implementar estrategias de manejo ambiental (Ruiz-Ruiz *et al.*, 2016).

2.4.1.7 Pastos marinos

Las principales amenazas que enfrentan los ecosistemas de pastos marinos del Golfo de California son los aportes de aguas residuales y el calentamiento global (López-Calderón *et al.*, 2013).

2.4.1.8 Manglares

No existe información suficiente sobre los manglares en Guaymas y Empalme. Sin embargo, se tiene registrado a nivel mundial que el desarrollo urbano y la Infraestructura costera han provocado la degradación del hábitat de las comunidades biológicas y han ocasionado cambios en la hidrodinámica del ecosistema. Por su parte, la contaminación por aceites y gasolinas a causa de la presencia de embarcaciones afecta el intercambio gaseoso de los mangles y el desarrollo de los organismos que habitan en este ecosistema debido a las sustancias tóxicas provenientes de los hidrocarburos y de las descargas de aguas residuales (Cervantes *et al.*, 1992).

2.5 Riesgo ecológico

El riesgo es una medida de la posibilidad de daño o afectación como resultado de la exposición a una amenaza física (Environmental Protection Agency, 2001). Aplicado en un contexto ecológico, el riesgo es una estimación de la probabilidad de que ocurra un efecto ecológico adverso en un hábitat determinado, luego de exponerse a una o más amenazas antropogénicas (Doubleday *et al.*, 2017; Rangel-Buitrago *et al.*, 2020). Esto permite orientar la priorización del manejo y la asignación de recursos a través del análisis de las presiones antropogénicas y sus efectos consecuentes en los ecosistemas (Doubleday *et al.*, 2017; Holsman *et al.*, 2017). En este sentido, resulta fundamental la participación de expertos que brinden información acerca de las amenazas que enfrentan los hábitats de una determinada zona costera (Doubleday *et al.*, 2017).

El manejo de riesgos se puede llevar a cabo en cuatro fases: (1) la identificación y formulación de los problemas asociados a las condiciones ambientales existentes, (2) la evaluación del riesgo, (3) la evaluación de alternativas de manejo con base en la determinación si un riesgo es aceptable, o si debe ser reducido o eliminado, y (4) la implementación de la estrategia de

manejo del riesgo (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología, 2010; Gormley *et al.*, 2011). Particularmente, la evaluación del riesgo puede ajustarse a marcos de medición por métodos cualitativos (clasificación por rangos), cuantitativos (técnicas de simulación), o semicuantitativos (clasificación por puntaje y sistemas basados en lógica) (Gormley *et al.*, 2011).

La estimación del riesgo está intrínsecamente ligada al grado de exposición (frecuencia, duración e intensidad de contacto) que las especies o los ecosistemas tienen a determinada amenaza (Gormley *et al.*, 2011; Doubleday *et al.*, 2017); asimismo, se ha observado que el riesgo también depende de la vulnerabilidad de un ecosistema (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología, 2010; Gormley *et al.*, 2011).

Existen pocos estudios recientes sobre la evaluación del riesgo ecológico en los ecosistemas costeros (Tabla 3). Estos estudios coinciden en que los ecosistemas intermareales son los más afectados por las actividades humanas, principalmente la influencia del cambio climático y la contaminación por nutrientes (Halpern *et al.*, 2007; Doubleday *et al.*, 2017; Uribe *et al.*, 2020).

Halpern *et al.* (2007) evaluaron el impacto de las actividades humanas en 23 ecosistemas costeros alrededor del mundo tomando como factores de vulnerabilidad la escala espacial y frecuencia del impacto, la resistencia de los ecosistemas ante las amenazas, y su capacidad de resiliencia en términos del tiempo de recuperación. Los resultados revelaron que el incremento de la temperatura del mar, la pesca demersal y la contaminación por nutrientes son las principales amenazas que afectan los ecosistemas, principalmente: arrecifes rocosos, arrecifes coralinos, manglares y ambientes pelágicos.

En el Golfo Spencer, sur de Australia, Doubleday *et al.* (2017), estimaron el riesgo ecológico de ocho ecosistemas costeros a través de la evaluación del efecto relativo (exposición temporal y espacial) de las amenazas en cada ecosistema, tomando como indicadores de cambio la estructura física del ecosistema y la composición de especies. Los resultados revelaron una mayor posibilidad de riesgo para los ecosistemas intermareales, incluyendo ambientes rocosos, ambientes bentónicos y manglares. Las amenazas principales fueron el cambio climático (acidificación del mar, calentamiento global y eventos extremos del clima) y los aportes de nutrientes por actividades humanas.

Por su parte, Uribe *et al.* (2020) determinaron el nivel de riesgo de los ecosistemas costeros de Colombia mediante los criterios de riesgo de la Lista Roja de los Ecosistemas. Este estudio reveló que los manglares y las playas arenosas son los ecosistemas que se encuentran en estado de mayor riesgo ecológico, y las amenazas con mayor nivel de impacto son la presión por transformación del hábitat costero y el cambio climático.

Un aspecto relevante que incluyen los estudios anteriores es la integración de información apoyada por la opinión de expertos para solventar la falta de datos en la evaluación del riesgo ecológico. Por ello, una medida asociada a la evaluación del riesgo ecológico es la incertidumbre, definida como una falta de conocimiento o la ausencia de información. De tal forma que la determinación de la incertidumbre permite mejorar el proceso de toma de decisiones en el manejo de riesgos, generando a su vez la detección de vacíos de información y el incremento de la certeza con estudios más precisos (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología, 2010; Doubleday *et al.*, 2017).

Tabla 3. Principales amenazas a los ecosistemas costeros con alto riesgo ecológico descritos en estudios recientes.

Sitio de estudio	Amenazas principales	Ecosistema con mayor riesgo ecológico	Referencia bibliográfica
Diferentes partes del mundo	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio climático • Pesca • Contaminación por nutrientes 	<ul style="list-style-type: none"> • Arrecifes de coral • Manglares • Ambientes pelágicos 	Halpern <i>et al.</i> (2007)
Golfo de Spencer, Australia	<ul style="list-style-type: none"> • Cambio climático • Descarga de nutrientes 	<ul style="list-style-type: none"> • Ambientes rocosos • Ambientes bentónicos • Manglares 	Doubleday <i>et al.</i> (2017)
Colombia	<ul style="list-style-type: none"> • Transformación del hábitat costero • Cambio climático 	<ul style="list-style-type: none"> • Manglares • Playas arenosas 	Uribe <i>et al.</i> (2020)

3. JUSTIFICACIÓN

Por su gran riqueza de especies, dinamismo y alta productividad, los ecosistemas costeros desempeñan un papel fundamental para el bienestar, en función de los bienes y servicios que proveen a la sociedad. En particular, aportan materias primas, proporcionan espacios para la recreación, educación, investigación, brindan protección a la costa, controlan la erosión del suelo, mantienen vida silvestre, purifican el agua y actúan como sumideros de carbono, esto último es de especial relevancia pues mitiga efectos del cambio climático. Sin embargo, el incremento de la población en las zonas costeras y su demanda de recursos ha repercutido negativamente en estos ecosistemas, afectando directamente el suministro de sus bienes y servicios ecosistémicos.

La presente tesis contribuye al conocimiento de la diversidad y cobertura de los ecosistemas costeros, así como a la identificación de sus amenazas y riesgos ecológicos en los municipios de Guaymas y Empalme, en Sonora, México, con el fin de guiar la toma de decisiones en el uso planificado y ordenado de esta región.

El conocimiento aportado en esta tesis contribuye con las bases técnicas para implementar un programa de planeación espacial costera que favorecerá la certidumbre para inversiones y el desarrollo económico de actividades pesqueras, acuícolas, turísticas y portuarias en Guaymas y Empalme, Sonora.

4. HIPÓTESIS

En la zona costera de Guaymas y Empalme se detectarán diversos ecosistemas (manglares, playas arenosas, islas, ambientes rocosos, cuerpos de agua costeros, pastos marinos, dunas costeras, ambiente pelágico y ambiente bentónico), cuyas amenazas más importantes estarán asociadas al desarrollo urbano y al aporte de aguas residuales y ante estas amenazas el riesgo ecológico será mayor en manglares y cuerpos de agua costeros. La ubicación espacial de ecosistemas, amenazas y riesgos, permitirá guiar la planeación del desarrollo ordenado de la zona costera.

5. OBJETIVOS

5.1 Objetivo general

Conocer la diversidad, amenazas y riesgos ecológicos de los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme, Sonora, México, para aplicarse en procesos de planeación de la zona costera.

5.2 Objetivos particulares

1. Delimitar la zona costera de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora.
2. Detectar la ubicación y cobertura de los ecosistemas en la zona costera de Guaymas y Empalme.
3. Determinar las amenazas y estimar los riesgos ecológicos en los ecosistemas costeros.
4. Proponer lineamientos para la planeación espacial de la zona costera de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora.

6. MATERIAL Y MÉTODOS

6.1 Área de estudio

Los municipios de Guaymas y Empalme, están ubicados en la Costa Central y al este del Golfo de California (Mata Ángeles, 2016), y al suroeste del Estado de Sonora, entre los 27° 31' y 28° 38' latitud norte y los 110° 03' y 111° 24' longitud oeste colindando al norte con el municipio de La Colorada, al este con el municipio de Cajeme, al noreste con el municipio de Hermosillo y al suroeste con el Golfo de California (Fig. 11).

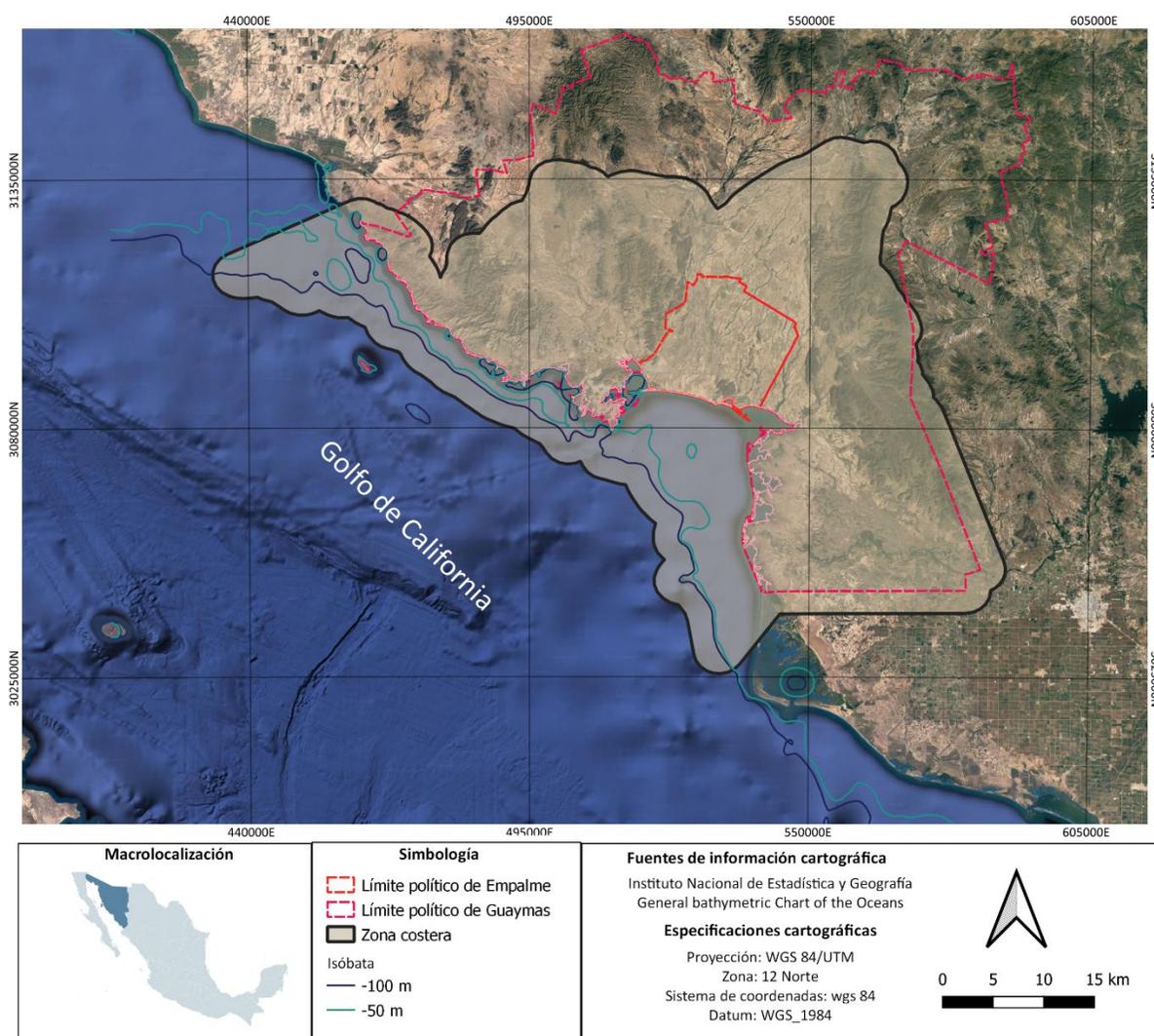


Figura 11. Localización del área de estudio, indicando la zona costera de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora.

6.1.1 Fisiografía

El Estado de Sonora tiene una superficie de 181,052 Km, de los cuales 1207.8 Km son parte del litoral costero (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 1991), y \approx 175 Km pertenecen a la línea de costa de Guaymas y Empalme (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017). Las características de la zona costera están definidas por la influencia en su porción continental de las provincias fisiográficas Llanura Sonorense, Llanura Costera del Pacífico y Sierra Madre Occidental, y en su parte marina por dos provincias oceanográficas: el Golfo Superior que se distingue por cuencas someras, pendientes ligeras y corrientes de marea fuertemente rotatoria y el Golfo Inferior, en el cual se presentan cuencas profundas y mínimas variaciones de salinidad (Polanco Mizquez, 2009).

6.1.2 Hidrología

Estos municipios se encuentran en la región hidrológica RH-9 Sonora Sur (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2006) dentro de la Cuenca del Río Mátape (Vega-Granillo *et al.*, 2011) dividida a su vez en seis subcuencas indicadas en la Tabla 4 (Ruíz Vega, 2007).

Tabla 4. Subcuencas del Río Mátape (Ruíz Vega, 2007).

Subcuenca	Área (Km ²)
(A) Río Mátape – Empalme	2,887
(B) Río Mátape – Presa Punta de Agua	3,119
(C) San José de Guaymas	1,235
(D) Guaymas	661
(E) Arroyo Chicuroso	545
(F) Arroyo Tetabiate	584

6.1.3 Clima

El clima de la región es del tipo BW (h') h, siendo muy seco, muy cálido y cálido con temperaturas que varían entre 16 y 33° C, y la precipitación total anual en promedio es de ~ 300 mm (García, 2004).

6.1.4 Actividades productivas

El total de la población en Sonora corresponde a 2,944,840 habitantes (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2020), del cual el 92% reside en la zona costera; con Guaymas y Empalme ocupando los primeros lugares del total de localidades en Sonora, por su potencial de desarrollo económico que el escenario costero ofrece, destacando actividades como la pesca, el desarrollo turístico y portuario (Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora, 2008).

6.2 Metodología

6.2.1 Delimitación de la zona costera

La delimitación de la zona costera se realizó a partir de criterios físicos que se sustentan en el enfoque de ecosistemas e implícitamente consideran la conectividad de subcuencas-ecosistemas-mar adyacente (Fig. 12). Bajo este contexto, las actividades humanas (incluyendo el área de impacto) son un factor determinante en la selección de los criterios de delimitación de la zona costera de Guaymas y Empalme:

- **Límites políticos de Guaymas y Empalme.** En la línea de costa demarcada por los límites políticos se realizan actividades pesqueras, acuícolas, turísticas (Polanco-Mizquez, 2009) y desarrollo urbano (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2009).
- **Subcuencas hidrológicas costeras.** Representan un medio para analizar la dispersión de contaminantes y nutrientes a través de ríos y escorrentías costeras (Ávila García *et al.*, 2018). Dentro de las subcuencas hidrológicas con frente de playa se ubican principalmente

la agricultura costera y la camaronicultura, además de una alta densidad poblacional (Polanco- Mizquez, 2009).

- **Isóbata de -100 m.** Representa el límite marino de la mayor parte de las actividades de pesca, turismo náutico y movimiento de carga marítima.

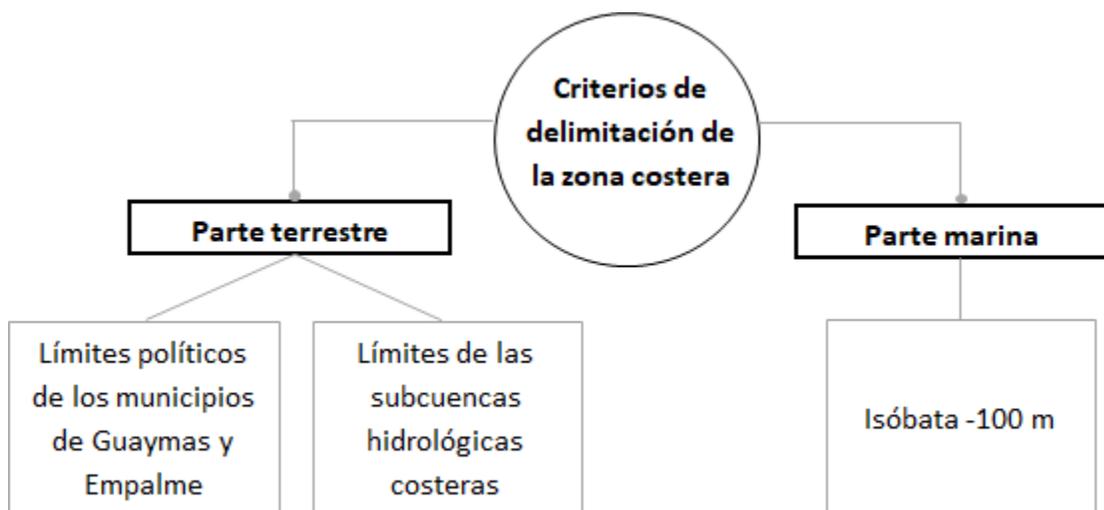


Figura 12. Criterios específicos de delimitación de la zona costera de Guaymas y Empalme.

El procesamiento de la delimitación de la zona costera se realizó mediante Sistemas de Información Geográfica, a través del software QGIS 3.22.29 y siguiendo el procedimiento expuesto en la Fig. 13.

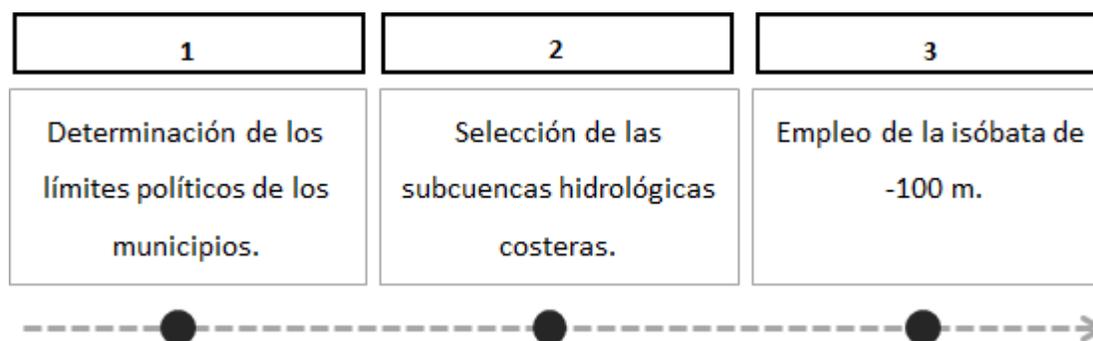


Figura 13. Procedimiento metodológico para la delimitación de la zona costera.

