

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SINALOA
FACULTAD DE INFORMÁTICA CULIACÁN
FACULTAD DE CIENCIAS DE LA TIERRA Y EL
ESPACIO
POSGRADO EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN**



**DISEÑO DE UN MARCO METODOLÓGICO INTEGRAL PARA EL
ANÁLISIS Y EVALUACIÓN DEL RIESGO ANTE IMPACTOS DEL
CAMBIO CLIMÁTICO EN ZONAS COSTERAS MEDIANTE
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA.**

TESIS

**COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE:
DOCTORA EN CIENCIAS DE LA INFORMACIÓN**

PRESENTA:

YEDID GUADALUPE ZAMBRANO MEDINA

DIRECTORES DE TESIS:

**DR. WENSESLAO PLATA ROCHA
DR. CUAUHTÉMOC FRANCO OCHOA**

CULIACÁN ROSALES, SINALOA. 04 DE FEBRERO 2024.



Dirección General de Bibliotecas
Ciudad Universitaria
Av. de las Américas y Blvd. Universitarios
C. P. 80010 Culiacán, Sinaloa, México.
Tel. (667) 713 78 32 y 712 50 57
dgbuas@uas.edu.mx

UAS-Dirección General de Bibliotecas

Repositorio Institucional Buelna

Restricciones de uso

Todo el material contenido en la presente tesis está protegido por la Ley Federal de Derechos de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

Queda prohibido la reproducción parcial o total de esta tesis. El uso de imágenes, tablas, gráficas, texto y demás material que sea objeto de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente correctamente mencionando al o los autores del presente estudio empírico. Cualquier uso distinto, como el lucro, reproducción, edición o modificación sin autorización expresa de quienes gozan de la propiedad intelectual, será perseguido y sancionado por el Instituto Nacional de Derechos de Autor.

Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-No Comercial
Compartir Igual, 4.0 Internacional



*“El mundo al final del siglo será muy diferente al de hoy.
Las condiciones en nuestro planeta dependerán de los pasos que nosotros tomemos
ahora para ralentizar el calentamiento global”*

– William Nordhaus

Dedicatoria

*A Dios, por guiarme con fortaleza a través de las adversidades y mostrarme el camino
a seguir en todo momento.*

*A mi esposo e hijos, que son mi fuente de inspiración constante, por quienes persisto
en dar lo mejor de mí en cada momento.*

*A mis padres, cuyo apoyo constante y enseñanzas me han infundido la determinación
de jamás rendirme.*

Gracias por su inquebrantable presencia a mi lado.

Agradecimientos

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por el financiamiento otorgado para la realización de mis estudios doctorado con numero de No. CVU 711384.

Al posgrado de Ciencias de la Información de la Universidad Autónoma de Sinaloa, por brindarme la oportunidad de prepararme en especial a sus coordinadores Dra. Xiomara Zaldívar Colado y Dr. Rosendo Romero Andrade, así como a los maestros de la Facultad de Ciencias de la Tierra y el Espacio y Facultad de Informática Culiacán.

A mis directores de tesis, el Dr. Wenseslao Plata Rocha y el Dr. Cuauhtémoc Franco Ochoa, por el respaldo incansable que me han brindado. Su constante guía, enseñanzas y confianza depositada en mi trabajo han sido fundamentales para mi crecimiento académico. Sus valiosas opiniones, críticas constructivas, sugerencias y correcciones, así como los enriquecedores debates en los que hemos participado, han contribuido de manera esencial a la evolución y consolidación de las ideas presentadas en esta investigación.

A el Dr. Manuel Edwiges Trejo Soto, cuya valiosa asistencia en el ámbito de los análisis estadísticos ha sido de una magnitud invaluable. De igual manera, extendiendo mi gratitud al Dr. Sergio Alberto Monjardin Armenta por sus minuciosas revisiones y su invariable disposición a orientarme en momentos de incertidumbre, aportando perspicaces ideas. Asimismo, agradezco a la Dra. Xóchilt Guadalupe Torres Carrillo por su sobresaliente empatía y sus aportaciones enriquecedoras a lo largo de mi investigación.

Al Instituto Tecnológico de Mazatlán por otorgarme la oportunidad de llevar a cabo mi estancia académica de investigación en el Departamento de Ingenierías bajo la tutela del Dr. Álvaro Peraza Garzón, al cual agradezco su gran apoyo, ya que fue esencial para la conclusión exitosa de esta investigación.

A mis compañeros del posgrado en Ciencias de la Información, y de manera especial a Evangelina y Lidia, cuyo constante apoyo y aliento han sido invaluable a lo largo de este trayecto. Su presencia y respaldo fueron una fuente constante de motivación que ha enriquecido mi experiencia académica.

Resumen

El cambio climático es un fenómeno complejo, sus causas e impactos están estrictamente relacionadas con los ecosistemas y las actividades humanas. El litoral es uno de los sistemas más afectados, por lo que cualquier variación del medio natural se puede convertir en un riesgo importante. Por lo tanto, es de suma importancia conocer cuál es el riesgo al que están expuestas las costas y en especial las ciudades costeras siendo necesario comprender cuál es la problemática de cada una de ellas. Las costas del mundo están experimentando cambios significativos y el Golfo de California no es una excepción. Aun así, son mínimos los estudios sobre riesgo de los impactos del cambio climático a lo largo de sus costas, por lo que esta investigación pretende contribuir a este nuevo conocimiento. El objetivo principal es proporcionar el diseño de un marco metodológico integral para el análisis y evaluación del riesgo ante impactos del cambio climático en zonas costeras incluyendo erosión costera, fenómenos tropicales extremos y aumento del nivel del mar, además de investigar el crecimiento urbano de una ciudad y su interacción con el riesgo costero empleando tecnologías de la información geográfica. Durante la investigación, se llevó a cabo un análisis de los cambios en la línea de costa del Golfo de California con proyecciones a los años 2030 y 2050 utilizando DSAS. Los hallazgos revelaron que aproximadamente el 72% de la costa del Golfo de California está experimentando una erosión constante, mientras que el 28% está sujeto a acreción. Se identificó un alto riesgo frente a las costas de Mazatlán debido a erosión costera así como a la presencia de ciclones tropicales y aumento del nivel del mar. Específicamente para la ciudad costera de Mazatlán, los resultados de la simulación del modelo CA-Markov revela un crecimiento significativo del área de asentamiento urbano a lo largo del tiempo. Se prevé que esta área aumente de 2,068 hectáreas en el año 2030 a 4,605 hectáreas en el año 2050. Estos hallazgos resaltan la importancia de considerar los impactos del cambio climático y la expansión urbana en la planificación y gestión costera, así como la necesidad de implementar medidas de adaptación y mitigación para reducir el riesgo de las comunidades costeras frente al cambio climático. Además, contribuyen al avance de las ciencias al proporcionar evidencia empírica sobre cómo estos fenómenos están interrelacionados y cómo afectan a las comunidades y al medio ambiente costero, lo que puede guiar el desarrollo de políticas y estrategias más efectivas para abordar estos desafíos.

Abstract

The complex nature of climate change results in its causes, impacts, and risks being related to all ecosystems and various areas of human activity. The coastline is one of the most affected natural environments, so any alteration of the natural environment can become a major risk. Therefore, it becomes crucial to know the risk that coasts, and especially coastal cities are exposed to in the face of climate change, as well as to comprehend the specific problems of each sector. The world's coastlines are undergoing significant changes, and the Gulf of California is no exception. However, no detailed study is available on the risk of climate change impacts along its coastline, so this research aims to contribute to this new knowledge. The objective is to provide the design of a comprehensive methodology for risk assessment of climate change impacts in coastal areas including coastal erosion, extreme tropical events, and sea level rise, besides investigating the urban growth of a city and its interaction with coastal risk using geographic information technologies. During the research, an analysis of changes in the shoreline of the Gulf of California was performed with projections to the years 2030 and 2050 using DSAS. The study showed that approximately 72% of the Gulf of California coastline is eroding, while 28% is growing. A high risk was identified off the coast of Mazatlán because of coastal erosion, and the presence of tropical cyclones and sea level rise. According to the CA-Markov model simulation, there will be significant growth in the urban settlement area of Mazatlán over time, with the area projected to increase from 2,068 hectares in the year 2030 to 4,605 hectares in the year 2050. These results highlight the importance of considering the effects of climate change and urban expansion in coastal planning and management. As well as the need to implement adaptation and mitigation measures to reduce the vulnerability of coastal communities to climate risks. In addition, they contribute to the advancement of science by providing empirical evidence on how these phenomena are interrelated and how they affect communities and the coastal environment, which can guide the development of more effective policies and strategies to address these challenges.

Índice general

Dedicatoria.....	iv
Agradecimientos.....	v
Resumen	vi
Abstract.....	vii
Índice general	viii
Índice de figuras	xi
Índice de Tablas.....	xiii
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN.....	15
1.1. Planteamiento del problema y preguntas de investigación	15
1.2. Justificación	19
1.3. Hipótesis	21
1.4. Objetivos.....	21
1.5. Estructura de la Tesis.....	22
CAPÍTULO II: ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO.....	23
2.1. Cambio climático.....	23
2.1.1. Cambio climático en México.....	27
2.1.2. Cambio climático en el Golfo de California.....	29
2.2. Zona litoral.....	32
2.2.1. Factores que intervienen en el litoral	40
2.2.2. Impactos observados del cambio climático en el litoral.	41
2.3. Sistema Digital de Análisis de la Línea Costera (DSAS)	43
2.4. Desastre natural.....	43
2.4.1. Ciclones Tropicales.....	44
2.4.2. Variabilidad del nivel del mar.....	46
2.5. Crecimiento urbano en zonas costeras	49
2.6. Modelos de simulación y predicción del crecimiento urbano	50
2.6.1. Modelo de simulación: <i>Autómata Celular</i>	54
2.6.2. Modelo de Cadena de Markov	55

2.6.3.	AC - Markov	56
2.6.4.	Impulsores de los cambios de uso de suelo	57
2.7.	Los tres pilares del Riesgo	58
2.7.1.	Enfoques en el ámbito de Evaluación de Riesgo en zonas costeras	61
2.8.	Objetivos de desarrollo sostenible 2030 (ODS 2030).....	67
2.8.1.	Manejo Integrado de la Zona Costera.....	70
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA.....		71
3.1.	Área de Estudio.....	71
3.1.1.	Definición y contexto del área de estudio en el litoral del Golfo de California.	71
3.1.2.	Mazatlán como área de estudio prioritaria.....	72
3.2.	Esquema metodológico.....	74
3.3.	Marco de referencia	76
3.4.	Peligro por erosión costera.....	77
3.4.1.	Preprocesamiento de imágenes satelitales y extracción de la línea de costa	77
3.4.2.	Sistema digital de análisis de la costa.	78
3.5.	Peligro por ciclones tropicales y aumento del nivel del mar	80
3.4.2.1.	Cota de inundación	80
3.4.	Simulación del crecimiento urbano a través de Autómatas Celulares-Markov	86
3.4.1.	Generación de probabilidades de transición y área de transición aplicando el modelo de Cadenas de Márkov.....	86
3.1.1.	Desarrollo de criterios (restricciones y factores) para la obtención del mapa de idoneidad.	87
3.1.2.	Validación del modelo de Autómatas celulares- Markov.....	89
3.2.	Riesgo ante impactos del cambio climático.....	90
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES		91
4.1.	Peligro por erosión costera.....	91
4.1.1.	Tendencias y variabilidad de la línea de costa.....	91
4.1.2.	Análisis del cambio a largo plazo de la costa entre 1981 y 2020.	92
4.1.3.	Tasas de Cambio en las costas del Golfo de California.....	92

4.1.4.	Tasas de cambio en las costas de Sinaloa	95
4.1.5.	Tasas de cambio en las costas de Sonora.....	97
4.1.6.	Tasas de cambio en las costas de Baja California.....	99
4.1.7.	Tasas de cambio en las costas de Baja California Sur	101
4.1.8.	Pronóstico de la línea de costa y validación del modelo	102
4.1.9.	Tendencias y variabilidad del área prioritaria del estudio: Mazatlán.	105
4.2.	Peligro por ciclones tropicales y aumento del nivel del mar	107
4.2.1.	Cota de inundación:	114
4.3.	Simulación del crecimiento urbano a través de Autómatas Celulares- Markov	119
4.3.1.	Probabilidades de transición y área de transición obtenidos del modelo de Cadenas de Márkov.....	121
4.3.2.	Mapa de idoneidad.....	122
4.3.3.	Validación del modelo de simulación AC	125
4.3.4.	Proyección del mapa de uso de suelo a través del modelo Autómatas Celulares- Markov.	126
4.4.	Riesgo ante impactos del cambio climático.	130
CAPÍTULO V. CONCLUSIONES		132
REFERENCIAS		136

Índice de figuras

Figura 1. Emisiones de dióxido de carbono.	24
Figura 2. Nivel medio del Mar.	26
Figura 3. Impactos proyectados del cambio climático en México.	27
Figura 4. Índice de estabilidad climática 2075-2099 RCP 8.5´.	28
Figura 5. Temperatura superficial del mar y Anomalías del Nivel del Mar.	31
Figura 6. Zonas del litoral.	34
Figura 7. Estructura de un Huracán.	45
Figura 8. Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.	68
Figura 9. Área de estudio.	72
Figura 10. Área de estudio prioritaria.	73
Figura 11. Zonas de alta erosión.	74
Figura 12. Esquema metodológico.	75
Figura 13. Marco de riesgo metodológico.	76
Figura 14. Transectos DSAS y línea de base.	79
Figura 15. Cota de inundación.	81
Figura 16. Esquema para la obtención de los mapas de idoneidad.	88
Figura 17. Jerarquías analíticas.	88
Figure 18. Líneas de costa.	91
Figure 19. a) Variación en NSM, y b) Tasas de cambio LRR para Sinaloa.	96
Figura 20. Tasas de cambio WLR y LRR en la costa de Sinaloa.	96
Figure 21. a) Variación en NSM, y b) Tasas de cambio LRR para Sonora.	98
Figura 22. Tasas de cambio WRL y LRR en la costa de sonora.	98
Figure 23. Variación en NSM, y b) Tasas de cambio LRR para Baja California.	100
Figura 24. Tasas de cambio WLR y LRR en la costa de Baja California.	100
Figure 25. Variación en NSM, y b) Tasas de cambio LRR para Baja California Sur.	101
Figura 26. Tasas de cambio WLR y LRR en la costa de baja california sur.	102
Figura 27. Líneas de costa pronosticadas.	103
Figura 28. Tasas de cambio LRR, la línea de costa real y pronosticada al 2020.	104
Figura 29. Puntos críticos de erosión en la costa de Mazatlán.	106

Figura 30. Línea de costa pronosticada para Mazatlán al 2030 y 2050.....	106
Figura 31 .Impactos de ciclones tropicales y frentes fríos en la costa Golfo de California.....	109
Figura 32. Peligro por ciclones tropicales.....	110
Figura 33. Ciclones tropicales que afectaron a Mazatlán en un radio de 100 km durante 1980-2020.....	111
Figura 34. Huracán Willa.....	113
Figura 35. Peligro por aumento del nivel medio del mar en el Golfo de California. ..	115
Figura 36. Aumento del nivel del mar para Mazatlán de acuerdo al IPCC.....	116
Figura 37. Áreas en peligro por aumento del nivel del mar en Mazatlán.....	116
Figura 38. Precipitación obtenidos de ERA5.....	117
Figura 39. Ilustración general de inundación ante la presencia del Huracán Willa. ..	118
Figura 40. Uso de Suelo y Vegetación año 2002.....	119
Figura 41. Uso de Suelo y Vegetación año 2011.....	120
Figura 42. Uso de Suelo y Vegetación año 2020.....	121
Figura 43. Factores considerados para generar los mapas de idoneidad.....	123
Figura 44. Mapa de idoneidad para el crecimiento urbano.....	124
Figura 45. Validación del modelo CA-Markov.....	125
Figura 46. Registro de la validación del modelo.....	126
Figura 47.Crecimiento urbano de la ciudad de Mazatlán.....	128
Figura 48. Escenario de uso de suelo al 2030.....	129
Figura 49. Escenario de uso de suelo al 2050.....	130
Figura 50. Mapa de Riesgo general al año 2050.....	131

Índice de Tablas

Tabla 1. Revisión bibliográfica sobre análisis de la Línea de costa.	35
Tabla 2. Factores que controlan las características de los ambientes costeros.	41
Tabla 3. Escala Saffir – Simpson.....	46
Tabla 4. Modelos de simulación mediante autómatas celulares.....	53
Tabla 5. Variables utilizadas como indicadores y técnicas geoespaciales.	63
Tabla 6. Revisión bibliográfica de vulnerabilidad costera.	66
Tabla 7. Bases de datos utilizadas.	75
Tabla 8. Años de las imágenes históricas de Landsat utilizadas.	77
Tabla 9. Uso de Suelo y Vegetación utilizados.....	86
Tabla 10. Niveles de concordancia del índice Kappa.....	89
Tabla 11. Clasificación de las tasas de cambio	92
Tabla 12. NSM	93
Tabla 13. EPR.....	93
Tabla 14. LRR	94
Tabla 15. WLR	94
Tabla 16. Estadísticas de cambio a largo plazo en la línea de costa regional.	105
Tabla 17. Ciclones tropicales de 1980-2020 en el Golfo de California.	107
Tabla 18. Promedio mensual de 1981-2020 de frentes fríos en México.	109
Tabla 19. Ciclones que han impactado Mazatlán.	112
Tabla 20. Niveles de marea en Mazatlán.....	114
Tabla 21. Run-up para la costa de Mazatlán.....	114
Tabla 22. Cota de inundación, contemplando ciclones tropicales.....	115
Tabla 23. Cota de inundación considerando el incremento del nivel del mar.	117
Tabla 24. Huracán WILLA, del 20 al 24 de octubre de 2018	117
Tabla 25. Distribución del uso de suelo y su variación del 2002 al 2020 en el municipio de Mazatlán.....	120
Tabla 26. Matriz de zonas de Transición para 2002- 2011.....	122
Tabla 27. Matriz de probabilidad de Transición para 2002- 2011.	122
Tabla 28. Valores de Kappa para el uso de suelo previsto para el año 2020.	125

Tabla 29. Cambios en el uso del 2020 al 2050 en el municipio de Mazatlán.	126
Tabla 30. Matriz de zonas de Transición para el año 2030.	127
Tabla 31. Matriz de probabilidades de Transición para el año 2030.....	127
Tabla 32. Matriz de zonas de Transición para el año 2050.	127
Tabla 33. Matriz de probabilidad de Transición para el año 2050	127

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Planteamiento del problema y preguntas de investigación

El cambio climático implica cambios en el clima y las temperaturas del planeta, los cuales impactan en los ecosistemas y son resultado tanto directo como indirecto de la influencia humana. Su preocupante aceleración se debe a la acumulación de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, mayormente causados por actividades humanas. Este fenómeno complejo tiene repercusiones en todos los ecosistemas y afecta diversas áreas de la actividad humana, como los océanos y ecosistemas marinos, los bosques con su rica biodiversidad, la producción de alimentos (agricultura y ganadería), el suministro de agua dulce, y los métodos de producción, distribución y consumo de energía, por mencionar algunos ejemplos. El litoral, uno de nuestros valiosos entornos naturales, ha sido especialmente impactado por los efectos del cambio climático. Es alarmante considerar que cerca de 2.500 millones de personas residen a menos de 100 km de la costa, lo que añade una mayor amenaza a los ecosistemas costeros (CONABIO, 2022). En México aproximadamente una cuarta parte de la población habita cerca de las costas. Sin embargo, el desarrollo acelerado y desordenado de las actividades económicas en zonas costeras urbanas, genera conflictos ambientales afectando la línea de costa así como los ecosistemas naturales y socio-productivos (Pérez et al., 2017).

Los impactos del cambio climático, principalmente los de inundación, erosión, retroceso en zonas costeras, pérdida de hábitats costeros, entre otros, se consideran hoy en día como prioridad para la política de gestión de riesgos de desastres y de adaptación al cambio climático en la costa. El Quinto informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) menciona que el efecto combinado de los peligros asociados a los eventos extremos, así como el incremento de la exposición y el aumento de la vulnerabilidad de los asentamientos humanos y de los ecosistemas costeros son los detonantes de que el nivel de riesgo aumente (R J Nicholls et al., 2007).

Para comprender el verdadero riesgo que enfrentan las ciudades ubicadas en zonas costeras ante los impactos del cambio climático, es fundamental analizar diversos peligros a los que se enfrenta y también a influencia antrópica a lo largo del tiempo. Es necesario abordar las problemáticas específicas de cada sector, lo que incluye evaluar el balance sedimentario actual, identificar las causas potenciales de desequilibrios en esta área y estudiar la tendencia del nivel del mar y su temperatura en el tiempo. Además de eso, es imprescindible considerar otros factores que influyen en la dinámica litoral, como los vientos dominantes, el patrón de oleaje, las corrientes litorales y las mareas. Todos estos elementos pueden verse afectados por el cambio climático y juegan un papel importante en la configuración de las costas. Actualmente es de suma importancia analizar y evaluar cuales son estos riesgos en las ciudades costeras ante el cambio climático, el cual ha demostrado a nivel mundial cambios significativos principalmente en zonas litorales. Algunos estudios indican que de 60% (Durgappa, 2008) o hasta el 70% (Bird, 1985) de las playas de arena de todo el mundo están siendo erosionadas.

Para determinar el riesgo por sector costero a estos cambios, también es relevante tener en cuenta su nivel de desarrollo actual. Las áreas con una infraestructura y planificación más sólidas pueden estar mejor preparadas hacer frente a los desafíos del cambio climático, mientras que las zonas menos desarrolladas pueden enfrentar mayores riesgos y dificultades para adaptarse. Por lo tanto, para evaluar adecuadamente el riesgo real que enfrentan las ciudades costeras frente al cambio climático, se requiere un análisis completo que abarque la historia de la expansión urbana, los factores ambientales que afectan el litoral, como la tendencia del nivel del mar, erosión en la costa e inundación por fenómenos meteorológicos extraordinarios. Solo con un enfoque holístico se podrá tomar decisiones efectivas para abordar los desafíos presentes y futuros.

En México la falta de una visión multisectorial y articulada a largo plazo, centrada en el mar, ha dado lugar a un desarrollo caótico que ha dañado las zonas costeras y saqueado las áreas marinas. Ninguna ciudad costera ha conseguido aprovechar los recursos naturales y los ecosistemas de forma sostenible ni ha sido capaz de incorporar como activo social, económico y cultural la explotación de las zonas costeras y marinas (Sevilla et al., 2018).

Las fuerzas hidrodinámicas como el nivel del mar, las condiciones de las olas, las marejadas y el caudal de los ríos son los principales impulsores del Cambio Climático en las

zonas costeras (Ranasinghe, 2016), y la costa del Golfo de California no es una excepción a esta tendencia siendo la costa de Mazatlán una de las más afectadas. Existen algunos estudios locales de Mazatlán que se centran en la dinámica de la costa como el realizado por (Montaña-law et al., 1988; Montaña-Ley & Gutiérrez-Estrada, 1987a; Montaña-Ley & Peraza-Vizcarra, 1986a; Oyedotun et al., 2018) donde coinciden que el litoral de Mazatlán ha estado en erosión a través del tiempo. Pues los forzamientos naturales están siempre presentes y están haciendo que la gestión costera en esta parte del mundo sea problemática para los gestores costeros debido a que el aumento de la población, por ejemplo, de esta ciudad tropical incrementa la demanda por el uso de la costa para recreación, turismo, comercio, entre otros, haciendo aún más vulnerable ante el cambio climático.

El enfoque o método más práctico en este ámbito de evaluación de los riesgos es el método cualitativo de riesgos múltiples que permite una primera estimación de los riesgos; y métodos semicuantitativos que se basan en suma ponderada o matrices de causa-efecto, proporcionan una evaluación más profunda de las relaciones entre agentes y procesos y la exposición de los elementos en riesgo, por ejemplo (Gallina et al., 2020; Greiving et al., 2006; G. Wang et al., 2014); y finalmente los métodos cuantitativos de múltiples riesgos como enfoques probabilístico, redes bayesianas y modelos basados en agentes, permiten un análisis más robusto de la dinámica de múltiples riesgos, por ejemplo (Jäger et al., 2018; S. Lee et al., 2020; Liu et al., 2015; Plomaritis et al., 2018; Sanuy et al., 2020).

Los conocimientos actuales sobre riesgos en costas demuestran que las metodologías existentes presentan ciertas limitaciones, especialmente en lo que concierne a los requisitos establecidos por los marcos de riesgo más recientes para la planificación y administración de las áreas costeras. Según el IPCC el análisis en conjunto de peligro, exposición y vulnerabilidad permite obtener un resultado holístico, siendo prioritario para la reducción de los riesgos asociados al cambio climático. Esta investigación pretende contribuir al conocimiento actual del análisis y evaluación del riesgo de los impactos del cambio climático en el Golfo de California y en específico Mazatlán, así como analizar su expansión urbana con el uso de Tecnologías de información geográfica (TIG), dado que el uso de estas herramientas representa recursos valiosos y de gran relevancia en la solución de dilemas ambientales y en la organización del desarrollo territorial. Por lo que se centra en el desarrollo de un marco metodológico integral, basado en el Marco de riesgo establecido por el IPCC, (2014) el cual

permitirá conocer el riesgo de los impactos del cambio climático asociados a los huracanes, erosión y el aumento del nivel del mar.

Desde esta perspectiva, las preguntas de investigación surgen como faros orientadores en este camino de comprensión:

- ¿Cuál ha sido la tendencia de la línea de costa y cuáles son los puntos críticos de erosión costera en el Golfo de California, y cuál de ellos podría tener el mayor Riesgo ante los impactos del cambio climático?
- ¿Cuáles son los peligros por ciclones tropicales y aumento del nivel del mar frente a las costas del Golfo de California y en qué medida lo afectará?
- ¿Cómo ha sido la dinámica de los cambios de uso de suelo en el área seleccionada y sus escenarios futuros al 2030 y 2050 mediante CA-Márkov?
- ¿Puede ser tomado el marco de riesgo por AR5 (IPCC, 2014) como referencia para el análisis y evaluación del riesgo de impactos del cambio climático en las zonas costeras de México para obtener una visión holística de los riesgos a los que están expuestas las zonas costeras?

Estas preguntas son relevantes y abarcan distintos aspectos clave que fueron investigados en profundidad para obtener una comprensión integral de la situación. Cada pregunta se enfoca en un aspecto específico y contribuirá a desarrollar la investigación sólida y holística. Al abordar la tendencia de la línea de costa, la dinámica de los cambios de uso de suelo y vegetación, en especial el urbano, así como las variaciones meteorológicas y del nivel del mar como base para el marco de riesgo del IPCC como referencia, la investigación estará explorando diferentes dimensiones de los desafíos relacionados con el cambio climático en las zonas costeras de México. Estas preguntas también proporcionan una base sólida para la formulación de la siguiente hipótesis y de los objetivos de investigación.

1.2. Justificación

México se enfrenta a una realidad preocupante, siendo uno de los países más vulnerables ante los impactos del cambio climático. Estos impactos se manifiestan en diversas regiones de la costa mexicana, siendo especialmente evidentes en las infraestructuras cercanas, así como en los valiosos ecosistemas, como playas y lagunas de manglar, que enfrentan una presión alarmante debido al crecimiento acelerado de nuevos desarrollos costeros.

El cambio climático global está ejerciendo un impacto significativo en la estructura y función de estos ecosistemas, siendo varios los factores clave que los afecta. Entre estos, destacan la temperatura media del agua, el nivel medio del mar, el flujo y disponibilidad de agua dulce en estuarios y humedales costeros, y el aumento en la frecuencia de tormentas y eventos climáticos extremos. Esta variabilidad climática ha generado un fuerte impacto en las actividades humanas, repercutiendo en sectores como la agricultura, el turismo, la producción y consumo de energía, la disponibilidad de recursos hídricos, así como en la salud de la población. Sin embargo, uno de los efectos más preocupantes es la pérdida de hábitats costeros e infraestructuras debido a la erosión e inundación. Estos cambios y desafíos exigen una atención urgente para abordar sus consecuencias y buscar soluciones sostenibles que protejan y preserven estos valiosos ecosistemas y la calidad de vida de las comunidades costeras.

El Golfo de California enfrenta en la actualidad una doble amenaza: por un lado, la creciente tendencia de las actividades humanas y, por otro, los impactos del cambio climático. A pesar de su inmensa importancia y valor biológico, paisajístico y ecológico, así como su relevancia para el desarrollo socioeconómico local a través de actividades como la pesca y el turismo, son escasos los estudios que se han enfocado en analizar y evaluar los riesgos derivados del cambio climático que enfrenta esta región. Por lo tanto, es crucial abordar la variabilidad costera del Golfo de California y, debido a su vasta extensión, identificar una zona prioritaria para llevar a cabo un análisis más detallado de los posibles impactos del cambio climático en la fracción de costa seleccionada. Por lo tanto, resulta fundamental realizar esta investigación para comprender los desafíos que se avecinan y se busquen soluciones adecuadas que protejan su rica biodiversidad y garanticen la sostenibilidad de las actividades humanas que dependen de este ecosistema.

Se seleccionó la zona costera de Mazatlán como área de estudio modelo de acuerdo a los resultados del análisis de la variabilidad de la línea de costa realizado previamente (Franco-Ochoa et al., 2020; Zambrano-Medina et al., 2023), y a sus condiciones geomorfológicas y ubicación geográfica ya que se encuentra en la trayectoria natural de huracanes en las costas occidentales de México, que hace que el agua del mar invada las zonas costeras originando pérdidas al estar sujeto periódicamente a las inundaciones.

Además de lo anterior las proyecciones del nivel del mar del sexto informe de evaluación del IPCC mediante la herramienta de proyección del nivel del mar (SEA LEVEL CHANGE: <https://sealevel.nasa.gov/ipcc-ar6-sea-level-projection-tool>), la NASA advierte que desaparecerán playas en todo el mundo incluyendo las de costas mexicanas ante el inminente aumento del nivel del mar y entre ellas se encuentran las playas de Mazatlán, además de Los Cabos, Acapulco, Manzanillo, Cancún, entre otras.