Los límites políticos de los municipios de Guaymas y Empalme escala 1:250000 (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2012) y las subcuencas hidrológicas escala 1:1000000 (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 1998) se obtuvieron del geoportal de la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/> (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2021a), y únicamente se seleccionaron las subcuencas costeras acotadas a los municipios de Guaymas y Empalme (Tabla 5).

Tabla 5. Subcuencas hidrológicas costeras en los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora.

Región hidrológica	Cuenca hidrológica	Subcuenca hidrológica costera
Sonora Sur	Río Sonora 3 y Río Mátape 2	Peña Blanca - 3 GITES
		Arroyo Guaymas
	Río Mátape 2	El Sueño - Santa Margarita
		Río Bajo Mátape
		La Bonita - Baugo (Guásimas)
	Río Yaqui 3	Río Yaqui Bajo
		Bajo Cocoraque

Por su parte, la isóbata de 100 metros se obtuvo de GEBCO (General Bathymetric Chart of the Oceans) (https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/) mediante el procesamiento de un archivo ráster de batimetría con resolución de 15 arcos de segundo (≈ 450 m) (General Bathymetric Chart of the Oceans, 2020). La imagen se recortó al área de estudio y se determinaron sus curvas de nivel, detectando así la isóbata correspondiente.

6.2.2 Elaboración de mapa con delimitación espacial los ecosistemas costeros, clasificación de los tipos de costa e identificación espacial de actividades humanas

Se utilizaron cuatro imágenes de satélite Sentinel-2 (Tabla 6) de libre acceso de la plataforma Earth Explorer del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) con nivel de procesamiento 1 LC, el cual incluye correcciones radiométricas y geométricas además de ortorrectificación y registro espacial.

Tabla 6. Imágenes de satélite Sentinel-2 utilizadas para la clasificación de ecosistemas de la zona costera.

Número de tesela ¹	Número de órbita	Resolución (m)	Fecha
12R WR 54880 45120	141	10, 20, 60	06-04-2022
12R WS 54880 45140	141	10, 20, 60	06-04-2022
12R VS 54859 45140	41	10, 20, 60	04-04-2022
12R VR 54860 45119	41	10, 20, 60	04-04-2022

¹De acuerdo con el Sistema de Referencia de Cuadrícula Militar (MGRS), (2022).

Las imágenes correspondientes al área de estudio pertenecen a la zona UTM 12N (Fig. 14), tomadas en el año 2022 y en el mes de abril preferentemente debido a que deben cumplir los criterios siguientes, como señala Cruz García (2015): 1) periodo seco donde las escenas muestren un patrón homogéneo de sus características espaciales y espectrales, y 2) mayor estabilidad atmosférica en el área, considerando que las imágenes a emplear deben mostrar menos del 10 % de nubosidad con el fin de evitar obstrucción por las nubes, lo cual resulta en pérdida de datos de cobertura espacial.

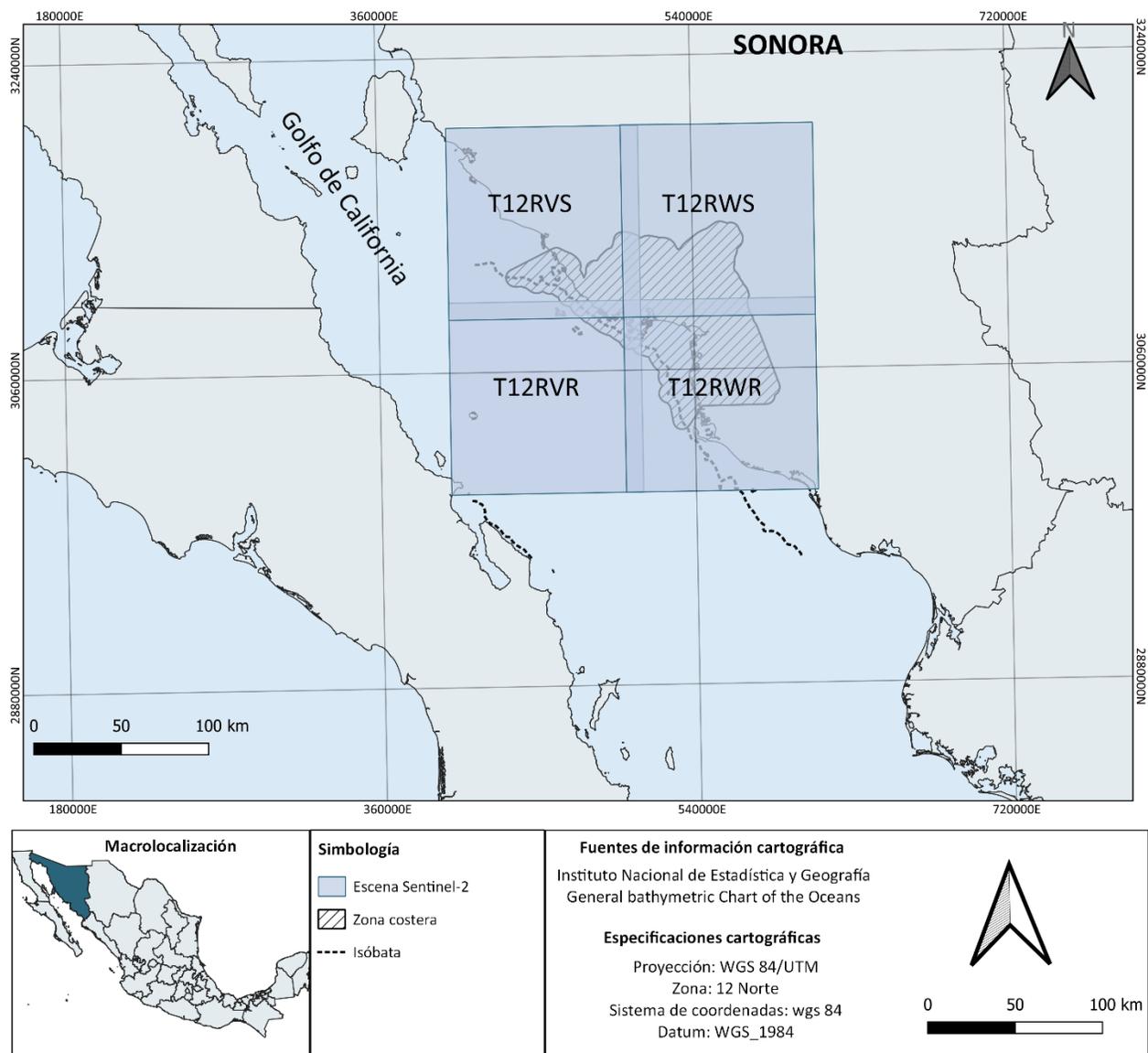


Figura 14. Escenas Sentinel-2 utilizadas para la clasificación de los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme, Sonora.

Las clases que se tomaron como base para la clasificación de la zona costera de Guaymas y Empalme, se generaron a partir de la información cartográfica del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), acervos bibliográficos y datos brindados por expertos.

Se identificaron los ecosistemas costeros de manglar, dunas costeras y cuerpos de agua costeros tomando como referencia guía los datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018). Las geoformas identificadas se representaron esencialmente por tres tipos que describen apropiadamente los ambientes costeros de la zona de estudio; la referencia guía fue la

contribución de Mendoza-Cantú (1997) y en el mapa se identificaron las geoformas *costa acantilada*, *playas mixtas* y *playas arenosas*.

Asimismo, se clasificaron las actividades humanas con mayor prominencia en el área de estudio, destacando la *agricultura*, la *acuacultura* y los *asentamientos humanos* obtenidos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018), y las actividades industriales principales identificadas mediante una revisión bibliográfica.

En la Tabla 7 se muestran las clases determinadas para la clasificación de la zona costera, con descripciones basadas principalmente en la guía para la interpretación del uso del suelo y vegetación (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2017).

Tabla 7. Listado de clases y su referencia para el proceso de clasificación.

CLASES	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA CARTOGRÁFICA
Agricultura	Se incluyen los sistemas manejados por el hombre que constituyen los usos del suelo a partir de la modificación de la cobertura vegetal para los diferentes tipos de agricultura (agricultura de riego anual, agricultura de riego anual y permanente, agricultura de riego anual y semipermanente, agricultura de riego permanente, agricultura de riego semipermanente y agricultura de temporal anual).	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018)
Acuacultura	Se refiere a la superficie dedicada al cultivo de especies en el agua para su producción alimenticia, para otras actividades humanas (recreación, estudio, obtención de productos) o para su conservación y producción.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018)
Asentamientos humanos	Se componen por los lugares donde se han establecido conglomerados demográficos en un área físicamente localizada, con el conjunto de sus sistemas de convivencia donde se integran elementos naturales y obras materiales.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía

		(2018)
Isla	Incluyen los polígonos de territorios insulares.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2013)
Manglar	Se componen por comunidades de mangles que se distribuyen en zonas con climas cálidos húmedos y de baja altitud. Su desarrollo tiene lugar en los márgenes de las lagunas costeras y esteros, así como en las costas fangosas de las costas, siempre sobre suelos profundos, sitios inundados y sin oleaje fuerte.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018)
Dunas costeras	Incluyen comunidades vegetales que se establecen en las costas, compuestas por plantas pequeñas y suculentas.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018)
Cuerpo de agua costero	Incluye las lagunas y bahías, descritas como sistemas generados en la línea de costa. Las lagunas son depresiones separadas del mar por una barrera, mientras que las bahías son formaciones cóncavas de la línea de costa que se prolongan hacia el continente (Kjerfve y Magill, 1989).	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018)
Costa acantilada (playas bajas erosivas)	La litología está compuesta principalmente por arenas medias hasta gravas, el frente de playa puede tener entre 3° y 10° y la parte posterior presenta escarpes de hasta 90°; el proceso geomorfológico es gravitacional producto de erosión mecánica por oleaje y acarreo litoral por oleaje (Mendoza-Cantú, 1997).	Mendoza-Cantú (1997)
Playa arenosa	Se componen de arenas de textura media de color claro a	Mendoza-Cantú

(playa arenosa)	baja	oscuro con pendiente de la playa suave, en el área de estudio se asocian con dunas costeras y presentan procesos de carácter acumulativo por transporte litoral, estas playas son muy extensas y se asocian a valles de intermontaña amplios principalmente en la porción oriental (Mendoza-Cantú, 1997).	(1997)
Playa (playa mixta)	mixta baja	Se compone de depósitos de tamaño de grano heterogéneo que varían desde arenas gruesas, gravas hasta guijarros. La inclinación de la playa es de pendiente suave entre 3° y 10° en el área de estudio frecuentemente se asocian con cauces de arroyos y acantilados costeros por los costados. El proceso geomorfológico es de playas muy dinámicas que alternan el proceso erosivo con el acumulativo (Mendoza-Cantú, 1997).	Mendoza-Cantú (1997)
Otro tipo de vegetación		Se consideraron en esta clase a las comunidades vegetales que no pertenecen a las clases anteriormente nombradas, pero que son útiles para la descripción de la zona costera.	Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018)

El tratamiento para generar el mosaico de la zona costera inició con el pre-procesamiento de las imágenes en el programa QGIS 3.22.9, que incluye una corrección atmosférica y la creación del paquete de bandas con las que se llevará a cabo la clasificación. Posteriormente, se realizó una prueba de calidad con las bandas 02, 03, 04 y 08 (resolución 10 m) de cada escena utilizando el color natural y el falso color para verificar su efectividad.

La imagen del área de estudio completa se obtuvo con el software ERDAS IMAGINE 2014. Para ello se comenzó con el apilamiento de bandas utilizando la herramienta *Layer stack*, donde se apilaron las bandas 2, 3, 4 y 8 (bandas de menor resolución). Al finalizar se realizó un mosaico de las imágenes procesadas con la herramienta *Mosaic Pro*.

Los polígonos de las clases en conflicto (*acuacultura, agricultura, asentamientos humanos, isla y cuerpo de agua costero*) se unieron en el programa QGIS 3.22.9 mediante la herramienta *Unir capas vectoriales*; en un paso posterior se utilizó la herramienta *Diferencia*, usando el área de estudio y el polígono de las clases en conflicto, para excluir estos polígonos del área de estudio. El polígono resultante se utilizó para cortar el área de estudio y generar las clases *duna costera, manglar y otro tipo de vegetación*.

La detección e identificación de los ecosistemas costeros se realizó en el software ERDAS IMAGINE 2014 mediante la herramienta de *Unsupervised Classification*, en la cual se formaron grupos de píxeles con características espectrales similares mediante el algoritmo *Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique (ISODATA)* programado a 50 clases, 50 interacciones y 0.95 del umbral de convergencia.

Por último, se utilizó el programa QGIS 3.22.9 para los procesos finales que se describen a continuación. De la clasificación resultante se seleccionaron y agruparon las distintas clases con la herramienta *Recode*; adicionalmente, para tener una clasificación más homogénea se empleó la función *Neighborhood*, función que analiza los valores de clase según los valores de clase circundantes, logrando una clasificación más uniforme a un tamaño 5 x 5. El ráster resultante se convirtió a vector con la herramienta *Poligonizar*, el cual se unió con el polígono de clases en conflicto mediante la función *Unir capas vectoriales*, obteniendo así la clasificación final.

Se calculó el área de cada polígono en las opciones de tablas y la información de la base de datos de la clasificación fue copiada a Microsoft Excel 365 para analizar la distribución de las superficies de los usos del suelo y vegetación del área de estudio.

6.2.3 Análisis del riesgo ecológico y amenazas a los ecosistemas costeros

La estimación del riesgo ecológico de los ecosistemas costeros se realizó siguiendo la metodología de Doubleday *et al.* (2017). Para ello se diseñó y elaboró una encuesta que fue aplicada a expertos en ámbitos costeros y marinos, incluyendo científicos, consultores y tomadores de decisiones en los sectores del gobierno.

El método de estimación del riesgo ecológico se basó en determinar la probabilidad de que ocurra un efecto ecológico adverso en un hábitat determinado luego de exponerse a una o más amenazas antropogénicas (Doubleday *et al.*, 2017; Rangel-Buitrago *et al.*, 2020). La estimación consistió en determinar el riesgo relativo de las actividades humanas sobre los ecosistemas y sus servicios identificados para la zona costera de Guaymas y Empalme con base en la caracterización de la exposición temporal y espacial de las amenazas principales, y su efecto sobre la estabilidad del ecosistema. Los expertos brindaron información acerca de las actividades y/o influencias locales y globales (cambio climático), la consecuencia ecológica de las amenazas en el ecosistema, la capacidad de resistencia (fragmentación), la recuperación natural del ecosistema y las posibles interacciones sinérgicas entre las actividades humanas y los efectos del cambio climático.

Adicionalmente, se realizó una medida independiente de incertidumbre asociada al efecto amenaza-ecosistema a partir de las actividades e influencias de mayor potencial de afectación a la condición ambiental para identificar las brechas de conocimiento que pueden guiar futuras prioridades de investigación, y asimismo reducir el nivel de desinformación.

a) Diseño de la encuesta

Se elaboró una encuesta con cinco secciones como se muestra en la Tabla 8 que fue distribuida por medios electrónicos para conocer la opinión de los expertos con respecto al efecto de cada amenaza potencial sobre cada uno de los ecosistemas costeros (Anexo A).

Tabla 8. Componentes de la encuesta para el análisis del riesgo ecológico.

Sección	Contenido
I	Antecedentes y experiencia
II	Clasificación de las actividades/influencias en función de su importancia.
III	Evaluación de la consecuencia ecológica de las amenazas principales sobre el ecosistema.
IV	Evaluación la recuperación natural potencial del ecosistema ante el efecto de las amenazas y la capacidad de resistencia.

V Evaluación de las interacciones sinérgicas entre las actividades y el cambio climático.

Los expertos se eligieron con base en su experiencia en algún ecosistema en particular. Los científicos se identificaron con base en sus publicaciones científicas en la región, los consultores por recomendaciones y los funcionarios de gobierno por su injerencia en materia ambiental, acuícola o pesquera.

b) Estimación del riesgo ecológico

El riesgo ecológico se determinó con base en la vulnerabilidad del ecosistema y el efecto de las actividades antropogénicas (amenazas). La vulnerabilidad se evaluó considerando el nivel fragmentación, el tiempo de recuperación y el grado de exposición a disturbios. El efecto de las actividades humanas se evaluó con base en los niveles de cambio en la estructura física del ecosistema; cambio en la composición de las especies; exposición temporal y cobertura espacial (Tabla 9).

La vulnerabilidad se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Vulnerabilidad} = \text{Fragmentación} + \text{Recuperación} + \text{Grado de Exposición a Disturbios} \quad (1)$$

El efecto se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Efecto} = (\text{Indicador 1} + \text{Indicador 2}) \times (\text{Exposición temporal} + \text{Cobertura espacial}) \quad (2)$$

La estimación del riesgo ecológico se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Riesgo ecológico} = \text{Vulnerabilidad} + \text{Efecto} \quad (3)$$

El riesgo ecológico se presentó con valores en una escala 0 a 1.

Tabla 9. Sistema de evaluación de la vulnerabilidad del ecosistema y el efecto de las actividades antropogénicas.

Variable	Nivel	Valoración	
Vulnerabilidad	Fragmentación	Sin fragmentación	0
		Baja	1
		Moderada	2
		Alta	3
	Tiempo de recuperación	Menos de 1 mes	0
		Menos de 1 año	1
		Entre 1 y años	2
		Entre 6 y 10 años	3
		Más de 10 años	4
	Grado de exposición a disturbios	1 vez cada dos o más años	0
		1 vez al año	1
		Más de 2 veces al año	2
		1 vez al mes	3
	Exposición temporal	Mayor a 6 meses/año	0
		4 a 6 meses/año.	1
2 a 3 meses/año		2	
1 a 30 días/año		3	
Continua		4	
Efecto	Cobertura espacial	< 25 %.	0
		25 a 49 %	1
		50 a 74 %	2
		75 a 100%	3
	Cambio en la estructura física del ecosistema (Indicador 1)	< 25 %.	0
		25 a 49 %	1
		50 a 74 %	2
		75 a 100%	3
	Cambio en la	< 25 %.	0

composición de	25 a 49 %	1
especies (Indicador 2)	50 a 74 %	2
	75 a 100%	3

6.2.4 Propuesta de lineamientos para la planeación espacial de la zona costera del municipio de Guaymas

Con base en la información generada sobre la ubicación espacial de los ecosistemas costeros, sus amenazas y riesgos ecológicos, se elaboró una propuesta de lineamientos para la planeación espacial de la zona costera de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora.

7. RESULTADOS

7.1 Delimitación de la zona costera de Guaymas y Empalme

La zona costera de Guaymas y Empalme comprende un litoral de 178 Km y una superficie de 6410 Km², y está compuesta por un 77 % de ambiente terrestre y 23 % de ambiente marino (Fig. 15). Las subcuencas hidrológicas que conforman la zona costera son: Bajo Cocoraque, Río Yaqui Bajo, La Bonita-Baugo (Guásimas), Arroyo de Guaymas, Río Bajo Mátape, Peña Blanca-Tres Gites y El Sueño-Santa Margarita.

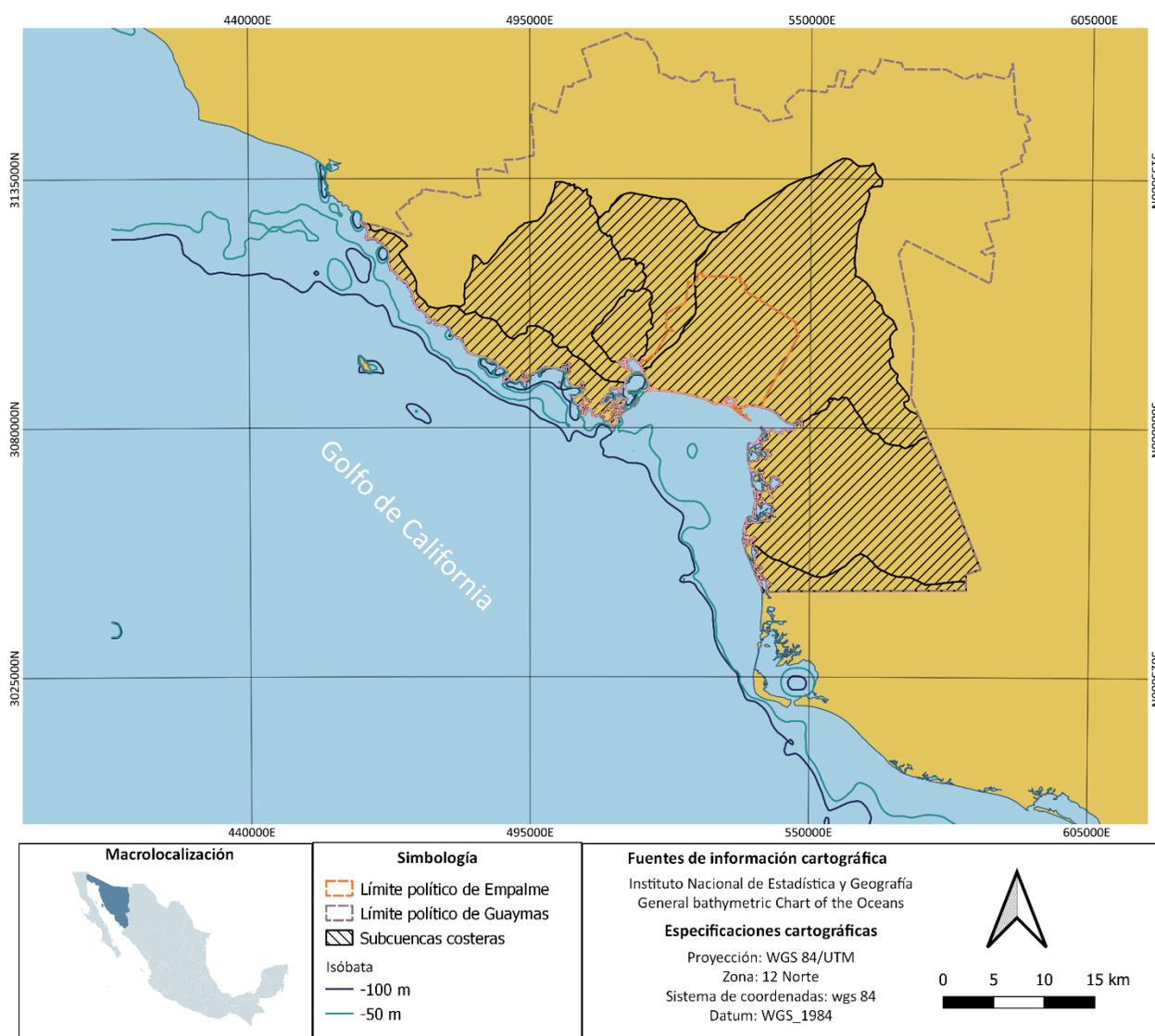


Figura 15. Delimitación de la zona costera de Guaymas y Empalme.

7.2 Ubicación y cobertura de los ecosistemas costeros

Los ecosistemas que se identificaron en la zona costera corresponden a cuerpos de agua costeros, manglar, islas, dunas costeras, playas arenosas, playas mixtas, costas acantiladas y otros tipos de vegetación. Asimismo, se detectaron la ubicación espacial de actividades humanas: agrícolas, camaronícolas, procesamiento de productos pesqueros, desarrollo urbano e industrial (Fig. 16).

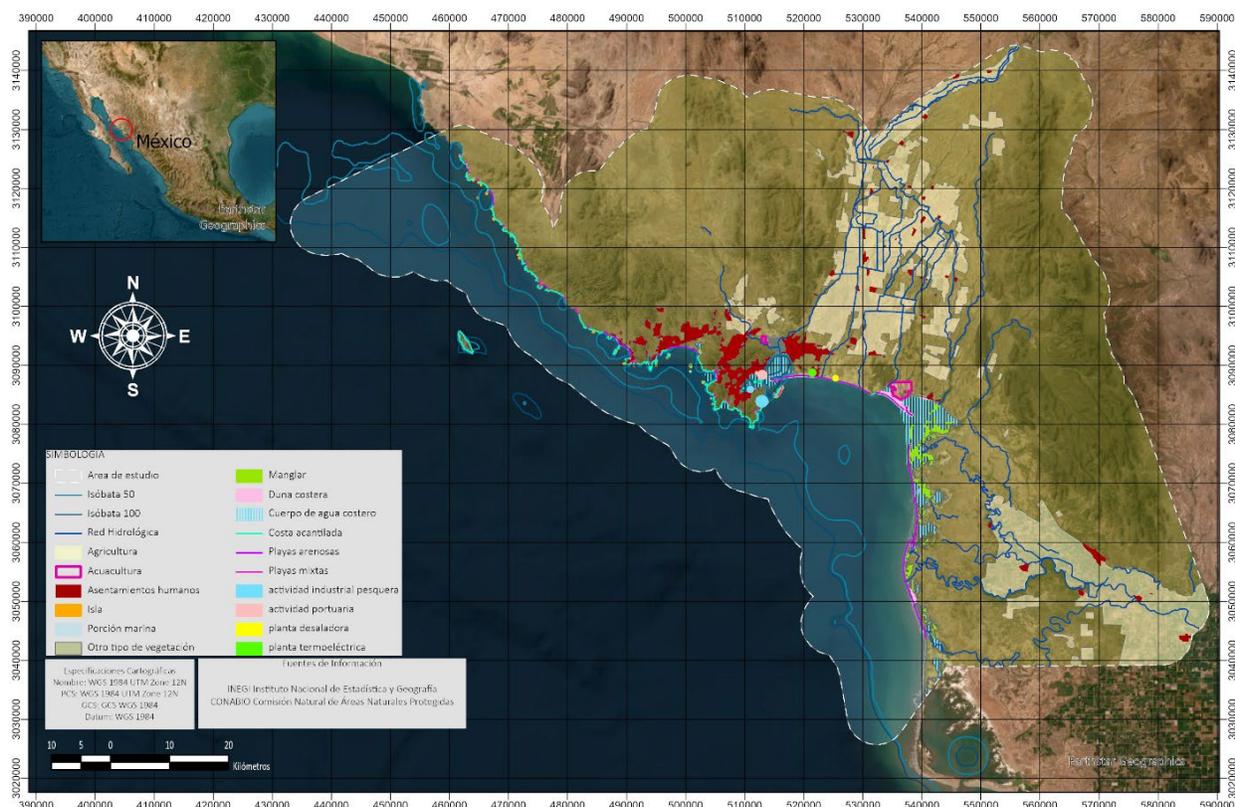


Figura 16. Ubicación espacial de los ecosistemas identificados en la zona costera de Guaymas y Empalme.

De acuerdo con el análisis de representatividad, los ecosistemas costeros comprenden el 30 % del total de la zona, del cual los ambientes bentónico y pelágico reflejaron el mayor porcentaje de cobertura (27 %); mientras que la clase con mayor cobertura en la zona costera corresponde a otros tipos de vegetación no propiamente costera (matorral, mezquital, vegetación halófila y vegetación riparia), con el 58 % de representatividad (Tabla 10).

Tabla 10. Representatividad de la zona costera a partir de la clasificación realizada y los usos del suelo y vegetación reportados por la serie VII del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2018) en el área de estudio.

Clase	Cobertura (ha)	Representatividad (%)
Otro tipo de vegetación	525,912	57.96%
Mar	244,738	26.97%
Agricultura	106,499	11.74%
Cuerpos de agua costeros	13,146	1.45%
Zona urbana	12,661	1.40%
Manglar	2,860	0.32%
Acuicultura	864	0.10%
Dunas costeras	493	0.05%
Territorios insulares	149	0.02%

La ubicación geográfica y espacial de los ecosistemas reveló la siguiente información de los ecosistemas costeros:

- Los cuerpos de agua costeros se localizan principalmente hacia el centro y sur de la zona costera, y corresponden a Bahía de San Carlos, estero El Soldado, Bahía Bacoichampo, estero Bacoichampo, Bahía de Guaymas, Sistema lagunar Empalme-El Rancho, laguna Las Guásimas, laguna Las Cruces y laguna Algodones.
- Los manglares están situados en el borde interno de las lagunas costeras, con mayor cobertura desde la laguna Las Guásimas hacia el sur.
- Las islas se localizan desde la bahía de Guaymas hacia el norte de la franja costera bajo estudio.
- Los ambientes rocosos costeros se ubican asociados al litoral de la península de Guaymas y a las montañas hacia el norte de litoral desde San Carlos hasta El Choyudo.

- Las playas que destacan por su extensión de norte a sur corresponden a La Manga 1, La Manga 2, Algodones, Piedras Pintas, San Francisco, Miramar, El Cochórit, Playa del Sol, así como el litoral de las barreras arenosas de las lagunas Las Guásimas, Las Cruces y Algodones.
- Los ambientes bentónico y pelágico se consideran en la porción marina de la zona costera, indicada a partir del límite continental hasta la isóbata de los -100 m.
- Los pastos marinos están representados por praderas de *Zostera marina* que se observan al interior de las lagunas costeras en las inmediaciones de sus bocas, pero exclusivamente en los meses fríos del año (noviembre a abril).

7.3 Amenazas y riesgo ecológico de los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme

Se enviaron 71 encuestas y se recibieron 29 respuestas (49 %), contestadas por expertos representando centros de investigación, institutos, universidades y gobierno federal, quienes identificaron “Investigación” como su responsabilidad principal (66 %) (Fig. 17, A), y la mayoría con más de 20 años de experiencia en su ecosistema (38 %) (Fig. 17, B).

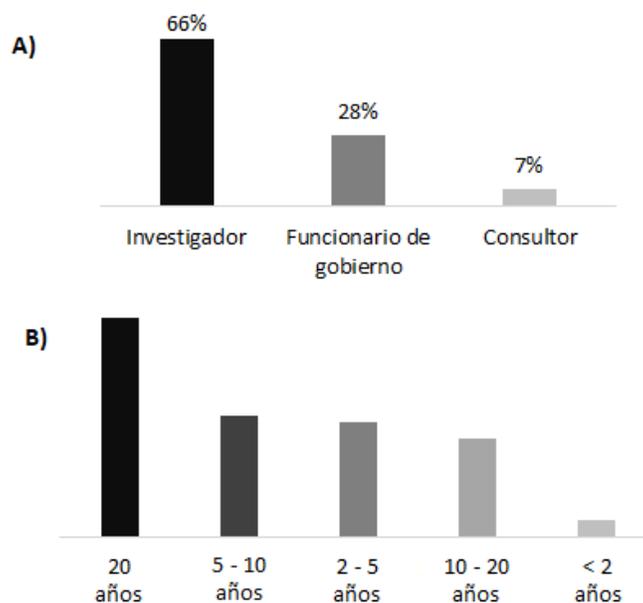


Figura 17. Composición del perfil de las personas que respondieron la encuesta (A) y años de experiencia expresados (B).

7.3.1 Amenazas a los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme

Los expertos identificaron 24 actividades e influencias antropogénicas que amenazan a los ecosistemas de la zona costera de Guaymas y Empalme (Anexo B). Las amenazas de mayor importancia fueron vertimientos de aguas residuales (12 %), seguido por generación y aportes de basura (8 %), pesca ilegal (7 %), calentamiento global (7 %) y modificación del hábitat marino por infraestructura costera (6 %) (Fig. 18).



Figura 18. Principales actividades e influencias humanas detectadas en los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme.

Los vertimientos de aguas residuales fueron la mayor amenaza a los ecosistemas de Guaymas y Empalme observándose en cuatro de los ocho ecosistemas costeros (ambiente bentónico, cuerpos de agua costeros, pastos marinos y playas-dunas costeras), y representando al menos un 12 % del total de las amenazas calificadas como principales (Tabla 11).

En el análisis por ecosistema, el ambiente bentónico presentó 12 amenazas antropogénicas principales, donde predominaron vertimientos de aguas residuales (13 %), así como generación y aportes de basura (13 %). Las islas tuvieron como amenaza principal la generación y aportes de basura (14 %). En los cuerpos de agua costeros destacó como amenaza el vertimiento de aguas residuales (15 %). Los manglares presentaron como amenazas principales la acuicultura de camarón (50 %) y el calentamiento global (50 %). En los pastos marinos se detectó como amenaza principal el vertimiento de aguas residuales (12 %). En el ambiente pelágico destacó la pesca ilegal (33 %) de un total de 5 amenazas principales. En las playas - dunas costeras la amenaza más frecuente fue los vertimientos de aguas residuales (13 %) de un total de 14 amenazas principales. Los ambientes rocosos presentaron 9 amenazas principales, de las cuales predominó la modificación del hábitat marino por infraestructura costera (20 %) (Tabla 11).

Tabla 11. Actividades e influencias principales para cada tipo de ecosistema presente en la zona costera de Guaymas y Empalme.

Ecosistema	Actividades / Influencias humanas	Magnitud (%)
Ambiente bentónico	Vertimiento de aguas residuales	13.3
	Generación y aportes de basura	13.3
Islas	Generación y aportes de basura	14.3
Cuerpos de agua costeros	Vertimiento de aguas residuales	15
Manglar	Acuicultura de camarón	50
	Cambio climático: calentamiento global	50
Pastos marinos	Vertimiento de aguas residuales	11.8
Ambiente pelágico	Pesca ilegal	33.3
Playas - dunas costeras	Vertimiento de aguas residuales	13.3

Ambientes rocosos	Modificación del hábitat marino por infraestructura costera.	20
-------------------	--	----

7.3.2 Interacciones sinérgicas

Basado en las opiniones de los expertos, los efectos del cambio climático (aumento del nivel del mar, calentamiento global, acidificación del océano y eventos extremos del clima) destacaron por la sinergia que presentan con las actividades e influencias locales (Fig. 19) (Anexo C).

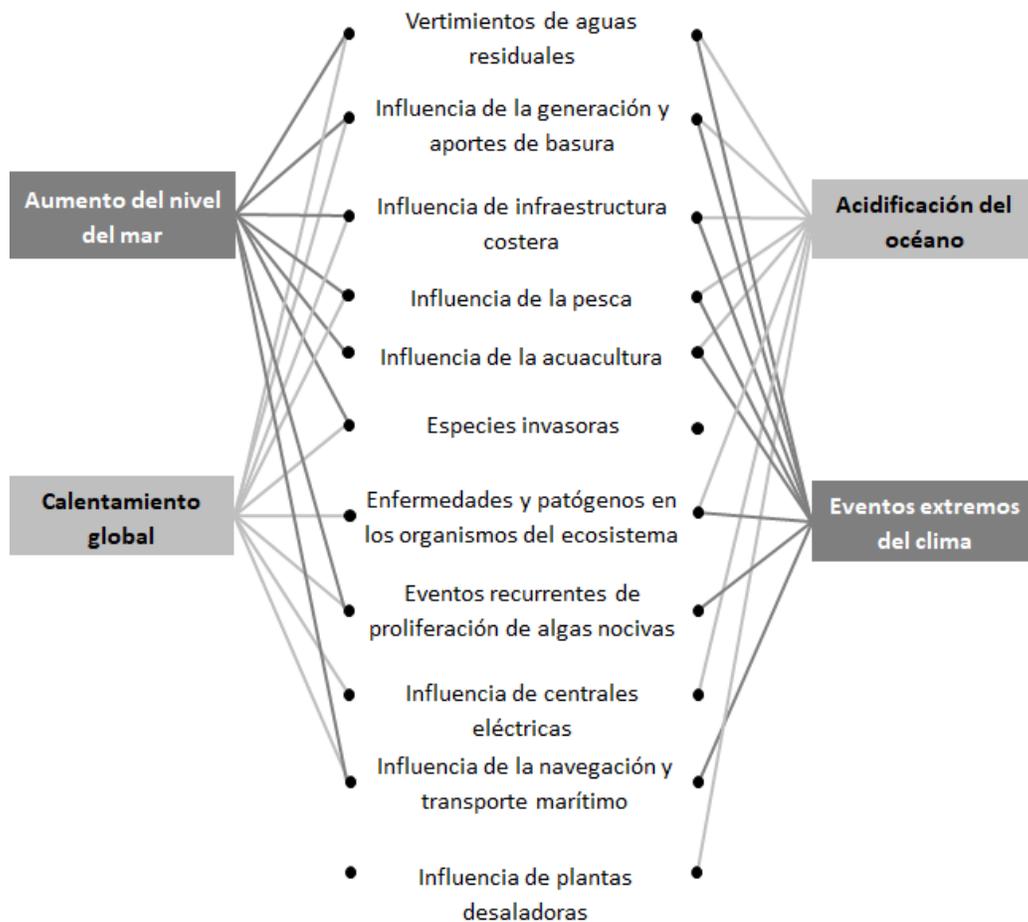


Figura 19. Sinergias resultantes entre los efectos del cambio climático y actividades e influencias antropogénicas en la zona costera de Guaymas y Empalme.

7.3.3 Riesgo Ecológico

Los ocho ecosistemas costeros presentaron valores de vulnerabilidad entre 7.8 y 10.8. Los efectos de las amenazas fueron notablemente diferentes entre los ecosistemas, los puntajes más altos se observaron en manglares (26), cuerpos de agua costeros (≈ 19) y los ambientes rocosos (16) (Fig. 20).

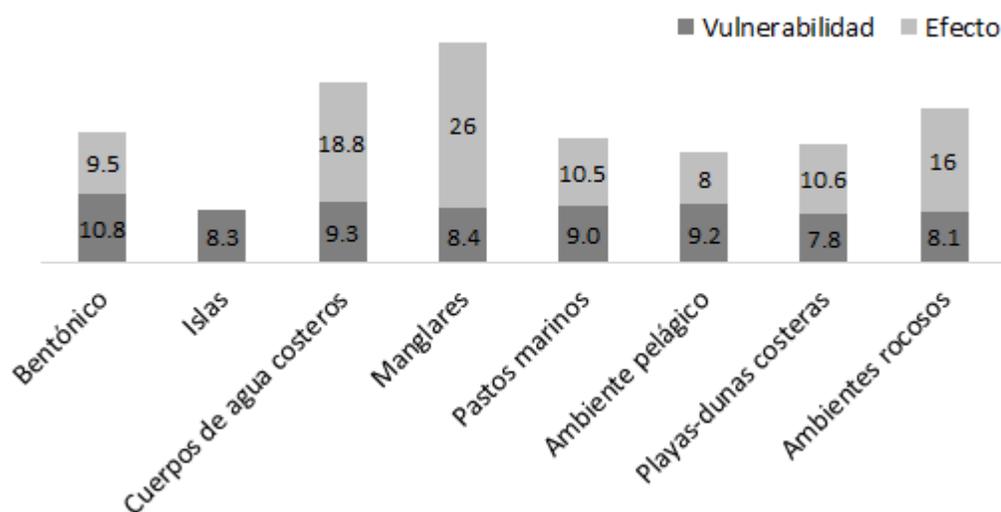


Figura 20. Puntaje de vulnerabilidad y efecto de las amenazas a los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme.