Mazatlán además de ser una de las ciudades de mayor crecimiento urbano y turístico, es el principal puerto de altura y navegación del noroeste de México con inversiones extranjeras directas, pero la falta de planeación adecuada para el desarrollo urbano y económico incrementa el riesgo ante los impactos del cambio climático como por ejemplo los huracanes, frentes fríos y el aumento del nivel del mar que a su vez ocasionan inundaciones y erosión en las playas. Al existir asentamientos humanos irregulares ubicados en zonas expuestas a ella su riesgo se incrementa y aún más al ser destino turístico y tener un incremento poblacional en determinadas temporadas.

Sin embargo, existe una carencia de estudios sistemáticos y análisis estadísticos sobre la ocurrencia de la mayoría de estos eventos en Mazatlán, lo que hace aún más escasas las simulaciones. Por tanto, es imperativo llevar a cabo la identificación y evaluación de las áreas propensas a la erosión y las inundaciones, con el fin de ubicar y proteger elementos vulnerables. Es necesario realizar investigaciones específicas en el municipio de Mazatlán para recabar información que contribuya a la planificación y toma de decisiones frente a los riesgos actuales y futuros derivados del cambio climático. Adicionalmente este tipo de estudios requiere de escenarios de exposición los cuales se obtienen de la simulación del crecimiento urbano en la ciudad de Mazatlán y así poder mitigar el riesgo y los efectos ante el cambio climático futuro.

Bajo esta perspectiva, los marcos probabilísticos e integrales están emergiendo con fuerza como los paradigmas más adecuados para evaluar de manera ideal el riesgo de los impactos del cambio climático e identificar opciones de adaptación. La gestión de riesgos y adaptación constituye un desafío financiero significativo que la sociedad debe enfrentar en la actualidad. Para abordar la toma de decisiones de manera efectiva, es imprescindible contar con herramientas y metodologías de análisis exhaustivas y confiables, que promuevan el uso equitativo y eficiente de los recursos. Por lo que, para instituir opciones y medidas efectivas, es crucial conocer el riesgo de los impactos del cambio climático en las zonas costeras, en este caso a lo largo del litoral del Golfo de California, ya que permitirá a los tomadores de decisiones considerar todas las posibilidades que podría darse en escenarios futuros.

En este contexto surge la necesidad de comprender de forma holística el riesgo ante el inminente impacto del cambio climático en base al Marco de Riesgo del IPCC (2014) contribuyendo así a la identificación de puntos críticos de riesgo de acuerdo con criterios de vulnerabilidad, peligro y exposición y a ubicar áreas que requieren una acción urgente. Los hallazgos obtenidos constituirán recursos de gran valor para los administradores costeros, permitiéndoles establecer políticas y estrategias de respuesta al cambio climático. Estas acciones se alinean con el enfoque de retroceder-adaptarse-protector propuesto por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático. Además, está claro que un mejor conocimiento del entorno costero permitirá mejorar el manejo integrado de la zona costera, así como su planificación a largo plazo y contribuir con material científico para alcanzar los objetivos de Desarrollo Sostenible 2030.

1.3. Hipótesis

El diseño un marco metodológico integral utilizando tecnologías de la información geográfica para analizar y evaluar el riesgo ante impactos del cambio climático en zonas costeras, permitirá identificar áreas críticas de riesgo donde se requiere adaptación o intervención.

1.4. Objetivos

General

Diseñar un marco metodológico integral utilizando tecnologías de la información geográfica para analizar y evaluar el riesgo ante impactos del cambio climático en zonas costeras.

Particulares

- Determinar la tendencia a largo plazo de la línea de costa mediante el análisis digital de imágenes satelitales Landsat e identificación de hotspots (puntos críticos) de erosión costera a lo largo del Golfo de California.
- Evaluar el peligro por ciclones tropicales y aumento del nivel del mar en el Golfo de California.
- Determinar la dinámica de los cambios de uso suelo para los años 2002-2011-2020 y obtener escenarios para los años 2030 y 2050 mediante el modelo CA-Markov para el municipio de Mazatlán como área prioritaria seleccionada.
- Aplicar el Marco Conceptual de Riesgo del IPCC para elaborar un mapa de riesgo frente a los impactos del cambio climático en la zona costera de Mazatlán, y determinar su impacto de lo Local a lo Global apegados a los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030.

1.5. Estructura de la Tesis

El resto de este documento se encuentra estructurado en cuatro capítulos. En el Capítulo II, se exponen los antecedentes y el marco teórico necesarios para comprender el contexto de la investigación. El Capítulo III detalla la metodología empleada para la ejecución de la propuesta metodológica. Esto abarca desde la selección del área de estudio prioritaria hasta el análisis expansión urbana, además de la evaluación de los peligros asociados a la erosión e inundación causadas por fenómenos meteorológicos y el incremento del nivel del mar. En el Capítulo IV, se presentan los resultados obtenidos en cada una de las etapas delineadas en la metodología, así como las discusiones. Por último, en el Capítulo V, se incluyen las conclusiones que se derivan de los objetivos de la investigación y de la hipótesis planteada. Además, se exploran las posibles direcciones para futuras investigaciones.

CAPITULO II: ANTECEDENTES Y MARCO TEÓRICO

En este capítulo, se exponen los antecedentes y fundamentos teóricos necesarios para el desarrollo de la investigación actual. Se abordan conceptos vinculados a los riesgos derivados del cambio climático, así como a la erosión e inundación en zonas costeras, además de explorar conceptos y modelos de expansión urbana. Se describen las metodologías empleadas para evaluar el nivel de riesgo al que se enfrentan estas áreas, al igual que se detallan las estrategias destinadas a la implementación de un análisis multivariado mediante un enfoque holístico, respaldado por Tecnologías de la Información Geográfica.

2.1. Cambio climático

El cambio climático origina cambios que directa o indirectamente son producidos por la actividad humana. El aumento de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero favorece a la variación de la temperatura y al deterioro de la capa de ozono. El aumento de la concentración del dióxido de carbono (CO₂) el cual registró entre 1970 y 2004 un aumento del 80%, pasando de 21 a 30 Gigatoneladas ha provocado la intensificación de este fenómeno atmosférico, el cual ha aumentado recientemente debido a diversas actividades ejercidas por el hombre, como el uso de energías eléctricas, las industrias de combustibles fósiles, petróleo y carbón (Dawahidi et al., 2019) o la contaminación por transportes, el mal uso de los residuos, entre otros.

Desde la era preindustrial las emisiones de dióxido de carbono que generan los combustibles fósiles y la industria han aumentado desde la era preindustrial (Figura 1), como resultado del crecimiento económico y demográfico. Sus efectos se han detectado en todo el sistema climático, estos cambios biofísicos y procesos naturales han estado presentes en la evolución del planeta, y hoy en día se atribuyen principalmente al cambio climático antropogénico, llamado así por las evidencias que muestran que la temperatura de la atmósfera terrestre ha aumentado recientemente por las actividades humanas. El Grupo

Intergubernamental de Expertos del Cambio Climático concluyen que, el calentamiento en el sistema climático es indiscutible, claramente el humano a influido en este fenómeno, siendo también afectado, además de los sistemas físicos y biológicos IPCC (2014). Prueba de ello es el aumento de la temperatura del aire y del océano, el deshielo de los polos, sequías, fenómenos meteorológicos extremos, erosión, inundaciones y el aumento del nivel global del mar. Siendo este último el indicador climático más importante, que se rige en gran medida por los cambios de temperatura global. Cuando la temperatura media aumenta, el Nivel medio global del mar aumenta (Robert J. Nicholls & Cazenave, 2010).

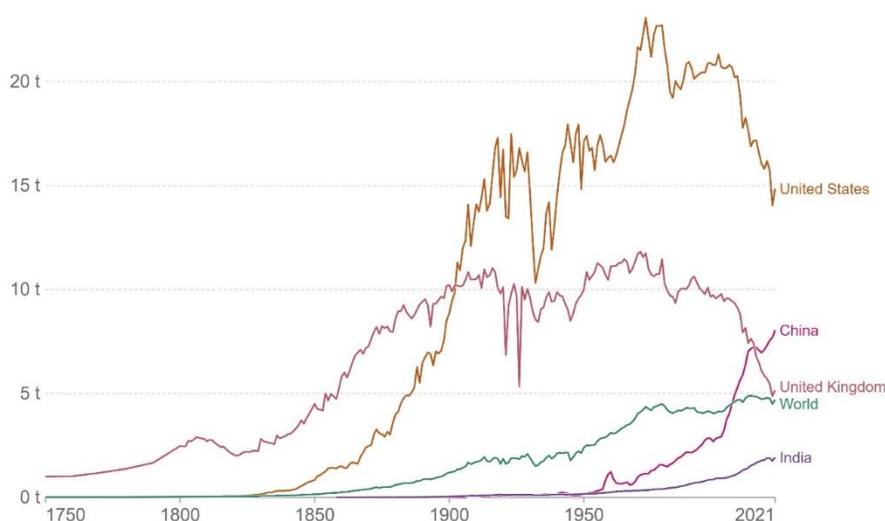


Figura 1. Emisiones de dióxido de carbono. Fuente: (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2023)

La observación sistemática del nivel del mar comenzó después del lanzamiento de TOPEX / Poseidon a fines de 1992. Desde entonces el registro del nivel del mar medido por altimetría satelital ha llevado a mejoras en la comprensión del cambio del nivel del mar en escalas regionales y globales. Actualmente, la media mundial en el nivel del mar está aumentando a tasas de 3,26 mm (Robert J. Nicholls & Cazenave, 2010) y 3.41 mm según datos de AVISO de 1993 a 2020 (Figura 2a), mientras que la energía de las olas aumentan el 0,4% por año (Reguero et al., 2019). Sin embargo el aumento del nivel del mar (SLR) no es homogéneo en todos los océanos, por ejemplo en el océano pacifico es de 2.88 mm/año (Figura 2b), en el Golfo de Guinea en la costa atlántica de Camerún es de alrededor de 3.4 mm/año (Fotsi et al., 2019), de 2.2 mm/año en South Atlantic Bight en Estados Unidos

(Passeri et al., 2014) y sólo 0.8 mm/año en la costa de Keelung en Taiwán (Tseng et al., 2010). Mientras que las proyecciones del IPCC en el 5° informe indican que la subida del nivel del mar se estima entre 0.25 m y 1.0 m en el año 2100.

A nivel mundial el cambio climático está afectando a todos los países, pero la distribución de la intensidad de sus impactos es desigual. En América Latina y el Caribe cada vez son más frecuentes fenómenos como sequías, fuertes lluvias, olas de calor, grandes incendios, inundaciones, erosión, etc. (García Cueto et al., 2010), y algunos autores han realizado trabajos sobre las inundaciones utilizando los SIG (Di Bella et al., 2008; Barnolas y Llasat, 2005).

Song et al., (2006) mediante la utilización de SIG y la lógica difusa hicieron un estudio en el sureste del Tíbet a lo largo de la carretera Sichuan-Tíbet (China) en una parte de la cuenca del río Palongzangbu, cinco factores fueron elegidos como los principales parámetros para evaluar el peligro inundación: topografía, modelo digital de elevación, litología, pendiente y altitud. Orlando et al., (2005) a través los SIG como herramientas de ayuda para la valoración de riesgo, realizaron un estudio sobre la evaluación de riesgo de inundación en el municipio Monopoli, Italia. Para el análisis de riesgo, se utilizó un enfoque jerárquico con dos componentes principales: peligro y vulnerabilidad, donde se detallaron los factores que los conforman. Este método se basó en el Analytic Hierarchy Process (AHP) desarrollado por Saaty a finales de los años 70, el cual asigna pesos a cada elemento de la jerarquía. Los factores considerados para el componente de peligro incluyeron precipitación, pendiente, permeabilidad, vegetación e interferencias humanas, mientras que para la vulnerabilidad se tomaron en cuenta la población y la zona urbana.

Se llevó a cabo una delimitación geológica de las áreas con potencial de peligro y riesgo de inundación en el área de Sagua de Tánamo. Esto se logró mediante el análisis e interpretación de las condiciones y causas principales del entorno físico que favorecen la ocurrencia de este fenómeno. Con el empleo de las técnicas de cartografía digital y SIG se obtuvo el mapa de riesgo por inundación como expresión de la influencia de las condiciones naturales e hidrometeorológicas imperantes (Castañeda y Guardado, 2006). Se llevó a cabo un estudio en la cuenca del río Cauto en Cuba, específicamente en la provincia de Granma, para evaluar la susceptibilidad a inundaciones mediante SIG, se analizaron varios factores, como pendiente, altitud, litología, suelo y uso del suelo. Esto permitió identificar las áreas más

propensas a inundaciones facilitando la gestión del riesgo de inundaciones en la región (Montecelos et, al. 2011).

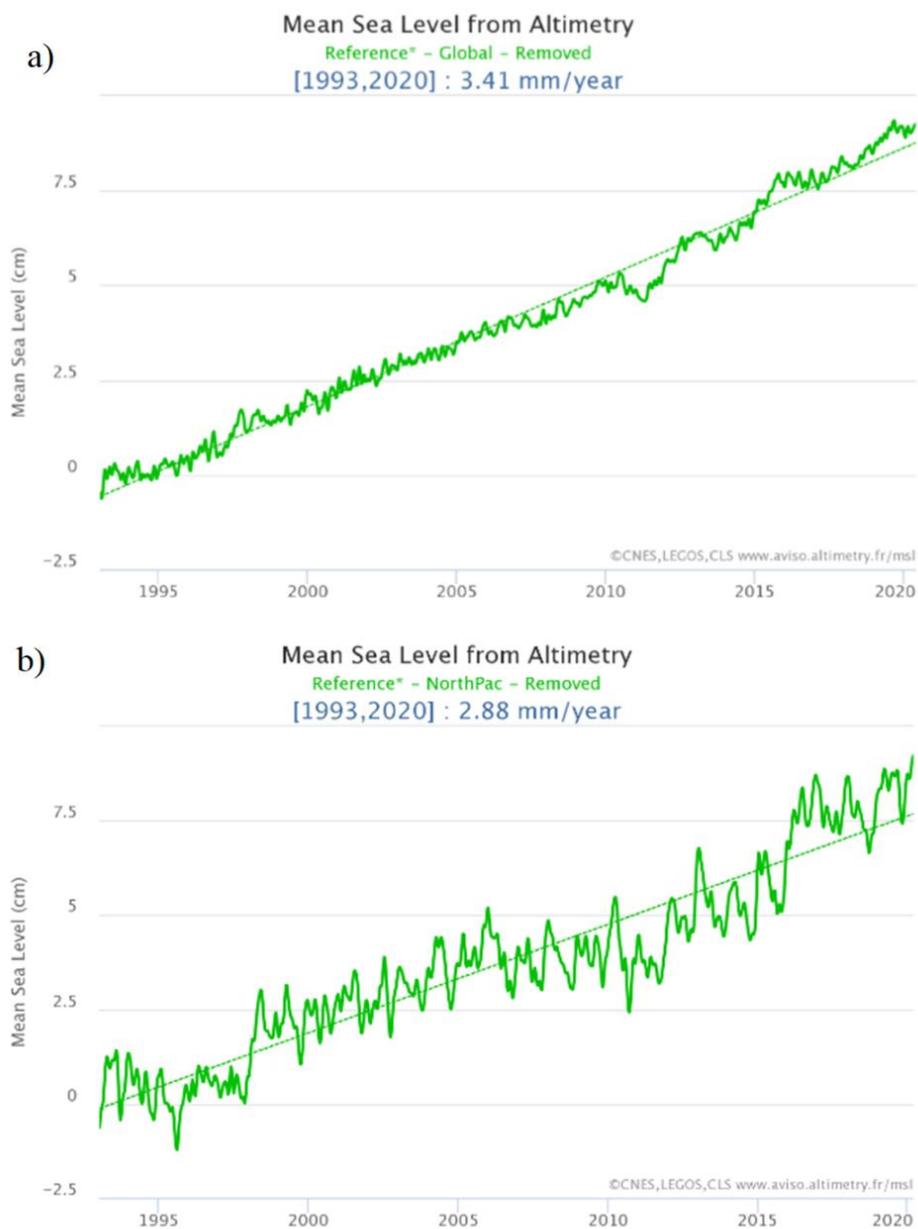


Figura 2. Nivel medio del Mar. a) global y b) Norte del océano pacífico. Fuente: <https://www.aviso.altimetry.f>

2.1.1. Cambio climático en México

México es un país altamente vulnerable ante los impactos del cambio climático (Figura 3), afectando principalmente a los ecosistemas y a la población en general. Estos impactos se distribuirán de una manera heterogénea en el país, debido a los diferentes tipos de clima, la destrucción de los recursos naturales, el desarrollo socioeconómico y la concentración demográfica (González Terrazas et al., 2019).



Figura 3. Impactos proyectados del cambio climático en México. Fuente: (González Terrazas et al., 2019)

De acuerdo con el IPCC, los ciclones tropicales aumentarán la intensidad de los vientos y la precipitación. Las proyecciones realizadas para nuestro país, indican que en la zona del Caribe y Golfo de México, así como en el Pacífico mexicano, la intensidad de los huracanes aumentará por un aumento en la temperatura oceánica y atmosférica, volviéndose más frecuente la aparición de sistemas de categorías 4 y 5, con el consecuente aumento en la velocidad de los vientos, mareas de tormenta (oleaje) y precipitaciones (INE-SEMARNAT, 2006). Estos fenómenos generan inundaciones y que, según el IPCC, son uno de los impactos más representativos del cambio climático. A estos eventos se les asocian los riesgos de muerte, de lesiones, de mala salud y desorganización en los medios de subsistencia, de pérdidas económicas y de daño a la infraestructura IPCC, (2014). El Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático de México considera este impacto en todos los estados (Figura 4).

El clima futuro se prevé que experimentará cambios diversos en velocidad y dirección, lo que generará nuevas condiciones climáticas. Ante esta situación, un enfoque de adaptación en los planes de conservación consiste en identificar áreas menos propensas a cambios climáticos. Estas áreas, denominadas "áreas de estabilidad climática", pueden servir como refugios para especies, permitiéndoles persistir y expandirse. El índice de estabilidad climática de CONABIO se determina mediante la superposición de zonas de vida basadas en condiciones climáticas actuales y futuras. Este índice incorpora cuatro modelos globales de circulación (CNRMC-M5, GFDL-CM3, HADGEM2-ES y MPI-ESM-LR), cada uno con sus respectivos escenarios de forzamiento radiativo (RCP 4.5 y 8.5) para horizontes temporales cercanos (2015-2039), medios (2045-2069) y lejanos (2075-2099). La escala del índice varía de 0 a 1, donde valores cercanos a 1 indican áreas con estabilidad en la misma zona de vida, mientras que valores cercanos a 0 señalan áreas con alta inestabilidad climática. Por ejemplo, en el futuro lejano (2075-2099), el estado de Sinaloa destaca como una región con alta inestabilidad climática en el Golfo de California (Figura 4).

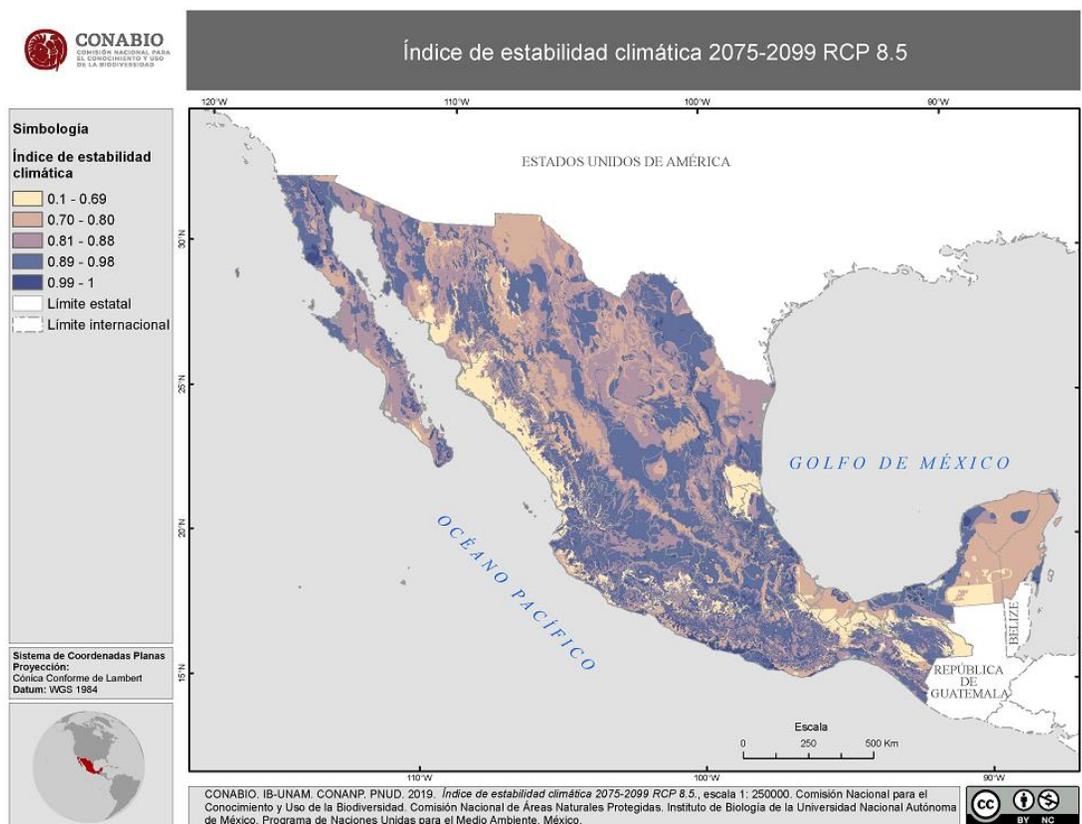


Figura 4. Índice de estabilidad climática 2075-2099 RCP 8.5´.

Fuente: CONABIO (2019)

2.1.2. Cambio climático en el Golfo de California

La costa del Golfo de California es una de las comunidades biológicas marinas más diversas y al igual que otros ecosistemas del mundo, se enfrenta a numerosas amenazas en hábitats, lagunas costeras, estuarios, humedales y playas que resultan principalmente por los impactos del cambio climático. Para conocer si existen cambios en el clima como para afirmar que el cambio climático es real, se requiere establecer las características del cambio climático a nivel regional, en nuestro caso en el Golfo de California, trabajando principalmente en detección de sus impactos en los sistemas naturales y humanos, así como su vulnerabilidad y riesgos a los que se enfrentan. Por este motivo a partir del siguiente párrafo se muestra la revisión bibliográfica de cuáles son las variables que se han analizado en el Golfo de California y como las ha impactado el cambio climático.

De acuerdo a Lluch-Cota et al. (2010) y Soto Mardones (1999), la circulación y temperatura superficial en el Golfo de California es predominantemente estacional, mostrando una circulación superficial ciclónica en verano y anticiclónica en invierno. En cuanto a la circulación del Golfo de California existen estudios como la realizada por Jiménez, Marinone, & Parés-Sierra, (2005), donde además de utilizar la variable de viento idealizado y espacialmente homogéneo, incorporo la variable de climatología real calculada a partir de datos de viento del QuikScat. Encontrando que en promedio el viento en el norte es en dirección al continente y en el resto del Golfo de California es en dirección sureste incrementando su magnitud hacia el ato Golfo y del continente hacia la península. Mientras que el promedio temporal es mucho mayor que los resultados del viento idealizado.

Una de las variables más importantes para analizar (datos históricos y proyecciones) y conocer su tendencia y por ende como es que la impactado el cambio climático, es la temperatura superficial del mar (TMS), la cual es muy importante en los estudios de la dinámica costera. Existen ya análisis de la TMS en el Golfo de California , como por ejemplo el desarrollado por (Ojeda-Ruiz et al., 2020) donde analizó los resultados de las proyecciones climáticas del IPCC de la Temperatura Superficial del Mar (TSM) y datos a partir de sensores remotos (1985-2018) detectando la anomalía más alta en 1997 con un valor de 2.9°C, por arriba del promedio e incrementando las anomalías positivas para finales del siglo. Mientras que los resultados de proyecciones de CC mostraron que, dependiendo los escenarios, la TSM

de Golfo de California podría incrementarse (2081-2100) de 1°C en RCP 2.6, 1.8°C en RCP 4.5 y 3.2°C para el RCP 8.5.

Soto Mardones et al., (1999), en su investigación también sobre la TSM del Golfo de California mediante el uso de imágenes satelitales para el periodo de 1983 - 1996, dividió el Golfo de California en cuatro regiones, encontrando que la TSM disminuye hacia la parte norte del Golfo de California encontrando que la variabilidad se incrementa año tras año, y también percato la aparición y desarrollo de zonas cálidas durante el invierno, las cuales relaciono con los giros anticiclónicos, así como la presencia de zonas frías durante el verano, las cuales atribuyó con giros ciclónicos en esta área geográfica. Mientras que en la región central y sur muestra amplitudes diferentes mayores durante invierno en el lado continental.

La geografía del Golfo de California se define por su naturaleza como un cuerpo de agua profundo, estrecho y alargado en una orientación NW-SE, rodeado por la península árida de Baja California al oeste y por los desiertos de Sonora y Sinaloa al este. Esto resulta en un clima más continental en comparación con la cercana corriente de California (Bernal et al., 2001). Debido a que la boca del Golfo de California se ubica en la convergencia de la corriente Norecuatorial y el Giro del Pacífico Norte, su costa está expuesta a fenómenos como EL Niño-Oscilación del Sur (ENOS) siendo la señal de variabilidad interanual más importante en el Golfo de California, su magnitud y manifestación regional dependen principalmente de la fuerza de los eventos (Salvador E. Lluch-Cota et al., 2010). Las primeras evidencias de un evento ENOS en el Golfo de California se observó en 1957, aunque los dos mayores eventos de ENOS de los últimos tiempos fueron los registrados en 1982-1983 y 1997-1998 (Páez-Osuna et al., 2016).

El Índice de Oscilación Decadal del Pacífico Norte (ODPN), es otro fenómeno importante a considerar en el Golfo de California. Bernal et al., (2001) en su estudio en el Bajo Golfo de California lo considero al igual que ENOS, y determino que ambos patrones de variabilidad climática controlan patrones de variabilidad de la TSM del Bajo Golfo de California, reforzando sus efectos durante los períodos ENOS positivo y ODPN negativo, al tiempo que los mitiga después de la última transición de la ODPN positivo. Observó un aumento en la intensidad de los vientos, especialmente en invierno desde la década de 1950, aunque este efecto se ve mitigado por el calentamiento a largo plazo del Pacífico tropical. Se concluye que las variaciones anuales en el nivel del mar están relacionadas con cambios en la

temperatura y salinidad del agua, influenciados por el Océano Pacífico a través del Golfo de California (Figura 5). Además, se determina que la precipitación está principalmente influenciada por las lluvias de verano asociadas al fenómeno ENOS.

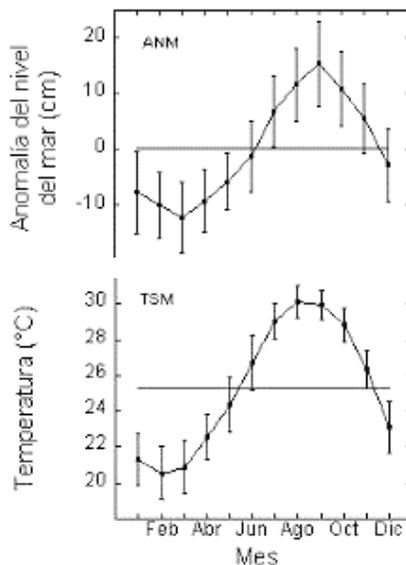


Figura 5. Temperatura superficial del mar y Anomalías del Nivel del Mar.

Fuente: (Bernal et al., 2001).

El reciente aumento del nivel del mar es una de las manifestaciones más importantes del CC, y es causado por varios factores, como el transporte de agua dulce continental a los océanos y la expansión térmica del agua de mar debido al calentamiento del océano. El nivel medio del mar también se ve afectado por factores locales y regionales, como el movimiento vertical de la corteza terrestre, hundimiento costero, extracción de agua subterránea, así como cambios en la circulación oceánica, la presión atmosférica (por ejemplo tormentas) y temperatura del agua (Páez-Osuna et al., 2016). En el Golfo de California, según Páez-Osuna et al., (2016), la tendencia media regional del nivel del mar estimada con datos de altimetría satelital y, con mareógrafos ubicados dentro del Golfo, es de $0,8 \pm 0,8$ mm y $2,5 \pm 1,1$ mm por año, respectivamente. Su estudio mostró que el aumento del nivel del mar (1993 - 2015) tiene un gradiente geográfico, es decir, el Golfo superior tiene una tendencia media más alta ($2,0 \pm 0,4$), mientras que en el Golfo medio es más bajo ($0,1 \pm 0,3$) y en la parte baja del Golfo, la tendencia media muestra una transición de la entrada del Golfo de $0,5 \pm 0,4$.

La influencia de lo antrópico en los cambios en la costa también desempeña un papel importante en su configuración haciéndolas aún más vulnerables ante el inminente cambio climático. En el Golfo de California la construcción de presas, la alta densidad de población cerca o en las playas, así como las principales actividades económicas, como el turismo, la agricultura y la acuicultura en la costa, son importantes modificadores de la dinámica sedimentaria y que, en última instancia, afectan en la variabilidad de la línea costera. De igual manera la construcción de estructuras de protección como muros y escolleras con la finalidad de equilibrar los procesos costeros cuando no son bien diseñados se convierten en otro detonante en los cambios morfológicos y en la erosión producida por la energía de las olas las cuales están aumentando a tasas de 0,4% por año a nivel global a causa del aumento en la temperatura del océano (Reguero et al., 2019); y estos a su vez, modifican los procesos de transporte de sedimentos.

2.2. Zona litoral

La zona costera o litoral constituye una zona con un equilibrio dinámico especialmente crítico y sensible a cualquier alteración (Bardají et al., 2009), es una franja espacial marítimo-terrestre de ancho y constitución variable en la cual ocurre la interacción entre diferentes componentes marino y terrestres, y es uno de los lugares que alberga la mayor diversidad de ambientes y recursos que interactúan entre sí, creando ecosistemas con características ambientales, climáticas, geomorfológicas e hidrológicas únicas en el planeta (Torres-Mota, Salles-Afonso-de-Almeida, & López-González).