En general, los riesgos ecológicos para la zona costera de Guaymas y Empalme presentaron valores bajos a ligeramente moderados considerando un rango de 0.0 a 1.0, donde 0 representa un puntaje bajo, y 1.0 un puntaje alto. Los ecosistemas con mayor riesgo ecológico fueron los manglares (puntaje = 0.12), cuerpos de agua costeros (puntaje = 0.09) y ambientes rocosos (puntaje = 0.08), con valores que sobrepasan la media calculada. Por otro lado, las islas son los ecosistemas que presentaron el valor más bajo de riesgo ecológico (puntaje = 0.03) (Fig. 21).

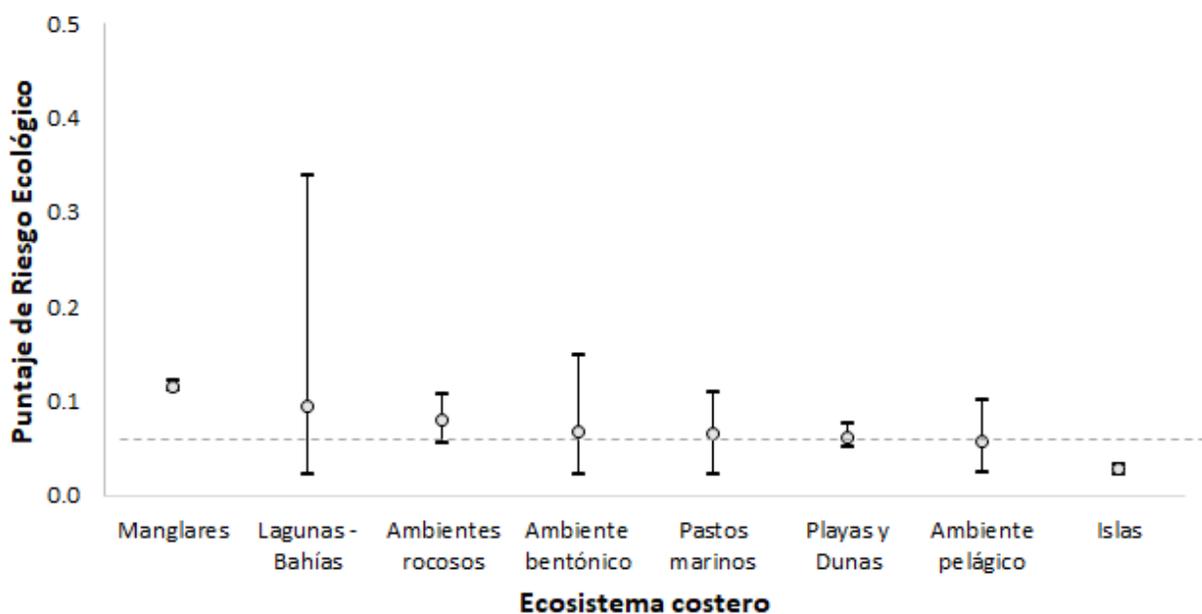


Figura 21. Estimación de riesgo ecológico de los ecosistemas costeros. La línea punteada indica el valor promedio estimado de riesgo ecológico.

En la evaluación ecológica de los ecosistemas costeros, las respuestas por parte de los expertos fueron consideradas con nivel bajo de incertidumbre (Fig. 22).

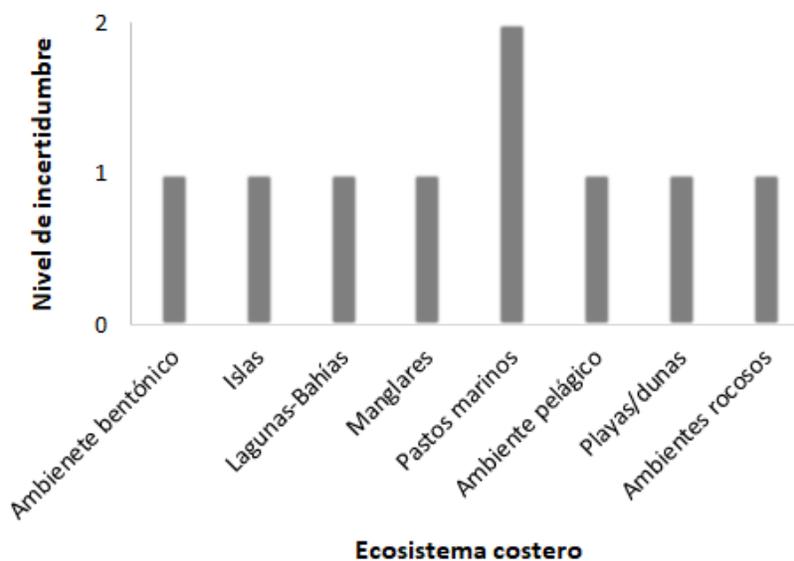


Figura 22. Nivel de incertidumbre asociada a la evaluación ecológica de los ecosistemas costeros.

8. DISCUSIÓN

La zona costera de Guaymas y Empalme se caracteriza por su diversidad de ecosistemas (playas, costas rocosas, manglares, lagunas costeras, islas, entre otros) y esto se explica por los tipos de costa y por su ubicación en dos regiones biogeográficas del Golfo de California (basadas en distribución de peces), Golfo Central y Golfo Sur (Walker, 1960; Thomson *et al.*, 1979). En la porción central de la franja costera bajo estudio, se encuentra la zona conurbada de las ciudades de Guaymas y Empalme ($\approx 160,000$ hab.), además San Carlos (2,500 hab.) se ubica ≈ 15 Km al norte de la ciudad de Guaymas, entonces en este corredor San Carlos-Guaymas-Empalme se encuentran la mayoría de las amenazas y el mayor riesgo ecológico a las funciones y servicios de los ecosistemas costeros, derivado del desarrollo urbano, portuario, turístico e industrial.

8.1 Delimitación de la zona costera de Guaymas y Empalme

En México, la Política Nacional de Mares y Costas (Diario Oficial de la Federación, 2018), define a la zona costera como el espacio geográfico de interacción mutua entre el medio marino, el medio terrestre y la atmósfera, comprendido por: a) una porción continental definida por 265 municipios costeros; 150 con frente de playa y 114 sin acceso al mar, pero con influencia costera alta y media (por ejemplo, vegetación costera); b) una porción marina definida a partir de la plataforma continental delimitada por la isóbata de los 200 metros, y c) una porción insular representada por las islas nacionales (Diario Oficial de la Federación, 2018). En particular, la delimitación de la zona costera de Guaymas y Empalme, está basada en criterios que de acuerdo con Milanés-Batista *et al.* (2017), pueden guiar los procesos de ordenamiento territorial, planeación espacial y manejo de zonas costeras.

En este estudio, el uso de las subcuencas hidrológicas costeras, en la delimitación tierra adentro, fue esencial considerando que las cuencas interaccionan funcionalmente por medio de flujos hidrológicos de agua dulce, sedimentos y sustancias disueltas, formando un continuo fluvial marino costero (Zamboni *et al.*, 2010); mientras que la delimitación mar afuera, las isóbatas comprendieron el principal criterio; a nivel global con frecuencia se hace referencia a las isóbatas de -20 m, -50 m y -100 m, debido a que es donde se encuentra la mayor cobertura de ecosistemas costeros y la mayor parte de las actividades humanas (Milanés-Batista *et al.*,

2017). En la Ley Federal del Mar de México (Diario Oficial de la Federación, 1986) se establece como criterio de delimitación jurídica las primeras 12 millas náuticas a partir la línea de costa para definir el Mar Territorial, y 200 millas náuticas a partir del Mar Territorial para definir la Zona Marina Exclusiva. Asimismo, la Política de Mares y Costas de México (Diario Oficial de la Federación, 2018), en su función de sustentabilidad de las zonas costeras, determina como criterio de delimitación la isóbata de -200 m. No obstante, la isóbata de -100 m ha resultado idónea para delimitar la porción marina de la zona costera de Guaymas y Empalme de acuerdo con Polanco Mizquez (2009), pues representa el límite marino para el total de las actividades pesqueras, acuícolas y turísticas realizadas en esta zona.

El marco teórico internacional indica que los criterios de delimitación pueden variar según los fines y los intereses de gestión (Milanés-Batista *et al.*, 2017), de tal forma que los criterios utilizados para delimitar la zona costera de Guaymas y Empalme, se ajustaron a un enfoque ecosistémico que puede guiar su planeación y manejo.

8.2 Los ecosistemas en la zona costera de Guaymas y Empalme

Los ecosistemas identificados en la zona costera de estudio correspondieron a playas - dunas costeras, ambientes rocosos, manglares, pastos marinos, islas, ambiente pelágico, ambiente bentónico y cuerpos de agua costeros (lagunas costeras y bahías). La distribución de estos ecosistemas es consistente con los tipos de costa y con dos regiones biogeográficas (basada en distribución de peces) del Golfo de California, considerando que prácticamente un 50 % de esta franja costera se ubica en la región Golfo Central (al norte de la bahía de Guaymas) y el otro 50 % representa la región Bajo Golfo (al sur de la bahía de Guaymas). La región Golfo Central se caracteriza por ser fundamentalmente rocosa y con profusión de acantilados; mientras que la región Bajo Golfo se caracteriza por fondos arenosos o lodosos y una gran cantidad de sistemas estuarino-lagunares (Walker, 1960; Thomson *et al.*, 1979). De tal forma que en la zona costera de Guaymas-Empalme, las costas rocosas predominan en la porción norte (Golfo Central) y la costa arenosa caracteriza a la porción sur (Bajo Golfo).

En particular, los ecosistemas de manglar tienen su mayor cobertura en la porción sur, donde también dominan por su cobertura, las lagunas costeras y las playas; mientras que las costas rocosas, acantilados e islas predominan desde la zona central del área de estudio hacia el norte. Los ambientes pelágico y bentónico definidos por la extensión desde el litoral hasta la isóbata de -100 m, incorporan otro rasgo importante en este escenario costero diverso, que incluye algunas praderas de *Zostera marina* que pueden observarse en las inmediaciones de las bocas de las lagunas costeras, exclusivamente en invierno.

En conjunto, los ecosistemas que componen la zona costera generan diversos servicios. Una revisión de estos servicios atribuidos a los ecosistemas costeros presentes en la zona costera de Guaymas-Empalme, incluyen pesca, recreación, protección costera, mantenimiento de biodiversidad y reciclaje de nutrientes (Tabla 12).

Tabla 12. Servicios potenciales de los ecosistemas en la zona costera de Guaymas y Empalme.

Servicios	Playas y dunas	Ambiente bentónico	Ambiente pelágico	Ambientes rocosos
Materia prima	X	X	X	X
Protección costera	X			X
Control de erosión	X			X
Mantenimiento de biodiversidad	X	X	X	X
Mantenimiento de recursos pesqueros	X	X	X	X
Reciclaje de nutrientes	X	X	X	X
Almacenamiento de carbono		X	X	
Turismo, recreación, educación e investigación	X	X	X	X

(continúa)

Servicios	Islas	Manglares	Pastos marinos	Cuerpos de agua costeros
Materia prima	X	X	X	X
Protección costera		X	X	
Control de erosión	X	X	X	
Mantenimiento de biodiversidad	X	X	X	X
Mantenimiento de recursos pesqueros		X	X	X
Reciclaje de nutrientes	X	X	X	X
Almacenamiento de carbono		X	X	
Turismo, recreación, educación e investigación	X	X	X	X

Fuente:

Playas y dunas: Gutiérrez de MacGregor y González Sánchez (1999); Schlacher *et al.* (2008); Azuz-Adeath *et al.* (2009); Barbier *et al.* (2011); Beatriz Benseny (2011); Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2013); Barboza y Defeo (2015); Dang *et al.* (2021).

Ambiente bentónico: Galparsoro *et al.* (2014); Barnes *et al.* (2019).

Ambiente pelágico: Dickey-Collas *et al.* (2019); Santora *et al.* (2021).

Costas y arrecifes rocosos: Gutiérrez de MacGregor y González Sánchez (1999); Branch *et al.* (2008); Fernández *et al.* (2014).

Islas: Balzan *et al.* (2018).

Manglares: Ewel *et al.* (1998); Branch *et al.* (2008); Barbier *et al.* (2011); Donato *et al.* (2011); McLeod *et al.* (2011); Yip-Lee *et al.* (2014); Trégarot *et al.* (2017); Rodríguez Zúñiga *et al.* (2018).

Pastos marinos: Mueller-Dombois (1992); Waycott *et al.* (2009); McLeod *et al.* (2011); Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2013); Trégarot *et al.* (2017).

Cuerpos de agua costeros: Lara Domínguez *et al.* (2011); de la Lanza Espino *et al.* (2013); Haro Martínez *et al.* (2015).

Lo anterior es consistente con la importancia que tienen algunas actividades productivas en la zona costera de Guaymas y Empalme.

La pesca es una actividad clave en Guaymas, a nivel nacional ocupa el séptimo lugar por su participación en personal ocupado en la pesca y el segundo lugar por el valor agregado en la pesca (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2019). Guaymas es el nodo central de la actividad pesquera en Sonora y esto se explica por los volúmenes anuales extraídos en sus costas; por el predominio en las capturas de dos especies altamente demandadas en el mercado: camarón y sardina, esta última se procesa principalmente para producción de harina como materia prima en la elaboración de alimentos balanceados para ganado, así como para extracción de aceite (Yurkievich y Sánchez-Crispín, 2016).

El escenario costero con ambientes rocosos (costas y acantilados rocosos), playas - dunas costeras, así como islas e islotes representa un capital natural que ha propiciado el desarrollo de San Carlos, uno de los principales destinos turísticos del Estado de Sonora, donde las playas, de acuerdo con los hábitos de recreación y preferencias de los turistas, son sitios de esparcimiento activos durante todo el año, además que las características naturales de estas playas es el principal atractivo para los usuarios de la región (García-Morales *et al.*, 2018). Además, de acuerdo con la percepción, tanto de turistas como capitanes de yates, el capital natural de San Carlos compuesto por distintos paisajes costeros y vida marina es atractivo para realizar actividades recreativas de paseo, pesca y buceo (Rivera-Martínez, 2020).

En la zona costera de Guaymas y Empalme el servicio de mantenimiento de biodiversidad se consolida mediante el establecimiento de áreas naturales protegidas (ANP), específicamente las islas del Golfo de California tienen la categoría de Área de Protección de Flora y Fauna bajo la administración de la Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP) (Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 2000) y el estero El Soldado, localizado en el municipio de Guaymas, es una ANP con la categoría de Zona Sujeta a Conservación Ecológica, administrada por el gobierno de Sonora (Boletín Oficial del Gobierno del Estado de Sonora, 2006).

El servicio de reciclaje de nutrientes es particularmente importante para sostener actividades como el cultivo de camarón, debido a que el modelo de desarrollo de la camaronicultura que se realiza adyacente a las lagunas El Rancho y Las Guásimas, ubicados en los municipios de Empalme y Guaymas, respectivamente, utiliza el agua de estos sistemas para el abastecimiento

de los estanques de cultivo, y los efluentes generados son vertidos a estos cuerpos de agua que asimilan, transforman y procesan la materia orgánica y los nutrientes mediante procesos biogeoquímicos (Medina-Galván *et al.*, 2021). Desde luego, existe un umbral en la magnitud de materia orgánica y nutrientes de fuentes antropogénicas que pueden ser procesados sin afectar el estado trófico o tasa de suministro de materia orgánica del ecosistema (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2016), por ello el desarrollo de la camaronicultura con un enfoque ecosistémico debe ser considerado.

El servicio de protección costera es proporcionado por los manglares, las dunas costeras y los ambientes rocosos en la zona costera de Guaymas y Empalme. Este servicio debe ser mejor valorado y considerarse en la planeación del desarrollo urbano, debido al acelerado desarrollo que se ha observado en San Carlos, así como en el crecimiento presente y futuro de la zona conurbada Guaymas y Empalme.

8.3 Amenazas y riesgos ecológicos en los ecosistemas de la zona costera de Guaymas y Empalme

Las amenazas identificadas para la zona costera de Guaymas y Empalme coinciden con las presiones antropogénicas observadas en otros escenarios costeros a nivel global (Crain *et al.*, 2009; Millenium Ecosystem Assessment, 2005; Newton *et al.*, 2020) y nacional (Lara-Lara *et al.*, 2008b). En particular, la problemática por las amenazas de mayor importancia que se observa en los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme se puede atribuir al crecimiento poblacional y un desarrollo urbano que sugiere haber soslayado la planeación, y esto puede atribuirse a un débil sistema de gobernanza y la falta de una estrategia de ordenamiento territorial y ambiental en ambos municipios (Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores, 2018). Tomando como referencia el índice de ciudades prósperas (Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores, 2018), la infraestructura urbana de Guaymas ha crecido con generación de estructuras urbanas discontinuas, espacios urbanos vacíos y alteraciones ecológicas.

En consecuencia, un factor determinante que pone en riesgo el estado de los ecosistemas en la zona costera de Guaymas y Empalme es la mala calidad del agua y de los sedimentos como

resultado del vertimiento de aguas residuales, y la generación y aporte de basura, provenientes principalmente de las zonas urbanas (Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores, 2018) y las plantas procesadoras de harina de pescado (Osuna-Ramírez *et al.*, 2017). Aquí cabe mencionar que, por su representatividad en la zona, la agricultura parece ser una fuente importante de aguas residuales (Tabla 13), pero los valles agrícolas de Guaymas y Empalme no aportan aguas residuales al mar. Además, un análisis reciente sobre la calidad del agua de retorno agrícola procedente del Distrito de Riego 018 del territorio Yaqui localizado al sureste de la ciudad de Guaymas (40 km), reveló un estado aceptable del agua en los cuerpos de agua receptores (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2019).

Por otro lado, se tiene registro desde hace dos décadas que las aguas residuales de la ciudad de Guaymas se vierten al mar sin tratamiento o no reciben un tratamiento eficiente (Vargas-González *et al.*, 2014; Ruiz-Ruiz *et al.*, 2016), además se vierten aguas residuales del procesamiento de elaboración de harina de pescado que tienen un ineficiente tratamiento (Osuna-Ramírez *et al.*, 2017). Asimismo, las aguas residuales generadas contienen metales pesados asociados a actividades industriales como la refinación y descarga de minerales en la terminal de la Administración Portuaria Integral de Guaymas (Méndez *et al.*, 2004); además, en la ensenada La Salada se han detectado problemas de hipoxia que demuestran el aporte excesivo de materia orgánica proveniente de las aguas residuales urbanas (Vargas-González *et al.*, 2014). También, el vertimiento de aguas residuales y la insuficiente infraestructura sanitaria han propiciado contaminación fecal, indicada por las concentraciones de enterococos en las playas de Guaymas y Empalme (León-López *et al.*, 2018), afectando el servicio de recreación y el turismo que sostienen esta zona (García-Morales *et al.*, 2017).