Las playas son componentes del borde costero y consisten en acumulaciones de materiales sueltos que están expuestas a la influencia del oleaje, las corrientes marinas, los vientos y las mareas. De esta manera, cualquier modificación en estos procesos conlleva consecuencias significativas para el medio ambiente y la economía local, lo cual puede generar problemas sociales y económicos para las comunidades locales y los diversos sectores productivos de la región si no son abordados a tiempo por las autoridades territoriales correspondientes. En este sentido, existe un objeto geográfico denominado “Línea de costa”, el cual permite caracterizar las variaciones del medio ambiente costero y es crucial en la administración de recursos, la preservación del entorno natural, la promoción de un desarrollo costero sustentable, la organización de los asentamientos humanos y la identificación de áreas

de riesgo, haciéndose indispensable para la gestión adecuada de las zonas costeras (Cifuentes et al, 2017).

La línea costera, definida como la interface entre la tierra y el mar (figura 6), consiste en la zona de contacto entre la superficie emergida y la superficie marina, esta última en constante movimiento horizontal y vertical, causado por fenómenos de diferentes escalas espaciales y temporales por lo que su delimitación se aleja mucho de la exactitud dada la propia naturaleza fractal de la costa ya que es la variable de mayor dinamismo en el litoral, así como su progresividad en cuanto a su delimitación (Fraile-Jurado & Fernández-Díaz, 2018). La modificación de la línea de costa preexistente con la consiguiente pérdida o ganancia de sedimentos. Según Ojeda Zújar, (2000) la erosión costera constituye un tema clásico en geomorfología costera y riesgos naturales, que a su vez puede presentarse en conjunto con riesgos de inundación. Sin embargo, difieren tanto desde la perspectiva metodológica para evaluar el riesgo, como desde las estrategias para su gestión y mitigación.

La erosión costera es el avance del mar sobre la tierra, medido en un periodo suficientemente amplio para eliminar las fluctuaciones del clima, de las tormentas y de los procesos sedimentarios a nivel local (Pat Doody, et al, 2005). Aunque también puede existir otro factor conocido como acreción que es el avance de la línea de costa hacia el mar, producto de la deposición de material en la playa; estos procesos erosión y acreción pueden estar ligados a los factores antropogénicos que se definen como la Situación, forzamiento o proceso originada o derivada de la actividad humana (Silva-Casarín et al., 2014). Mientras que la inundación costera depende esencialmente del oleaje, la marea meteorológica, la marea astronómica, además del ya evidente aumento del nivel medio del mar (A. Toimil et al., 2016).

Dentro del concepto de erosión costera es necesario diferenciar los procesos erosivos a corto plazo los cuales se vinculan a fenómenos extremos temporales que ocasionan una erosión importante en sectores de la costa (retroceso temporal), pero que los sedimentos erosionados vuelven al sistema sedimentario litoral cuando pasa el evento; y, los procesos de erosión costera a largo plazo (retroceso permanente), siendo un fenómeno menos perceptible, pero que debido al balance sedimentario negativo en la franja litoral por procesos naturales en la costa y por fenómenos extremos, es considerable evaluándolo en periodos largos de tiempo.

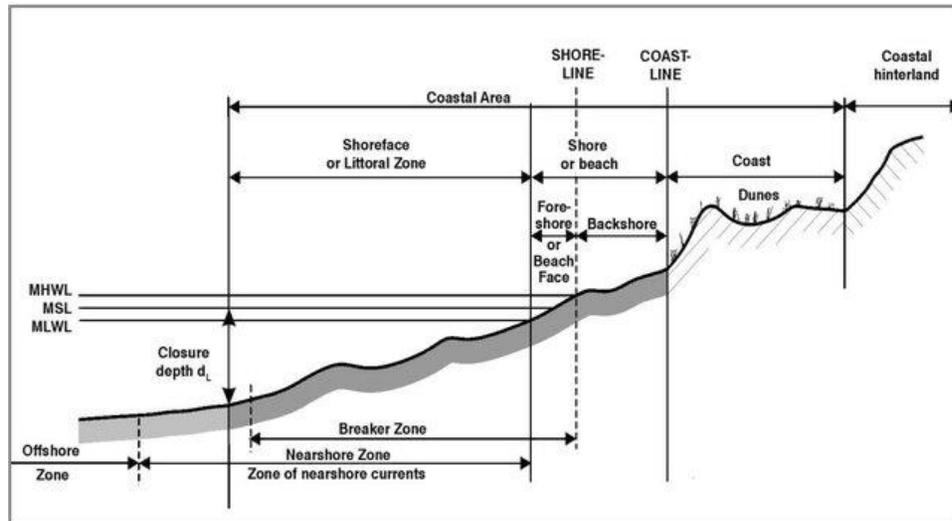


Figura 6. Zonas del litoral

Fuente: (Ibarra, Belmonte Serrato 2017).

La evaluación de la peligrosidad natural en las zonas costeras ha sido tratada como la medición de tasas de erosión, las cuales se expresan en metros de retroceso por año. Esto implica observar la variación espacial en la posición (x, y) de dos líneas costeras para distintas fechas, lo que proporciona una perspectiva geográfica y espacial de los cambios ocurridos. Para ello se necesita de: a) la obtención de datos o fuentes de información que permitan *reconstruir* (localizar con determinada precisión métrica antiguas líneas de costa) la posición de la línea de costa en fechas pasadas y, b) la utilización de técnicas adecuadas para medir geoméricamente los cambios, así como procedimientos analíticos para calcular las tasas de erosión (Ojeda Zújar, 2000).

La digitalización de la línea de costa obliga a un proceso de toma de decisiones que si bien es común para cualquier tipo de objetivo, se torna crítico en este caso (Fraile-Jurado & Fernández-Díaz, 2018), y antes de extraer datos de fuentes es necesario definir la línea de costa a utilizar y, evaluar la precisión geométrica de las fuentes de información ya que, en parte, condicionan las escalas espaciales a las que podamos trabajar.

La mejor forma de adquirir la posición de la línea de costa es mediante el uso de métodos de posicionamiento precisos como los receptores GPS geodésicos, levantamientos topográficos con estación total, técnicas fotogramétricas y video-monitorización, sin embargo, aún que ofrecen ventaja en cuanto a la precisión, tienen la desventaja de ser de alto costo al

aplicarse en grandes tramos del litoral (Cabezas-Rabadán et al., 2019) y además de no tener alta posibilidad retrospectiva (Ojeda Zújar, 2000). Actualmente el uso de imágenes satelitales para la detección de la línea de costa es una alternativa a este inconveniente al cubrir áreas amplias del territorio en una sola escena además de que su tiempo de revisita es corto, sin embargo, debido a su resolución espacial (por ejemplo 30 m para Landsat y 20 m para Sentinel-2, que son actualmente las más utilizadas) no se consideran una fuente suficientemente precisa para obtener la línea de costa. Debido a esto se han desarrollado diferentes metodologías (Tabla 1) para superar las restricciones de la limitada resolución de las imágenes, enfocadas principalmente en la extracción automatizada de la línea de costa como por ejemplo el sistema SHOREX ((Palomar-Vázquez et al., 2018) y CoastSat (Vos et al., 2019) los cuales permiten definir las líneas de costa de forma eficiente.

Tabla 1. Revisión bibliográfica sobre análisis de la Línea de costa.

Autor	Parámetro	Longitud de la costa y Sitio	Fuente	Periodo	Técnicas
(Vos et al., 2019)	Línea de costa	3.6 km Narrabeen-Collaroy, playas del norte de Sydney (Australia)	Línea de costa extraída automáticamente a partir de las imágenes Landsat y Sentinel-2, para el periodo de análisis (502 costas).	1987-2018	Creación y aplicación del Paquete de herramientas (Python) llamado CoastSat
(Palomar-Vázquez et al., 2018)	Línea de costa	34 km Isla de Mallorca (España)	Líneas de costa extraídas automáticamente de Landsat 8 y sentinel-2, para el año 2016 (31 líneas)		Creación de SHOREX (Python) y aplicación
(Cabezas-Rabadán et al., 2019)	Línea de costa Identificar las acciones antrópicas	8 k Golfo de Valencia (España)	Línea de costa extraídas automáticamente a partir de las imágenes Landsat 5, 7 y 8	1984-2014	SHOREX Sistema de Análisis Digital de la Costa (DSAS).
(Jana et al., 2014)	Línea de costa Aumento del nivel del mar	60 km (India)	Imágenes Landsat (Líneas digitalizadas de los años 1972, 1980, 1990, 2000 y 2010) Datos mensuales y anuales del nivel medio del mar del Servicio permanente del nivel medio del mar: Paradip, Haldia y Gangra.	1972-2010	Método de racionamiento de bandas. Sistema de Análisis Digital de la Costa (DSAS). Técnicas estadísticas.

SHOREline EXtraction (SHOREX) es una metodología desarrollada en Python con el objetivo de extraer automáticamente líneas de costa a partir de imágenes de satélite, tanto Landsat como Sentinel-2, con precisión a nivel sub-píxel, siendo un sistema real de tratamiento masivo de imágenes. Se divide en tres fases: descarga, preprocesado y procesado. La base del algoritmo de extracción de SHOREX se centra en determinar un vecindario alrededor del píxel candidato para determinar la posición más probable de la línea de costa dentro de dicho vecindario a nivel sub-píxel siguiendo la metodología expuesta por (Pardo-Pascual et al., 2018) con la que aparecen imprecisiones de los 7.5 m para las líneas costa procedentes de imágenes Landsat 7 (y a priori Landsat 5) y de 6.6 m para Landsat 8 y Sentinel-2.

SHOREX fue aplicado por (Cabezas-Rabadán et al., 2019) en tres playas del Golfo de Valencia en múltiples fechas (1984-2014), las líneas extraídas mediante esta metodología fueron a partir de imágenes Landsat 5, 7 y 8, obteniendo 382 líneas entre las tres playas. Los cambios de posición de la línea de costa fueron analizados empleando el Software Digital Shoreline Analysis System (DSAS) (Thierler et al., 2009) mediante transectos a cada 100 m cuantificado la tasa de cambio mediante la función lineal de Linear Regression Rate (m/año). Obtuvo resultados de utilidad para describir el estado y los cambios en las playas siendo posible detectar y cuantificar cambios en la costa directamente relacionados con la acción de los temporales y antrópicos.

CoastSat es un software de código abierto (Python) que al igual que SHOREX permite obtener de manera automática la línea de costa con la ventaja que CoastSat combina una clasificación de imágenes supervisada y una segmentación de borde de resolución de subpíxeles para mapear la posición de la costa (interfaz arena / agua) con una precisión de ~10 m (Vos et al., 2019). CoastSat ofrece la capacidad de monitorear los cambios de la costa a nivel mundial en escalas de tiempo cortas (estacionales) y largas (decenales) mediante la obtención de la línea de costa a partir de imágenes satelitales Landsat y Sentinel-2 permitiendo obtener series de tiempo de la posición de la costa y cuantificar sus cambios.

Cuando las líneas de costa para varias fechas han sido identificadas, su análisis es el siguiente paso, esto a partir de la medición de los cambios a corto o largo plazo, requiriendo un procedimiento metodológico que permita su comparación y medición geométrica. Hoy en día esto puede realizarse mediante programas informáticos de diseño gráfico (CAD) o SIG, y debido a que las tasas de erosión se expresan en *metros/año*, exige que las medidas sean

puntuales; un método utilizado es dividir la costa en tramos longitudinales con características morfodinámicas parecidas y seleccionar varios puntos retrospectivos para cada uno de ellos, principalmente cuando la diferencia entre fechas es de varios años o décadas (Ojeda Zújar, 2000). Una vez realizadas las mediciones es necesario conocer la tasa de erosión media y una técnica simple es utilizar la primera y última fecha para calcular la tasa de erosión entre los dos únicos puntos de referencia mediante la división de la distancia entre las dos fechas por el número de años. Sin embargo, si el tramo costero evaluado ha sido modificado antrópicamente (p. ej. Presas, puertos, escolleras), es recomendable analizar la línea de costa por periodos.

Otro método más sofisticado es utilizar para cada punto todas las mediciones entre las fechas disponibles mediante un análisis de regresión lineal, por ejemplo Cabezas-Rabadán, Pardo-Pascual, Almonacid-Caballer, Palomar-Vázquez, & Fernández-Sarría, 2019; Jana, Biswas, Maiti, & Bhattacharya, 2014 aplicaron este método ya que utilizan todas las líneas de costa disponible para el estudio, permitiendo obtener la tendencia frente a la aceptación de que el comportamiento de la erosión es homogénea a lo largo de todo el periodo.

Por lo que para el análisis de los cambios en la línea de costa se requieren de datos históricos (posición de ella a través del tiempo), para poder aplicar los métodos antes mencionados. Uno de los sistemas que incorpora estos y otros métodos es el Sistema de análisis digital de la línea costera (Digital Shoreline Analysis System (DSAS)), una extensión de ArcGIS (R. Thieler et al., 2009), el cual es una de los sistemas más empleados para el análisis de la línea de costa (p. ej. Cabezas-Rabadán, Pardo-Pascual, Almonacid-Caballer, Palomar-Vázquez, & Fernández-Sarría, 2019; Jana, Biswas, Maiti, & Bhattacharya, 2014; Lee, Eom, Do, Kim, & Ryu, 2019, entre otros). Este enfoque metodológico obtiene la estadística de la tasa de cambio de la línea de costa en base a el análisis histórico de ella, con estos resultados se pueden identificar puntos críticos de erosión o acreción, así como la evaluación de las causas e identificación de cuál es el factor más determinante en esa área mediante el análisis de sus resultados.

Las evaluaciones de impacto costero, desde un punto de vista metodológico, se pueden llevar a cabo bajo dos enfoques: basado en la observación y análisis de las tendencias históricas (abordado anteriormente), los cuales analizan los patrones espaciales o temporales de los factores involucrados así como los cambios en la costa para examinar si tiene una relación (p. ej. Cabezas-Rabadán et al., 2019; Jana et al., 2014) y basado en el modelación

numérica los cuales comparan observaciones de la costa con el resultados de un modelo de evolución costera intentando evaluar la contribución del aumento del nivel del mar, oleajes, mareas, etc., a la movilidad de la costa (Le Cozannet et al., 2014; Ojeda Zújar, 2000), el modelo más comúnmente utilizado es el basado en el principio de conservación de masa bidimensional simple conocido como la Regla de Bruun (1962). Los resultados de estos últimos son bastante aceptables cuando las escalas espacio-temporales son cortas y especialmente para tramos de formaciones arenosas como playas y dunas; estos modelos exigen gran volumen de información de partida por lo que es necesario disponer de información hidrodinámica como oleaje, marea e incluso batimetría.

Existen modelos de líneas, que predicen la evolución de una o N líneas a largo plazo, considerando las variaciones a corto plazo (temporales) y los modelos de malla requieren de los resultados de los modelos de propagación, corrientes y transporte, para en la malla definida sobre el espacio a modelizar, calcular la variación del fondo en cada punto de la malla para un intervalo de tiempo determinado (Ojeda Zújar, 2000). Durante estos últimos años se han desarrollado diferentes tipos de modelos numéricos para la simulación de la zona rompiente con diferente grado de complejidad según las ecuaciones que resuelven (A. Toimil et al., 2016).

Existen modelos que permiten obtener el peligro asociado a peligros costeros como los modelos hidrodinámicos y morfodinámicos que simulan la propagación del oleaje, flujo, transporte de sedimentos, cambios morfológicos y barreras por ejemplo el modelo Xbeach que resuelve las ecuaciones de balance de acción de la ola, de energía del *roller*, de masa y *momentum* en aguas poco profundas y fórmulas de transporte de sedimentos (Hernández-Valdés & Córdova-López, 2016; Plomaritis et al., 2018); modelos de evolución de la morfología costera como GEOMBEST (Stolper et al., 2005); o modelos de inundación como Rapid Flood Spreading Method–Explicit Diffusion wave with Acceleration term aplicado por Toimil et al., (2016), este último un modelo hidrodinámico bidimensional altamente eficiente que emplea el método de almacenamiento de celdas, y que cuenta con la topografía como subelemento de la malla computacional. Se fundamenta en la aproximación difusiva de las Ecuaciones de Aguas Someras y agrega un término extra que considera la inercia local, lo que resulta en una mayor estabilidad y en tiempos de ejecución más cortos. el cual considera

ciertos factores que intervienen en el ambiente costero como oleaje, mareas, caudal medio, modelo digital del terreno, etc.

Al obtener la tasa de erosión de las costas mediante el análisis de las tendencias históricas de la línea de costa, es posible proyectar estas hacia el futuro, calculando la posición de la costa de acuerdo a los años siguientes que se requieran p. ej. 100 años, esto haciendo retroceder la costa la distancia correspondiente a la tasa calculada multiplicada por el número de años a proyectar (posición de la costa linealmente); cabe mencionar que esto considerando que el comportamiento de la costa será igual en el futuro como en el pasado. Este método tiene a favor su simplicidad y la facilidad de aplicarlo a cualquier punto de la costa y parece reflejar de forma bastante correcta los cambios a escalas espacio-temporales a largo plazo (Ojeda Zújar, 2000).

En la actualidad, disponer de métodos eficaces para el monitoreo de la línea de costa o los procesos que contribuyen a su variabilidad, es fundamental para una buena gestión de entornos costeros, como las playas o dunas, tanto a nivel local como regional, lo cual influye de forma directa en aspectos relevantes sobre la sustentabilidad ambiental y el estudio del cambio climático. Diferentes estudios han demostrado que el análisis de la ubicación de la línea de costa es un indicador clave para los administradores, planificadores y científicos costeros para el monitoreo del litoral (p. ej. Palomar-Vázquez, Almonacid-Caballer, Pardo-Pascual, Cabezas-Rabadán, & Fernández-Sarría, 2018; Pardo-Pascual et al., 2018; Vos, Splinter, Harley, Simmons, & Turner, 2019).

Es importante considerar métodos de análisis históricos así como modelos numéricos, que consideren factores como el aumento del nivel del mar que actualmente amenaza a muchas regiones costeras bajas, por lo que, la línea de costa se considera la más afectada por este fenómeno debido a que no son líneas estáticas, sino que están sujetas a fenómenos erosivos y de acumulación debido a la cantidad de sedimento que les llega y las acciones de los agentes climáticos que actúan sobre ellas incluido el aumento del nivel del mar. Esto nos indica que la costa es un elemento activo que considerar en los efectos que provoca el cambio climático principalmente por el aumento del nivel del mar.

Dicha reacción de la costa depende de fenómenos que caracterizan una zona en particular, su tipología y de las características de su trasdós (Kallepalli et al., 2017; Olivas &

González, 2018). Se espera que el nivel del mar aumente aún más en el futuro, por lo que existe una creciente preocupación por sus posibles impactos futuros en las zonas costeras, una de las principales consecuencias esperadas es el retroceso de la línea de costa debido a la inmersión pasiva (retroceso del litoral causado por un aumento en el nivel del mar que no causa un cambio en la morfología) y erosión costera (variedad de procesos diferentes que causan cambios morfológicos); ambos procesos pueden resultar en un retroceso de la línea de costa (Le Cozannet et al., 2014).

2.2.1. Factores que intervienen en el litoral

Las zonas costeras, debido a la dinámica e interacción entre sus componentes naturales y socio-económicos, constituyen uno de los ambientes más frágiles del hábitat terrestre donde se producen importantes problemas debido a la modificación del sistema sedimentario natural ocasionando una variación en la línea de costa (Merlotto & R. Bértola, 2008). Una tendencia erosiva y/o acumulativa en un sistema costero es el resultado final de las modificaciones geomorfológicas del paisaje, causadas por procesos físicos como la marea, el oleaje, los ciclones, el transporte de sedimento litoral y barreras a este, ya sean naturales o antropogénicos que intervienen en diversos dominios del tiempo pues pueden ocurrir en unas pocas horas o en miles de años (Tabla 2).

La expansión desordenada en las áreas costeras es posiblemente la principal forma en que los seres humanos afectan el medio ambiente. Este proceso comienza con la destrucción o alteración de los terrenos, seguido por la construcción de asentamientos y su posterior desarrollo. Esta modificación geomorfológica actúa de forma negativa y en ocasiones, acentúa el incremento de la erosión en el litoral (Rangel-Buitrago, 2009).

Las acciones del hombre que provocan procesos erosivos son numerosas y cuando las costas sufren sus efectos, los factores naturales incrementan su acción erosiva en diferentes grados según la magnitud de la intervención, dificultando la reconstrucción natural de las playas y ocasionando el retroceso de la línea de costa (Merlotto & R. Bértola, 2008); en algunos casos, su recuperación es irreversible o se requieren cambios drásticos de conducta socioeconómica para preservar el medio natural o bien mitigar las consecuencias de los cambios ya realizados.

Discernir entre los cambios por procesos naturales, las actividades humanas y el cambio climático en la costa a nivel regional o mundial, es muy complicado, porque estos factores están interrelacionados en el tiempo y el espacio (Gómez-Pazo et al., 2019). Sin embargo, los procesos naturales y las actividades humanas en las zonas costeras son los principales factores vinculados a la dinámica moderna (Bera & Maiti, 2019).

Es necesario comprender claramente que son muchos los factores que intervienen en el litoral, y difícilmente un cambio en algún fragmento de la línea de costa puede ser atribuido solo a algunos de ellos. Sin embargo, conociendo la variabilidad de la línea de costa y sus puntos críticos de erosión o acreción es más sencillo identificar cuales acciones naturales o antropogénicas son las que más atribuyen un cambio en la costa.

Tabla 2. Factores que controlan las características de los ambientes costeros.
Adaptada de (Perillo et al., 2019)

Factores Geológicos	Tipo de margen continental, Neotectonismo	Estabilidad costera	Litología costera
	Relieve costero		
Factores Fluviales	Descarga fluvial, carga sedimentaria		
Aguas subterráneas	Aportes subterráneos		
Olas	Olas y corrientes litorales		
Nivel del mar	Nivel del mar medio (eustático) y mareas		
Factores atmosféricos	Climas, Meteorología (vientos, temperatura, humedad, tormenta, etc.)		
Factores biológicos	Influencia biológica (manglares, arrecifes, etc.)		
Factores antrópicos	Urbanización, represamiento de ríos y estructuras costeras		

2.2.2. Impactos observados del cambio climático en el litoral.

El impacto del cambio climático se agrava rápidamente, pues aumenta la frecuencia y la intensidad de los fenómenos meteorológicos extremos, provocando un impacto repentino como inundaciones o terremotos, pero también de impacto lento, como sequias, erosión o el aumento del nivel del mar, ocasionando la degradación de hábitats, así como la extinción y desplazamiento de la población. Las zonas costeras son más susceptibles a los impactos del cambio climático por situarse en la interfaz entre la tierra y el mar (Boak & Turner, 2005), y albergar distintos procesos que las convierten en zonas altamente dinámicas. Según el IPCC, (2014) En las áreas costeras, el cambio climático afecta principalmente el nivel del mar, la

temperatura del océano y la acidificación del agua marina, lo que tiene un impacto directo en el litoral:

- Los efectos derivados del incremento en el nivel del mar se manifestarán en el largo plazo, debido a la demora en la respuesta de este fenómeno a los cambios en la temperatura.
- Durante las últimas tres décadas, se ha registrado un notorio aumento en las temperaturas de la superficie del mar en más del 70% de las costas del mundo, presentando variaciones amplias tanto en el espacio como en el tiempo. Paralelamente, se ha observado un incremento en la frecuencia de eventos extremos de temperatura en las aguas costeras en varias regiones.
- La decoloración de los corales, fenómeno atribuido al incremento en la temperatura, ha provocado un aumento significativo en el blanqueamiento masivo y la mortalidad de los arrecifes de coral en todas las zonas costeras durante las últimas tres décadas, fenómeno principalmente inducido por el calentamiento global.
- El cambio climático ha generado desplazamientos en los límites y rangos de distribución de diversas especies intermareales, así como de los hábitats costeros como los manglares y las praderas submarinas. Esta situación se ha evidenciado en una expansión hacia los polos de los manglares, especialmente en el Golfo de México y Nueva Zelanda, en consonancia con las proyecciones del cambio climático, y en las afectaciones a las praderas submarinas presentes en el Océano Atlántico, el Mar Mediterráneo y las aguas australianas.
- El calentamiento del océano ha incrementado la intensidad de los ciclones tropicales, ya que actúan como un mecanismo natural para enfriar zonas oceánicas excesivamente calientes, considerados como un sistema de seguridad térmica para prevenir el sobrecalentamiento del planeta. Este fenómeno puede explicar la aparente intensificación observada en los últimos años, como una respuesta natural al aumento de la temperatura terrestre. Según diversos modelos, se estima que, a nivel global, los ciclones tropicales serán entre un 2% y un 11% más intensos en promedio. Además, se proyecta un aumento del 20% en la intensidad de las lluvias dentro de un radio de 100 km del centro de un ciclón tropical para el año 2100. Sin embargo, se prevé que la

frecuencia de estos fenómenos disminuya entre un 6% y un 34%. (SEMARNAT, 2012).

- Los cambios en el comportamiento de las tormentas a su vez alterarán las cantidades de energía de las olas que se acercan a la costa desde diferentes direcciones (el "clima de las olas"). Por lo tanto, las olas de tormenta y las marejadas de tormenta asociadas con ciclones tropicales y frentes fríos, pueden inducir una serie de peligros potenciales como procesos de sobreelevación, inundación, así como la variabilidad de la línea costera (erosión o acreción en playas o dunas principalmente) en muchas áreas que afectaría a las comunidades costeras y la infraestructura (Slott et al., 2006). Se ha demostrado que el retroceso costero será más pronunciado cuando la altura de la ola significativa exceda en la playa y cuando el tamaño de grano que compone la playa sea menor. Otro efecto significativo presente en las costas es el posible cambio en el transporte longitudinal de sedimentos a lo largo de la costa sometidas a un transporte litoral muy activo. (Olivas & González, 2018).

2.3. Sistema Digital de Análisis de la Línea Costera (DSAS)

Digital Shoreline Analysis System (DSAS) versión 5.1, desarrollado por el USGS ha sido un componente central del proyecto Coastal Change Hazards. El software se desarrolló originalmente a principios de la década de 1990 y ha experimentado cambios continuos para su mejora principalmente en sus estadísticos y la interfaz del usuario. Este algoritmo permite obtener estadísticas de cambio a partir de múltiples líneas de costas históricas (Himmelstoss, E.A. Henderson et al., 2018; Himmelstoss et al., 2021; R. Thieler et al., 2009), además de un pronóstico de su posición futura mediante la aplicación de un modelo beta con horizontes costeros de 10 y 20 años (Himmelstoss et al., 2021). Genera resultados de buen rendimiento basados en características de entrada como la fecha y el archivo de forma de la línea de costa y se considera que es uno de los más eficientes y efectivos, pues proporciona un mayor rendimiento en el análisis de cambio de línea de costa en lugar de muchas herramientas y métodos tradicionales (Baig et al., 2020).

2.4. Desastre natural

La Estrategia Internacional para la Reducción del Riesgo de Desastres (INISDR, sigla en inglés) define el término desastre como “sucesos que causan considerables pérdidas humanas, materiales, económicas o ambientales, alterando el funcionamiento de la comunidad

humana afectada y excediendo su capacidad para hacer frente a la situación utilizando sus propios recursos”. Un desastre natural puede definirse como un evento o suceso que ocurre, en la mayoría de los casos, en forma repentina e inesperada, causando sobre los elementos sometidos alteraciones intensas, representadas en la pérdida de vida y salud de la población, la destrucción o pérdida de los bienes de una colectividad y/o daños severos sobre el medio ambiente y superando su capacidad para hacer frente a la situación (Maskrey, 1993).

Los desastres pueden ser de origen natural y antropogénico. Los primeros son considerados como perturbaciones naturales en la dinámica de los ecosistemas y juegan un papel importante en la evolución de la diversidad biológica; mientras que los desastres de origen antropogénico son provocados por las actividades humanas debido a la gestión inadecuada de los recursos naturales (Manson & Jardel, 2009). La problemática actual de los desastres naturales con incidencia urbana proviene de una inadecuada intervención del hombre en la naturaleza (Vidal et al., 2001). Ahora bien (Maskrey, 1993) menciona que un fenómeno natural es toda manifestación de la naturaleza debido a su funcionamiento interno y definen desastre natural como la correlación que existe entre los fenómenos naturales peligrosos considerando las condiciones socioeconómicas y físicas vulnerables.

2.4.1. Ciclones Tropicales

De acuerdo con (Rosengaus, 2002), los ciclones tropicales inician su desarrollo como pequeñas perturbaciones atmosféricas en las zonas del planeta y épocas del año que cumplen con las condiciones necesarias para su formación e intensificación. El fenómeno opera como un remolino de aire que circula alrededor de un centro de baja presión. En el centro del remolino se forma un área conocida como "ojo", que es una región de aparente calma con diámetros que pueden variar desde 10 km hasta más de 100 km. La intensidad del ciclón es mayor cuando el diámetro del ojo es más pequeño. Después del ojo se encuentra la pared del ciclón, la cual es la característica más impresionante, conformada por una pared vertical de 10 a 12 km de altura y de 10 km de espesor, aproximadamente (figura 7). En este sector se presentan las condiciones más peligrosas del fenómeno: los vientos más fuertes, las lluvias más intensas y el oleaje y la marea de tormenta más destructivos.

Una característica destacada de los ciclones tropicales es la variación significativa de las condiciones desde el centro hacia afuera. La presión y la velocidad de rotación están estrechamente relacionadas, de modo que un cambio en una de ellas afecta a la otra. Por lo

tanto, tanto la presión mínima como la velocidad máxima de rotación se consideran indicadores de la intensidad del ciclón.

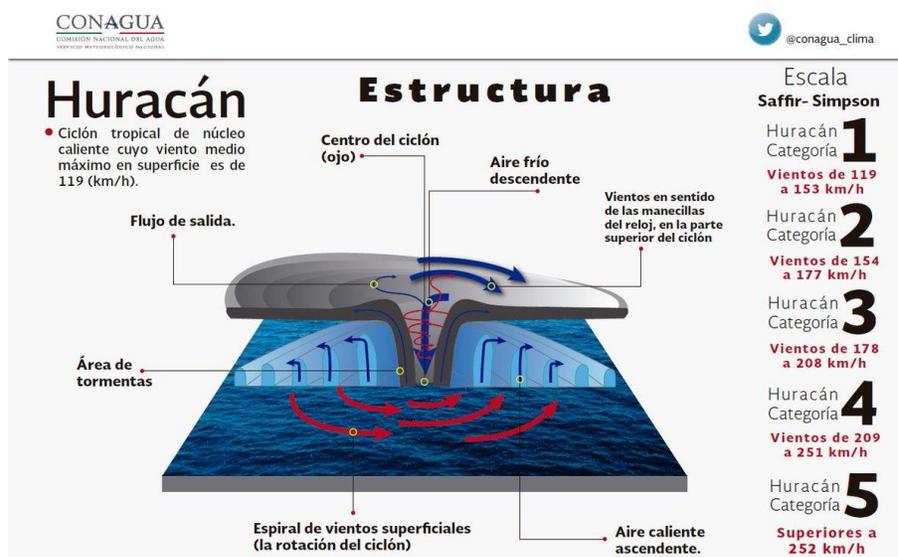


Figura 7. Estructura de un Huracán.
 Fuente: CONAGUA.