Cabe mencionar que algunos de los materiales mencionados tienen la cualidad de ser persistentes, incluso tienden a bioacumularse y biomagnificarse con el tiempo a través de las redes alimenticias (Crain *et al.*, 2009). De manera que los ecosistemas costeros amenazados principalmente por los vertimientos de aguas residuales y la generación de basura en este estudio, podrían estar en proceso de transformación en ambientes con toxicidad moderada-alta (Kennish, 2002; Osuna-Ramírez *et al.*, 2017; Vargas-González *et al.*, 2017) y con potencial de eutrofización (Ruiz-Ruiz *et al.*, 2016; Vargas-González, 2018), afectando negativamente no sólo a las comunidades bióticas asociadas que dependen directamente de la calidad del agua y los

sedimentos (Barraza-Guardado *et al.*, 2014), sino que también suponen un riesgo a la salud pública (Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores, 2018).

Igualmente, el continuo crecimiento poblacional humano ha generado una alta demanda del uso del suelo para actividades de pesca y turismo a nivel mundial (Millenium Ecosystem Assessment, 2005), mismos que caracterizan el desarrollo productivo de la zona costera de Guaymas y Empalme (Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora, 2008; Yurkievich y Sánchez-Crispín, 2016); generando así los problemas de pesca ilegal por falta de regulación de los pescadores ribereños (Yurkievich y Sánchez-Crispín, 2016) y la modificación del hábitat marino por infraestructura marina (Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora, 2008) que se observaron en la zona costera de Guaymas y Empalme. Es importante considerar que la pesca ilegal y la modificación del hábitat marino por infraestructura marina contribuyen con la pérdida de recursos marinos a través de la sobreexplotación (Yurkievich y Sánchez-Crispín, 2016) y la alteración de la estructura de las comunidades bióticas (Pardal-Souza *et al.*, 2016), respectivamente.

El cambio climático es una de las principales amenazas a escala global que ponen en riesgo a los ecosistemas costeros en diferentes partes del mundo, generando efectos adversos en la expresión genética y la fisiología de los organismos (He *et al.*, 2019); por ello, no podría considerarse como una amenaza local en la zona costera de Guaymas y Empalme. Siguiendo esta explicación, el cambio climático presenta mayor relevancia al establecer sinergia con las amenazas locales, debido a que sus efectos adversos tienden a incrementarse con el desarrollo urbano y el crecimiento de la población (Ostrowski *et al.*, 2021). En el presente estudio, el vertimiento de aguas residuales fue la amenaza local que más interacciones formó con los efectos del cambio climático, destacando el calentamiento global y la acidificación del océano, lo cual es consistente con los datos revelados por Ostrowski *et al.* (2021), donde explican que las aguas residuales tienen la capacidad de formar múltiples interacciones con otras amenazas debido a su facilidad de manipulación.

Lo anterior sugiere que las acciones de manejo en la zona costera de Guaymas y Empalme deben estar encaminadas hacia la regulación de los vertimientos de aguas residuales y el fortalecimiento de la legislación urbana para un uso eficiente del suelo. Algunas de las acciones

locales que se han propuesto son el uso de sistemas eficientes de tratamiento en las plantas tratadoras de aguas residuales (Osuna-Ramírez *et al.*, 2017) y la reutilización del agua tratada para evitar su descarga en el mar (Vargas-González, 2012). De igual manera, se determinó un índice que mide el porcentaje de aguas tratadas (Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores, 2018), el cual constituye una buena medida para monitorear constantemente la sanidad y sostenibilidad ambiental de los ecosistemas costeros afectados.

Asimismo, es importante considerar que la regulación de las amenazas debe complementarse con acciones enfocadas en reducir los impactos del cambio climático para maximizar el potencial de recuperación de los ecosistemas costeros (He *et al.*, 2019). El establecimiento de áreas naturales protegidas, la restauración de los ecosistemas y el manejo de las amenazas locales que actúan en sinergia con el cambio climático son algunas opciones que se han llevado a cabo a nivel global para contrarrestar o sobrellevar los impactos por el cambio climático (He *et al.*, 2019).

En general, los riesgos ecológicos para la zona costera de Guaymas y Empalme presentaron valores ligeramente más bajos que los observados por Doubleday *et al.* (2017) en el Golfo de Spencer (Australia), sin embargo, no sería adecuado determinar que la zona costera bajo estudio presenta una menor posibilidad de afectación por las amenazas si se compara con otros escenarios costeros, pues la magnitud de importancia de las amenazas depende de las características del escenario costero en la región donde se presenten (He *et al.*, 2019).

Por otro lado, en el análisis por separado, los ecosistemas con los puntajes más altos de riesgo ecológico obtenidos para la zona costera de Guaymas y Empalme coinciden con los datos reportados en otros escenarios costeros a nivel mundial (Halpern *et al.*, 2007; Doubleday *et al.*, 2017; Uribe *et al.*, 2020). El nivel de riesgo presentado estuvo influenciado principalmente por el efecto de la exposición continua a la amenaza, pues se ha observado que a una mayor exposición a la amenaza se eleva la posibilidad de que los ecosistemas sufran efectos adversos (Halpern *et al.*, 2007). Esto es consistente con la ubicación geográfica y espacial de los ecosistemas costeros presentes en la zona costera de Guaymas y Empalme, donde los ecosistemas costeros con mayor presión son aquellos localizados en las cercanías de las zonas con mayor influencia de las actividades antropogénicas, destacando la mancha urbana como

una fuente de presión constante, y la influencia de los aportes de aguas residuales como dispersores de las amenazas hacia los ecosistemas costeros.

Asimismo, el efecto de las amenazas es potenciado por el crecimiento urbano desordenado, con potencial afectación en la disminución de coberturas en los ecosistemas costeros (Tabla 13) (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018), y que a su vez induce la elevación del riesgo ecológico en los ecosistemas.

Tabla 13. Listado comparativo entre la clasificación realizada y los usos del suelo y vegetación reportados por la serie VII de Instituto Nacional de Estadística y Geografía en el área de estudio (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2018).

CLASES	Instituto Nacional de					
	Estadística y Geografía (2018)		Clasificación (estudio actual)		Diferencia en comparación	
	Área (ha)	Cobertura (%)	Área (ha)	Cobertura (%)	Área (ha)	Cobertura (%)
Agricultura	86,561	9.55%	106,499	11.74%	19,938	2.19%
Zona urbana	9,220	1.02%	12,661	1.40%	3,441	0.38%
Acuacultura	622	0.07%	864	0.10%	242	0.03%
Dunas costeras	669	0.07%	493	0.05%	- 176	-0.02%
Manglar	4,350	0.48%	2,860	0.32%	- 1,491	-0.16%
Otras vegetaciones	547,381	60.37%	525,912	57.96%	-21,469	-2.40%
Porción marina	257,952	28.45%	244,738	26.97%	-13,215	-1.47%
Cuerpos de Agua Costeros	-	-	13,146	1.45%	13,146	1.45%
Territorios insulares	-	-	149	0.02%	-	-

Si bien diversos estudios a nivel mundial coinciden en que los manglares se encuentran entre los ecosistemas con mayor riesgo ecológico (Halpern *et al.*, 2007; Doubleday *et al.*, 2017; Uribe *et al.*, 2020), principalmente por efecto del cambio climático y la deforestación (Jennerjahn *et al.*, 2017), información reciente sobre los patrones de cambio y amenazas en los manglares de México mostró que, para el caso específico del Estado de Sonora, se ha registrado un incremento en la cobertura de manglar de $\approx 13\%$ entre 1973 y 2020, sin presencia de manglar perturbado para el 2020 (Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, 2021b). Existe la posibilidad de una interpretación errónea de los datos por la falta de contabilización de extensiones de manglar, aunado a la observación de indicios de procesos de degradación (Rivera-Arriaga *et al.*, 2020); sin embargo, la cobertura de manglar de la zona costera de Guaymas y Empalme aún no parecen ser afectada por las amenazas presentes. Ante esta situación es necesario fomentar la generación de información detallada y actualizada a nivel local que permita identificar impactos ambientales y establecer medidas de mitigación, si es necesario.

A diferencia de lo observado en la zona costera de Guaymas y Empalme, los cuerpos de agua costeros no han sido identificados o incluidos en otros estudios como ecosistemas con un riesgo ecológico considerable (Halpern *et al.*, 2007; Doubleday *et al.*, 2017; Uribe *et al.*, 2020), posiblemente debido a una variación en los métodos de estimación utilizados, las escalas de medición o el conjunto de amenazas asociados a los ecosistemas (Doubleday *et al.*, 2017). No obstante, los diversos estudios que analizan el estado ambiental de los cuerpos de agua costeros de Guaymas y Empalme, sugieren que éstos representan el ecosistema con mayor potencial de afectación por las amenazas en las inmediaciones de la zona conurbada San Carlos-Guaymas-Empalme, particularmente por aporte de aguas residuales sin tratamiento (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2004; Arreola-Lizárraga *et al.*, 2016, Ruiz-Ruiz *et al.*, 2017; Reynaga-Franco *et al.*, 2017, Medina-Galván *et al.*, 2021).

Cabe resaltar que el riesgo ecológico obtenido también refleja la posibilidad de pérdida de los servicios que ofrecen, incluyendo la provisión de los recursos pesqueros (Yurkievich y Sánchez-Crispín, 2016), materia prima que comúnmente sustenta la economía de poblaciones costeras (Barbier *et al.*, 2011), mantenimiento de la biodiversidad (Millenium Ecosystem Assessment, 2005), y el mantenimiento del turismo náutico y de sol y playa, que es uno de los más

importantes en Sonora (Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora, 2008).

8.4 Lineamientos para la planeación espacial de la zona costera

En México, el Ordenamiento Ecológico del Territorio (OET) es un instrumento de política ambiental cuyo objeto es regular o inducir el uso del suelo y las actividades productivas, para lograr la protección del medio ambiente, así como la preservación y el aprovechamiento sostenible de los recursos naturales a partir del análisis de las tendencias de deterioro y las potencialidades de aprovechamiento del mismo (Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente, 1988). Adicionalmente, existen los procesos de Ordenamiento Territorial definidos como la expresión espacial de las políticas económicas, sociales, culturales y ecológicas de la sociedad, cuyos objetivos son el desarrollo socioeconómico equilibrado y la organización física del espacio (Conferencia Europea de Ministros responsables de Ordenación del Territorio, 1983). En resumen, los Ordenamientos Ecológicos (en sus diversas modalidades) y el Ordenamiento Territorial tienen una base de orientación elementalmente sectorial (medio ambiente los primeros, y urbana-asentamientos humanos el segundo) y su confluencia en la zona costera pueden vincularse bajo un enfoque de desarrollo sustentable (Arreola-Lizárraga *et al.*, 2015).

Esta tesis aporta información de la ubicación y cobertura de ecosistemas costeros, las actividades humanas que se realizan, el análisis de las amenazas y la evaluación del riesgo ecológico. A partir de esta información se pueden proponer lineamientos para su consideración en procesos de planeación espacial como los ordenamientos ecológicos o del territorio de la zona costera de Guaymas y Empalme. Específicamente, un Programa Territorial de la zona conurbada Guaymas-Empalme-San Carlos fue elaborado en 1999 (Secretaría de Infraestructura Urbana y Ecología, 1999) y luego actualizado y evaluado en 2011 (Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano, 2011). Una actualización de ese ordenamiento resulta necesaria, donde las aportaciones con enfoque ecosistémico que hace esta tesis pueden ser aplicadas.

A partir de las observaciones realizadas y contribuciones previas, se presentan los siguientes lineamientos:

Los cuerpos de agua costeros y playas recreativas no deben ser receptores de aguas residuales sin tratamiento previo. Actualmente, es necesario hacer todos los esfuerzos de gestión y suma de voluntades de todos los actores sociales para instalar plantas de tratamiento de aguas residuales urbanas eficientes en los asentamientos de San Carlos, Guaymas y Empalme. Como lo señala Osuna-Ramírez (2010) también el tratamiento de aguas residuales de la industria de procesamiento de harina de pescado es un asunto prioritario para mitigar los efectos adversos al ambiente y vida marina, debido al exceso de materia orgánica que es aportada al mar.

Los ecosistemas de manglar y las islas deben mantenerse sin aportes de residuos sólidos, mediante un programa con campaña de limpieza. Considerando que las islas son un Área Natural Protegida (ANP), estas actividades son parte del programa de manejo que debe ser efectivo. En el caso de los manglares están protegidos por la Norma Oficial Mexicana NOM-022-SEMARNAT-2003, que establece las especificaciones para la preservación, conservación, aprovechamiento sustentable y restauración de los humedales costeros en zonas de manglar. De tal forma que las afectaciones a estos ecosistemas pueden atenderse mediante denuncia ciudadana ante la Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA).

En las playas recreativas, con la voluntad e iniciativa de las autoridades de los municipios, prestadores de servicios turísticos, usuarios y científicos deben considerar la mejora con atención prioritaria en: inversión en infraestructura y servicios, programa de limpieza, implementación de programas de educación ambiental, y monitoreo de la calidad sanitaria del agua y de la arena (García-Morales, 2017).

Diseñar e implementar un programa de saneamiento y restauración de ecosistemas costeros con evidencia de mayor deterioro, tales como los ecosistemas costeros adyacentes al parque industrial pesquero y a la planta de tratamiento de aguas residuales La Salada.

Diseñar e implementar un programa de monitoreo de la salud de los ecosistemas costeros mediante indicadores de la calidad ambiental y sanitaria.

Incorporar en los planes de desarrollo municipal de Guaymas y Empalme las acciones específicas para el mejor aprovechamiento de los servicios ecosistémicos de esta zona costera. Por ejemplo, 1) reactivar los comités de playas limpias en ambos municipios y elaborar un reglamento de uso de las playas, 2) actualizar el Programa Territorial de la zona conurbada Guaymas-Empalme-San Carlos elaborado por la Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano (2011), 3) revitalizar el malecón del puerto de Guaymas para hacerlo más atractivo con un mejoramiento de arquitectura y arte creativo, 4) elaborar e implementar un programa de manejo del turismo náutico de San Carlos, Sonora, como fue propuesto por Rivera-Martínez (2020).

9. CONCLUSIONES

Los criterios utilizados para delimitar la zona costera de los municipios de Guaymas y Empalme basados en los límites de las subcuencas hidrológicas tierra adentro y la isóbata de los 100 m mar afuera, resultan prácticos considerando que en ese espacio costero se llevan a cabo las principales actividades e influencias costeras en la región, incluyendo la pesquería, acuacultura, infraestructura costera, navegación y transporte marítimo, y el turismo.

La zona costera de Guaymas y Empalme es diversa en ecosistemas costeros, representados por ocho ecosistemas, incluyendo playas - dunas costeras, ambiente bentónico, ambiente pelágico, ambientes rocosos, manglar, pastos marinos, islas y cuerpos de agua costeros. Esta riqueza indica su potencial de generar diversos servicios ecosistémicos, destacando provisión de recursos pesqueros, mantenimiento de la biodiversidad, escenarios de recreación y esparcimiento, protección costera y reciclaje de nutrientes.

Se detectaron 24 actividades e influencias antropogénicas que amenazan a los ecosistemas costeros de la zona de estudio, donde las amenazas principales comprenden vertimientos de aguas residuales sin tratamiento, generación y aporte de basura, pesca ilegal y el desarrollo de infraestructura costera, las cuales establecen interacción sinérgica con los efectos del cambio climático.

Los manglares, cuerpos de agua costeros y ambientes rocosos son los ecosistemas que presentaron una mayor posibilidad de riesgo debido al efecto de exposición continua ante las amenazas antropogénicas, provenientes principalmente de actividades industriales y como consecuencia del crecimiento de los asentamientos humanos en la costa.

La detección de las amenazas antrópicas a la zona costera indica la necesidad de gestión ambiental para evitar que los ecosistemas costeros se deterioren y se pierdan los servicios ecosistémicos que brindan.

El análisis y caracterización de las interacciones amenaza-ecosistema observadas en la zona costera de Guaymas y Empalme con apoyo de los Sistemas de Información Geográfica es una herramienta adecuada para la planeación espacial, que puede aplicarse a los procesos de ordenamiento ecológico con enfoque ecosistémico, el cual pretende llevar a cabo el uso

sustentable de los recursos a través de toma de decisiones adecuadas. El éxito consecuente requiere trabajos futuros que generen información más específica y actualizada, así como la implementación de acciones que consideren las circunstancias ecológicas locales de los ecosistemas y las amenazas que enfrentan, con atención prioritaria por parte de autoridades, usuarios de servicios, sociedad y científicos.

10. LITERATURA CITADA

- Administración Portuaria Integral de Guaymas S. A. de C. V. (2020). *Manifestación de Impacto Ambiental. Modalidad Particular*. Construcción de canal de navegación y plataforma primaria de operaciones para la expansión del puerto de Guaymas, Sonora, ISBN: 9781119130536, pp 94-206.
- Álvarez-Berastegui, D., Ciannelli, L., Aparicio-González, A., Reglero, P., Hidalgo, M., López-Jurado, J. L., Tintoré, J. y Alemany, F. (2014). Spatial scale, means and gradients of hydrographic variables define pelagic seascapes of bluefin and bullet tuna spawning distribution. *PLoS ONE*, 9(10): 1-8. doi: 10.1371/journal.pone.0109338.
- Arkema, K. K., Verutes, G. M., Wood, S.A., Clarke-Samuels, C., Rosado, S., Canto, M., Rosenthal, A., Ruckelshaus, M., Guannel, G., Toft, J., Faries, J., Silver, J. M., Griffin, R. y Guerry, A. D. (2015). Embedding ecosystem services in coastal planning leads to better outcomes for people and nature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 112(24): 7390-7395. doi:10.1073/pnas.1406483112.
- Arreola-Lizárraga, J. A., Juárez-Chávez, F. I., Polanco Mizquez, E. I. y Padilla-Arredondo, Arreola Lizárraga J. A., Juárez-Chávez F. I., E. I. Polanco-Mizquez, E. I. y G. Padilla-Arredondo (2015). *Análisis de la confluencia de tres ordenamientos en la zona costera de Guaymas, Sonora, México*. pp. 87-101. En: V. Sorani y M.L. Alquicira Arteaga (eds.). *Perspectivas del Ordenamiento Territorial y Ecológico en América y Europa*. Arlequin Editorial y Servicios S.A. de C.V., Guadalajara, Jalisco, México, p 258. ISBN: 978-607-8338-34-4.
- Arreola-Lizárraga, J. A., Padilla-Arredondo, G., Medina-Galván, J., Méndez-Rodríguez, L., Mendoza-Salgado, R. y Cordoba-Matson, M. V. (2016). Analysis of hydrobiological responses to anthropogenic and natural influences in a lagoon system in the Gulf of California. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 45(1): 112-120. doi: 10.1515/ohs-2016-0011.
- Arreola-Lizárraga, JA., Padilla-Arredondo, G. y Ortega-Rubio, A. (2004). *Experiencias de manejo en la zona costera del Pacífico: la Bahía de Guaymas, un caso específico*. En: Rivera Arriaga E, Villalobos Zapata GJ, Azuz Adeath I, Rosado May F (eds), *El manejo costero en México*, pp 375-386.
- Arreola-Lizárraga, J. A., Padilla-Arredondo, G., Ruiz-Ruiz, T. M., Cruz-García, L. M., Méndez-Rodríguez, L. C., Hernández-Almaraz, P. y Vargas-González, H. H. (2018). Estuaries and coastal lagoons of Mexico: challenges for science, management, and conservation. En: *Mexican natural resources management and biodiversity conservation*, pp 251-283.
- Ávila García, P., Pablos Hach, J. L. y Pelayo Moller, C. M. (2018). *Estudio sobre la protección de ríos, lagos y acuíferos desde la perspectiva de los derechos humanos*. Comisión Nacional de los Derechos Humanos (CNDH)/ Universidad Autónoma de México (UNAM), México, pp 59-61. Disponible en: http://www.cndh.org.mx/sites/all/doc/Informes/Especiales/ESTUDIO_RIOS_LAGOS_ACUIFEROS.pdf.
- Azuz-Adeath, I. y Rivera-Arriaga, E. (2009). Descripción de la dinámica poblacional en la zona costera mexicana durante el periodo 2000-2005. *Papeles de Población*, 15(62): 75-107.
- Balzan, M V., Potschin-Young, M. y Haines-Young, R. (2018). Island ecosystem services: insights from a literature review on case-study island ecosystem services and future prospects. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 14(1): 71-90. doi: 10.1080/21513732.2018.1439103.