Hay dos escalas utilizadas para categorizar la intensidad de los ciclones tropicales, que se fundamentan en la velocidad del viento que generan. Una de ellas es la Escala Beaufort, aunque en la actualidad está en desuso. Esta escala era una medida empírica de la intensidad del viento, principalmente basada en las condiciones del mar y la fuerza del viento, con un enfoque naval. La Escala Saffir – Simpson es la que se utiliza actualmente y está basada en la intensidad del viento asociado a depresiones y tormentas ciclónicas y cinco niveles de huracanes (Tabla 3).

Estos fenómenos climáticos procesos de origen meteorológicos son uno de los factores más importantes que generan erosión o acreción a corto plazo en las costas. Estos ciclones pueden producir inundaciones en localidades costeras por medio de un fenómeno conocido como marea meteorológica que es definida como la, respuesta del nivel del mar a las tensiones tangenciales inducidas por el viento y campos de presiones. Este riesgo puede generar inundaciones en la costa que en algunos casos la subida de la marea puede alcanzar de 2 a 3 metros sobre el nivel del mar (CENECAM, 2002).

Aunado al efecto producido por los ciclones se puede considerar un panorama donde se presente en conjunto una marea astronómica que es un movimiento periódico y alternativo

de ascenso y descenso del nivel de las aguas de los mares y océanos, resultado de la atracción, por gravedad de La luna y del Sol. Este ciclo se repite cada 12 horas y 25 minutos, llevándose a cabo un desplazamiento horizontal de los límites del agua: el máximo o ascenso se denomina pleamar o marea alta, y el mínimo bajamar o marea baja (CENAPRED, 2006).

Tabla 3. Escala Saffir – Simpson

Categoría	Presión central (mb)	Velocidad del Viento (km/h)	Efectos en las costas
Perturbación tropical	1008.1 a 1010	---	---
Depresión tropical	1004.1 a 1008	< 62	Suspensión de actividades recreativas
Tormenta tropical	985.1 a 1004	62.1 a 118	Suspensión de actividades de pesca menor y en pequeños puertos
Huracán categoría 1	980.1 a 985	118.1 a 154	Suspensión de actividades de pesca mayor y operación portuaria en general
Huracán categoría 2	965.1 a 980	154.1 a 178	Daños en puertos y embarcaciones pequeñas
Huracán categoría 3	945.1 a 965	178.1 a 210	Daños en embarcaciones medianas y destrucción de las pequeñas.
Huracán categoría 4	920.1 a 945	210.1 a 250	Daños a rompeolas, muelles, embarcaciones mayores, erosión de playa
Huracán categoría 5	< 920	> 250	Colapso de estructuras de protección, daños severos a embarcaciones mayores y muelles

Al considerar la marea de tormenta, astronómica y Run-up que se define a la cota de inundación como el conjunto de máximos discretos de elevación del agua, medidos en la costa con respecto al nivel del agua en calma (el que se producirá en ausencia de olas) (Hilary F. Stockdon et al., 2006). Estos tres elementos conforman a la cota de inundación que se representa como la interacción de variables oceanográficas como: la marea astronómica, la marea meteorológica, el set-up y el run-up del oleaje. Para determinar dichas variables, se puede utilizar información de oleaje y de los niveles del mar de la RENEOM del IMT (Montoya et al., 2022).

2.4.2. Variabilidad del nivel del mar

Según el Sistema Mundial de Observación del Nivel del Mar (PSMSL por sus siglas en inglés), el nivel medio del mar (NMM) se define como el nivel de aguas tranquilas del mar promediado durante un periodo determinado de tiempo, en donde los efectos provocados por la marea y por otras causas frecuentes como las olas, quedan compensados (Pons, 2009).

El reciente aumento del nivel del mar es una de las manifestaciones más importantes del cambio climático, y es causado por varios factores, como el transporte de agua dulce continental a los océanos y la expansión térmica del agua de mar debido al calentamiento del océano. El nivel medio del mar también se ve afectado por factores locales y regionales, como el movimiento vertical de la corteza terrestre, hundimiento costero, extracción de agua subterránea, así como cambios en la circulación oceánica, la presión atmosférica (por ejemplo tormentas) y temperatura del agua (Páez-Osuna et al., 2016). Los cambios en el nivel del mar global han influido en las condiciones costeras a lo largo del tiempo geológico. Estos cambios o variaciones del nivel del mar respecto a la tierra se conocen como eustáticos. Algunos de los impactos típicos en respuesta al aumento del nivel del mar son erosión costera, aumento de riesgo a inundaciones e impactos en infraestructuras.

Según (Fairbridge, 1961), son cuatro las hipótesis teóricas: hipótesis de la flexión continental, hipótesis de la margen oscilante, hipótesis geodésica, hipótesis eustática, no excluyentes, que intentan explicar los factores que producen una variación relativa entre el mar y la tierra que hacen que la orilla de costa se desplace. Donde la hipótesis eustática es la más aplicada, aunque lo mejor sería considerar las otras hipótesis a la hora de hacer una evaluación, además de tener en cuenta los ciclos meteorológicos.

La línea costera es especialmente vulnerable al aumento del nivel del mar, ya que no es estática y está sujeta a procesos de erosión y acumulación. Estos procesos están influenciados por la cantidad de sedimentos que llegan a la costa y por las acciones de los agentes climáticos. Por lo tanto, la costa es un elemento dinámico que debe ser tenido en cuenta al evaluar los impactos del cambio climático, especialmente debido al incremento del nivel del mar. Dicha reacción de la costa depende de fenómenos que caracterizan una zona en particular, su tipología y de las características de su trasdós (Kallepalli et al., 2017; Olivas & González, 2018). Este aumento del nivel de mar acelerado a su vez resultará en un retroceso de la costa mucho más rápido con impactos severos en áreas bajas. Sin embargo, las tasas regionales precisas dependen de factores como la energía eólica local, la temperatura del agua de mar y la elevación/hundimiento tectónico, entre otros (Robert J. Nicholls & Cazenave, 2010; Reguero et al., 2019). Existen modelos de respuesta sencillos que nos aproximan a conocer cómo va a responder la costa ante el aumento del nivel del mar, el método más

comúnmente utilizado es el principio de conservación de masa bidimensional simple conocido como la Regla de Bruun (1962).

2.2.2.1. Medida del nivel medio del mar

La evolución del nivel del mar es una variable fundamental que explica numerosos procesos físicos de la tierra, y se define como el nivel de las aguas tranquilas del mar promediado durante un periodo determinado de tiempo (meses, años), de tal forma que los efectos provocados periódicamente por mareas y por otras causas frecuentes como las olas quedan compensados, esta definición es la utilizada por los usuarios de mareógrafos (Dawahidi et al., 2019). Históricamente, el mareógrafo ha sido el instrumento importante para medir el nivel del mar. La técnica de medición varía dependiendo del tipo de mareógrafo empleado. Todos ellos registran el nivel del mar de manera instantánea en un lugar específico de la línea costera, proporcionando lecturas continuas limitadas a ese punto particular y no capturando cambios en el nivel del mar en toda su extensión.

La medida del nivel medio del mar se ha utilizado de forma habitual para definir el origen del cero altimétrico de las redes de nivelación nacionales (Pons, 2009). En la actualidad, esta medida adquiere especial importancia por ser una herramienta para la evaluación y el seguimiento del cambio climático.

Actualmente, la medición del nivel del mar puede realizarse utilizando mareógrafos ubicados en puntos específicos o mediante satélites altimétricos. En el caso de la altimetría por satélite, el nivel medio del mar se calcula como un solo valor referido a un momento específico. Este valor se obtiene promediando las alturas de la superficie del mar sobre el elipsoide, corrigiendo los efectos físicos (mareas, efecto barométrico inverso, etc.) e instrumentales (retardos de la señal del satélite debido a la atmósfera, error orbital radial, etc.). La superficie del mar se divide en áreas de igual tamaño, cada una de las cuales tiene un valor medido y corregido de la altura de la superficie del mar. La relación entre el nivel medio del mar obtenido con mareógrafos y el nivel medio del mar obtenido por altimetría por satélite, es hoy en día un importante tema de investigación (Pons, 2009).

2.5. Crecimiento urbano en zonas costeras

El fenómeno de la expansión y crecimiento urbano en las áreas litorales tiene una especial importancia en cuanto a la ocupación del territorio se refiere y el riesgo al que se enfrenta al cambio climático. Por ello, la ocupación del suelo y el cambio de usos por la continua urbanización del litoral constituye un tema crucial en el ámbito de evaluación de riesgos ante el cambio climático, pues la zona urbana sin duda es el principal motor de las alteraciones de uso del suelo que terminan por desencadenar desastres y a su vez es la más afectada.

El desarrollo urbano desordenado, una característica común en las ciudades de México y en numerosas partes del mundo, resulta en una expansión hacia zonas inadecuadas para la ocupación humana, donde las intervenciones antrópicas tales como, invasión de áreas naturales y construcciones sin infraestructuras adecuadas para el área, aumentan el riesgo en cuanto a la estabilidad de esos terrenos frente a eventos extremos. También existe el impacto relacionado con la mala planeación de la red de drenajes al igual que con la generación de residuos, característico de los núcleos urbanos infiriendo en la dinámica de los cursos de agua, afectando la capacidad de los cauces, teniendo entonces consecuencia en el ámbito de las inundaciones, un claro ejemplo es la ciudad en estudio.

En los últimos años, la disponibilidad de alta resolución temporal de datos satelitales y los diferentes tipos de herramientas de modelado basadas en SIG, ha ayudado en el manejo de datos espaciales y análisis, aplicando modelos de simulación y predicción del crecimiento urbano más realistas (Aarthi & Gnanappazham, 2018), dado que asentamientos humanos que se encuentran en urbanizaciones no planificadas, propician serias amenazas para el medio ambiente y para la misma población.

El monitoreo y la evaluación del cambio de uso y la cobertura del suelo se han utilizado ampliamente en la investigación ambiental relacionada con la biodiversidad y la conservación de los ecosistemas, la erosión de la tierra y la desertificación, pero también para los estudios sobre el cambio climático, ya que se ha informado que los cambios en el uso de la tierra representan una parte significativa de las emisiones globales de carbono (Gemtzi, 2021). El estudio de estos cambios históricos es fundamental para comprender el impacto negativo que tiene la expansión urbana en el medio ambiente y en las actividades humanas,

especialmente en lo que respecta a la transformación del territorio, que conlleva a la fragmentación y contaminación del paisaje. Estos efectos provocan daños irreversibles al medio ambiente y aumentan la vulnerabilidad de la población ante los efectos del cambio climático

La identificación y detección de estos cambios de uso de suelo los cuales son un tipo de ocupación, ya sea, vegetación natural, cultivos agrícolas o espacios urbanos (Chuvieco, 2008), juegan un papel importante en la gestión urbana y el desarrollo sostenible (Yao et al., 2016). Por último cabe mencionar que el uso de la tierra y cobertura de la tierra, aunque ambos describen la condición de la superficie terrestre y tienen un carácter temporal dinámico, tienen una perspectiva diferente, ya que los usos de la tierra reflejan las actividades humanas, mientras que la cubierta terrestre describe la condición biofísica (Assaf et al., 2021).

2.6. Modelos de simulación y predicción del crecimiento urbano

Los modelos de simulación y predicción incluyen técnicas cuantitativas y espacio-temporales que se implementan para monitorear el crecimiento urbano. Algunas modelizaciones más utilizadas son: la basada en Autómatas Celulares (AC), Redes Neuronales Artificiales (RNA), la basada en Fractales, Regresión Lineal o Logística (RL), la basada en Agentes y Árboles de Decisión (Linares & Picone, 2018). Los resultados derivados de estas técnicas se utilizan para crear políticas futuras que tengan en cuenta el desarrollo sostenible y las demandas de las generaciones futuras.

Diversos estudios han aplicado estos y otros modelos, los modelos Autómatas celulares son unos de los más utilizados y funcionan de forma que, a partir de un conjunto de celdas, con un estado determinado, unas reglas de transición y en función de su comportamiento respecto a la vecindad inmediata, cada unidad se comporta dinámicamente cambiando su estado inicial y conformando patrones espaciales (Cantergiani & Delgado, 2016). Además los Autómata celular presentan múltiples componentes o unidades en interacción, lo que los asemeja a las ciudades como sistemas complejos, son dinámicos y registran fuertes conexiones de vecindad espacial y presentan auto-similitud, siendo esta la presencia de estructuras espaciotemporales que siguen patrones que surgen de lo que aparentemente es un caos (Jiménez López et al., 2018). Recientemente también las Redes Neuronales se han integrado a los SIG y modelos de AC para predecir los usos de suelo urbano (Aarthi & Gnanappazham,

2018), como los aplicados en el año 2018 para Sriperumbudur Taluk, Chennai en el estado de Tamil Nadu en India por (Aarthi & Gnanappazham, 2018), donde comparo las actuaciones de tres modelos de AC, el modelo Autómata Celular Tradicional, el modelo de Autómatas Celulares basado en Agentes y modelo de Autómatas Celulares basado en Agentes Acoplados a la Red Neuronal.

Los Modelos Basados en Agentes (MBA) están ganando popularidad en la simulación de sistemas espaciales complejos. Estos modelos se basan en una representación celular que tiene en cuenta el comportamiento de los diferentes agentes del sistema para llevar a cabo la simulación. Sus principales componentes son los propios agentes, el entorno y las relaciones que existen entre ellos, plasmadas en el modelo a través de reglas de decisión (Cantergiani et al., 2014). Aunque tanto los Autómatas Celulares (AC) como los Modelos Basados en Agentes (MBA) comparten una estructura similar basada en células y operan con reglas de decisión, los MBA están comenzando a ocupar un espacio que los AC no cubren, al incorporar agentes específicos en su configuración. A través de estos, los MBA incorporan un aspecto comportamental, ya que éstos deben representar los principales elementos involucrados en el fenómeno estudiado y, a su vez, son los actores de promover los cambios que se pretenden simular (Cantergiani & Delgado, 2016).

El acoplamiento de AC con otros modelos permite la consideración cuantitativa de la controladores externos en el entorno SIG, en el que los datos espacio-temporales pueden servir como parámetros de referencia, por ejemplo: la combinación de Autómatas Celulares y el algoritmo de búsqueda gravitacional aplicado por (Nowrouzifar et al., 2017), este algoritmo se aplicó para calibrar las reglas de transición facilitando la calibración de autómatas celulares y alcanzando soluciones óptimas en menos interacciones. También la integración de AC - CM la cual ha sido una de las más utilizadas para modelar la expansión urbana ya que no requiere datos completos para modelar la expansión urbana de manera adecuada y realista (Xu et al., 2019). Las limitaciones de AC-CM se superan integrando otro modelo como el de Regresión Logística, como el que se utilizó en la provincia de Gilan, Irán, donde se combinó un modelo de Regresión Logística, la Cadena de Markov, junto con el modelado basado en Autómatas Celulares (Jafari et al., 2016).

Las Cadenas de Markov espaciales generan secuencias de variables aleatorias que dependen de su probabilidad de transición (Mauricio & Maturana-Miranda, 2019), y simulan

los estados de un sistema en un tiempo determinado, a partir de dos estados precedentes en el espacio, esto significa que la modelización no tiene en cuenta las variables explicativas y descriptivas, sino que se basa exclusivamente en el análisis de la dinámica interna del sistema (Jiménez López, 2019). Mientras que LR disfruta de un alto grado de flexibilidad al especificar las fuerzas impulsoras y limitantes de la expansión urbana para crear un conjunto óptimo de variables para el Modelo AC- CM (Xu et al., 2019).

El modelo de Regresión Logística se considera una herramienta concisa y efectiva ya que el proceso de urbanización está representado por una curva logística por lo cual un modelo AC basado en Regresión Logística es esencialmente coherente con el mecanismo de evolución urbana como el presentado en la ciudad de Hangzhou en la costa al suroeste de china por (Cao et al., 2020).

Las fortalezas y debilidades de los diversos modelos se identifican con base en el análisis y discusión de las características de estos modelos, su aplicación y comparación, por ejemplo el estudio realizado por (Avalos Jiménez et al., 2019) donde simulan el crecimiento urbano de la zona metropolitana Tepic-xalisco al año horizonte 2045 aplicando tres modelos diferentes: Técnicas de Evaluación Multicriterio (EMC), Regresión Logística (RL) y Automatas Celulares con cadena de Markov (AC-CM), de los cuales AC- CM mostro los mejores resultados.

El modelo CA-Markov integra las ventajas de simulación espacial de un modelo AC y las ventajas de simulación temporal de un modelo de Markov, permitiendo así obtener la probabilidad de ocurrencia de un evento en un momento a través de la simulación espacial (P. Tian, Cao, Li, Pu, Gong, et al., 2021). Este modelo se ha aplicado ampliamente en los procedimientos de simulación debido a que es fácil de operar y tiene viabilidad y cientificidad.

Numerosos estudios existentes basados en el modelo AC-CM se concentran en simulación de cambios regionales de uso del suelo o expansión urbana, cambios en el paisaje, desastres de incendios bajo perturbaciones de las actividades económicas ubicadas principalmente en ciudades, lagos y cuencas fluviales (Tabla 4). Sin embargo la urbanización en zonas costeras y entornos ecológicos son extremadamente cambiantes ante el cambio climático y este modelo AC-CM es indicado para la simulación del crecimiento urbano junto con la evaluación de riesgos futuros, ya que ofrece una amplia comprensión sobre la

complejidad de los componentes de los sistemas espaciales, pues el modelo CM estima la cantidad de cambio y el modelo CA evalúa geográficamente el cambio espacial (Hamad et al., 2018).

Tabla 4. Modelos de simulación mediante autómatas celulares.

Autor / Modelo	Datos y factores		
MOLAND (Engelen et al., 2007)	Usos del suelo; variables socioeconómicas, distancias a carreteras; pendientes; zona excluida	*Autómatas celulares constreñidos. Reglas de transición: idoneidad; accesibilidad; vecindario von Neumann; zona excluida; perturbación estocástica	Demanda externa Ranking arriba-abajo
FUTURES(Meentemeyer et al., 2013)	Máscara binaria; distancias; zona excluida; proyección de población; pendientes; regiones; variables dinámicas	*Autómata Celular. Reglas de transición: regresión logística; presión urbana (kernel, ocurrencia o gravedad) Tamaño y forma de los parches	Demanda. Monte Carlo, localización del píxel (ranking del vecindario de la semilla para situar el parche)
MachCA (Feng et al., 2016)	Máscara binaria; distancias; zona excluida	*Autómatas celulares Reglas de transición (actualizadas cada iteración): vecindario Moore; perturbación estocástica; constreñimientos. MMCC y support vector machines	Sin demanda ni umbrales. Imagen clasificada con los cambios.
CA-MAS (G. Tian et al., 2016)	Máscara binaria; distancias; pendientes; elevaciones; carreteras; zona excluida	*Autómatas celulares regresión logística; Sistema multi-agentes.	Demanda Monte Carlo hasta alcanzar demanda
(P. Tian, Cao, Li, Pu, & Gong, 2021)	ríos, carreteras, ciudades, meteorología, divisiones administrativas, planificación regional, datos de construcción de zonas de protección ecológica	CA-Markov Cambios en el paisaje y evaluación de riesgo ecológico en humedales Mapa de riesgo ecológico	Imágenes Landsat (1991, 2000, 2004, 2008, 2013 y 2017) Simulación de paisaje de escenarios múltiples.
(Hamad et al., 2018) Zona Núcleo de Halgurd-Sakran.	Mapas de cobertura terrestre Landsat (1993, 1998, 2003, 2008 y 2017)	CA-Markov	Predicción de cambios en el uso de la tierra (dos escenarios)

(Amini Parsa et al., 2016) Arasbaran, Irán	Mapas de cobertura terrestre Landsat (1989, 2000, 2013)	CA-Markov	Cambios y predicción en el uso y cobertura de la tierra en Reserva de biosfera de Arasbaran, Irán.
(Harb et al., 2020) SLEUTH Túnez, Monastir	Pendiente, uso de suelo, exclusión, expansión urbana, transporte, sombra de colinas	Autómata celular Desarrollado por el servicio geológico de los estados unidos 100->50->30m	Espontaneo Nuevo centro de expansión Borde (centros urbanos antiguos y nuevos) Influenciado por carretera Simular escenarios futuros de crecimiento urbano.
(Barredo & Engelen, 2010) Pordenone, Italia.	Idoneidad física, zonificación, accesibilidad, impacto dinámico	Autómata celular Cambio de uso de la tierra Riesgo ante inundaciones 100 m	Crecimiento urbano: CA orgánico influenciado por las carreteras y crecimiento espontánea influenciado por carreteras
(Pinto et al., 2021) Ciudad de Coimbra, Portugal	Uso de Suelo 1991 y 2001 Datos censales 1991 y 2001	Simulación integrada del uso de la tierra y las interacciones del transporte	

2.6.1. Modelo de simulación: *Autómata Celular*

Autómata celular es un modelo de dinámica espacial en el que, el tiempo, espacio y el estado son discretos, y las interacciones espaciales y la causalidad temporal son locales (H. Wang et al., 2021). Este modelo tiene la capacidad de cambiar y controlar procesos complejos distribuidos espacialmente (Gidey et al., 2017). A sido utilizado ampliamente en la simulación de sistemas urbanos por su capacidad de modelar la proximidad, la cual se considera como un elemento espacial esencial que refleja la dinámica de los cambios en el uso de la tierra (Gharaibeh et al., 2020). El modelo CA es un sistema espacial dinámico y relativamente simple, en el que el estado de cada celda de la matriz depende del estado previo de las celdas encerradas dentro de un vecindario definido, de acuerdo con un conjunto de reglas de transición (Gidey et al., 2017).

AC es un modelo de simulación dinámica en el que tanto el espacio-tiempo como el estado son discretos y discontinuos. Puede resolver sistemas complicados con reglas locales simples (Gao et al., 2021). La expresión del modelo AC es:

$$S_{(t+1)} = f[S_{(t)}N]$$

Donde S es el conjunto de estados de AC y N es el rango de campo celular. t y $t + 1$ son dos puntos de tiempos sucesivos y f son las reglas de transferencia del estado de AC.

Los Autómatas Celulares (AC) simulan la evolución del espacio geográfico mediante la representación de cada ubicación como un píxel. Cada píxel puede tomar un valor de un conjunto finito de estados. La evolución de los píxeles está determinada por una función de transición, que considera los valores actuales de los píxeles y los valores de sus vecinos en un momento dado. AC asume que una región tiene una mayor tendencia a cambiar a una categoría de uso de la tierra si las regiones vecinas pertenecen a esa categoría (Gharaibeh et al., 2020)

La vecindad, factor propio de los AC, determina la influencia que tiene sobre el uso del suelo de un píxel el uso de los píxeles vecinos. La aptitud se relaciona con la capacidad de cada área del territorio para sostener usos urbanos, teniendo en cuenta factores como pendiente, altitud, crecimiento poblacional, distancia a cuerpos de agua, entre otros. Por último, el factor estocástico introduce cierta incertidumbre en el modelo para reflejar la naturaleza aleatoria de los fenómenos de crecimiento urbano. Simultáneamente, un filtro de vecindad espacial limita la influencia de los píxeles ubicados lejos de la clase en consideración, otorgando mayor preferencia a las áreas contiguas. En esta investigación, se utilizaron filtros de vecindad de 5×5 para establecer las relaciones entre los píxeles

2.6.2. Modelo de Cadena de Márkov

La cadena de Márkov es un modelo que predice la probabilidad de cambio de LULC de un estado a otro estado teniendo en cuenta la tendencia de cambio de LULC pasada en diferentes escalas espacio-temporales (Gidey et al., 2017), son modelos de proyección que describen los movimientos probabilísticos de un elemento individual en un sistema compuesto de estados discretos (Assaf et al., 2021). Este modelo contempla una evolución lineal de la dinámica de los usos de suelo, lo que puede resultar incompatible con la propia evolución del paisaje, de tal manera que los cambios de ritmo, la desaparición o la nueva aparición de procesos de ocupación del suelo, no quedan reflejados en la modelización y constituyen los principales errores en los valores estimados (Paegelow, M., Camacho Olmedo, M.T. y Menor Toribio, 2003).

La representación matemática de un modelo de Márkov viene dada por la matriz de transición T, que es una matriz cuadrada donde el número de filas y columnas corresponde al número de estados del sistema (Assaf et al., 2021).

$$S_{t+1} = (p_{ij}) * (S_t)$$

y

$$p_{ij} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \dots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \dots & p_{2n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ p_{n1} & p_{n2} & \dots & p_{nn} \end{bmatrix}$$

$$(0 \leq p_{ij} < 1 \text{ and } \sum_{j=1}^n p_{ij} = 1, i, j = 1, 2, \dots, n)$$

Donde p_{ij} es la matriz de probabilidad de transición de estado y n es el número de tipo de uso de suelo; S es el estado de uso de suelo y $t + 1$ y t es el punto de tiempo.

En el modelo de cadena de Márkov, el cambio de usos de suelo se considera un proceso estocástico. El estado en un momento particular t depende exclusivamente del estado en el paso de tiempo anterior t-1 y no de los estados anteriores a eso.

Tres resultados se generan como resultado de este modelo, 1) la matriz de probabilidad de transición la cual almacena la probabilidad de que cada estado cambie a cada uno de los otros estados; 2) la matriz de área de transición producida a partir de esta matriz de probabilidad de transición y almacena el número esperado de pixeles que podrían cambiar sobre un número predeterminado de unidades de tiempo, y 3) las imágenes de probabilidad condicional que expresan la probabilidad de que cada pixel pertenezca a la clase designada en el siguiente paso de tiempo.

2.6.3. AC - Markov

Los modelos CA y Márkov han extendido sus iras sobre las geociencias y con el avance de las tecnologías de teledetección y SIG junto con un aumento exponencial en la potencia de computación y modelado. El modelo de Márkov puede predecir correctamente la magnitud del cambio, pero no se puede obtener la dirección correcta, entonces, por sí solo no es suficiente para analizar un problema simplemente porque no considera la distribución

espacial de cada categoría. Por lo que el modelo de autómatas celulares se implementa para tener en cuenta la naturaleza espacial y por lo tanto la dirección de los datos (Ghosh et al., 2017).

Los autómatas celulares y el modelado de la cadena de Márkov, estos dos modelos pueden ser de inmensa utilidad cuando se fusionan y se aplican en situaciones prácticas. Mediante la fusión del modelo cadena de Márkov con AC se pueden percibir los atributos espaciales y temporales. En el modelo combinado CA-Markov, el modelo de Márkov proporciona probabilidad y cantidad de cambio de uso de la tierra, mientras que el modelo CA trabaja en la distribución espacial y las interacciones vecinales (Fu et al., 2018).

En otras palabras, AC aborda la asignación espacial y la ubicación del cambio cubriendo la limitante de la Cadena de Márkov, y mientras este predice los cambios cuantitativamente, basándose en los cambios que han ocurrido en el pasado, y sus resultados se utilizan como entradas para el modelo de AC. A pesar de las limitaciones de estos dos modelos, la integración de ellos lo hace empíricamente sólido (Shafizadeh Moghadam & Helbich, 2013).

Estos modelos generalmente se calibran utilizando datos de capacitación (es decir, mapas de uso de la tierra anteriores), que luego se comparan con un mapa de uso de la tierra real, aunque se descuida la cantidad de cambio (Ghosh et al., 2017; Shafizadeh Moghadam & Helbich, 2013).

2.6.4. Impulsores de los cambios de uso de suelo

Un problema importante es la pérdida significativa de tierras a lo largo de los años debido a una combinación de factores naturales y humanos. Las preguntas científicas y de gestión son que factores contribuyen a los cambios en la cubierta terrestre del de la tierra y como los podemos modelar, y como se vería el LULC en esta región dados los factores actuales. Si bien los factores socioeconómicos son los principales impulsores del cambio de uso de la tierra, en este proyecto solo se consideraron factores físicos ya que, la proximidad física a una clase de uso de la tierra existente es un impulsor del cambio a una clase particular de uso de la tierra en el futuro.

La elevación se reconoce como los factores topográficos imperativos que afectan el cambio de LULC (Leta & Demissie, 2021) y su variación puede ser un impulsor considerable

del cambio (Gharaibeh et al., 2020). Por lo tanto, también la pendiente afecta las tendencias espaciales del cambio de la cubierta terrestre supongamos que cuanto más suave es una pendiente de la tierra, más fácil es tener cambios en el uso de la tierra (Gharaibeh et al., 2020). La ganancia de suelo urbano está altamente concentrada en pendientes relativamente planas y la deforestación disminuye con el aumento del gradiente de pendiente (C. Wang et al., 2017). Otra variables a considerar es Proximidad a la carretera, determinante de la accesibilidad, siendo uno de los principales impulsores para atraer más usos urbanos y expansión (Gharaibeh et al., 2020). La proximidad del río proporciona comodidad a los residentes para acceder a los recursos mientras cambian el uso de la tierra (Leta & Demissie, 2021). La distancia de lo urbano puede ser un motor de cambio muy fuerte, ya que cuanto más cerca esté la tierra de los centros urbanos, más fácil será que la tierra cambie a usos urbanos (Gharaibeh et al., 2020).

Las distancias carreteras principales, a la ciudad y a ríos, se calcularon utilizando la función de distancia euclidiana en el software Terrset 18.21. La distancia euclidiana es la distancia en línea recta entre dos puntos y se utiliza para calcular lo más cercano y lo más lejano en los mapas. Mediante este método, el modelo reconoce el área y calcula la influencia de cada factor en el cambio de uso de la tierra en función de la distancia (Gharaibeh et al., 2020).