- Barbier, E. B., Hacker, S. D., Kennedy, C., Koch, E. W., Stier, A. C. y Silliman, B. R. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2): 169-193. doi: 10.1890/10-1510.1.
- Barboza, F. R. y Defeo, O. (2015). Global diversity patterns in sandy beach macrofauna: a biogeographic analysis. *Scientific Reports*, 5: 1-9. doi: 10.1038/srep14515.
- Barnes, David, K. A., Sands, C. J., Richardson, A. y Smith, N. (2019). Extremes in benthic ecosystem services; blue carbon natural capital shallower than 1000 m in isolated, small, and young Ascension Island's EEZ. *Frontiers in Marine Science*, 6(663): 1-12. doi: 10.3389/fmars.2019.00663.
- Barraza-Guardado, R. H., Arreola-Lizárraga, J. A., López-Torres, M. A., Casillas-Hernández, R., Miranda-Baeza, A., Magallón-Barrajas, F. y Ibarra-Gámez, C. (2013). Effluents of shrimp farms and its influence on the coastal ecosystems of Bahía de Kino, Mexico. *The Scientific World Journal*, : 1-8. doi: doi:10.1155/2013/306370.
- Beatriz Benseny, G. (2011). *La zona costera como escenario turístico. Transformaciones territoriales en la Costa Atlántica Bonaerense Villa Gesell (Argentina)*. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Sur, pp 21 - 117. Disponible en: http://nulan.mdp.edu.ar/1417/1/benseny_g.pdf.
- Bertrand, A., Grados, D., Colas, F., Bertrand, S., Capet, X., Chaigneau, A., Vargas, G., Mousseigne, A. y Fablet, R. (2014). Broad impacts of fine-scale dynamics on seascape structure from zooplankton to seabirds. *Nature Communications*, 55239: 1-9. doi: 10.1038/ncomms6239.
- Branch, G. M., Thompson, R. C., Crowe, T. P., Castilla, J. C., Langmead, O. y Hawkins, S. J. (2008). Rocky intertidal shores: prognosis for the future. En: *Aquatic ecosystems: trends and global Prospects*: 209-225. doi: 10.1017/CBO9780511751790.020.
- Cervantes, M., Findley, L. T., Holtschmit, K. H., Manrique, F., Pantoja, C., Robles, A., Soberón-Chávez, G. y Vidal, O. (1992). Importancia ecológica del Estero del Soldado. En: *Ecología, Recursos Naturales y Medio Ambiente en Sonora*, Primera ed. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, campus Guaymas, Sonora, pp 73-87.
- Charles, E. y Douvere, F. (2009). *Marine spatial planning: a step-by-step approach toward ecosystem-based management. Intergovernmental Oceanographic Commission and Man and Biosphere Programme*. IOC Manual and Guides No. 53, ICAM Dossier No. 6., Paris: UNESCO, pp 12-16.
- Chatterjee, S. (2017). An analysis of threats to marine biodiversity and aquatic ecosystems. *The Social Science Research Network Electronic Journal.*, pp 1-10. doi: 10.2139/ssrn.2964468.
- Comisión de Ecología y Desarrollo Sustentable del Estado de Sonora (CEDES). (2008). *Programa de ordenamiento ecológico territorial de la costa de Sonora*, pp 38-209. Disponible en: [http://transparencia.cajeme.gob.mx/Otra_Informacin/Otra_Información/Secretaría del Ayuntamiento/Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial de la Costa de Sonora.pdf](http://transparencia.cajeme.gob.mx/Otra_Informacin/Otra_Información/Secretaría_del_Ayuntamiento/Programa_de_Ordenamiento_Ecológico_Territorial_de_la_Costa_de_Sonora.pdf).
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2000). *Programa de Manejo Área de Protección de Flora y Fauna Islas del Golfo de California, México*. Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas, 1ra edición, México, D.F., p 262.
- Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2021a). *Geoportal del Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad*. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>. [consulta: 14 junio 2021].
- Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad (CONABIO). (2021b). *Manglares de México. Actualización y análisis de los datos 2020*. Primera ed. México, D. F., pp 49-51. ISBN: 9786078570508.

- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). (1998). *Subcuencas hidrológicas*. México. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- Conferencia Europea de Ministros responsables de Ordenación del Territorio (CEMAT). (1983). *Carta Europea de la Ordenación del Territorio*. Conferencia Europea de Ministros Responsables de Ordenación del Territorio-CEMAT.
- Crain, C. M., Halpern, B. S., Beck, M. W. y Kappel, C. V. (2009). Understanding and managing human threats to the coastal marine environment. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1162: 39-62. doi: 10.1111/j.1749-6632.2009.04496.x.
- Crowe, T. P., Thompson, R. C., Bray, S. y Hawkins, S. J. (2000). Impacts of anthropogenic stress on rocky intertidal communities. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 7(273): 273-297. doi: 10.1023/A.
- Cruz García, L. M. (2015). *Las áreas naturales protegidas con ambientes costero-marinos en Baja California Sur, México: representatividad y manejo*. Tesis doctoral. Centro de Investigaciones Biológicas del Noreste, S. C., pp 1-2, 18.
- Dang, K. B., Nguyen, T. T., Ngo, H. H., Burkhard, B., Müller, F., Dang, V. B., Nguyen, H., Ngo, V. L. y Pham, T. P. N. (2021). Integrated methods and scenarios for assessment of sand dunes ecosystem services. *Journal of Environmental Management*, 289(3): 1-14. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.112485.
- De Andrés, M., Barragán, J. M. y García Sanabria, J. (2017). Relationships between coastal urbanization and ecosystems in Spain. *Cities*, 68: 8-17. doi: 10.1016/j.cities.2017.05.004.
- De la Lanza Espino, G., Ortiz Pérez, M. A. y Carbajal Pérez, J. L. (2013). Diferenciación hidrogeomorfológica de los ambientes costeros del Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía*, 81: 33-50. doi: 10.14350/rig.33375.
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2018). *Política Nacional de Mares y Costas de México*. Disponible en: https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=4940652&fecha=15/12/2006#gsc.tab=0. [consulta: 3 julio 2022].
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (2006). *Programa de Ordenamiento Ecológico del Golfo de California*. Disponible en: https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5545511&fecha=30/11/2018#gsc.tab=0. [consulta: 3 julio 2022].
- Diario Oficial de la Federación (DOF). (1986). *Ley Federal del Mar*. México. Disponible en: <https://www.diputados.gob.mx/LeyesBiblio/pdf/124.pdf>.
- Dickey-Collas, M., Mcquatters-Gollop, A., Bresnan, E., Kraberg, A., Manderson, J., Nash, R., Otto, S., Sell, A. F., Tweddle, J. F. y Trenquel, V. (2019). Pelagic habitat: exploring the concept of good environmental status. *ICES Journal of Marine Science*, 76(6): 2333-2347. doi: 10.1093/icesjms/fsz127.
- Dirección General Adjunta de Oceanografía Hidrografía y Meteorología (DIGAOHM). *Sonora*. In: *Derrotero Pacífico Mex.* Disponible en: <https://digaohm.semar.gob.mx/derrotero/derrotero.html>. [consulta: 7 junio 2022].
- Dirección General del Boletín Oficial y Archivo del Estado. (2006). *Declaratoria que se establezca como área natural protegida bajo categoría de zona sujeta a conservación ecológica donde se encuentra el Estero El Soldado y áreas aledañas*. Hermosillo, Sonora, pp 2-11.

- Donato, D. C., Kauffman, J. B., Murdiyarso, D., Kurnianto, S., Stidham, M. y Kanninen, M. (2011). Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, 4(5): 293-297. doi: 10.1038/ngeo1123.
- Doubleday, Z. A., Jones, A. R., Deveney, M. R., Ward, T. M. y Gillanders, B. M. (2017). Eight habitats, 38 threats and 55 experts: assessing ecological risk in a multi-use marine region. *PLoS ONE*, 12(5): 1-15. doi: 10.1371/journal.pone.0177393.
- Douve, F. (2008). The importance of marine spatial planning in advancing ecosystem-based sea use management. *Marine Policy*, 32(5): 762-771. doi: 10.1016/j.marpol.2008.03.021.
- Duffy, J. E. (2006). Biodiversity and the functioning of seagrass ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 311: 233-250. doi: 10.3354/meps311233.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2001). *An overview of risk assessment and RCRA*. U.S, pp 1-4. doi: 10.1038/s41560-019-0504-1.
- Ewel, K. C., Twilley, R. R. y Eong Ong, J. (1998). Different kind of mangrove forests provide different goods and services. *Global Ecology and Biogeography Letters*, 7(1): 83-94.
- Fernández, J., Jiménez, M. y Allen, T. (2014). Diversidad, abundancia y distribución de la macrofauna bentónica de las costas rocosas al norte del Estado Sucre, Venezuela. *Revista de Biología Tropical*, 62(3): 947-956. doi: 10.15517/rbt.v62i3.13495.
- Galparsoro, I., Borja, A. y Uyarra, M. C. (2014). Mapping ecosystem services provided by benthic habitats in the European North Atlantic Ocean. *Frontiers in Marine Science*, 1(23): 1-14. doi: 10.3389/fmars.2014.00023.
- García, E. (2004). *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen (Modifications to Köppen's climate classification system)*. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad de México, pp 45-55.
- García-Morales, G., Arreola-Lizárraga, J. A. Mendoza-Salgado, R. A., García-Hernández, P. Rosales-Grano y A. Ortega-Rubio (2018). Evaluation of the recreational aptitude of beaches as perceived by users. *Journal of Environmental Planning and Management*, 61 (1): 161-175. doi:10.1080/09640568.2017.1295924.
- García-Morales, G. (2017). *Evaluación integral y estrategia de manejo de las playas recreativas de Guaymas y Empalme, Sonora, México*. Tesis doctoral. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C., pp 26-66.
- General Bathymetric Chart of the Oceans. (2020). *Gridded Bathymetry Data*. Disponible en: https://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data/. [consulta: 14 junio 2021].
- Goodchild, M. F. (2009). Geographic information systems and science: today and tomorrow. *Annals of GIS*, 15(1): 3-9. doi: 10.1080/19475680903250715.
- Gormley, Á., Pollard, S. y Rocks, S. (2011). Guidelines for environmental risk assessment and management. En: *Understanding and Managing Natural and Environmental Risks*. Crown copyright, pp 22-40. Disponible en: <http://www.defra.gov.uk/publications/files/pb13670-green-leaves-iii-1111071.pdf>.
- Gutiérrez de MacGregor, M. T. y González Sánchez, J. (1999). Las costas mexicanas y su crecimiento urbano. *Investigaciones Geográficas*, 1(40): 110-126. doi: 10.14350/rig.59098.
- Haines-Young, R. y Potschin, M. (2017). *Common international classification of ecosystem services (CICES) V5.1. Guidance on the application of the revised structure*. Fabis Consulting. U. K., pp 3-12.

- Halpern, B. S., Selkoe, K. A., Micheli, F. y Kappel, C. V. (2007). Evaluating and ranking the vulnerability of global marine ecosystems to anthropogenic threats. *Conservation Biology*, 21(5): 1301-1315. doi: 10.1111/j.1523-1739.2007.00752.x.
- Hamylton, S. M. (2017). The application of spatial analysis to coastal environments. En: *Spatial Analysis of Coastal Environments*. Cambridge University Press, pp 1-30.
- Haro Martínez, A. A., Arias Rojo, H. M. y Taddei Bringas, I. C. (2015). El valor de los servicios ambientales en la cuenca baja del río Mayo. *Región y Sociedad*, 27(63): 31-59. doi: 10.22198/rys.2015.63.a236.
- He, Q. y Silliman, B. R. (2019). Climate change, human impacts, and coastal ecosystems in the anthropocene. *Current Biology*, 29: 1021-1035. doi: 10.1016/j.cub.2019.08.042.
- Herzka, S. Z., Zaragoza Álvarez, R. A., Peters, E. M. y Hernández Cárdenas, G. (2020). Tomo IV: pastos marinos. En: *Atlas de línea base ambiental del Golfo de México*. Primera ed. CICESE, Ensenada, B. C., pp 12-15. ISBN: 9786079568894.
- Holsman, K., Samhoury, J., Cook, G., Hazen, E., Olsen, E., Dillard, M., Kasperski, S., Gaichas, S., Kelble, C. R., Fogarty, M. y Andrews, K. (2017). An ecosystem-based approach to marine risk assessment. *Ecosystem Health and Sustainability*, 3(1): 1-16. doi: 10.1002/ehs2.1256.
- Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (INVEMAR). (2006). *Informe del estado de los ambientes marinos y costeros en Colombia: año 2005*. Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras "José Benito Vives de Andrés". Santa Marta, Colombia, p 360.
- Instituto del Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (Infonavit). (2018). *Índice básico de las ciudades prósperas*. Guaymas, Sonora, México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2020). *Censo Población y Vivienda 2020*. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2020/>. [consulta: 28 marzo 2021].
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). *Pesca y acuicultura: Censos Económicos*. Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México, p 58.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2018). *Conjunto de datos vectoriales de uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VII. Conjunto Nacional*. México. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463842781>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Guía para la interpretación de cartografía. Uso del suelo y vegetación. Escala 1:250 000. Serie VI*. México, pp 23-58.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2017). *Anuario estadístico y geográfico de Sonora 2017*. México.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2013). *Territorio insular*. Escala 1:50 000. México. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463039839>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2012). *Áreas geoestadísticas municipales*. Aguascalientes, México: Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <http://www.conabio.gob.mx/informacion/gis/>.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (1991). *Datos básicos de la geografía de México*. Segunda ed. DR, México. ISBN: 9781626239777.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2009). *Prontuario de Información Geográfica Municipal*. Guaymas, Sonora. Disponible en: http://www3.inegi.org.mx/contenidos/app/mexicocifras/datos_geograficos/28/28034.pdf.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2006). *Hidrografía*. Escala 1:250 000. México. Disponible en: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=889463598428>.

- Jennerjahn, T. C., Gilman, E., Krauss, K. W., Lacerda, L. D., Nordhaus, I. y Wolanski, E. (2017). Mangrove ecosystems under climate change. En: *Rivera-Monroy VH et al. (ed) Mangrove Ecosystems: a global biogeographic perspective*. Springer International Publishing, pp 211-244.
- Kennish, M. J. (2002). Environmental threats and environmental future of estuaries. *Environmental Conservation*, 29(1): 78-107. doi: 10.1017/S0376892902000061.
- Kjerfve, B. y Magill, KE. (1989). Geographic and hydrodynamic characteristics of shallow coastal lagoons. *Marine Geology*, 88(3-4): 187-199. doi: 10.1016/0025-3227(89)90097-2.
- Lara-Lara, J. R., Arreola Lizárraga, J. A., Calderón Aguilera, L. E., Camacho Ibar, V. F., De la Lanza Espino, G., Escofet Giansone, A., Espejel Carbajal, M. I., Guzmán Arroyo, M., Ladah, L. B., López Hernández, M., Meling López, E. A., Casasola Barceló, P. M., Reyes Bonilla, H., Ríos Jara, E. y Zertuche González, J. A. (2008a). Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. En: *Capital Natural de México, vol. I: Conocimiento actual de la biodiversidad (CONABIO)*, México, pp 109-134.
- Lara-Lara, R. (2007). Capítulo 2: Los ecosistemas marinos. En: *Lara-Lara R (ed) Segundo Estudio de País. Parte A. Conocimiento de la Biodiversidad*, pp 1-43.
- Lara-Lara, R., Sosa-Ávalos, R., Díaz, V. y Tapia, M. (2008b). Los ecosistemas marinos. En: *Capital Natural de México*, CONABIO, México, pp 135-159.
- Lara Domínguez, A. L., Contreras Espinosa, F., Castañeda-López, O., Barba-Macías, E. y Pérez-Hernández, M. A. (2011). Lagunas costeras y estuarios. En: *CONABIO (ed) La biodiversidad en Veracruz: un estudio de estado*, primera ed. pp 297-313.
- León-López, C. E., Arreola-Lizárraga, J. A., Padilla-Arredondo, G., Chávez-Villalba, J. E., Mendoza-Salgado, R. A., Méndez-Rodríguez, L. C. y García-Hernández, J. (2018). Temporal variability of enterococci and associated sources at three subtropical recreational beaches. *Oceanological and Hydrobiological Studies*, 47(4): 327-336. doi: 10.1515/ohs-2018-0031.
- Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). (1988). *Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente*. Diario Oficial de la Federación, 28 de enero de 1988. Reforma: Diario Oficial de la Federación, 13 de diciembre de 1996. México.
- Lluch-Cota, S. E., Aragón-Noriega, E. A., Arreguín-Sánchez, F., Auriol-Gamboa, D., Bautista-Romero, J. J., Brusca, R. C., Cervantes-Duarte, R., Cortés-Altamirano, R., Del-Monte-Luna, P., Esquivel-Herrera, A., Fernández, G., Hendrickx, M. E., Hernández-Vázquez, S., Herrera-Cervantes, H., Kahru, M., Lavín, M., Lluch-Belda, D., Lluch-Cota, D. B., López-Martínez, J., Marinone, S. G., Nevárez-Martínez, M. O., Ortega-García, S., Palacios-Castro, E., Parés-Sierra, A., Ponce-Díaz, G., Ramírez-Rodríguez, M., Salinas-Zavala, C. A., Schwartzlose, R. A. y Sierra-Beltrán, A. P. (2007). The Gulf of California: review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography*, 73: 1-26. doi: 10.1016/j.pocean.2007.01.013.
- Lombard, A. T., Dorrington, R. A., Reed, J. R., Ortega-Cisneros, K., Penry, G. S., Pichegru, L., Smit, K. P., Vermeulen, E. A., Witteveen, M., Sink, K. J., McInnes, A. M. y Ginsburg, T. (2019). Key challenges in advancing an ecosystem-based approach to marine spatial planning under economic growth imperatives. *Frontiers in Marine Science*, 6(146). doi: 10.3389/fmars.2019.00146.
- López Calderón, J., Riosmena-Rodríguez, R., Torre, J. y Meling-López, A. (2013). El pasto marino en el Golfo de California: estado actual y amenazas. *CONABIO, Biodiversitas*, 97: 15-20. Disponible en: <http://cobi.org.mx/wp-content/uploads/2013/02/biodiversitas.pdf>.

- Martínez-Yrizar, A., Stephen Felger, R. y Búrquez, A. (2010). Los ecosistemas terrestres de Sonora: un diverso capital natural. En: *Molina-Freaner F, Van-Devender T (eds) Diversidad biológica de Sonora, México*, pp 129-156.
- Mata Ángeles, J. A. (2016). *Clasificación y evaluación ecológica de los ecosistemas costeros de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora, México*. Tesis de licenciatura. Instituto Tecnológico del Valle del Yaqui, Sonora, pp 8 y 22.
- McLeod, E., Chmura, G. L., Bouillon, S., Salm, R., Björk, M., Duarte, C. M., Lovelock, C. E., Schlesinger, W. H. y Silliman, B. R. (2011). A blueprint for blue carbon: Toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 9(10): 552-560. doi: 10.1890/110004.
- Medina-Galván, J., Osuna-Martínez, CC., Padilla-Arredondo, G., Frías-Espericueta, M., Barraza-Guardado, R. H. y Arreola-Lizárraga, J. A. (2021). Comparing the biogeochemical functioning of two arid subtropical coastal lagoons: the effect of wastewater discharges. *Ecosystem Health and Sustainability*, 7(1): 1-12. doi: 10.1080/20964129.2021.1892532.
- Méndez, L., Acosta, B., Arreola-Lizárraga, A. y Padilla, G. (2004). Anomalous levels of heavy metals in sediments from Guaymas Bay, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 72(6): 1101-1106. doi: 10.1007/s00128-004-0357-5.
- Méndez, L., Salas-Flores, L. M., Arreola-Lizárraga, A., Álvarez-Castañeda, S. T. y Acosta, B. (2002). Heavy metals in clams from Guaymas Bay, Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 68(2): 217-223. doi: 10.1007/s001280241.
- Mendoza-Cantú, M. E. (1997). *Regionalización Geomorfológica y de Paisaje en la Región Costera entre Guaymas y Agiabampo, Sonora, México*.
- Milanés Batista, C., Suárez, A. y Botero Saltarén, C. M. (2017). Novel method to delimitate and demarcate coastal zone boundaries. *Ocean and Coastal Management*, 144: 105-119. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2017.04.021.
- Military Grid Reference System. (2022). *Legal land converter*. Disponible en: <https://legallandconverter.com/p50.html>. [consulta: 26 noviembre 2022].
- Millenium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and human well-being: synthesis*. Washington, D. C., pp 1-82. ISBN: 1597260401. doi: 10.11646/zootaxa.4892.1.1.
- Morzaria-Luna, H. N., Turk-Boyer, P., Polanco-Mizquez, E. I., Downton-Hoffmann, C., Cruz-Piñón, G., Carrillo-Lammens, T., Loaiza-Villanueva, R., Valdivia-Jiménez, P., Sánchez-Cruz, A., Peña-Mendoza, V., López-Ortiz, A. M., Koch, V., Vázquez-Vera, L., Arreola-Lizárraga, J. A., Amador-Castro, Imelda, G., Suárez Castillo, A. N. y Mungia-Vega, A. (2020). Coastal and marine spatial planning in the northern Gulf of California, Mexico: consolidating stewardship, property rights, and enforcement for ecosystem-based fisheries management. *Ocean and Coastal Management*, 197: 1-13. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105316.
- Mueller-Dombois, D. (1992). The formation of island ecosystems. *GeoJournal*, 28(2): 293-296. doi: 10.1007/BF00177244.
- Newton, A., Icelly, J., Cristina, S., E. Perillo, G. M., Eugene Turner, R., Ashan, D., Cragg, S., Luo, Y., Tu, C., Li, Y., Zhang, H., Ramesh, R., L. Forbes, D., Solidoro, C., Béjaoui, B., Gao, S., Pastres, R., Kelsey, H., Taillie, D., Nhan, N., Brito, A. C., De Lima, R. y Kuenzer, C. (2020). Anthropogenic, direct pressures on coastal wetlands. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 8(144): 1-29. doi: 10.3389/fevo.2020.00144.
- Oakley, J. W., Lawing, A. M., Guillen, G. J. y Gelwick, F. (2018). Defining ecologically, geographically, and politically coherent boundaries for the northern Gulf of Mexico coastal

- region: facilitating ecosystem-based management. *Ocean and Coastal Management*, 154: 1-7. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2017.12.019.
- Ortiz-Lozano, L., Olivera-Vázquez, L. y Espejel, I. (2017). Legal protection of ecosystem services provided by marine protected areas in Mexico. *Ocean and Coastal Management*, 138: 101-110. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2017.01.017.
- Ostrowski, A., Connolly, R. M. y Sievers, M. (2021). Evaluating multiple stressor research in coastal wetlands: a systematic review. *Marine Environmental Research*, 164: 1-11. doi: 10.1016/j.marenvres.2020.105239.
- Osuna-Ramírez, R. (2010). *Condición ambiental de un ecosistema costero receptor de aguas residuales de la producción de harina de pescado en Guaymas, Sonora, México*. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Guaymas, Guaymas, Sonora, p 75.
- Osuna-Ramirez, R., Arreola-Lizárraga, J. A., Padilla-Arredondo, G., Mendoza-Salgado, R. A. y Mendez-Rodríguez, L. C. (2017). Toxicity of wastewater from fishmeals production and their influence on coastal waters. *Fresenius Environmental Bulletin*, 26(11): 6408-6412.
- Pardal-Souza, A. L., Dias, G., Christofoletti, R. A. (2016). Shading impacts by coastal infrastructure on biological communities from subtropical rocky shores. *Journal of Animal Ecology*: 9-12. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12811>.
- Polanco Mizquez, E. I. (2009). *El escenario costero del estado de Sonora, México: valoración ambiental, presión antropogénica e instrumentos de política ambiental*. Tesis de maestría. Instituto Tecnológico de Guaymas, Sonora, pp 9 y 34.
- Portman, M. E. (2016). Ecosystem services for oceans and coasts. En: *Environmental planning for oceans and coasts. Methods, tools and technologies*. Springer, pp. 117–137. Disponible en: <http://www.springer.com/series/8088>.
- Rangel-Buitrago, N., Neal, W. J., Bonetti, J., Anfuso, G. y De Jonge, V. N. (2020). Vulnerability assessments as a tool for the coastal and marine hazards management: an overview. *Ocean and Coastal Management*, 189: 105134. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2020.105134.
- Reynaga-Franco, F. J., Arreola-Lizárraga, J. A., Padilla-Arredondo, G., Chávez-Villalba, J. E. y Ruiz-Ruiz, T. M. (2017). Estado trófico de tres lagunas costeras subtropicales del Golfo de California. En: *Paz Pellat F, Velázquez Rodríguez A, Rojo Martínez M (eds) Estado actual del conocimiento del Ciclo del Carbono y sus interacciones en México: síntesis a 2018*. Programa Mexicano del Carbono. Sonora, pp 352-357.
- Ricaurte, L. F., Olaya-Rodríguez, M. H., Cepeda-Valencia, J., Lara, D., Arroyave-Suárez, J., Finlayson, C. M. y Palomo, I. (2017). Future impacts of drivers of change on wetland ecosystem services in Colombia. *Global Environmental Change*, 44: 158-169.
- Rivera-Arriaga, E., Azuz-Adeath, I., Cervantes Rosas, O. D., Espinoza-Tenorio, A., Silva Casarín, R., Ortega-Rubio, A., Botello, Alfonso, V. y Vega Serratos, B. E. (2020). Restauración ecológica de manglares de México. En: *Gobernanza y manejo de las costas y mares ante la incertidumbre: una guía para tomadores de decisiones*. Instituto de Ecología, Pesquerías y Oceanografía del Golfo de México (EPOMEX), Campeche, p 654.
- Rivera-Martínez, C. M. (2020). *Capital natural y turismo náutico en San Carlos, Sonora, México*. Tesis de maestría. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. La Paz, B.C.S., p 70.
- Rodríguez Zúñiga, M. T., Villeda-Chávez, E., Vázquez-Lule, A. D., Bejarano, M., Cruz López, M. I., Olgún, M., Villela Gaytán, S. A. y Flores, R. (2018). *Métodos para la caracterización de los manglares mexicanos: un enfoque espacial multiescala*. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad, Ciudad de México, pp 8 y 13. ISBN: 9786078570034.

- Ruiz-Ruiz, T. M., Arreola-Lizárraga, J. A., Morquecho, L., Méndez-Rodríguez, L. C., Martínez-López, A. y Mendoza-Salgado, R. A. (2017). Detecting eutrophication symptoms by means of three methods in a subtropical semi-arid coastal lagoon. *Wetlands*, 37: 1105–1118. doi: doi:10.1007/s13157-017-0944-y.
- Ruiz-Ruiz, T. M., Arreola-Lizárraga, J. A., Morquecho, L., Mendoza-Salgado, R. A., Martínez-López, A., Méndez-Rodríguez, L. C. y Enríquez-Flores, J. (2016). Assessment of eutrophication in a subtropical lagoon in the Gulf of California. *Aquatic Ecosystem Health and Management*, 19(4): 382-392. doi: 10.1080/14634988.2016.1242950.
- Ruiz Vega, F. L. (2007). *Actualización del balance hídrico integral de la Cuenca del Río Mátape, y sus acuíferos Mátape, Valle de Guaymas y San José de Guaymas*. Tesis de maestría. Universidad de Sonora, Hermosillo, Sonora, p 16.
- Salas Mejía, N. (2019). *Análisis ecológico de la comunidad de peces en el área natural protegida: estero El Soldado, Sonora, México*. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. Guaymas, Sonora, pp 10-13.
- Santora, J., Schroeder, I., Bograd, S., Chavez, F., Cimino, M., Fiechter, J., Hazen, E., Kavanaugh, M., Messié, M., Miller, R., Sakuma, K., Sydeman, W., Wells, B. y Field, J. (2021). Pelagic biodiversity, ecosystem function, and services: an integrated observing and modeling approach. *Oceanography*, 34(2):17-35. doi: 10.5670/oceanog.2021.212.
- Santos Saldanha, D. y Da Silva Costa, D. F. (2019). Classificação dos serviços ecossistêmicos prestados pelas áreas úmidas na zona estuarina do Rio Piancó-Piranhas-Açu (Nordeste, Brasil). *Ateliê Geográfico - Goiânia-GO*, 3(3): 263-282.
- Satyam, K. y Thiruchitrambalam, G. (2018). Habitat ecology and diversity of rocky shore fauna. En: *Biodiversity and Climate Change Adaptation in Tropical Islands*. Elsevier Inc. Port Blair, India, pp 187-215.
- Schlacher, T. A., Schoeman, D. S., Dugan, J., Lastra, M., Jones, A., Scapini, F. y McLachlan, A. (2008). Sandy beach ecosystems: key features, sampling issues, management challenges and climate change impacts. *Marine Ecology*, 29(SUPPL. 1): 70-90. doi: 10.1111/j.1439-0485.2007.00204.x.
- Secretaría de Infraestructura Urbana y Ecología (SIUE). (1999). *Programa de Ordenamiento Territorial de la Zona Conurbada de Guaymas-Empalme-San Carlos*. Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano del Gobierno del Estado de Sonora.
- Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano (SIDUR). (2011). *Actualización del Programa de Ordenamiento Territorial de la Zona Conurbada de Guaymas-Empalme-San Carlos*. Secretaría de Infraestructura y Desarrollo Urbano del Gobierno del Estado de Sonora.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2016). *Consultoría estratégica para el proyecto de la planta desaladora para las ciudades de Guaymas y Empalme, estado de Sonora. B5 Análisis de la flora y fauna marinas en la zona*. Ciudad de México.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). (2013). *Manejo de ecosistemas de dunas costeras, criterios ecológicos y estrategias*. México. ISBN: 9786078246595.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) e Instituto Nacional de Ecología (INE). (2010). *Introducción al análisis de riesgos ambientales*. Segunda ed. México, D. F. ISBN: 9786077908265.
- Thomson, D.A., Findley, L.T. y Kerstitch, A.N. (1979). *Reef fishes on the Sea of Cortez*. John Wiley and Sons. New York. VII, pp 302.

- Trégarot, E., Failler, P. y Maréchal, J. P. (2017). Evaluation of coastal and marine ecosystem services of Mayotte: indirect use values of coral reefs and associated ecosystems. *International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management*, 13(3): 19-34. doi: 10.1080/21513732.2017.1407361.
- Uribe, E., Etter, A., Luna-Acosta, A., Díazgranados, M. C., Acosta, A., Alonso, D., Chasqui, L., Gómez-López, D. I., Rodríguez-Rodríguez, J. A., Osorno-Arango, A., Navas-Camacho, R., Sánchez, L., Rojas-Aguirre, S., Ricaurte-Villota, C. y Coca-Domínguez, O. (2020). *Lista Roja de Ecosistemas Marinos y Costeros de Colombia (versión 1)*. Documento técnico. Bogotá, D. C., pp 5-22, 28-50.
- Vargas-González, H. H. (2012). *Vertimientos de aguas residuales urbanas y sus efectos en la condición ambiental de la Ensenada La Salada, Sonora, México*. Tesis de maestría. Centro de Investigaciones Biológicas de Noroeste, S. C. Guyamas, Sonora, pp 29-50.
- Vargas-González, H. H., Arreola-Lizárraga, J. A., García-Hernández, J., Mendoza-Salgado, R. A., Zenteno-Savín, T. y Méndez-Rodríguez, L. C. (2017). Calidad de sedimentos asociada a actividades antrópicas en lagunas costeras semiáridas subtropicales de la costa central este del Golfo de California. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 33(1): 7-22. doi: 10.20937/RICA.2017.33.esp02.01.
- Vargas-González, H. H., Arreola-Lizárraga, J. A., Mendoza-Salgado, R. A., Méndez-Rodríguez, L. C., Lechuga-Deveze, C. H., Padilla-Arredondo, G. y Cordoba-Matson, M. (2014). Effects of sewage discharge on trophic state and water quality in a coastal ecosystem of the Gulf of California. *The Scientific World Journal*, 2014: 1-7. doi: 10.1155/2014/618054.
- Vargas González, H. H. (2018). *Cambios en la biodisponibilidad de elementos traza asociados a procesos de eutrofización en sistemas lagunares del Golfo de California*. Tesis doctoral. Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S. C. Guyamas, Sonora, pp 44-99.
- Vega-Granillo, E. L., Cirett-Galán, S., De la Parra-Velasco, M. L. y Zavala-Juárez, R. (2011). Capítulo 8: Hidrogeología de Sonora, México. En: *Calmus T (ed) Panorama de la geología de Sonora, Méxic*. México, D. F., pp 267-298.
- Walker, B. W. (1960). The Distribution and affinities of the marine fish fauna of the Gulf of the California. *Systematic Biology*, 9(3): 123–133.
- Waycott, M., Duarte, C. M., Carruthers, T. J. B., Orth, R. J., Dennison, W. C., Olyarnik, S., Calladine, A., Fourqurean, J. W., Heck, K. L., Hughes, A. R., Kendrick, G. A., Kenworthy, W. J., Short, F. T. y Williams, S. L. (2009). Accelerating loss of seagrasses across the globe threatens coastal ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 106(30): 12377-12381. doi: 10.1073/pnas.0905620106.
- Yip Lee, S., Primavera, J. H., Dahdouh-Guebas, F., Mckee, K., Bosire, J. O., Cannicci, S., Diele, K., Fromard, F., Koedam, N., Marchand, C., Mendelsohn, I., Mukherjee, N. y Record, S. (2014). Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment. *Global Ecology and Biogeography*, 23(7): 726-743. doi: 10.1111/geb.12155.
- Yurkievich, G. y Sánchez-Crispín, Á. (2016). Estructura territorial de la actividad pesquera en Guaymas, Sonora. *Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía*, (91): 152-167. doi: 10.14350/rig.49937.
- Zamboni, A., J. L., Nicolodi, G. Fonseca-Barroso, F. Serrano-Léllis, A. Nunes-García. (2010). La gestión integrada de zonas costeras y cuencas hidrográficas en Brasil. En: *Alberto Matarán Ruiz (Coord.), Espacio litoral y sostenibilidad: una visión multidisciplinaria desde las Ciencias Ambientales*. Universidad de Cádiz, Servicio de Publicaciones, pp 103-128.

11. ANEXOS

Anexo A | Encuesta acerca de la zona costera de Guaymas y Empalme, Sonora, México.

Presentación

Distinguido (a) colega, su experiencia laboral es la razón por la que enviamos esta invitación para responder una breve encuesta asociada a mi proyecto de tesis de maestría “Bases para la planeación de la zona costera de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora, México: enfoque basado en el ecosistema” que estoy realizando en el programa de posgrado del Centro de Investigaciones Biológicas del Noroeste, S.C. (www.cibnor.gob.mx).

La encuesta incluye las temáticas: (1) antecedentes y experiencia del experto, (2) identificación de cinco actividades/influencias principales para el ecosistema, (3) evaluación ecológica de cada actividad/influencia sobre el ecosistema, (4) evaluación de la recuperación del ecosistema, (5) evaluación de las interacciones sinérgicas entre las actividades/influencias.

Los resultados de la tesis buscan contribuir a mejorar el conocimiento de ecosistemas costeros e incidir con información útil a los tomadores de decisiones para aprovechar de manera sostenible la zona costera de los municipios de Guaymas y Empalme, Sonora.

Su apoyo es muy apreciado y esencial para el éxito de este proyecto.

Atentamente,

Biol. Andrea Escamilla Trejo (estudiante).

Dr. José Alfredo Arreola Lizárraga (director de la tesis).

Introducción

La encuesta tiene el propósito de evaluar los efectos de las actividades y/o influencias con mayor potencial de incidencia en la condición de los ecosistemas costeros. Para ello se solicita proporcionar la información correspondiente al ecosistema de su experiencia. Si su experiencia comprende más de un ecosistema, podrá continuar evaluando cada ecosistema.

El tiempo estimado para responder el cuestionario es de 10 minutos.

Antecedentes

Nombre:

Correo electrónico (requerido):

Afiliación (organización a la que pertenece):

Posición:

- Académica (estudiante posgraduado).
- Consultor público o privado.
- Gobierno (federal).
- Gobierno (estado).
- Gobierno (local).
- Organización no gubernamental.
- Usuarios de servicios .
- Otro: _____.

Responsabilidad principal del trabajo:

- Consultoría.
- Política Ambiental.
- Manejo de los Recursos Naturales.
- Investigación.
- Otro: _____

Años de experiencia con el estudio del ecosistema costero y/o temas relacionados:

- () Menos de 2 años.
 () 2 a 5 años.
 () 5 a 10 años.
 () 10 a 20 años.
 () Más de 20 años.

Indique el ecosistema del cual tiene mayor conocimiento o experiencia (elija una opción):

- [] Playas/dunas costeras.
 [] Ambiente bentónico (fondos suaves, desde línea de costa hasta 50 m de profundidad).
 [] Ambiente pelágico (masa de agua, desde línea de costa hasta 50 m de profundidad).
 [] Ambientes rocosos (costas y arrecifes rocosos).
 [] Pastos marinos.
 [] Manglares.
 [] Islas (incluye ambientes marinos circundantes hasta 30 m de profundidad).
 [] Lagunas costeras, bahías, esteros.

Actividades/influencias

Seleccione las cinco actividades o influencias de mayor potencial de afectación a la condición ambiental de su ecosistema. Clasifique en función de su importancia del 1 al 5 de (1 = mayor importancia).

Actividad/Influencia	Consideraciones de potencial amenaza
(Acuicultura de bivalvos: almeja y ostión.	<ul style="list-style-type: none"> • Sedimentación. • Aportes de materia orgánica. • Sombreado. • Modificación de corrientes. • No considerar impactos por poblaciones invasivas ferales o criaderos.