2.7. Los tres pilares del Riesgo

Las políticas internacionales para la reducción del riesgo de desastres, el desarrollo sostenible y a adaptación climática están poniendo cada vez más énfasis en la gestión de Riesgos Múltiples, siendo reconocida por la Agenda para el Desarrollo después del 2015 como una forma importante de lograr los objetivos de Desarrollo Sostenible y los objetivos del desarrollo del Milenio (ODM) (Gallina et al., 2020). El Grupo de Trabajo II del IPCC en el Quinto informe estableció que el análisis del peligro, exposición y vulnerabilidad es prioritario para la reducción de los riesgos actuales y futuros asociados a la variabilidad climática y al cambio climático. Asegura que los impactos actuales por eventos extremos (ondas de calor, sequías, inundaciones, ciclones tropicales, entre otros) han aumentado la vulnerabilidad y exposición de los ecosistemas y las poblaciones humanas a la variabilidad climática.

Según el (IPCC, 2014) se definen los siguientes términos fundamentales:

Riesgo.

Se refiere al potencial de consecuencias adversas en las que algo de valor se encuentra amenazado por un resultado incierto, tomando en cuenta la diversidad de valores involucrados. Comúnmente, el riesgo se expresa como la probabilidad de que ocurran eventos o tendencias peligrosas, multiplicada por el impacto que estos tendrían en caso de materializarse. Los riesgos surgen de la interacción entre la vulnerabilidad, la exposición y el peligro. Este término se aplica especialmente al evaluar los posibles impactos del cambio.

Peligro.

Se refiere al potencial de ocurrencia de un suceso o tendencia física, ya sea de origen natural o humano, que podría dar lugar a pérdidas de vidas, lesiones u otros efectos negativos para la salud, así como a daños y pérdidas en propiedades, infraestructuras, medios de subsistencia, servicios, ecosistemas y recursos ambientales. El término peligro generalmente se asocia con eventos o tendencias físicas relacionadas con el clima o sus impactos directos.

Exposición.

La exposición se refiere a la presencia de personas, medios de subsistencia, especies o ecosistemas, funciones, servicios y recursos ambientales, infraestructuras o activos económicos, sociales o culturales en áreas y entornos que podrían ser afectados negativamente. Esta exposición está vinculada a la ubicación geográfica de estos elementos, aunque es importante tener en cuenta que pueden existir diferencias en los niveles de exposición incluso dentro del mismo espacio. Es relevante señalar que un evento climático que representa una amenaza puede ocurrir sin que haya exposición, como una ola de calor en un área donde no hay elementos vulnerables que puedan sufrir daños. En resumen, la exposición implica la interacción de elementos susceptibles con el peligro potencial, lo que determina el grado de riesgo para cada entidad expuesta.

Vulnerabilidad.

Se refiere a la propensión o predisposición de un sistema, individuo o comunidad a ser afectado negativamente por un evento o tendencia peligrosa. La vulnerabilidad engloba una

serie de conceptos y elementos, entre ellos la sensibilidad o susceptibilidad al daño, así como la falta de capacidad de respuesta y adaptación ante situaciones adversas.

Esta condición de vulnerabilidad puede estar relacionada con diversos factores, como la ubicación geográfica, la infraestructura, la disponibilidad de recursos, la salud, la educación, entre otros. La evaluación de la vulnerabilidad es esencial para comprender los riesgos que enfrenta una población o un sistema ante eventos climáticos o situaciones de peligro, y para desarrollar estrategias de mitigación y adaptación efectivas para reducir su exposición y fortalecer su resiliencia.

Impactos.

Los impactos climáticos se refieren a los efectos que ocurren en los sistemas naturales y humanos como resultado de eventos climáticos extremos o del cambio climático. Este término se utiliza principalmente para describir los efectos sobre los sistemas naturales y humanos causados por eventos meteorológicos extremos y el cambio climático. Los impactos abarcan aspectos como vidas, medios de subsistencia, salud, ecosistemas, economías, sociedades, culturas, servicios e infraestructuras. Estos efectos son el resultado de la interacción de cambios o fenómenos climáticos peligrosos durante un período específico y la vulnerabilidad de las sociedades o sistemas expuestos a ellos. En el contexto del cambio climático, los impactos físicos, como inundaciones, sequías y elevación del nivel del mar, son considerados un subconjunto de los impactos.

Adaptación.

Es el proceso mediante el cual se realizan ajustes en respuesta al clima actual o proyectado y sus efectos. En sistemas humanos, la adaptación tiene como objetivo moderar o evitar los daños causados por los cambios climáticos y, al mismo tiempo, aprovechar las oportunidades que puedan surgir. En ciertos sistemas naturales, la intervención humana puede facilitar la adaptación al clima proyectado y sus impactos. En esencia, la adaptación implica tomar medidas proactivas para reducir la vulnerabilidad y mejorar la resiliencia de las comunidades y ecosistemas frente a los desafíos del cambio climático.

Transformación.

La transformación se refiere a cambios significativos en los sistemas naturales y humanos, que van más allá de simplemente adaptarse a las condiciones cambiantes del clima.

Implica modificaciones en paradigmas, objetivos y valores para promover la adaptación y el desarrollo sostenible, especialmente enfocados en reducir la pobreza. Esto implica un cambio profundo y sostenido en la gestión de recursos, la toma de decisiones y las políticas públicas. Busca abordar integralmente los desafíos del cambio climático para lograr una sociedad más resiliente, equitativa y sostenible, con cambios en la producción y consumo de recursos, desarrollo urbano, políticas públicas y prácticas sociales y económicas. En última instancia, busca no solo proteger contra impactos negativos, sino también mejorar la calidad de vida y reducir la pobreza de manera sostenible

Resiliencia.

La resiliencia se refiere a la capacidad de los sistemas sociales, económicos y ambientales para enfrentar y superar eventos, tendencias o perturbaciones peligrosas. Se manifiesta mediante respuestas eficientes y reorganización que les permite mantener su función esencial, identidad y estructura, a pesar de las adversidades. Un sistema resiliente puede resistir los impactos negativos de situaciones desafiantes y conservar su capacidad de adaptación, aprendizaje y transformación. En lugar de simplemente volver a su estado original después de un evento adverso, un sistema resiliente tiene la capacidad de aprender de la experiencia y adaptarse para mejorar su resistencia en el futuro. Se considera una cualidad valiosa en la gestión del cambio climático y otros desafíos, ya que contribuye a la sostenibilidad y al desarrollo de soluciones más efectivas y duraderas. Los sistemas que exhiben alta resiliencia son más capaces de hacer frente a la incertidumbre y la variabilidad inherentes a los sistemas naturales y humanos.

2.7.1. Enfoques en el ámbito de Evaluación de Riesgo en zonas costeras

El enfoque o método más práctico en este ámbito de evaluación de los riesgos es el método cualitativo de riesgos múltiples que permite una primera estimación de los riesgos; le siguen los métodos semicuantitativos que se basan en suma ponderada o matrices de causa-efecto, proporcionan una evaluación más profunda de las relaciones entre agentes y procesos y la exposición de los elementos en riesgo, por ejemplo (Gallina et al., 2020; Greiving et al., 2006; G. Wang et al., 2014); y finalmente los métodos cuantitativos de múltiples riesgos como enfoques probabilístico, redes bayesianas y modelos basados en agentes, permiten un análisis más robusto de la dinámica de múltiples riesgos, por ejemplo (Jäger et al., 2018; S. Lee et al., 2020; Liu et al., 2015; Plomaritis et al., 2018; Sanuy et al., 2020), aplicados en la Costa de

North Norfolk en Reino Unido, Corea del Sur, ciudad creada virtualmente, en las costas de la laguna de Ria Formosa al Sur de Portugal, y en Deltas en España, respectivamente.

El cambio climático amplificará los riesgos existentes y creará nuevos riesgos para los sistemas naturales y humanos. Los riesgos se distribuirán de forma desigual y, en general, serán mayores para las personas y las comunidades más desfavorecidas, independientemente del nivel de desarrollo de los países (IPCC, 2014). Por lo que la evaluación de riesgos no solo es averiguar en donde se encuentran los problemas relacionados con él, sino también determinar cuantitativa y cualitativamente la importancia de estos. Una evaluación completa de riesgos espacialmente debe tener en cuenta todos los riesgos relacionados con el área en específico de investigación (Greiving et al., 2006). Los eventos ambientales extremos exacerbados por el cambio climático, el grado en que un área está expuesta a tales eventos y sus elementos sensibles representan colectivamente el riesgo general de una región (Murshed et al., 2021).

Según el IPCC (2014), Riesgo se caracteriza como “el potencial de consecuencias en que algo de valor humano (incluidos los propios humanos) está en peligro con un desenlace incierto, también lo define como la probabilidad de ocurrencia de sucesos peligrosos multiplicada por las consecuencias si estos sucesos ocurren”. Combinando y analizando estas definiciones, “Riesgo”, en esta investigación se considerará como la probabilidad de los efectos adversos derivados de los peligros relacionados con el cambio climático y el grado de vulnerabilidad y exposición de los sistemas ambientales y socioeconómicos.

Por consiguiente y en base al marco establecido en el informe más reciente del IPCC, Riesgo (R) en este documento se considera como el producto o convolución del peligro (P), vulnerabilidad (V) y exposición (E) como una fórmula estándar de riesgo antes los impactos del cambio climático, la cual puede ser expresada mediante la siguiente ecuación.

$$R = P * V * E \quad (1)$$

Se ha presentado una atención exhausta en la investigación de evaluación de riesgos en zonas costeras, de los cuales la mayoría parten de nociones diferentes de riesgo, con enfoques y variables distintas (Tabla 5), pero coinciden en el que el Riesgo es un tema que debe de abordarse con Técnicas de Evaluación Multicriterio. Sin embargo, existe un vacío en el mapeo

de escenarios futuros de riesgo a largo plazo que podría presentarse en estas regiones. Por lo que, para abordar esta brecha resulta importante seleccionar las variables más adecuadas que funcionen como indicadores para la obtención de índices y así crear escenarios de riesgos costeros en periodos de tiempo diferentes (pasados y presentes), que permitan mediante modelos geoespaciales de simulación la generación de escenarios futuros de riesgo de los impactos del cambio climático en el litoral.

Tabla 5. Variables utilizadas como indicadores y técnicas geoespaciales.

Autor	Variables	Formato y área	Evaluación	Técnicas
(Murshed et al., 2021)	Frecuencia de ciclón Aumento relativo del nivel del mar Tasa de cambio de la línea de costa Marejada ciclónica Densidad de población Uso de suelo Pendiente Batimetría Geomorfología	Costa de Bangladesh	Evaluación de riesgo de desastres	Evaluación multicriterio Técnica de interpolación ponderada por distancia inversa.
(Gallina et al., 2020)	Aumento del nivel del mar Marejada ciclónica Erosión costera Censo de población y vivienda Modelo digital de elevación Reservas naturales	Raster Costa Italiana al Norte del Mar Adriático	Evaluación Multi-Riesgo en costas	Análisis de criterios múltiples basadas en expertos. Matriz de influencia
(S. Lee et al., 2020)	Salud humana Problemas energéticos	Raster Corea del sur	Evaluación de Riesgos múltiples (Olas de calor por cambio climático)	Redes bayesianas Matriz de Riesgo
(Sanuy et al., 2020)	Oleaje Niveles de agua Morfología costera	Delta de la Tordera y Cabrera de Mar (España)	Evaluación de peligros costeros	Modelo Fuente-Via-Receptor (SPR) Redes bayesianas
(Plomaritis et al., 2018)	Oleaje Nivel de marejada ciclónica Morfología costera	Ría Formosa (Sur de Portugal)	Evaluación de peligros costeros	Modelo morfodinámico Xbeach Redes bayesianas
(Jäger et al., 2018)	Variables hidráulicas y morfológicas Información catastral	Costa de Nort Norfolk	Análisis de riesgos costeros y toma de decisiones	Modelo Fuente-Via-Receptor (SPR) Modelo SWAN Redes bayesianas

(Satta et al., 2017)	Aumento del nivel del mar Altura de ola significativa Sequias Erosividad Elevación Rugosidad Uso de suelo Densidad de Población Llegadas de turistas Crecimiento de la población Nivel de educación Población de más de 65 Producto interno bruto	Países: Albania Argelia Bosnia y Herzegovina Croacia Egipto Libia Montenegro Marruecos Palestina Siria Túnez	Evaluar los riesgos de los impactos del cambio climático en los ecosistemas costeros.	Análisis de criterios múltiples basadas en expertos. Índice de Riesgo Costero (CRI-MED)
(Rizzi et al., 2016)	Geomorfología Uso de suelo Urbanización Densidad de población costera Principales ciudades Límites administrativos Número de hoteles Biodiversidad terrestre Presencia de áreas protegidas y humedales	El Golfo de Gabes, costa este de Túnez en el mar mediterráneo	Evaluación y gestión de los impactos del cambio climático	Evaluación multicriterio
(G. Wang et al., 2014)	Efectos de mareas rojas Tasa de erosión costera Altitud media Longitud de la costa Humedales y cobertura forestal Economía Sociedad Estándares de vida	50 ciudades en zona costera de China.	Evaluación semicuantitativa Riesgo (Costas)	Evaluación multicriterio Proceso de Jerarquía Analítica Método Delphi Enfoque de Matriz de Riesgos

El enfoque en el campo de evaluación de impactos con respecto al cambio climático es llamado “arriba abajo”, y se enfoca en los aspectos biofísicos de la vulnerabilidad, estrechamente vinculados al riesgo de exposición, particularmente a las manifestaciones físicas de la variabilidad de los cambios ambientales o eventos. Típicamente, este enfoque, aborda a la vulnerabilidad de un sistema humano como determinado por la naturaleza del riesgo físico, el grado de exposición al riesgo y la sensibilidad del sistema a los impactos del riesgo (Hinkel & Klein, 2007). Los factores de riesgo dependen de las actividades humanas en la zona costera y varían de acuerdo con el tipo de actividades y usos desarrollados.

La Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres (ONU/EIRD, 2004), indica que vulnerabilidad es una “condición determinada por factores o procesos físicos, sociales,

económicos y ambientales, que aumentan la susceptibilidad de una comunidad al impacto por amenazas”.

Para el IPCC (IPCC, 2007, 2012) la vulnerabilidad se define, como “el grado en que los sistemas pueden verse afectados adversamente por el cambio climático, dependiendo de si éstos son capaces o incapaces de afrontar los impactos negativos del cambio climático, incluyendo la variabilidad climática y los eventos extremos. México ha adoptado y plasmado esta concepción de vulnerabilidad en su marco legal nacional, como se observa en la Ley General de Cambio Climático. Según esta definición, la vulnerabilidad no se limita únicamente a las condiciones climáticas desfavorables, sino que también está relacionada con la capacidad de la sociedad para anticipar, enfrentar, resistir y recuperarse de los impactos. Por lo tanto, la vulnerabilidad está determinada por la naturaleza, magnitud y velocidad de los cambios climáticos a los que se enfrenta un sistema, así como por su sensibilidad y su capacidad de adaptación.

Por consiguiente, la vulnerabilidad de un sistema se define por la siguiente ecuación:

$$V = E + S - CA \quad (2)$$

Dónde: V es la vulnerabilidad; E, la exposición; S, la sensibilidad; y, CA la capacidad adaptativa.

La vulnerabilidad abarca los aspectos físicos, sociales, económicos y ambientales de una región, sector o grupo social que están susceptibles a ser afectados por fenómenos meteorológicos o climáticos, siendo fundamental para comprender la génesis de los desastres naturales. La naturaleza multifactorial de la vulnerabilidad requiere un análisis tanto del pasado reciente como de proyecciones futuras para evaluar los posibles impactos del cambio climático. Por lo tanto, se ha pasado de una descripción cualitativa a una cuantitativa para identificar áreas prioritarias que requieren adaptación. Dado que no existe forma única de calcular la vulnerabilidad ante cambio climático se hace necesario contar con elementos mínimos para evaluarla (IPCC, 2012).

El análisis de la vulnerabilidad constituye el primer paso en el proceso de adaptación al cambio climático. Este análisis posibilita la identificación de las principales amenazas climáticas en el territorio, así como los problemas asociados a estas amenazas. Además,

permite determinar las causas subyacentes que podrían aumentar los impactos en la sociedad y en el medio ambiente. El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC) propone una forma de evaluar la vulnerabilidad al cambio climático, con miras a construir una visión común en el país. Este esfuerzo, realizado en coordinación con otras dependencias de la Administración Pública Federal, se materializa en el Atlas Nacional de Vulnerabilidad al Cambio Climático (ANVCC), que muestra la vulnerabilidad actual y futura de los municipios de México ante deslaves, inundaciones y estrés hídrico, y lo más importante, muestra las causas subyacentes que hacen vulnerable a la población y a las actividades económicas de los municipios. Además aborda el componente del sistema natural, aportando información sobre el cambio en la distribución potencial de especies prioritarias o en condición de riesgo en las Áreas Naturales Protegidas Federales del país y da recomendaciones explícitas sobre cómo aumentar la capacidad adaptativa y disminuir la sensibilidad ante amenazas relacionadas con el clima, en la actualidad y en un contexto de cambio climático (González Terrazas et al., 2019).

En México se han realizado algunos estudios de vulnerabilidad de la costa y de algunos ambientes costeros desde un enfoque de riesgo. Destacan los estudios de: (Espejel et al., 2007) que plantean que los factores de riesgo dependen de las actividades humanas en la zona costera y varían de acuerdo con el tipo de usos desarrollados; (Martínez et al., 2006) evalúan la vulnerabilidad de las dunas costeras ante disturbios naturales y humanos en Veracruz; Canul, Mendoza, & Silva, (2020) evalúan la vulnerabilidad con un enfoque determinista aplicando Jerarquía analítica (AHP) y probabilístico Latin Hipercube y Monte Carlo en la costa del estado de Campeche, concluyendo que aunque el enfoque probabilístico aplicado es el más adecuado para la evaluación de la vulnerabilidad costera los enfoques deterministas siguen siendo los más utilizados. Sin embargo la aplicabilidad de AHP sigue siendo la más utilizada para determinar el índice de vulnerabilidad costera por ejemplo (Mani Murali et al., 2013; Zhang et al., 2021) la aplican en la India y China, respectivamente; mientras que otros solo aplican estadística como (Onat et al., 2018).

Tabla 6. Revisión bibliográfica de vulnerabilidad costera.

Autor	Variables / Indicadores	Formato y área	Evaluación	Técnicas
(Zhang et al., 2021)	Geomorfología, Hábitats naturales y Relieve costero	Costa de Bohai, China	Índice de vulnerabilidad compuesto	Proceso de Jerarquía analítica (AHP)

	Aumento del nivel del mar, marejadas, oleaje y viento	5627 km		
	Área urbanizada y agrícola			
	Densidad de población y tasa de crecimiento, Transporte, educación, y servicios			
(Canul et al., 2020)	Elevación Dunas Altura significativa de la ola Cambio de la línea de costa Distancia a la costa Pendiente costera	Raster Costa de Campeche	Evaluación de la vulnerabilidad con enfoque determinista y probabilístico	Proceso de Jerarquía analítica (AHP) Modelo Latín Hipercube y Monte Carlo
(Onat et al., 2018)	Geomorfología Tasas de erosión / acreción Pendiente costera Aumento del nivel del mar Altura significativa de la ola Rango medio de la marea	Raster Costas de las islas hawaianas: Kaua'i, O'ahu, Moloka'i, Lana'i, Maui, Kaho'olawe and Hawai'i	Índices de Exposición y vulnerabilidad	Estadística descriptiva Análisis de Varianza (ANOVA)
(Mani Murali et al., 2013)	Pendiente costera Geomorfología Cambio de la línea de costa Aumento del nivel del mar Altura significativa de la ola Rango medio de la marea Uso de suelo Red de carreteras Zonas turísticas	Costa de Poducherry, India	Vulnerabilidad Física y social	Proceso de Jerarquía analítica (AHP)
(Martínez et al., 2006)	Condición geomorfológica (8variables) Influencia marina (8 variables) Influencia eólica (9 variables) Condición de la vegetación (10 variables) Efecto humano (17 variables)	Costa del Golfo de México	Índice de Vulnerabilidad	Índices probabilísticos

2.8. Objetivos de desarrollo sostenible 2030 (ODS 2030)

La Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible fue aprobada el 25 de septiembre de 2015 por la Asamblea General de las Naciones Unidas (ONU), entrando en vigor oficialmente el 1 de enero de 2016. La Agenda 2030 plantea 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (Objetivos Mundiales) con 169 metas (Figura 12), siendo estos universales, transformadores y civilizatorios, cubriendo aspectos económico, social y ambiental a favor de las personas, el

planeta y la prosperidad. Los 17 objetivos están interrelacionados, lo que significa que el éxito de uno afecta a los otros.



Figura 8. Objetivos de Desarrollo Sostenible de la Agenda 2030.

De acuerdo a ONU México, (2015), México participó en la definición de la Agenda, liderando el proceso consulta y de negociación. Ha sido un importante impulsor en América Latina, y pionero en la Instalación del Consejo Nacional de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. Adicionalmente, México ha aportado a la implementación de la Agenda 2030, destacando como uno de los dos países voluntarios en la región que presenta informes sobre los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) ante el Foro Político de Alto Nivel en Desarrollo Sostenible. Asimismo, estableció el Comité Técnico Especializado en Desarrollo Sostenible (presidido por la Presidencia de la República y el INEGI), con la participación de diversas dependencias de la Administración Pública Federal.

Los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030 coincidieron con un hito histórico alcanzado en 2015: el Acuerdo de París, aprobado durante la Conferencia sobre Cambio Climático (COP21). Este acuerdo se enfoca en mantener el aumento de la temperatura media mundial muy por debajo de 2°C con respecto a los niveles preindustriales, y continuar los esfuerzos para limitar dicho aumento a 1,5°C con respecto a esos mismos niveles. Asimismo, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) para 2030 se alinearon con el Marco de Sendai para la Reducción del Riesgo de Desastres, firmado en Japón en marzo de 2015. Estos acuerdos proporcionan un conjunto de normas comunes y metas alcanzables para la reducción de las emisiones de carbono, la gestión de los riesgos asociados al cambio climático y los desastres naturales, así como para la posterior reconstrucción tras dichos eventos.

Responder a la amenaza del cambio climático repercute en la forma en que gestionamos nuestros frágiles recursos naturales, por lo que el objetivo que se centra en combatir el cambio climático es el ODS 13: “Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos”. Según la Comisión Económica para América Latina y Caribe (CEPAL), el cambio climático es un factor que acentúa las desigualdades, sin embargo, se puede crecer y ser ambientalmente sostenible lo cual requiere transformaciones profundas y rápidas ya que se debe buscar un equilibrio entre acciones de mitigación y de adaptación y a su vez buscar alianzas entre sectores a fin de aumentar la ambición para limitar los aumentos de temperatura, tal como se estipuló en el Acuerdo de París. Es necesario implementar el marco global acordado en el Caribe y Centroamérica ya que son subregiones expuestas y altamente vulnerables a fenómenos cada vez más extremos a consecuencia del cambio climático. Así mismo, asume que las políticas públicas con una mirada territorial son fundamentales para abordar los desafíos que plantea el cambio climático.

Mientras que el ODS 14: “Conservar y utilizar de forma sostenible los océanos, mares y recursos marinos para lograr el desarrollo sostenible”. Según la CEPAL, América Latina y el Caribe cuentan con una extensa línea costera que supera los 70,000 kilómetros y alberga numerosos asentamientos humanos importantes. La región ha hecho progresos significativos en la protección de sus zonas marinas y costeras, destacándose países como México y Chile, que han superado la meta del 10% establecida en el marco del Convenio sobre la Diversidad Biológica para la conservación de áreas silvestres protegidas en estas áreas para el año 2020.

La gestión prudente de océanos y mares es una característica clave del futuro sostenible, pues las costas y mares de todo el mundo están siendo afectadas por desechos sólidos y líquidos de las embarcaciones, redes de pesca abandonadas, así como por contaminantes de origen terrestre, deforestación y desarrollo de infraestructura costera. Esta última ha degradado y destruido ecosistemas de protección natural como manglares y praderas marinas, los cuales tienen la finalidad de filtrar los contaminantes nocivos, absorber los nutrientes de la escorrentía y atrapar los sedimentos, aumentando la claridad y la calidad de las aguas marinas. Por lo que los servicios de protección de manglares y arrecifes de coral frente a fenómenos extremos y el cambio climático son importantes, siendo necesario priorizar la protección de los ecosistemas marinos, equilibrando el uso sostenible y la conservación de la biodiversidad y los hábitats.

2.8.1. Manejo Integrado de la Zona Costera

El Manejo Integrado de la Zona Costera (MIZC) es un proceso en constante evolución que implica la participación del gobierno y la sociedad para promover un uso ordenado y adecuado del territorio costero. Su objetivo es mejorar la calidad de vida de las comunidades, fomentando la colaboración entre diferentes actores y garantizando una gestión sostenible de los recursos costeros (www.procostas.org).

De acuerdo a Silva-Casarín et al., (2011), las metas de MIZC son:

- 1) Reducir la vulnerabilidad de la zona costera a riesgos naturales como lo son la erosión, inundación, salinización de acuíferos, así como la pérdida de hábitats costeros.
- 2) Mantener la conservación de la biodiversidad costero-marina y los procesos ecológicos esenciales, como son el flujo de nutrientes y energía.
- 3) Sostener los servicios ambientales provistos por los ecosistemas costero-marinos.
- 4) Resguardar la calidad de vida de las comunidades litorales, favoreciendo el desarrollo sustentable de las áreas marino-ostras.
- 5) Recuperar y rehabilitar zonas que han sido afectadas.
- 6) Procurar un aprovechamiento correcto de los recursos costeros evitando conflictos entre usos y procesos naturales.

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Área de Estudio

3.1.1. Definición y contexto del área de estudio en el litoral del Golfo de California.

El Golfo de California, también conocido como Mar de Cortés o Mar de Bermejo se encuentra en la parte noroeste de México y limita con los estados de Sonora, Sinaloa y Nayarit en el noroeste continental de México, así como la Península de Baja California (Figura 9). Es uno de los ecosistemas marinos más productivos y diversos del mundo (<https://www.tncmx.org>). Actualmente, se encuentra en un estado relativamente bueno de conservación, pero está siendo amenazado por la tendencia al alza de las actividades humanas principalmente en las áreas biológicamente importantes (Enríquez-Andrade et al., 2005) así como también por el cambio climático.

El perfil costero de la costa “este” se caracteriza por el hecho de que la pendiente media de la playa es de 7° y las arenas de la playa son principalmente gruesas (0.50-1.00 mm de escala Wentworth); en cuanto al perfil costero de la costa “oeste”, la pendiente media de la playa es de 4° y las arenas de la playa son principalmente medianas (0.25-0.50 mm de escala Wentworth). La marea astronómica semidiurna es predominantemente, caracterizada por una tendencia ascendente del rango medio de marea de la costa inferior a la alta, que van desde menos de 1.0 m en la costa inferior a más de 3.5 m en la costa superior (<http://www.mareografico.unam.mx>). En cuanto a las olas, estas son de baja altura (0.30 m) en el Golfo superior, mientras que en el golfo medio son de 0.60 a 0.90 m y en el Golfo inferior son de 1.50 a 1.80 m (Kasper-Zubillaga et al., 2007). El clima, en general, se caracteriza por el hecho de que la temperatura desciende en la parte superior del Golfo durante el invierno, produciendo heladas e incluso nevadas; en el verano, los ciclones tropicales (huracanes y depresiones) ocurren (principalmente) en la parte baja del Golfo; las lluvias son muy escasas en la parte superior del Golfo, y por lo general ocurren entre octubre y mayo; los vientos

predominantes son del noreste de noviembre a mayo, y en los otros meses son del sureste (Sans, 2018).



Figura 9. Área de estudio

3.1.2. Mazatlán como área de estudio prioritaria

Mazatlán forma parte del litoral del Golfo de California, dentro de la provincia geográfica denominada Llanura Costera de Mazatlán, entre las coordenadas $23^{\circ}15'$ y $23^{\circ}11'$ de latitud norte, $106^{\circ}29'$ y $106^{\circ}25'$ de longitud oeste (Figura 10). Este municipio cuenta con una superficie de 3,068 km². Se localiza dentro del Golfo de California y está considerada como una ciudad altamente turística, pesquera e industrial siendo una de las más importantes en la costa occidental de México (Beraud et al., 2009), sin embargo actualmente Mazatlán, es amenazado por la tendencia al alza de las actividades humanas principalmente las relacionadas al turismo e infraestructuras contribuyendo a una expansión urbana que afecta a áreas biológicamente importantes (Enríquez-Andrade et al., 2005).

El municipio de Mazatlán se considera con un nivel de peligro alto ante las tormentas tropicales ya que se encuentra en la trayectoria natural de huracanes y principalmente que el relieve de la ciudad frente a la costa es prácticamente plana. Debido a que se encuentra prácticamente sobre el nivel del mar, a excepciones de algunas zonas pequeñas, hace que en épocas de lluvias la ciudad de Mazatlán se inunde, sumado a esto también cuando existan coincidencias de las precipitaciones con las mareas altas (Beraud Lozano, 1997).

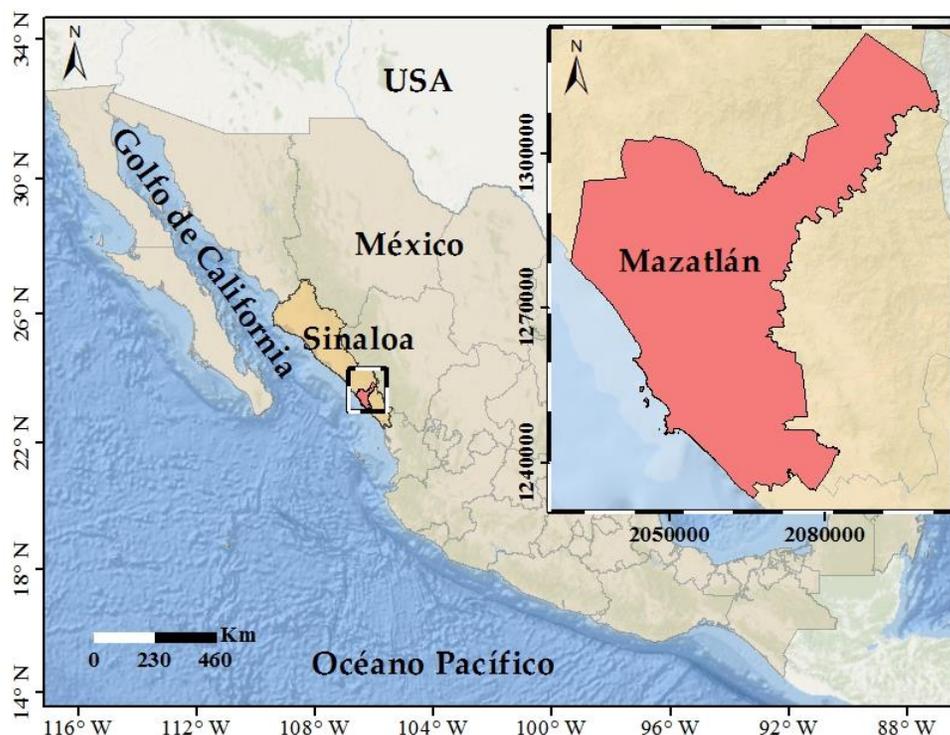


Figura 10. Área de estudio prioritaria.

La costa de Mazatlán se caracteriza por una marea mixta con un rango promedio de aproximadamente 1.0 m, un viento predominante del NO y tormentas tropicales ocasionales que migran a lo largo de la costa del Pacífico de México desde el SO golpeando la ciudad de Mazatlán (Oyedotun et al., 2018). Mazatlán está transformando el medio ambiente natural en artificial, lo cual ha causado que se pierdan recursos naturales y otros presenten mayores peligros. La degradación de los ecosistemas en especial los manglares en las zonas costeras hace que las inundaciones y erosión frente a las costas sean mayores y la costa de Mazatlán lo está presentando. El crecimiento urbano en los últimos años se ha dado principalmente a lo largo de su costa, sin tomar en cuenta los riesgos a los que se enfrentan, principalmente a los del cambio climático (Figura 11).

Para abordar las demandas en las zonas costeras y protegerlas de los riesgos, se necesita un enfoque integrado para la predicción de inundaciones y erosión que presentan las zonas costeras, así como el riesgo al que se encuentran expuestas. Una metodología exitosa debe basarse en una comprensión completa de los procesos naturales subyacentes a la dinámica de la zona costera. Esto incluye el análisis meteorológico y oceanográfico, el riesgo de tormentas, frentes fríos, aumento del nivel del mar, y el pronóstico futuro de la línea de costa, así como los cambios en los usos del suelo, en especial como las manchas urbanas se expanden.



Figura 11. Zonas de alta erosión.

Fuente (Aguilar, P., Mendoza & Silva, 2021)

3.2. Esquema metodológico

Para la realización de esta investigación, se siguió la metodología representada en la figura 12. Esta metodología consta de dos fases fundamentales: primero, se llevó a cabo la evaluación de riesgos derivados de la erosión costera, el aumento del nivel del mar y los fenómenos de ciclones tropicales. Segundo, la implementación del modelo CA-Markov para simular las modificaciones en el uso y la cobertura del suelo, con un enfoque particular en las áreas urbanas. Además, es relevante destacar que en la tabla 7 se detallan las fuentes de los datos utilizados para llevar a cabo cada una de las etapas del estudio. Esta tabla proporciona una referencia clara sobre la procedencia de la información clave que respalda nuestro análisis y evaluación.

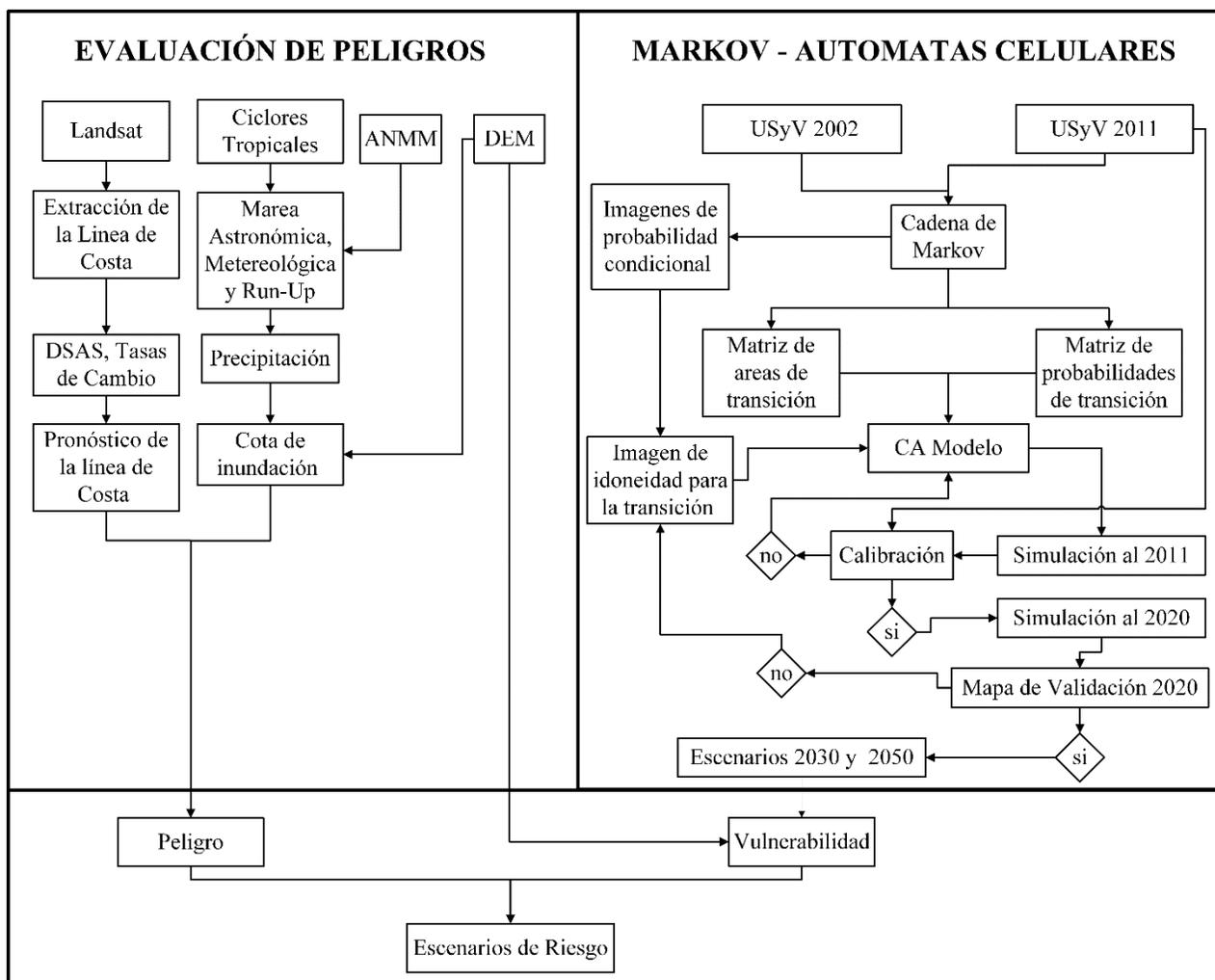


Figura 12. Esquema metodológico

Tabla 7. Bases de datos utilizadas.

Información	Fuente
Líneas de costa	Imágenes satelitales Landsat https://earthexplorer.usgs.gov
Usos de suelo y vegetación	INEGI: https://www.inegi.org.mx
Modelo digital de elevación	
Oleaje, viento y precipitación	ECMWF's ERA-Interim 5 http://www.ecmwf.int/research/era .
Mareas	Secretaria de Marina
	AVISO + https://www.aviso.altimetry.fr
Nivel del mar	Portal del nivel del Mar de la NASA: https://sealevel.nasa.gov/
Información de la trayectoria e intensidad de los huracanes	NE/NC Pacific HURDAT2 de la NOAA https://www.nhc.noaa.gov/data/

3.3. Marco de referencia

El IPCC menciona que el riesgo de los impactos del cambio climático surge de los peligros que aumentan con el cambio climático, de la vulnerabilidad y la exposición al que los sistemas naturales y humano enfrentan. Los cambios en el sistema climático son los impulsores de la peligrosidad, la exposición y la vulnerabilidad. Es por eso que esta investigación propone que sea tomado como base el marco conceptual del riesgo establecido por el IPCC (Figura 13) para la evaluación del riesgo de los impactos del cambio climático en zonas costeras, y así poder obtener un resultado holístico de los riesgos a los que se enfrentan las costas y en especial las ciudades costeras. Por lo tanto, será posible conocer la interacción entre los peligros o los diferentes impactos más allá de inundación y erosión en la costa, y la contemplar sectores importantes en términos de peligrosidad, exposición, vulnerabilidad y evaluación de riesgos IPCC (IPCC, 2014).

De forma general, el diseño del marco metodológico requiere ser multinivel a través de la evaluación de los componentes del riesgo, lo cuales se estudiarán de forma individual y se integran para obtener el riesgo de forma agregada. Y para ofrecer una visión holística de los riesgos a los que las áreas costeras están expuestas debido al cambio climático, se pretende considerar un sector estratégico para una evaluación y análisis más detallado dentro del Golfo de California ubicado mediante un enfoque cualitativo previo.

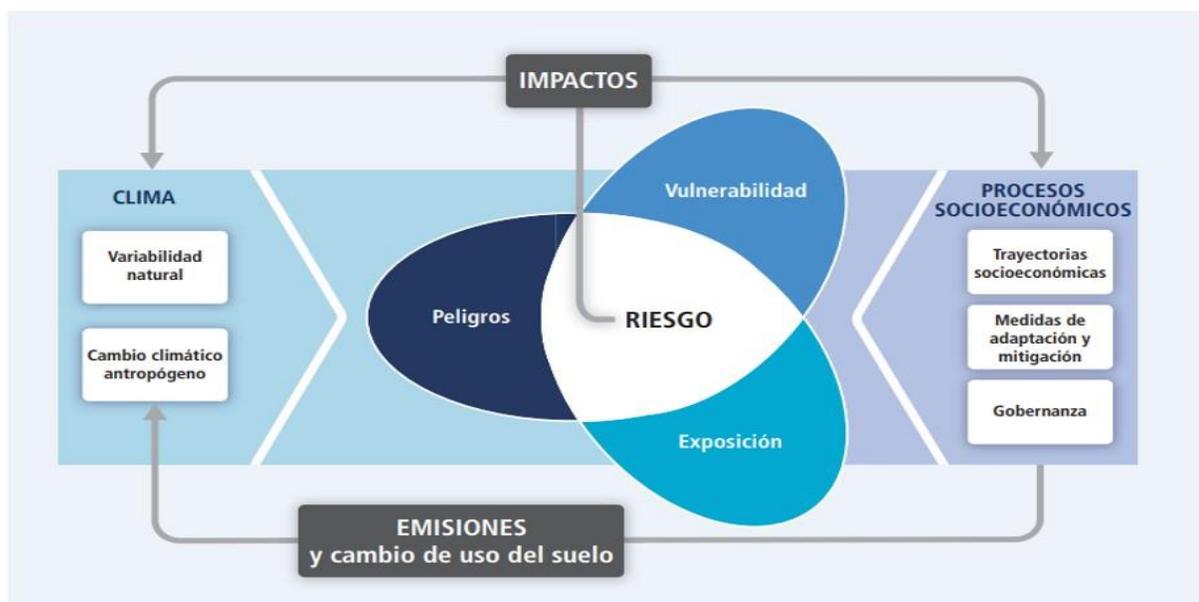


Figura 13. Marco de riesgo metodológico.
(IPCC, 2014)

3.4. Peligro por erosión costera

3.4.1. Preprocesamiento de imágenes satelitales y extracción de la línea de costa

Se utilizaron las imágenes históricas Landsat de la base de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés, <http://www.glovis.usgs.gov>, <https://earthexplorer.usgs.gov>), disponibles que cubren toda la costa del Golfo de California, para detectar el cambio en la costa entre 1981 y el 2020 (Tabla 8). Todas las imágenes utilizadas fueron del mes octubre para reducir los efectos de la variación cíclica anual del nivel medio del mar y la energía de las olas, en buena calidad y sin o poca nubosidad.

Tabla 8. Años de las imágenes históricas de Landsat utilizadas.

Datos de satélite/sensor	Año de adquisición
Landsat 3- Multi Spectral Scanner	1981
Landsat 5-Multi Spectral Scanner and Thematic Mapper	1993
Landsat 5-Multi Spectral Scanner and Thematic Mapper	2004
Landsat 7-Enhanced Thematic Mapper	2010
Landsat 8- Operational Land imager and Thermal Infrared Sensor	2020

Se realizó un preprocesamiento en todas las imágenes satelitales, la corrección radiométrica se realizó utilizando el software ENVI 5.3 con el método Reflectance Radiometric Calibration y Fast Line of Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH). El método Reflectance Radiometric Calibration se utilizó para afilar imágenes satelitales, mientras que el método FLAASH se utilizó para eliminar las perturbaciones causadas por la atmósfera (Jalaludin et al., 2020). Después de la corrección radiométrica, se utilizó el índice de agua de diferencia normalizada (NDWI) (McFeeters, 1996) para definir el límite entre la tierra y agua. Este índice utiliza las bandas 4 (verde) y 6 (NIR) del sensor MSS y las bandas 3 (verde) y 5 (NIR) del sensor OLI, a través de la siguiente ecuación:

$$NDWI = \frac{\text{Green} - \text{NIR}}{\text{Green} + \text{NIR}} \quad (3)$$

La relación entre estas bandas permitió maximizar la reflectancia del agua al trabajar con longitudes de onda en el verde, maximizando la reflectancia de la vegetación y minimizando la reflectancia de las masas de agua gracias a la banda infrarroja cercana (NIR)

(Maestri et al., 2019). Además de la aplicación del NDWI, se utilizaron bandas separadas de infrarrojo cercano (NIR) para comprobar el rango del índice aplicado.

En esta investigación, se utilizó la línea húmeda/seca como una aproximación del High Water Line (HWL). HWL es ampliamente utilizado en la investigación de los cambios en la costa (Oyedotun, 2016), y se define como el máximo de la última marea máxima (Jonah et al., 2016) puede ser visualmente discernible en la imagen de satélite (Boak & Turner, 2005). Su demarcación en las imágenes es difícil debido a la falta de conocimiento de las condiciones oceanográficas en el momento de tomar la vista aérea. Sin embargo, se ha demostrado que la línea húmeda/seca se aproxima estrechamente al HWL (Barbaro et al., 2019; Kermani et al., 2016).

3.4.2. Sistema digital de análisis de la costa.

DSAS realiza la estimación de las estadísticas de tasa de cambio aplicadas a una serie temporal de líneas de costa en formato vectorial. Estas líneas de costa se adquirieron a través de imágenes satelitales Landsat. Según se expone en (Himmelstoss, E.A. Henderson et al., 2018; Himmelstoss et al., 2021; E. R. Thieler et al., 2017) se siguieron los siguientes pasos:

- 1) Se creó una geodatabase en ArcGIS.
- 2) Se obtuvieron las líneas de costas como se especifica en el apartado 3.4.1.
- 3) Se estableció una línea base como se muestra en la figura 14, la cual se obtuvo mediante el suavizado de la línea más antigua desplazada 300 m mar adentro. Esta técnica de amortiguación es considerada altamente confiable y precisa para la definición de la línea base (Crowell et al., 1991).
- 4) Se generaron transectos perpendiculares a la línea base. En total se crearon 33225 transectos a intervalos de 100 m y una distancia de suavizado de 3000 m para Sonora y 2000 m para el resto de los estados (Figura 14).
- 5) Se calcularon las tasas de cambio de la costa aplicando DSAS el cual emplea modelos estadísticos que se basan en diversas medidas entre las posiciones históricas de la costa en cada uno de los transectos. Esto permitió generar distintas tasas de cambio, dependiendo de los métodos estadísticos seleccionados.

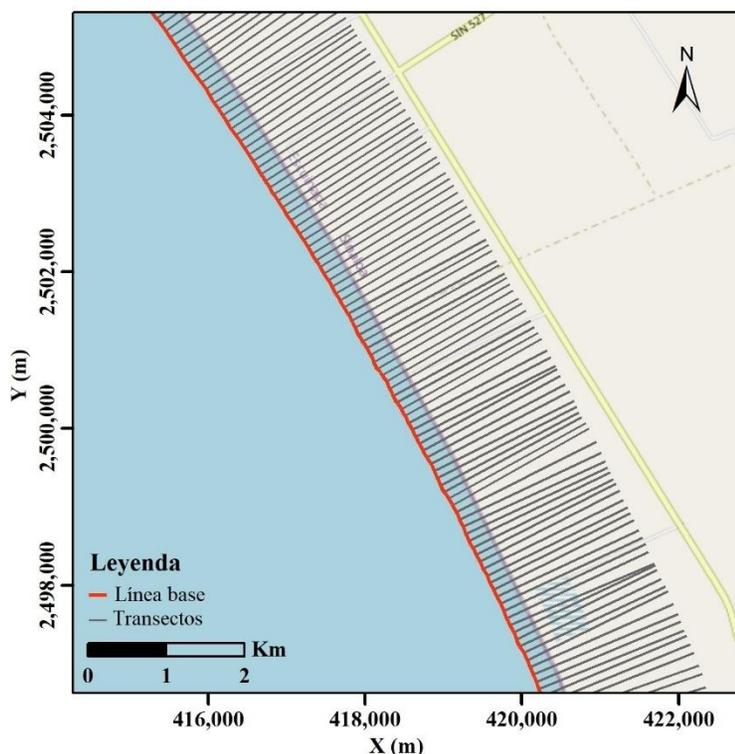


Figura 14. Transectos DSAS y línea de base

Los estadísticos obtenidos en esta investigación fueron:

Net Shoreline Movement (NSM), distancia total entre la primera y la última costa. Un parámetro estadístico calculado para cada transecto lanzado perpendicularmente a la costa (Himmelstoss et al., 2021; R. Thieler et al., 2009) y es representado mediante la ecuación 4, donde D es la distancia en metros:

$$NSM = D_{Nuevo} - D_{Viejo} \quad (4)$$

End Point Rate (EPR), se obtiene dividiendo la distancia del movimiento de la costa (NSM) por el tiempo (T) transcurrido entre las mediciones antiguas y las más recientes (Ecuación 5). EPR es adecuado para el análisis de la costa a corto plazo entre solo dos costas (Godwyn-Paulson et al., 2021; Kumar Das et al., 2021).

$$EPR (m/yr) = \frac{NSM}{T} \quad (5)$$

Linear Regression Rate (LRR), consiste en ajustar una línea de regresión de mínimos cuadrados a múltiples puntos de posición de la costa para un transecto en

específico(Himmelstoss et al., 2021). Se calcula trazando los puntos donde las costas están interceptadas por transectos y calculando la ecuación 6 de regresión lineal:

$$Y = a + bx \quad (6)$$

donde Y es la distancia en metros desde la línea base, x es el intervalo de fechas de la costa en años y b es la pendiente de la línea ajustada (m/años), es decir, la tasa de cambio de la costa LRR y a es la intersección. LRR es la pendiente de línea adecuada para el análisis a largo plazo del cambio de la línea de costa (Kuleli et al., 2011; Kumar Das et al., 2021), y se basa en conceptos estadísticos aceptados con una precisión satisfactoria (Baig et al., 2020). Las próximas posiciones de las líneas de costa se pronosticaron utilizando este método (Douglas & Crowell, 2000).

Weighted Linear Regression (WLR), determina una línea de mayor ajuste que LRR ya que da más peso a los datos confiables con un intervalo de confianza del 95% (Genz et al., 2007). De acuerdo a (Genz et al., 2007) mostrado en la ecuación 7 el peso ω se define como una función de la varianza en la incertidumbre de la medición (e) y el valor de ponderación ω está vinculado a datos de la costa antes de examinar su tasa de cambio (Godwyn-Paulson et al., 2021; Thierler et al., 2009).

$$\omega = \frac{1}{e^2} \quad (7)$$

WLR considera la ambigüedad en cada posición de la costa al calcular una línea de tendencia. El peso asignado para cada posición de la costa es el contrario de la incertidumbre posicional al cuadrado, de modo que las costas con mayor incertidumbre tienen menos influencia en la línea de tendencia que los puntos de datos con menor incertidumbre (Baig et al., 2020).

3.5. Peligro por ciclones tropicales y aumento del nivel del mar

3.4.2.1. Cota de inundación

Se desarrolló el cálculo para determinar la cota de inundación empleando ecuaciones paramétricas en la costa del municipio de Mazatlán. Para determinar la cota de inundación fue necesario calcular las variables Run-up, marea de tormenta y marea astronómica. El cálculo de la cota de inundación se basa en las ecuaciones propuestas por (García Contreras et al., 2013) como se muestra en la ecuación.

$$CI = MA + MM + RU \quad (8)$$

Donde: CI se refiere a la cota de inundación, MA representa la marea astronómica, MM es la sobreelevación debida a la marea meteorológica, RU es el run-up debido al máximo ascenso del oleaje considerando las unidades en metros.

Para esta investigación se considerara también el aumento del nivel medio del mar (ANMM) como se muestra en la ecuación 9 y figura 15 tal como lo considero (Alexandra Toimil et al., 2017) en su estudio.

$$CI = MA + MM + RU + ANMM \quad (9)$$

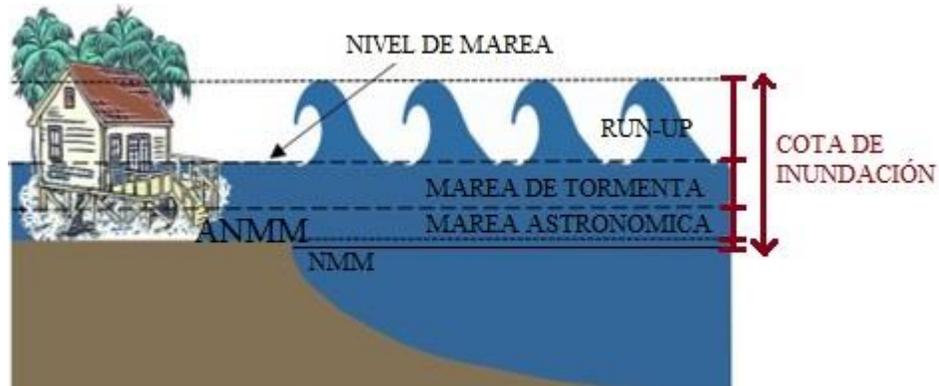


Figura 15. Cota de inundación.

La caracterización de los ciclones tropicales se puede realizar con el uso del modelo paramétrico de ciclones desarrollado por (Silva & Mendoza, 2012) y lo integran los sub-modelos de presión, viento y oleaje.

Sub-modelo de presión

El campo de presiones se calcula con la siguiente relación:

$$P_r = P_0 + (P_N - P_0)e^{-R/r} \quad (10)$$

Donde: P_0 toma los datos de la presión del centro del huracán; P_r la presión a una distancia radial r ; P_N la presión normal; y R se refiere a el radio de vientos ciclostróficos máximos.

Sub-modelo de viento

Se calculan los gradientes máximos del campo de vientos y la velocidad del viento a diez metros con base en el nivel del mar. El gradiente mayor de vientos para un ciclón se puede determinar como se muestra a continuación:

$$U_R = 21.8\sqrt{P_N - P_0 - 0.5fR} \quad (11)$$

Donde: U_R corresponde al gradiente mayor de vientos (km/h); f al parámetro de Coriolis, $f \approx 0.525 \sin \phi$; y ϕ es la latitud ($^\circ$).

La velocidad del viento que se calcula a diez metros a partir de nivel del mar para un ciclón y para una distancia r medida a partir del centro del ciclón, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$W = 0.886[F_v U_R + 0.5V_F \cos(\theta + \beta)] \quad (12)$$

Donde: W hace referencia a la velocidad del viento a diez metros a partir del nivel del mar (km/h); V_F se refiere a la velocidad de traslación (km/h); $(\theta + \beta)$ es el ángulo total entre V_F y U_R con base a una distancia radial r partiendo del centro del huracán y es positiva al lado derecho y negativa al izquierdo de la trayectoria del huracán;

F_v es un factor que se evalúa como la relación de la velocidad del viento en r como se muestra a continuación:

$$F_v = 1 - 0.971 \exp\left[-6.826 \left(\frac{r}{R}\right)^{4.798}\right]; \frac{r}{R} < 1 \quad (13)$$

$$F_v = \exp\left\{A \ln^3\left(\frac{r}{R}\right) \exp\left[B \ln\left(\frac{r}{R}\right)\right]\right\}; \frac{r}{R} < 1$$

Donde:

$$A = -0.99 [1.066 - \exp(-1.936N_C)] \quad (14)$$

$$A = -0.357 [1.4456 - \exp(-5.2388N_C)] \quad (15)$$

$$N_C = \frac{fR}{U_R} \quad (16)$$

Sub-modelo de oleaje

Para un ciclón en movimiento la altura de ola significativa, H_s , se da a partir de la siguiente ecuación:

$$H_s = 0.2887F_H \left(1 - \frac{6.69N_C}{1 + 10.3N_C - 3.25N_C^2} \right) \sqrt{R(P_N - P_0)} \left(1 + \frac{V_F \cos(\theta + \beta)}{2U_R F_V} \right) \quad (17)$$

Donde: H_s se refiere a la altura de ola significativa (m); F_H es el factor de altura de ola calculada a partir de las siguientes ecuaciones:

$$\begin{aligned} F_H &= A; & \frac{r}{R} &\leq 1 \\ F_H &= A - \frac{N_C \left(\frac{r}{R} - 1 \right)}{1 + B \left(\frac{r}{R} - 1 \right) + \frac{N_C \left(\frac{r}{R} - 1 \right)^2}{10}}; & \frac{r}{R} &> 1 \\ F_H &= 0; & F_R &< 0 \end{aligned} \quad (18)$$

$$A = \frac{1 + 0.8974 \left(\frac{r}{R} - 1 \right)}{1 + 0.742 \left(\frac{r}{R} - 1 \right) + 0.073815 \left(\frac{r}{R} - 1 \right)^2} \quad (19)$$

$$B = \frac{0.37N_C^{2.55}}{0.13 + N_C^{2.55}} \quad (20)$$

$$T_s = 12.1 \sqrt{H_s/g} \quad (21)$$

Donde: g se refiere a una constante que es la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²).

Cálculo del Run – Up

Para obtener el valor correspondiente al run-up se utilizará la ecuación dada por (H. F. Stockdon et al., 2006), en la que:

$$R_U = 1.1 \cdot 0.35 \beta_f \sqrt{H_0 L_0 + \frac{\sqrt{H_0 L_0 (0.563 \beta_f^2 + 0.004)}}{2}}; \quad Ir \geq 0.3 \quad (22)$$

$$R_U = 0.043 \sqrt{H_0 L_0}; \quad Ir \geq 0.3$$

Donde: R_U corresponde a run-up (m); β_f a la pendiente de la playa; H_0 se refiere a la altura de ola en aguas profundas, L_0 es la longitud de onda (m); I_r es el número de Iribarren.

La longitud de onda en aguas profundas y el número de Iribarren se calculan con las siguientes ecuaciones:

$$L_0 = \frac{gT^2}{2\pi} \quad (23)$$

Donde: T se refiere al periodo de ola

$$I_r = \frac{\beta}{\sqrt{H_0 L_0}} \quad (24)$$

Donde: β hace referencia a la pendiente de la playa.

Sobreelevación por marea de tormenta

La marea de tormenta representa un mayor riesgo para la población. Se define como una sobreelevación del nivel del mar causado por fenómenos meteorológicos extremos, como ciclónicos y frentes fríos. Se genera por la dirección del viento hacia la costa y el efecto de barómetro invertido. La marea se desvanece sin ocasionar daño alguno cuando el fenómeno ocurre en aguas profundas y cuando se presenta cerca a la costa se ve muy afectada (Silva & Mendoza, 2012). El que más influye en la altura del agua hacia tierra es el viento, también las mareas astronómicas son importantes en una marea de tormenta si la presencia del ciclón coincide con la pleamar. Se puede sumar a esto un factor más que es la anchura y la pendiente de la costa.

Se utilizará el modelo propuesto por la Universidad de Cantabria (G.I.O.C., 2000), para calcular la marea de tormenta, este modelo considera por separado la presión atmosférica y la velocidad del viento.

La sobreelevación debida a la presión se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$S_{VP} = 0.01026 (P_n - P_C)(1 - e^{-R/r}) \quad (25)$$

Donde: S_{VP} se refiere a la sobreelevación por el gradiente de presiones (m); P_C a la presión central del huracán (mb); P_n representa la presión en el punto seleccionado (mb); R se refiere al radio ciclotrófico del huracán (km); y r es el distanciamiento a partir del centro del

ciclón al punto seleccionado del cual se quiere obtener la sobreelevación (km). La sobreelevación debida a la acción del viento se muestra de manera simplificada se muestra en la siguiente ecuación:

$$\eta_v = \frac{Kw^2x}{g(h_1 - h - \eta_v)} \ln\left(\frac{h_1}{h + \eta_v}\right) \quad (26)$$

Donde: η_v se refiere a la sobreelevación por el viento (m); K al coeficiente experimental adimensional (3.3×10^{-6}); w a la componente de la velocidad del viento que sea perpendicular a la costa (m/s); h se refiere a la profundidad del punto seleccionado del cual se quiere obtener la sobreelevación (m); h_1 se refiere a la profundidad a la que inicia la sobreelevación ocasionada por el viento (m); x es la distancia horizontal entre h y h_1 (m).

Estimación de la presión central de ciclones en el pacífico

La mayoría de los modelos paramétricos para el cálculo de presión, viento y oleaje que se reportan en investigaciones requieren la posición del centro del huracán, presión central, valor de presión, entre otros. Debido a esto y a que no todos los reportes meteorológicos dan dichos valores, el modelo HURAC elimina dicha deficiencia de información y utiliza el criterio de (Silva et al., 2002); el cual estima la presión central en función de la velocidad superficial máxima del viento, en específico para el océano Pacífico como se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_0 = 1017.45 - 0.1437V_v - 0.00088V_v^2 \quad (27)$$

Donde: P_0 hace referencia a la presión central del huracán (mb); y V_v a la velocidad máxima del viento promedio en un minuto (km/h).