()	Acuicultura de camarón.	<ul style="list-style-type: none"> • Modificación de uso del suelo en la franja costera. • Aportes al mar de materia orgánica, nutrientes y sólidos suspendidos totales. • No considerar impactos por patógenos introducidos.
()	Plantas desaladoras.	<ul style="list-style-type: none"> • Aportes al mar de salmuera.
()	Navegación y transporte marítimo.	<ul style="list-style-type: none"> • Potencial de dragados, resuspensión de sedimentos, daños por anclaje, descargas residuales y antiincrustantes. • Derrame de combustibles. • <i>No considerar amenazas relacionadas con especies invasivas o pesca.</i>
()	Cambio climático: acidificación del océano (2020 - 2030).	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de 0.07 en el pH del océano. • Considerar que el pH del océano ya ha disminuido en los últimos 200 años cerca de 0.1.
()	Cambio climático: calentamiento global (2020 - 2030).	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de 0.8°C en la temperatura media del océano. • Incremento de 0.4 a 1.1°C en la media de la temperatura del aire.
()	Cambio climático: incremento en la frecuencia de eventos extremos de lluvia (2020 - 2030).	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento en la frecuencia de eventos extremos.
()	Cambio climático: reducción de lluvias (2020 - 2030).	<ul style="list-style-type: none"> • Disminución de la cantidad de lluvia.
()	Cambio climático: incremento de días cálidos (2020 - 2030).	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento del número de días cálidos (temperatura del aire > 35°C).
()	Cambio climático: incremento del nivel medio del mar (2020 - 2030).	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de ≥ 4.2 mm/año del nivel del mar. • Amenazas secundarias incluyen aumentos en eventos oceánicos extremos (e.g. oleaje de

	tormentas).
()	<p>Generación y aportes de basura.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Depósito de basura en el mar y en la costa. • Incluye basura en general, restos de artes de pesca, resto de materiales de acuicultura, etc.
()	<p>Desarrollos de infraestructura costera.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Reclamación de tierras, remoción de vegetación nativa y construcción de estructuras en la franja costera. • No considerar amenazas asociadas con el incremento de actividades en la costa, escurrimiento de sedimentos y alteración del suelo por componentes químicos (e.g. ácido sulfatado).
()	<p>Centrales eléctricas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Contaminación por metales pesados. • Contaminación térmica.
()	<p>Enfermedades y Patógenos en organismos del ecosistema.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Diversos factores causales, incluyendo especies introducidas.
()	<p>Modificación del hábitat marino por infraestructura costera.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amenazas secundarias incluyen alteración de corrientes y mareas, sedimentación y erosión de la costa.
()	<p>Modificación del hábitat marino por actividades de dragados.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Amenazas secundarias incluyen alteración de corrientes/mareas y resuspensión del sedimento.
()	<p>Vertimientos de aguas residuales.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Eutrofización. • Contaminación por metales pesados y agroquímicos. • Ingreso de patógenos. • No considerar impactos por las jaulas utilizadas en acuicultura.
()	<p>Pesca: trampas.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Riesgo por desecho de materiales de construcción de las trampas.

(Pesca: redes de arrastre.)	• Riesgo de pesca incidental.
(Pesca: piola, palangre, chinchorro.)	• Riesgo por desecho de materiales de construcción. • Riesgo por pesca incidental.
(Pesca: redes de cerco.)	• Riesgo de pesca incidental.
(Pesca: ilegal.)	• Pérdida de biodiversidad marina.
(Especies invasoras.)	• Pérdida de biodiversidad marina. • Cambios en tramas tróficas.
(Eventos recurrentes de proliferación de algas nocivas.)	• Mortalidad de fauna marina. • Cambios en la estructura y función del ecosistema.

¿Hay algunas amenazas que usted quisiera agregar entre las cinco amenazas principales y que no están enlistadas aquí? Si es así, indique su importancia.

Evaluación ecológica

Complete la información para la actividad/influencia que clasificó como de mayor importancia (número 1) en la sección anterior.

1. ¿Con qué frecuencia se presenta la actividad/influencia en el ecosistema?

- () Continua.
- () 1 a 30 días/año.
- () 2 a 3 meses/año.
- () 4 a 6 meses/año.
- () Mayor a 6 meses/año.

2. En escala del 1 al 3 ¿Qué tan seguro (a) está de la respuesta anterior?

(1 = seguro).

() 1.

() 2.

() 3.

3. ¿Cuál es la cobertura de la actividad/influencia en el ecosistema?

() < 25 %.

() 25 a 49 %..

() 50 a 74 %

() 75 a 100 %.

4. En escala del 1 al 3 ¿Qué tan seguro (a) está de la respuesta anterior?

(1 = seguro).

() 1.

() 2.

() 3.

5. ¿Cuál es el cambio potencial en las propiedades físicas del ecosistema causado por la actividad o influencia?

() < 25 %.

() 25 a 49 %.

() 50 a 74 %.

() 75 a 100 %.

6. En escala del 1 al 3 ¿Qué tan seguro (a) está de la respuesta anterior? (1 = seguro)

() 1.

() 2.

() 3.

7. ¿Cuál es el cambio potencial en la composición de las especies del ecosistema causado por la actividad o influencia?

- < 25 %.
- 25 a 49 %.
- 50 a 74 %.
- 75 a 100 %.

8. En escala del 1 al 3 ¿Qué tan seguro (a) está de la respuesta anterior? (1 = seguro)

- 1.
- 2.
- 3.

Recuperación o resiliencia

¿Cuál considera que es el grado de fragmentación o modificación de su ecosistema?

- Sin fragmentación.
- Baja.
- Moderada.
- Alta.
- No lo sé.

¿Si se tomarán medidas correctivas, en cuánto tiempo estima que el ecosistema se recuperaría de efectos adversos por actividades o influencias humanas?

- Menos de 1 mes.
- Menos de 1 año.
- Entre 1 y 5 años.
- Entre 6 y 10 años.
- Más de 10 años.
- No lo sé.

¿Con qué frecuencia su ecosistema se expone a un disturbio natural significativo, tal como oleaje, viento o lluvia en eventos extremos, o días con temperaturas extremas frías o cálidas?

- Una vez al mes.
- Más de dos veces al año.
- Una vez al año.
- Una vez cada dos o más años.
- No lo sé.

Sinergias

Por favor indique la sinergia más probable de los efectos del cambio climático (aumento del nivel del mar, calentamiento global, acidificación del océano y eventos extremos del clima) con alguna actividad/influencia en su ecosistema.

1. Aumento del nivel del mar en sinergia con:

- Vertimientos de aguas residuales.
- Influencia de la acuicultura.
- Influencia de la pesca.
- Influencia de plantas desaladoras.
- Influencia de la navegación y transporte marítimo.
- Influencia de la generación y aportes de basura.
- Influencia de centrales eléctricas.
- Enfermedades y patógenos en los organismos del ecosistema.
- Influencia de infraestructura costera.
- Influencia de infraestructura marina.
- Influencia de las actividades de dragados.
- Especies invasoras.
- Eventos recurrentes de proliferación de algas nocivas.
- No sé.
- Otro:

2. Calentamiento global en sinergia con:

- Vertimientos de aguas residuales.
- Influencia de la acuicultura.
- Influencia de la pesca.
- Influencia de plantas desaladoras.
- Influencia de la navegación y transporte marítimo.
- Influencia de la generación y aportes de basura.
- Influencia de centrales eléctricas.
- Enfermedades y patógenos en los organismos del ecosistema.
- Influencia de infraestructura costera.
- Influencia de infraestructura marina.
- Influencia de las actividades de dragados.
- Especies invasoras.
- Eventos recurrentes de proliferación de algas nocivas.
- No sé.
- Otro:

3. Eventos extremos del clima (sequías/ días con temperaturas extremas / inundaciones) en sinergia con:

- Vertimientos de aguas residuales.
- Influencia de la acuicultura.
- Influencia de la pesca.
- Influencia de plantas desaladoras.
- Influencia de la navegación y transporte marítimo.
- Influencia de la generación y aportes de basura.
- Influencia de centrales eléctricas.
- Enfermedades y patógenos en los organismos del ecosistema.
- Influencia de infraestructura costera.
- Influencia de infraestructura marina.
- Influencia de las actividades de dragados.
- Especies invasoras.

Eventos recurrentes de proliferación de algas nocivas.

No sé.

Otro:

4. Aumento del nivel del mar en sinergia con:

Vertimientos de aguas residuales.

Influencia de la acuicultura.

Influencia de la pesca.

Influencia de plantas desaladoras.

Influencia de la navegación y transporte marítimo.

Influencia de la generación y aportes de basura.

Influencia de centrales eléctricas.

Enfermedades y patógenos en los organismos del ecosistema.

Influencia de infraestructura costera.

Influencia de infraestructura marina.

Influencia de las actividades de dragados.

Especies invasoras.

Eventos recurrentes de proliferación de algas nocivas.

No sé.

Otro:

Anexo B | Amenazas e influencias identificadas en los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme, Sonora, México.

Actividad / Ecosistema	Ambiente bentónico	Islas	Cuerpos de agua costeros	Manglares	Pastos marinos	Ambiente pelágico	Playas - dunas costeras	Ambientes rocosos
Acuicultura de bivalvos: almeja y ostión.	x	x	x	x	x	x	x	x
Acuicultura de camarón.	x	x	x	x	x	x	x	x
Plantas desaladoras.	x	x	x	x	x	x	x	x
Navegación y transporte marítimo.	x	x	x	x	x	x	x	x
Acidificación del océano.	x	x	x	x	x		x	x
Calentamiento global.	x	x	x		x	x	x	x
Incremento en la frecuencia de eventos extremos de lluvia.	x	x	x	x	x	x	x	x
Reducción de lluvias.	x	x	x	x	x	x	x	x
Incremento de días cálidos.	x	x	x	x	x	x	x	x
Incremento del nivel medio	x	x	x	x	x		x	x

del mar.								
Generación y aportes de basura.	x	x	x	x	x	x	x	x
Desarrollos de infraestructura costera.	x	x	x	x	x	x	x	x
Centrales eléctricas.	x	x	x	x	x	x	x	x
Enfermedades y Patógenos en organismos del ecosistema.	x		x	x	x	x	x	x
Modificación del hábitat marino por infraestructura costera.	x	x	x	x	x	x	x	x
Modificación del hábitat marino por actividades de dragado.	x	x	x	x	x	x	x	x
Vertimientos de aguas residuales.	x	x	x	x	x	x	x	x
Pesca: trampas.	x	x	x	x	x	x	x	x
Pesca: redes de arrastre.	x	x	x	x	x	x	x	x

Pesca: piola, palangre, chinchorro.	x	x		x	x	x	x	x
Pesca: redes de cerco.	x	x	x	x	x	x	x	x
Pesca: ilegal.	x	x	x	x	x	x	x	x
Especies invasoras.		x	x	x	x	x	x	x
Eventos recurrentes de proliferación de algas nocivas.	x	x	x	x	x	x	x	x

Anexo C | Interacciones sinérgicas entre los efectos del cambio climático y las actividades e influencias antropogénicas en los ecosistemas costeros de Guaymas y Empalme, Sonora, México.

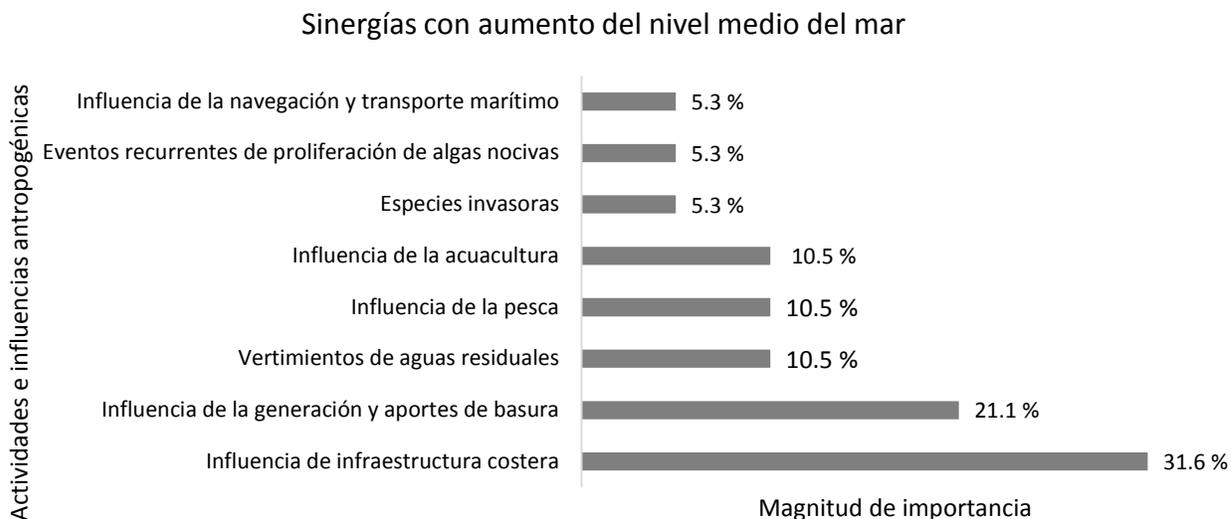


Figura 23. Actividades e influencias antropogénicas que establecen interacciones sinérgicas con aumento del nivel medio del mar.

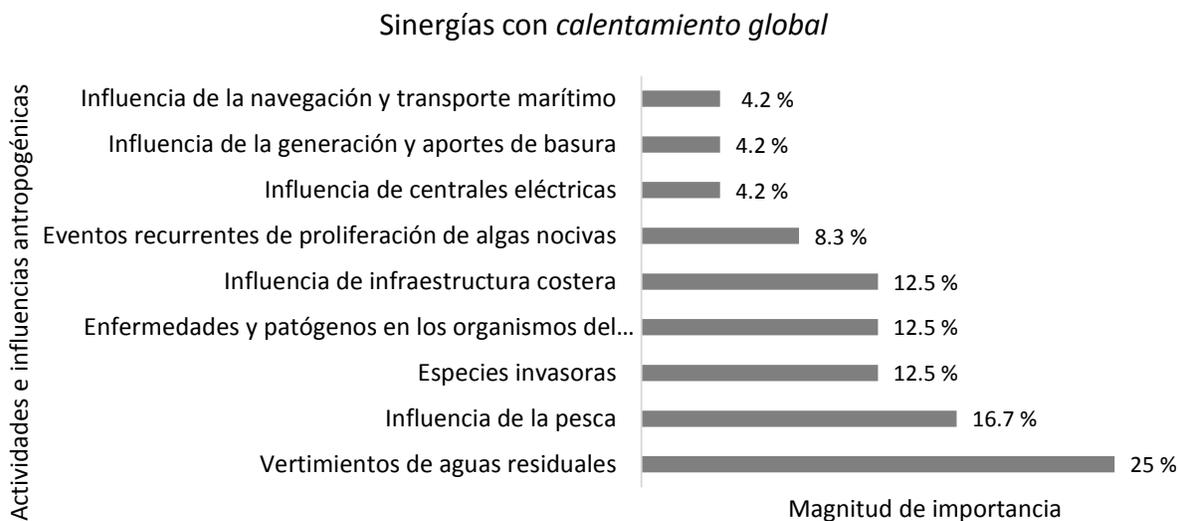


Figura 24. Actividades e influencias antropogénicas que establecen interacciones sinérgicas con calentamiento global.

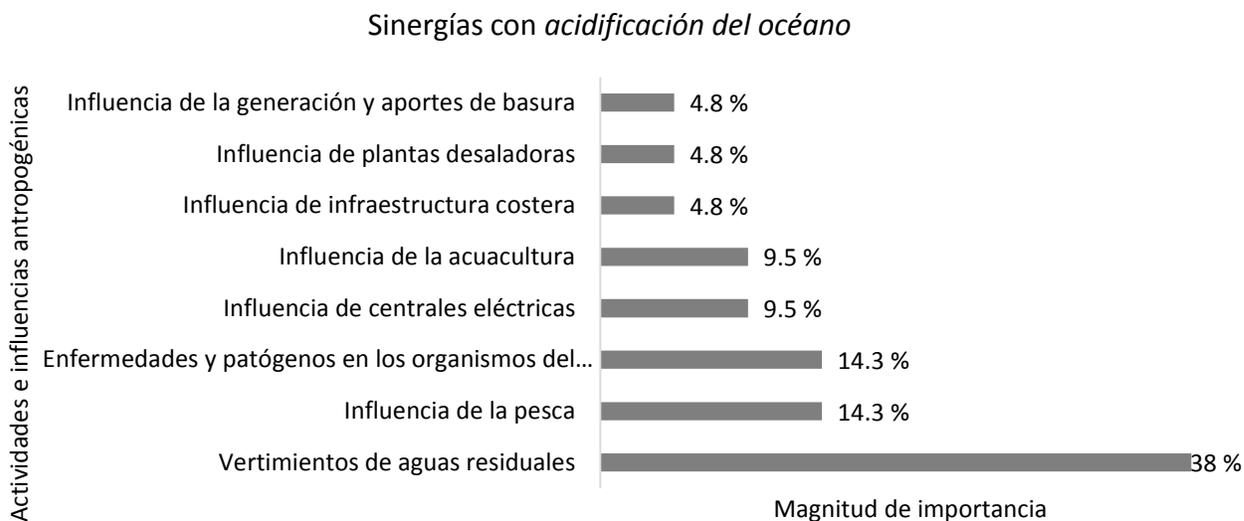


Figura 25. Actividades e influencias antropogénicas que establecen interacciones sinérgicas con acidificación del océano.

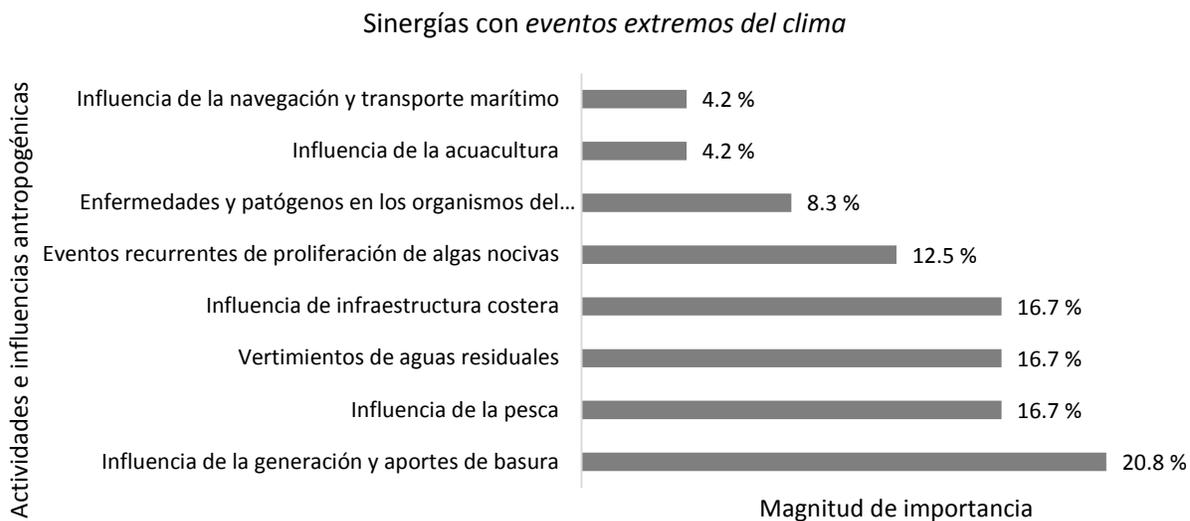


Figura 26. Actividades e influencias antropogénicas que establecen interacciones sinérgicas con eventos extremos del clima.