3.4. Simulación del crecimiento urbano a través de Autómatas Celulares-Markov

Los cambios de usos de suelo y vegetación se han analizado para el periodo de 2002-2011, 2011-2020; con el interés de conocer los cambios en estos periodos de tiempo, información que nos servirá para simular el futuro a 2030 y 2050. Se utilizaron los mapas oficiales de Uso de Suelo y vegetación (USV) de INEGI (tabla 9). Los mapas USV fueron homogenizados en 6 categorías (acuicultura, agricultura, bosque, manglar, selva y urbano); así como también se aplicaron correcciones topológicas y geométricas y una serie de operaciones espaciales para homogenizar la información con un tamaño de píxel de 50 m.

Tabla 9. Uso de Suelo y Vegetación utilizados.

Serie / año	Formato, Escala/Resolución	Insumos de las series de mapas
III / 2002	Vectorial, 1:250,000	LANDSAT
V / 2011	Vectorial, 1:250.000	LANDSAT 5 TM (30 m)
VII / 2020	Vectorial, 1:250,000 (Actualización)	LANDSAT 8 (30 m)

Esta simulación se aplicó mediante el modelo CA-MARKOV integrado en el software Idrisi Terrset. Es un modelo que utiliza evaluación multicriterio (EMC) con el cual entrena a partir de la generación de los mapas de idoneidad, cadenas de Márkov para la estimación de la cantidad de cambios y probabilidades y autómatas celulares (CA) para la fase de localización.

Para entrenar el modelo CA-Markov, los archivos de entrada fueron un mapa base, la matriz de área de transición de Márkov (obtenida del proceso de Márkov) y un grupo de mapas de idoneidad obtenidos de la evaluación multicriterio, dado que el modelo CA-Markov se basa en las probabilidades obtenidas a partir de las cadenas de Márkov, pero se limita a las áreas establecidas con la mayor idoneidad que se generan a partir de la EMC. Luego este inicia un proceso iterativo de reasignación de usos de suelo hasta que cubre todas las zonas o área predichos por las Cadenas de Márkov.

3.4.1. Generación de probabilidades de transición y área de transición aplicando el modelo de Cadenas de Márkov

Se requiere de la ejecución de modulo llamado Márkov en el software IDRISI, donde a partir de él se obtendrán las matrices de probabilidad de transición, así como sus áreas de

cambio. Este método se basa en cruzar mapas de uso del suelo en dos periodos de tiempo y así obtener una matriz de probabilidad de cambio para un tercer período que se quiera analizar. Para cada proyección, esta herramienta generó una matriz de probabilidades de transición, así como también una matriz de áreas de transición la cual muestra el número de píxeles que puedan o se espera que cambien de una clase de uso de suelo a otra durante un período de tiempo establecido, también es importante mencionar que da una colección de imágenes de áreas de adecuación/aptitud para cada uno de los usos de suelo, pero no corresponden a los mapas de idoneidad.

3.1.1. Desarrollo de criterios (restricciones y factores) para la obtención del mapa de idoneidad.

Los mapas de idoneidad son uno de los requisitos para usar el CA-Markov , estos mapas determinan el estado del cambio, representan la posibilidad de cambio de un píxel de una categoría a otra o que permanezca sin cambios. En otras palabras, la idoneidad significa la cualidad de tener propiedades que son apropiadas para propósitos específicos y el análisis de idoneidad es un proceso que identifica el patrón espacial más apropiado del futuro de uso y cobertura del suelo según su propósito. Los criterios para las diferentes categorías tendrían una idoneidad diferente, ya que los criterios de idoneidad urbana serían diferentes a los de idoneidad agrícola debido a que en cada caso los lugares adecuados tienen características diferentes. En esta investigación nos centramos en el mapa idóneo para que se dé el crecimiento urbano.

Estos mapas se generaron utilizando evaluación multicriterio (EMC) Figura 16. EMC es muy utilizado para la toma de decisiones espaciales principalmente las orientadas en la análisis y planificación u ordenamiento del territorio, es ampliamente aplicada para la obtención de los mapas de aptitud del territorio (Plata rocha et al, 2010). EMC considerara la capacidad del territorio para tomar un determinado uso (Paegelow, M., Camacho Olmedo, M.T. y Menor Toribio, 2003).

La EMC se realizó en el software Idrisi Terrset, mediante el módulo Decision Wizard, para el cual se requieren factores que se consideren intervengan en el comportamiento en este caso del crecimiento urbano. Se seleccionaron variables relacionadas con el comportamiento de los centros urbanos en específico con el del área de nuestro estudio; en base a esto se

consideraron cinco factores: pendientes, distancia a la zona urbanizada, distancia a carreteras, distancia a cuerpos de agua y distancias a la línea de costa; y se seleccionaron tres más como restricciones para el crecimiento urbano es decir, zonas donde el crecimiento urbano no se puede dar bajo las condiciones en la que se encuentra el territorio como las áreas que se encuentran urbanizadas, cuerpos de agua y red de carreteras.

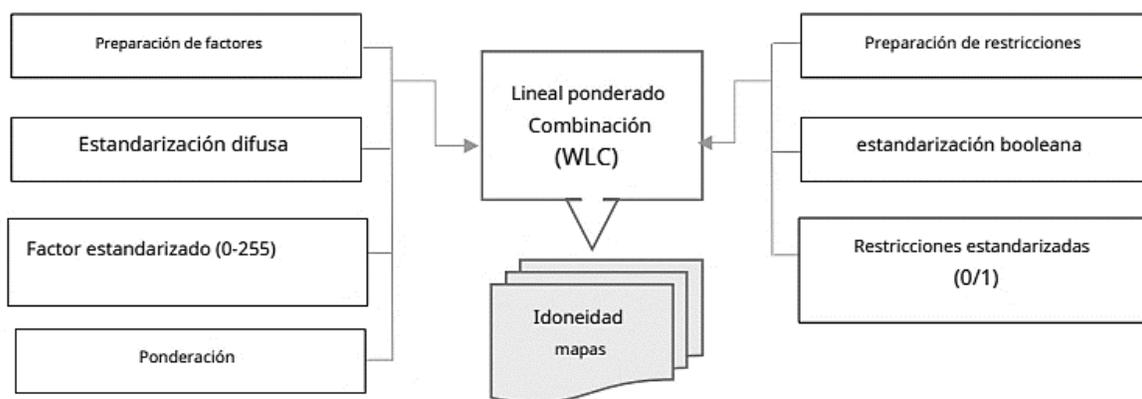


Figura 16. Esquema para la obtención de los mapas de idoneidad.

Los factores utilizados para la obtención del mapa de idoneidad fueron estandarizados dado que las variables se expresan en unidad de medidas diferentes, se generaron a una escala de 0 a 255 mediante el módulo FUZZY de Idrisi. Mientras que las restricciones son binarias de 0 y 1, donde 0 restringe o impide que se dé un cambio y 1 lo permite. Posteriormente se estableció el peso para cada uno de los factores en la EMC, mediante el método de Jerarquías Analíticas (Gómez y Barredo, 2006), en el cual se asigna un valor a cada uno de los factores de acuerdo con su nivel de importancia (Figura 17). Como resultado se obtendrá un mapa de idoneidad para el crecimiento urbano mediante la suma lineal ponderada de todos los factores y considerando también la restricción indicada con esos factores.

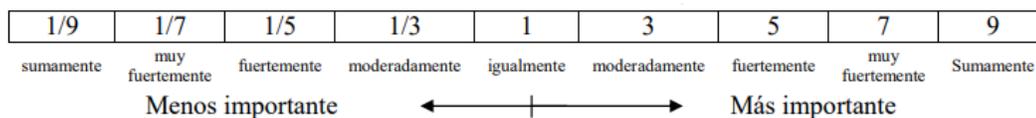


Figura 17. Jerarquías analíticas

Fuente: (Eastman, 2003)

3.1.2. Validación del modelo de Autómatas celulares- Markov

El propósito de la validación del modelo de salida es monitorear qué tan bien se ajustan los datos reales a la salida del modelo (Kityuttachai et al., 2013). Una vez obtenidos los escenarios de crecimiento urbano, se valida comparando el año simulado con el real, es decir, el resultado obtenido con CA-Markov vs el mapa del año 2020 real. Para lo cual, se obtuvo un índice estadístico Kappa (Tabla 9), el cual nos da una perspectiva de la calidad del resultado obtenido. Klocation mide el error de localización, en otras palabras, mide si la ubicación de un uso en un mapa es diferente de la ubicación del mismo uso en otro mapa. Por otro lado, Kquantity cuantifica el error que se genera con la cantidad de celdas pertenecientes a un uso en un mapa es diferente a la cantidad de celdas de ese uso en específico en otro mapa (Pontius, 2000; Sousa et al, 2002). Estos índices se obtuvieron usando la herramienta VALADATE de IDRISI Terrset.

Tabla 10. Niveles de concordancia del índice Kappa. Fuente: (Painho & Caeiro, 2002)

Valores de Kappa	Nivel de concordancia
< 0.00	Pobre
0.00 – 0.20	Leve
0.21 – 0.40	Razonable
0.41 – 0.60	Moderado
0.61 – 0.80	Considerable
0.81 – 1.00	Casi perfecto

Además, se reforzó la validación del modelo mediante dos parámetros planteados por (Robert Gilmore Pontius & Millones, 2011) que indican el desacuerdo de cantidad QD (quantity disagreement), que ocurre cuando la clasificación no coincide en términos de cantidad, es decir, cuando el número de celdas de una categoría específica en el mapa simulado difiere del número de celdas de la misma categoría en el mapa de referencia; y desacuerdo de asignación AD (disagreement allocation), que ocurre cuando la ubicación espacial de una categoría de suelo en un mapa simulado difiere de la ubicación espacial de esa misma categoría en el mapa de referencia.

3.2. Riesgo ante impactos del cambio climático

Se procesó la información geográfica organizada en capas temáticas con el fin de llevar a cabo la superposición cartográfica y obtener resultados. Esta metodología se empleó para analizar tanto las características espaciales como temáticas de los datos geoespaciales obtenidos. La superposición cartográfica realizada en el entorno de un Sistema de Información Geográfica (SIG) facilitó la identificación de las diversas áreas de riesgo en la ciudad de Mazatlán, especialmente en su zona costera. Se integraron los escenarios generados por el modelo CA-Markov del crecimiento urbano con los mapas de peligro por erosión costera, ciclones tropicales y aumento del nivel del mar. De esta manera, se logró aplicar el marco establecido por el IPCC, en el que se basa esta investigación, para obtener un mapa final de riesgo ante los impactos del cambio climático.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Peligro por erosión costera

4.1.1. Tendencias y variabilidad de la línea de costa.

Se obtuvieron las líneas de costa a lo largo del Golfo de California para los años 1981, 1993, 2004, 2010 y 2020 como se muestra en la siguiente figura.

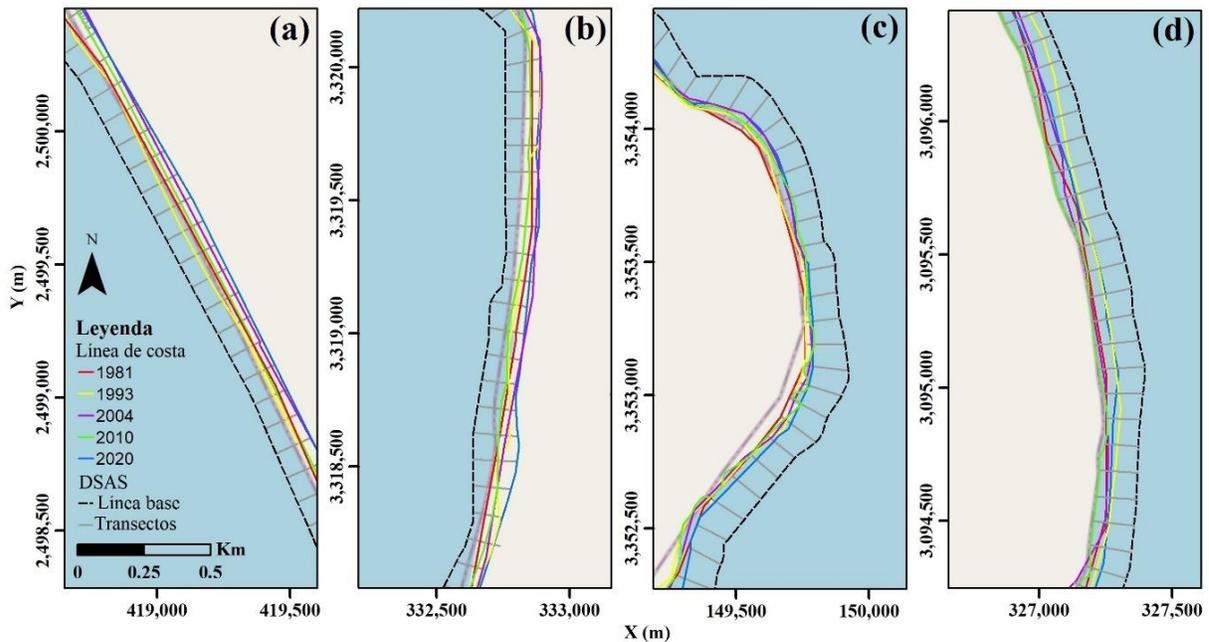


Figure 18. Líneas de costa. a) Sinaloa, b) Sonora, c) Baja California, d) Baja California Sur

En la presente investigación es necesario tener presente que la línea de costa hace referencia solo a una aproximación y es importante estar consciente de esta variabilidad que pudiera surgir en su obtención, así como de la resolución de las imágenes satelitales utilizadas y la larga extensión del Golfo de California. Por lo tanto, es importante mencionar que el objetivo de este apartado en la tesis fue evaluar las tasas de erosión y acreción para la selección de una área específica para una investigación más profunda, así como el pronóstico

de la línea de costa a 10 y 30 años y no la cuantificación y pronóstico preciso de los desplazamientos de la costa.

4.1.2. Análisis del cambio a largo plazo de la costa entre 1981 y 2020.

El análisis de la línea de costa en el periodo de 40 años utilizando técnicas geoespaciales y estadísticas, contribuyó a una mejor comprensión de la variabilidad costera a lo largo del Golfo de California. Se realizó a partir de las líneas de costa para los años 1981, 1993, 2004, 2010 y 2020 incorporadas en la geodatabase al igual que la línea base y un total de 33225 transectos a lo largo del Golfo de California, de los cuales 5937 fueron para Sinaloa, Sonora con 10906, Baja California y Baja California Sur con 6293, 10089 respectivamente. Todos los transectos se cortaron desde la línea base hasta la línea más lejana.

Se obtuvieron los modelos estadísticos NSM, EPR, LRR y WLR para una mayor comprensión de los movimientos que presento la línea de costa hasta la actualidad. Al tener en cuenta la resolución de la imagen y el periodo analizado se obtuvo un rango de incertidumbre para las unidades de las tasas de cambio, de 0.75 m/año. En vista de las incertidumbres, los resultados de la tasa de cambio de la costa a partir de LRR se obtuvieron con un nivel de confianza de 95%.

Los estadísticos obtenidos para la costa de Golfo de California se clasificaron en 4 categorías con base en lo establecido por (Franco-Ochoa et al., 2020; Zambrano-Medina et al., 2023) como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 11. Clasificación de las tasas de cambio

EPR (m / año)	Clasificación de la costa
<-2	Erosión alta
>-2 a <-1	Erosión moderada
>-1 a <0	Erosión baja
>0	Acreción

4.1.3. Tasas de Cambio en las costas del Golfo de California.

Los resultados sobre el movimiento de la línea de costa revelan que existe movilidad significativa hacia tierra (erosión) y menor hacia el mar (acreción) en diferentes sectores del Golfo de California. En la Tabla 12 se detallan los desplazamientos en términos de NSM

donde se proporciona información detallada de los movimientos que se presentaron. A lo largo de las costas, 22295 transectos presentan movimiento hacia tierra y 10930 movimiento hacia el mar. La distancia mayor hacia tierra fue de -2880.39 m ubicado en la costa de Sonora, mientras que la mayor positiva hacia el mar de 1325.71 localizado en la costa de Sinaloa.

Tabla 12. NSM

Estadísticos	Sinaloa	Sonora	BC	BCS	G.C
Numero de transectos	5937	10906	6293	10089	33225
Distancia media (m)	-39.61	-176.9	-105.46	-4.32	-81.57
Número de transectos con distancia negativa	4417	9558	2749	5571	22295
Distancia negativa máxima (m)	-515.90	-2880.39	-1650.21	-176.94	-2880.39
Media de todas las distancias negativas (m)	-105.48	-210.54	-281.73	-30.95	-157.17
Número de transectos con distancia positiva	1520	1348	3544	4518	10930
Distancia positiva máxima (m)	1325.71	747.76	278.6	318.92	1325.71
Media de todas las distancias positivas (m)	116.424	65.2	37.64	29	62.06

El análisis estadístico EPR revelo que los cambios fueron significativos a lo largo del Golfo de California, el cual presento una tasa de cambio de 2.16 m/año (Tabla 13), similar a lo reportado por (Franco-Ochoa et al., 2020), quien analizó la variabilidad de la línea de costa con el estadístico EPR en el Golfo de California. EPR no toma en cuenta la variabilidad entre todas las líneas de costa ya que considera solo la línea más antigua y la actual. Por lo tanto, en esta investigación se discuten los resultados en términos de LRR para considerar todas las líneas de costa en el periodo analizado, además se compara con los resultados de WLR.

Tabla 13. EPR

Estadísticas (m/año)	Sinaloa	Sonora	BC	BCS	GC
Tasa media de cambio	-1.32	-4.56	-2.69	-0.09	2.16
Máxima erosión	-26.54	-118.36	-42.83	-29.93	-118.36
Media de las tasas de erosión	-3.23	-5.44	-7.39	-0.76	-4.20
Máxima acreción	66.09	40.25	7.21	16.58	66.09
Media de las tasas de acreción	4.24	1.63	0.97	0.74	1.89

Los resultados de LRR (Tabla 14) muestran una tasa de cambio general de -2.20 m/año. El 72% de la costa muestra avance hacia tierra con una tasa de erosión de 3.86 m/año,

mientras que el 28% presento ganancia hacia el mar con una tasa de 2.05 m/año. En el caso de WLR, asigna un mayor peso a los puntos de intersección de transectos con menor valor de incertidumbre para obtener la línea de mejor ajuste, sin embargo, los valores de WLR (Table 15) difieren en centímetros con LRR en el estudio. La tasa de cambio general WLR para el Golfo fue de -1.78 m año^{-1} , presentando una diferencia de 0.42 respecto a LRR. Por este motivo y que el pronóstico de la posición futurista de la costa se obtuvo a partir de los resultados de LRR, en esta investigación se discuten los resultados en términos de LRR principalmente.

Tabla 14. LRR

Estadísticas	Sinaloa	Sonora	BC	BCS	G.C
Tasa media de cambio (m/año)	-1.58	-4.57	-2.35	-0.31	-2.20
Porcentaje de todos los transectos que presentar erosión (%)	78.64	88.05	47.83	66.14	72.19
Porcentaje de todos los transectos que tienen erosión estadísticamente significativa (%)	33.54	36.36	3.91	10.14	21.91
Máxima erosión (m/año)	-20.87	-118.02	-46.27	-5.92	-118.02
Media de las tasas de acreción (m/año)	-3.33	-5.42	-5.88	-0.83	-3.86
Porcentaje de todos los transectos con acreción (%)	21.36	11.95	51.17	33.86	27.62
Porcentaje de todos los transectos que presentan una acreción estadísticamente significativa (%)	5.12	1.84	5.13	3.14	3.46
Máxima acreción (m/año)	55.21	18.34	6.54	6.43	55.21
Media de todas las tasas de acreción (m/año)	4.89	1.75	0.89	0.7	2.05

Tabla 15. WLR

Estadísticas	Sinaloa	Sonora	BC	BCS	G.C
Tasa media de cambio (m/año)	-1.12	-3.69	-1.89	-0.45	1.78
Porcentaje de todos los transectos que presentar erosión (%)	68.87	77.84	53.54	69.38	69.06
Porcentaje de todos los transectos que tienen erosión estadísticamente significativa (%)	18.41	22.14	1.57	7.54	13.21
Máxima erosión (m/año)	-32.27	-130.32	-37.74	-28.1	-130.32
Media de las tasas de acreción (m/año)	-2.91	-5.32	-2.77	-1.02	-3.00
Porcentaje de todos los transectos con acreción (%)	31.13	22.16	46.46	30.62	30.93
Porcentaje de todos los transectos que presentan una acreción estadísticamente significativa (%)	5.51	1.12	2.19	1.71	2.32
Máxima acreción (m/año)	64.04	60.61	6.20	36.13	64.04
Media de todas las tasas de acreción (m/año)	3.74	2.06	0.82	0.82	1.86

Entre los principales factores que modifican la línea de costa se encuentran las corrientes de marea, patrones de oleaje, cambios batimétricos, tendencias de clima, aumento del nivel del mar, cambio de uso de suelo y el acaparamiento de recursos además de otros elementos antrópicos como rompeolas, espigones, entre otros, suman a la modificación de la línea de costa. Otro factor importante a considerar es la disminución de sedimentos que llegan al mar debido al represamiento de los ríos que modifican el cauce natural produciendo cambios que afectan a las tasas de sedimentación o pérdida por transporte costero y generan cambios en la línea de costa (Jiménez-Illescas Ángel et al., 2018). Por lo tanto, los resultados de erosión o acreción en esta investigación no pueden ser atribuidos a un factor específico ni solo a procesos ambientales (variabilidad climática estacional, interanual y decadal), cambio climático o antrópicos, concordando con (Coca & Ricaurte-Villota, 2022; Franco-Ochoa et al., 2020). En la actualidad, esta problemática no solo se presenta en el litoral del Golfo de California en México, sino en todo el mundo, países como China, Japón, Chile, Estados Unidos, Argentina y Rusia donde se ha transformado más de la mitad de la costa derivado de la erosión y uso de suelo, ha tenido un fuerte impacto en los procesos costeros y en el suministro de sedimentos.

En las siguientes secciones la costa del área de estudio se dividió por estado para facilitar el análisis y la interpretación de los cálculos.

4.1.4. Tasas de cambio en las costas de Sinaloa

A lo largo de la costa de Sinaloa 4417 transectos presentan distancias negativas y 1520 distancias positivas. El mayor movimiento hacia tierra fue de 515.90m y el mayor movimiento hacia el mar fue 1324.71 m (Figure 19a y table 12). LRR (Figure 19b y table 14) muestra que Sinaloa presentó erosión constante con una tasa de cambio general de cambio de -1.58 m/año a lo largo de su costa.

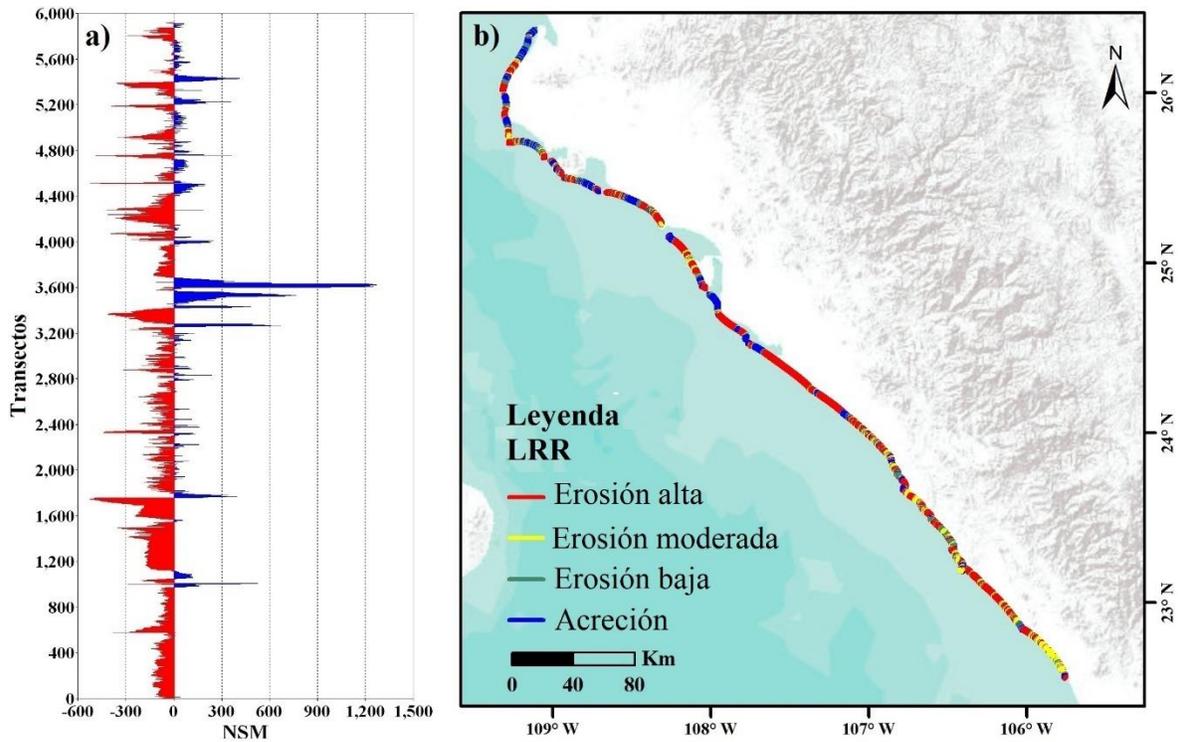


Figure 19. a) Variación en NSM, y b) Tasas de cambio LRR para Sinaloa.

El 78% de la costa se encuentra en erosión con una tasa promedio de -3.33 m/año. El resto de su costa se encuentra en acreción con una tasa promedio de 4.89 m/año. Se observó una tasa máxima de erosión y acreción de -20.87 y 55.21 m/año respectivamente. Mientras que WLR presento una tasa de cambio general de -1.12 m/año (Table 15) menor a la de LRR. Sin embargo, sigue una tendencia similar a LRR (Figura 20).

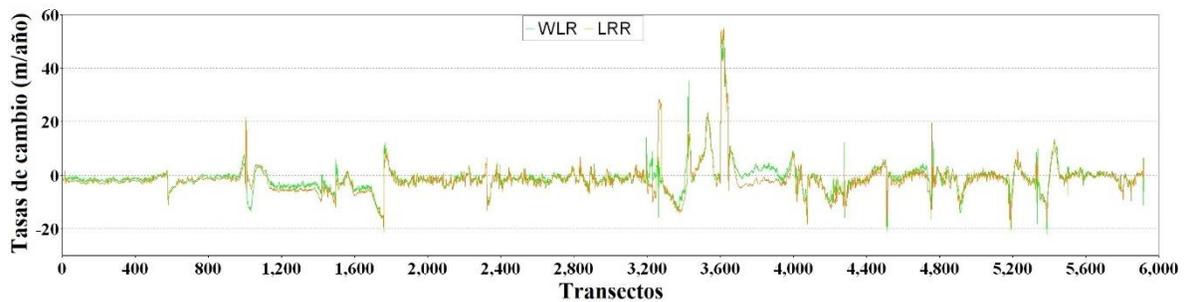


Figura 20. Tasas de cambio WLR y LRR en la costa de Sinaloa

La mayor parte de la costa de Sinaloa se encuentra en erosión, lo cual se atribuye principalmente al represamiento de la mayoría de sus ríos, ya que retienen sedimentos que llegaban al mar (Jiménez-Illescas Ángel et al., 2018), ocasionando erosión principalmente a los costados de sus desembocaduras. Otro motivo por el que la costa sinaloense es altamente erosionada es que está sometida a constantes fenómenos meteorológicos al encontrarse sobre un corredor natural de ciclones tropicales. Esta situación hace que la variabilidad de la línea de costa sea mayor presentando erosión a corto plazo ocasionada por estos fenómenos y que en ocasiones queda permanente, afectando tanto al sistema costero como a las infraestructuras cercanas a la línea de costa.

Sinaloa también cuenta con obras antropogénicas a lo largo del litoral que directa e indirectamente afectan en la aportación de sedimentos como escolleras, espigones, rompeolas y presas, además a esto se suman construcciones de obras de protección particulares, pues el 80% de la población estatal se encuentra localizada cercana a estos ambientes costeros aunado a intensas actividades productivas.

En Sinaloa existen algunas investigaciones costeras en áreas más específicas como las realizadas en playa Las Glorias, datos de esta investigación indican que es una playa altamente erosionada, similar a lo reportado por (Zambrano-medina, 2022) donde analizaron los cambios históricos de la línea de costa para encontrar los principales impulsores de los cambios y su riesgo ante la erosión costera encontrando una tasa de cambio general de -5.4 m/año. (Jiménez-Illescas et al., 2019) también analizó el comportamiento de dicha playa y encontró que playa las Glorias ha perdido hasta 300 m perpendiculares a la costa a lo largo de su 4.5 km sugiriendo el uso de geotubos para disminuir el problema. Otras playas como las de Mazatlán han sufrido erosión a un ritmo de -1.9 ± 0.9 m/año durante la última década (Oyedotun et al., 2018), datos similares a los obtenidos en este estudio.

4.1.5. Tasas de cambio en las costas de Sonora

Sonora presentó 9558 transectos con distancias negativas y un mayor movimiento hacia tierra de -2880.39 m, mientras que 1348 con distancias positivas y un máximo movimiento hacia el mar de 747.76 m (Figure 21a y table 12). La costa de Sonora presentó una tasa de cambio general LRR de -4.57 m/año, siendo en este estudio el estado con la mayor variabilidad en su costa. Los resultados obtenidos muestran que el 88% de su costa se

encuentra en erosión con una tasa promedio de -5.42 m/año; mientras que el resto está sometida a acreción con un promedio de 1.75 m/año.

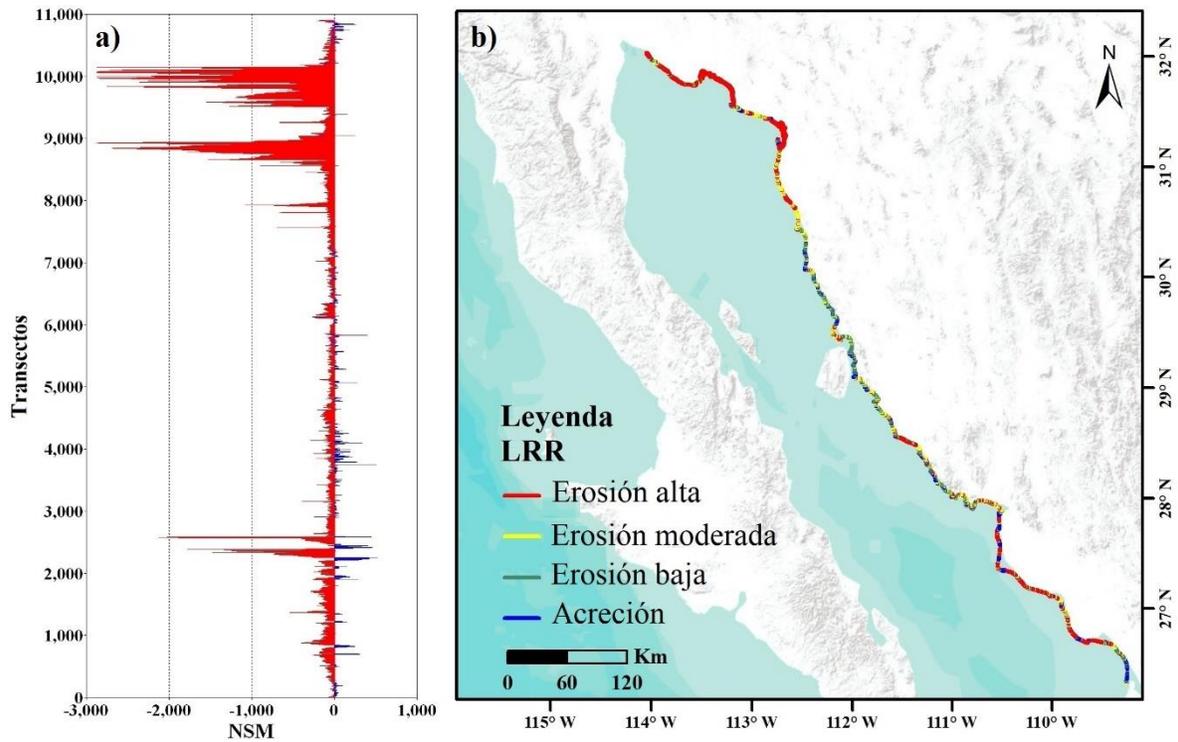


Figure 21. a) Variación en NSM, y b) Tasas de cambio LRR para Sonora.

Se observó una tasa máxima de erosión y acreción de -118.08 y 43.12 m/año respectivamente (Figure 21b y table 14). La tasa de cambio para WLR fue de -3.69 m/año (Table 15), con tendencia similar a LRR con una diferencia de 0.88 (Figure 22). A diferencia de Sinaloa, Sonora presenta una muy alta erosión al norte de su costa, esto puede ser atribuido al represamiento del río Colorado, que es el que más influye, pues los sedimentos y nutrientes que antes llegaban al mar ahora quedan represados en los embalses de las presas.

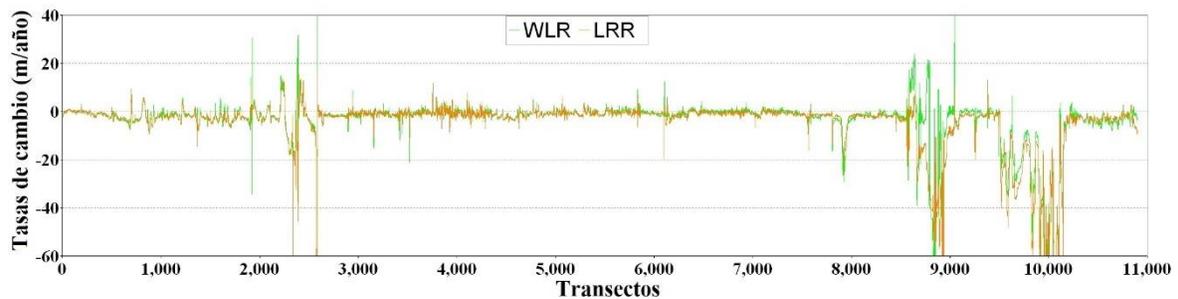


Figura 22. Tasas de cambio WLR y LRR en la costa de sonora

El río Colorado redujo su descarga a volúmenes intrascendentes después de la construcción de la presa Hoover en 1968 y el incremento en la demanda de irrigación (Hernández Azcúnaga, 2005). Por lo tanto la intervención humana en la cuenca hidrológica del río Colorado ha eliminado la descarga de agua y casi la totalidad del suministro de sedimentos a la desembocadura del río y su delta (J. D. Carriquiry & Sánchez, 1999), produciendo una inanición de sedimentos en todo el norte del Golfo de California (José D. Carriquiry et al., 2001).

El ambiente marino en el alto Golfo de California presenta ciclos de mareas semidiurnas y diurnas con amplias variaciones en el nivel del mar que van de 6.95 m en San Felipe hasta cerca de 10 m en el delta del río Colorado (Hernández Azcúnaga, 2005) (Ledesma-Vázquez et al., 2009). En esta región la dispersión, transporte y deposición de sedimentos en la actualidad está controlada principalmente por el forzamiento oceánico en lugar de los procesos fluviales como lo fue en el pasado (Hernández Azcúnaga, 2005). Además de efectos antrópicos en zonas costeras generados por el turismo residencial en destinos costeros al noroeste mexicano incluido Puerto Peñasco (Lizarraga, 2019).

4.1.6. Tasas de cambio en las costas de Baja California

En la costa de Baja California 2749 transectos presentan distancias negativas y 3544 distancias positivas. El mayor movimiento hacia tierra fue de -1650.21 m y el mayor movimiento hacia el mar fue 278.6 m (Figure 23a y table 12).

LRR presentó una tasa de cambio general de -2.35 m/año, el 47.8% de la costa presentó erosión con una tasa promedio de 5.88 m/año y un 51.2% acreción con una tasa promedio de 0.89%. La tasa máxima observada de erosión y acreción fue de -46.27 y 6.54 m/año respectivamente (Figura 23b y tabla 14). La tasa de cambio general WLR fue de -1.89 m/año (Table 15) con una tendencia similar a LRR lo largo de la costa (Figure 24).

Para Baja California los resultados mostraron que en la costa ubicada en el Alto Golfo predomina una erosión muy significativa, lo cual es atribuido principalmente a las actividades humanas, una de las más notables es la construcción de más de 20 presas a lo largo del río Colorado desde la década de 1930 (Salvador E. Lluch-Cota et al., 2007), (José D. Carriquiry et al., 2001), reduciendo el flujo de agua dulce a básicamente cero. El río Colorado suministraba

además de agua dulce, limo (Salvador E. Lluch-Cota et al., 2007) y actualmente los sedimentos que llegan a la costa son mínimos ocasionando que sea más sensible ante las variaciones de condiciones físicas (José D. Carriquiry et al., 2001). Por lo tanto, la variabilidad de la línea costera podría ya no atribuirse a, si llegan o no sedimentos si no a su mecanismo propio que ya dependería del forzamiento oceánico de esa zona (Hernández Azcúnaga, 2005).

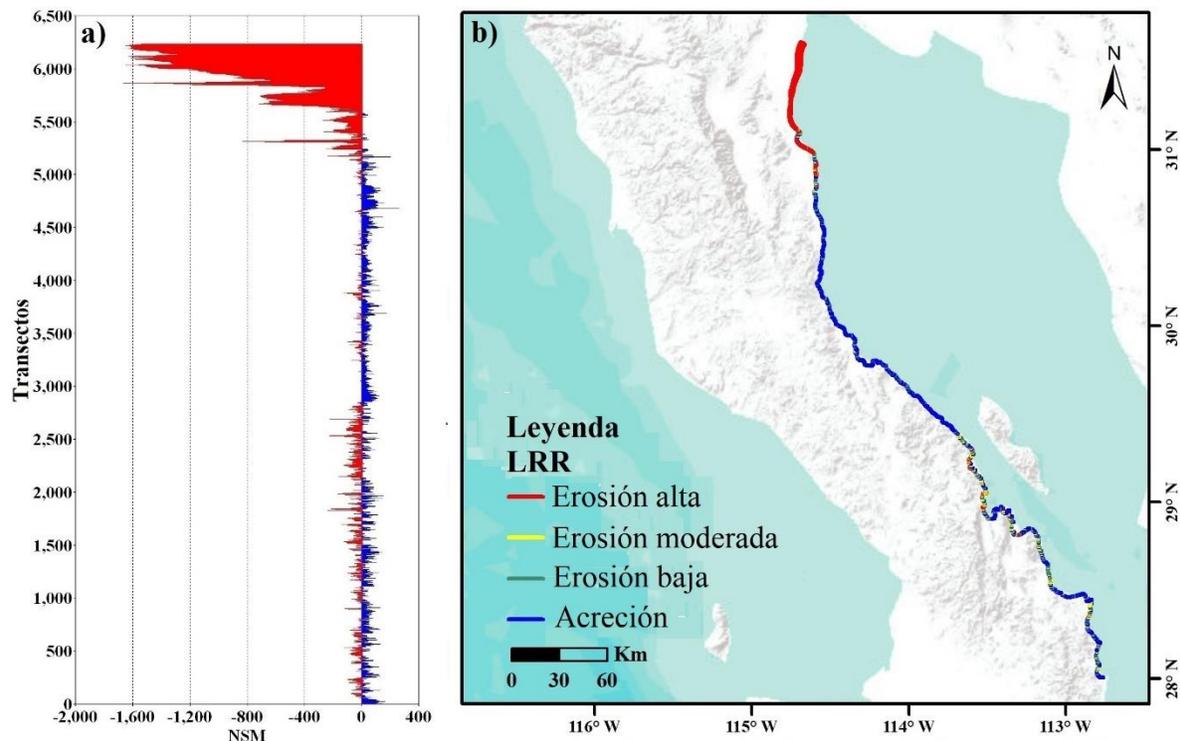


Figure 23. Variación en NSM, y b) Tasas de cambio LRR para Baja California.

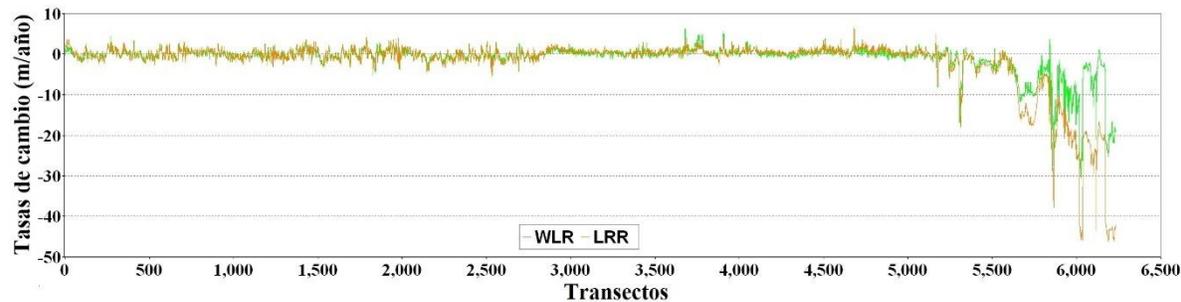


Figura 24. Tasas de cambio WLR y LRR en la costa de Baja California

4.1.7. Tasas de cambio en las costas de Baja California Sur

Baja California Sur presentó 5571 con distancias negativas y un mayor movimiento hacia tierra de -176.94 m. 4518 presentaron distancias positivas con un movimiento hacia el mar máximo de 318.92 m (table 12). Su costa es la más estable en comparación con la de los otros estados (Figura 25a). Su tasa general de cambio fue de -0.31 m/año.

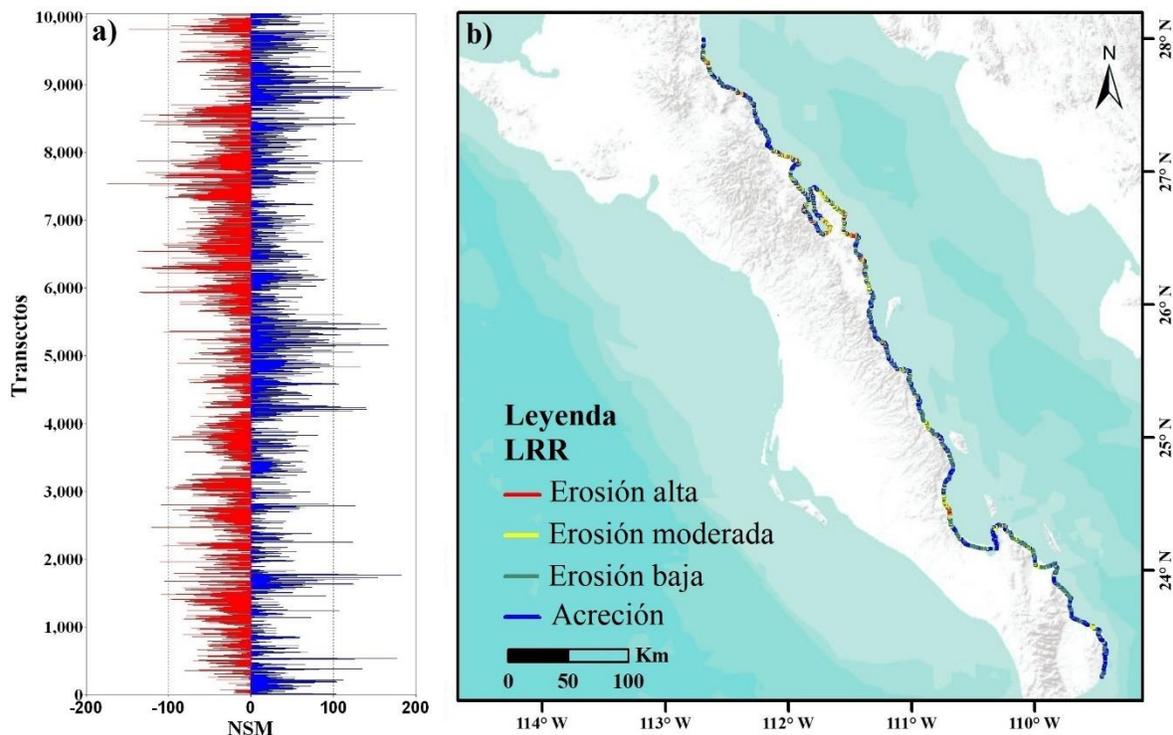


Figure 25. Variación en NSM, y b) Tasas de cambio LRR para Baja California Sur

El 66.14% de la costa de Baja California Sur se encuentra en erosión con una tasa promedio de -0.83 m/año; mientras que el resto se encuentra sometida a acreción con un promedio de 0.7 m/año. Se observó una tasa máxima de erosión y acreción de -22 y 14.32 m/año respectivamente (Figure 25b y table 14). WLR presento una tasa de cambio general de -0.45 m/año (Tabla 15) con una tendencia muy similar a LRR con una diferencia de 0.14 (Figure 26c).

Los factores responsables de la variabilidad en playas de Baja California Sur se atribuyen principalmente al cambio climático que provoca un incremento en la energía del oleaje y una mayor ocurrencia de ciclones tropicales generando periodos de erosión y acreción. Aunque localmente el impacto antrópico es importante, como en Santa Rosalía,

Loreto y La Paz, ya que cualquier modificación del sistema sedimentario natural puede derivar en erosión o acreción de la línea de costa (Nava-sánchez et al., 2018). Existen algunas investigaciones sobre análisis de cambios en sus costas, por ejemplo, (Castillo et al., 2020) que estimó las tasas de acreción y erosión del Snitbar de Punta Arena a partir de imágenes satelitales Landsat en un periodo de 1984-2016. En puerto escondido se examinaron los depósitos de rocas de barrera que cierran lagunas como resultado del transporte lateral desde costas rocosas adyacentes sujetas a erosión recurrente de tormentas (Johnson et al., 2020).

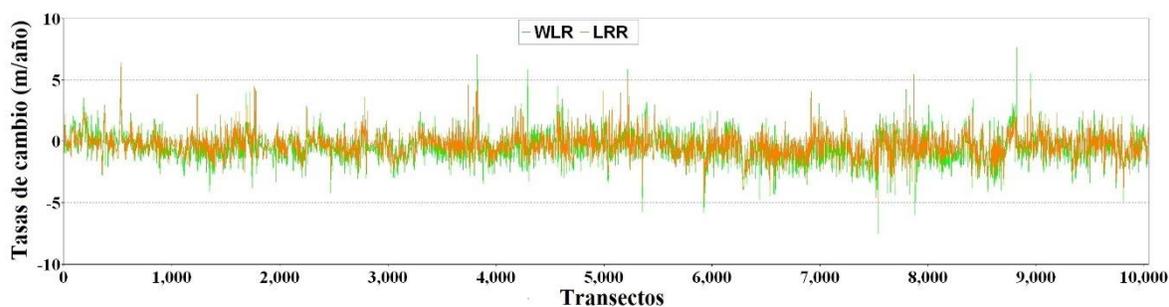


Figura 26. Tasas de cambio WLR y LRR en la costa de baja california sur

4.1.8. Pronóstico de la línea de costa y validación del modelo

Esta investigación tuvo como uno de sus objetivos pronosticar la posición futura de la línea de costa para los años 2030 y 2050, con el fin de comprender la dinámica costera a largo plazo. Para lograr esto, se empleó un enfoque basado en el método de regresión lineal y la aplicación del filtro Kalman, considerando los datos históricos desde 1981 hasta 2020. El modelo de Regresión Lineal y Filtro Kalman (LRR) fue utilizado para pronosticar las líneas de costa futuras. Los resultados obtenidos mediante el modelo LRR revelaron retrocesos significativos en la línea de costa proyectada para el futuro, como se muestra en la Figura 27.

Los resultados de la investigación indicaron que la erosión costera continuará siendo un fenómeno persistente a lo largo del Golfo de California para el período pronosticado. Se observó que las áreas más vulnerables son las desembocaduras de los ríos y las zonas costeras altamente urbanizadas, donde se evidencian retrocesos significativos. Esta situación se debe en gran medida a la ausencia de medidas adecuadas de protección y mitigación. En el caso de que no se implementen acciones para abordar esta problemática y se mantenga la actual tasa de crecimiento de la erosión, la comunidad costera enfrentaría serios desafíos en el futuro. Además, la condición biofísica del entorno costero se vería deteriorada. Se concluyen que la

línea de costa seguirá retrocediendo a lo largo del Golfo de California, lo que subraya la urgencia de implementar estrategias efectivas de manejo y conservación costera para preservar tanto el bienestar de las comunidades como la integridad del ecosistema costero.

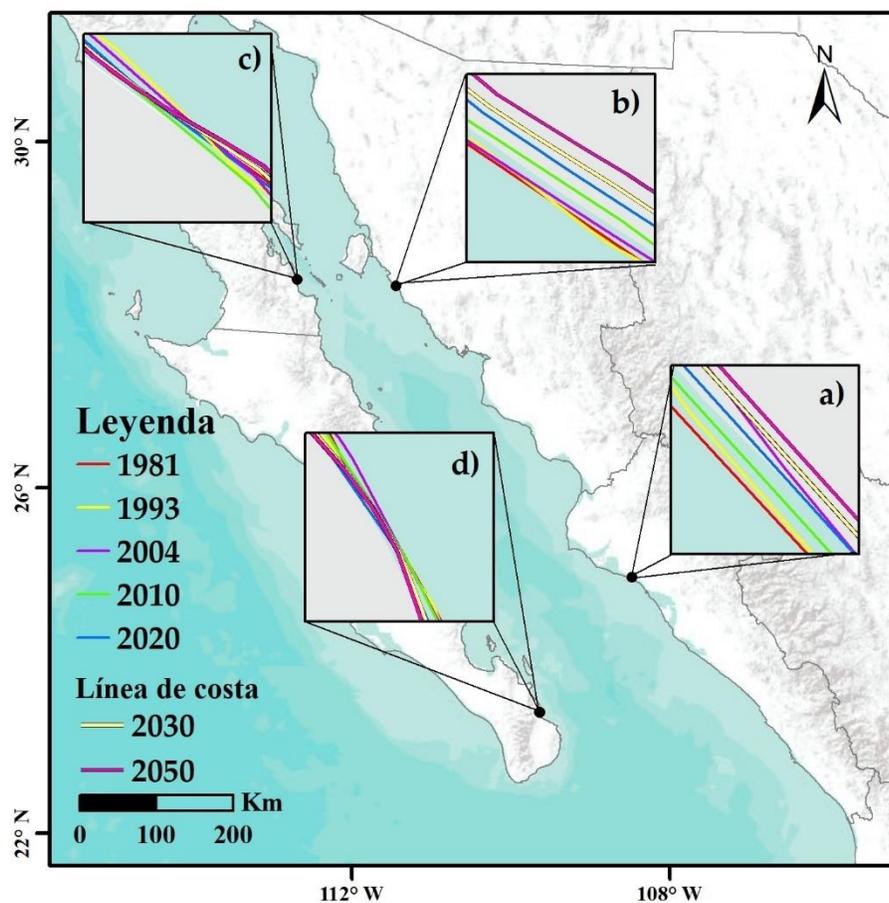


Figura 27. Líneas de costa pronosticadas. a) Sinaloa, b) Sonora, c) Baja California, d) Baja California Sur.

La validación del modelo se realizó a partir de las líneas 1981, 1990, 2000 y 2010, con las cuales se predijo la costa 2020 y se comparó con la costa real 2020 obteniendo un RMSE general de +/- 7.43 m. Esta metodología fue crucial para validar y estimar el error de las salidas del modelo, garantizando la fiabilidad de las proyecciones futuras de la costa.

Al enfocarnos en el alto Golfo, se pudo observar que la proyección de la costa futura parece ser más irregular que su posición original. No obstante, en más del 90% de la costa, se constató que la línea proyectada se encuentra dentro del valor predeterminado de amortiguador de la banda de incertidumbre, lo cual es un resultado comparable con los hallazgos obtenidos en (Himmelstoss et al., 2021).

La investigación incluyó un análisis adicional mediante la creación de un diagrama de dispersión y regresión basado en los datos obtenidos para el LRR de las costas reales y las costas derivadas del modelo para cada estado del Golfo de California (Figura 28), Este análisis reveló una relación significativa entre los LRR, ya que el coeficiente de determinación R^2 fue mayor a 0.78 en los cuatro estados estudiados. Además, se realizó un análisis general considerando todas las costas del Golfo de California, obteniendo un impresionante valor de R^2 de 0.95. Este resultado demostró claramente que existe una fuerte relación entre la costa real y la costa pronosticada por el modelo. El alto valor de R^2 indica que la capacidad del modelo para pronosticar la evolución de la línea de costa es altamente precisa y confiable.

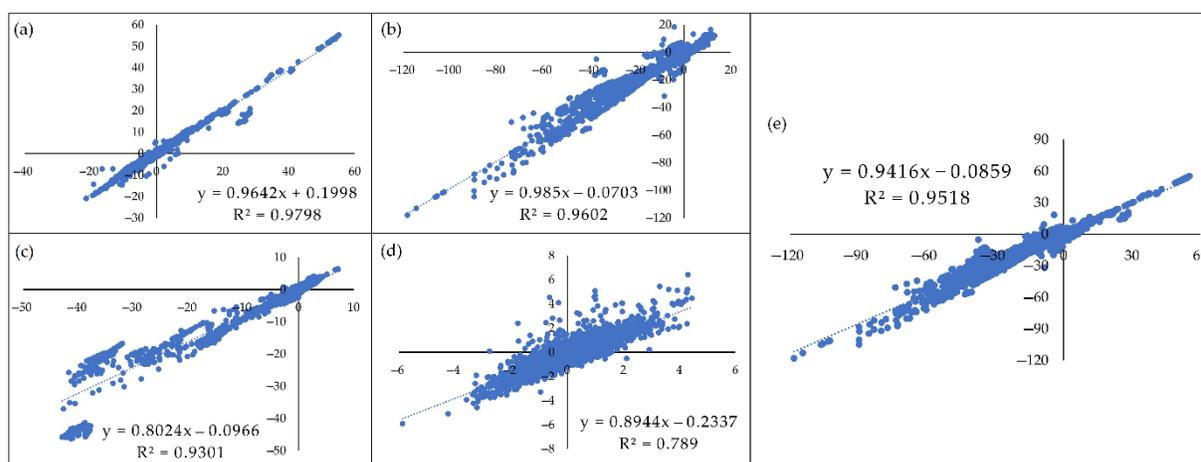


Figura 28. Tasas de cambio LRR, la línea de costa real y pronosticada al 2020. (a) Sinaloa, (b) Sonora, (c) Baja California, (d) Baja California Sur y (e) GC.

Estos hallazgos respaldan aún más la validez del modelo LRR y su capacidad para proporcionar proyecciones precisas y coherentes con la evolución real de la costa en el Golfo de California. La correlación encontrada entre las costas reales y las costas pronosticadas a través del análisis de regresión reafirma la utilidad de este enfoque en la comprensión de la dinámica costera y el apoyo en la toma de decisiones para la gestión y protección adecuada del litoral.

Estos resultados validados y comparables a investigaciones previas respaldan la confianza en la precisión y utilidad del modelo desarrollado para pronosticar la evolución futura de la costa en el Golfo de California. Sin embargo, es importante destacar que, debido a la naturaleza dinámica de la costa y los factores cambiantes que influyen en el proceso de

erosión, se deben continuar monitoreando y actualizando los modelos para mejorar la comprensión y gestión adecuada de este importante recurso natural.

4.1.9. Tendencias y variabilidad del área prioritaria del estudio: Mazatlán.

Mazatlán, además del cambio climático está siendo amenazado por la tendencia al alza de las actividades humanas (principalmente las relacionadas al turismo e infraestructuras contribuyendo a una expansión urbana que afecta a áreas biológicamente importantes ejerciendo una constante presión antropogénica que propicia a que se presente erosión, encontrándose en esta investigación que en más del 85% (Figura 29 y Tabla 16) su costa se ha presentado una erosión coincidiendo con (Aguilar, P., Mendoza & Silva, 2021). Además, en la Figura 30 se aprecia que esta erosión seguirá constante a los largo de su costa ocasionando el retroceso de la línea costera.

Tabla 16. Estadísticas de cambio a largo plazo en la línea de costa a escala regional.

Estadísticas	Mazatlán
Cambio medio de costa (m/año)	-1.6
Cambio mínimo de costa (m/año)	-9.3
Cambio máximo de costa (m/año)	3.8
Tasa media de acreción (m/año)	-0.8
Tasa media de erosión (m/año)	-2.2
Longitud de la costa que registra la erosión (km)	59.2
Longitud de la costa que registra la acreción (km)	11.6

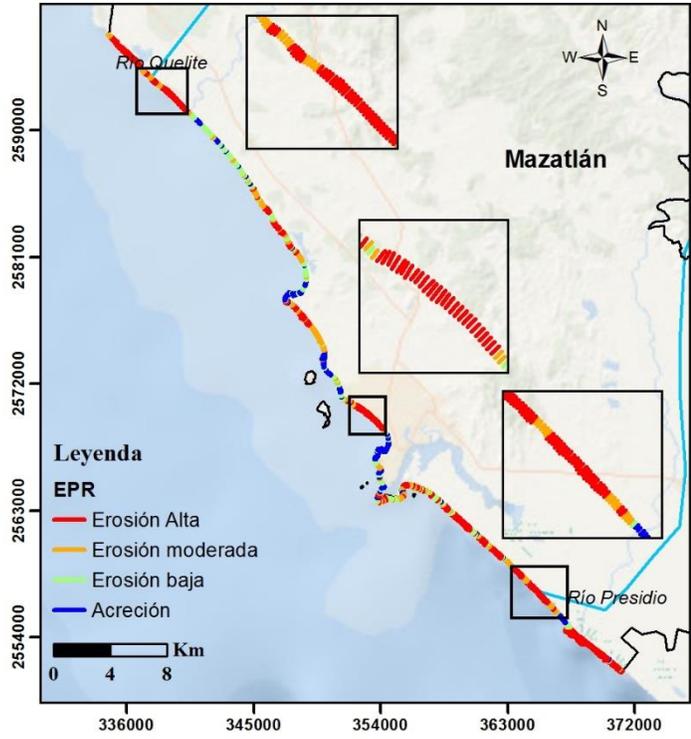


Figura 29. Puntos críticos de erosión en la costa de Mazatlán.

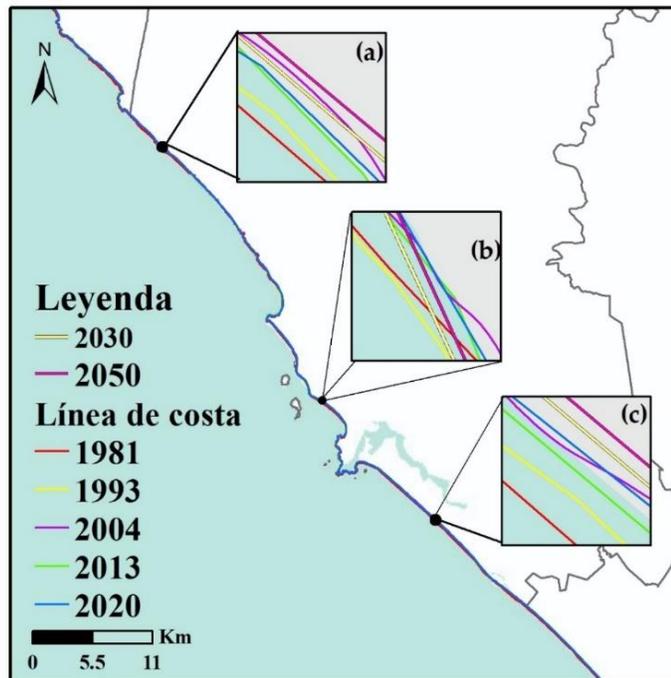


Figura 30. Línea de costa pronosticada para Mazatlan al 2030 y 2050.

4.2. Peligro por ciclones tropicales y aumento del nivel del mar

Durante el desarrollo de este estudio, se llevó a cabo un exhaustivo análisis y revisión de los ciclones tropicales que han impactado en el Golfo de California en el pasado. Esta revisión incluyó la recopilación de datos históricos sobre la frecuencia, intensidad, trayectoria. Los hallazgos de este análisis se presentan de manera detallada en la tabla 17 que proporciona una visión general de los ciclones tropicales que han afectado al Golfo de California. Esta tabla ofrece una herramienta invaluable para comprender mejor la dinámica de los ciclones tropicales en la región y para trasladarlos espacialmente.

Tabla 17. Ciclones tropicales de 1980-2020 en el Golfo de California. Fuente: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA): Pistas históricas de huracanes (<https://coast.noaa.gov/hurricanes>).

Nº	Nombre de la tormenta	Fecha	Tipo	Lugar de llegada a tierra
1	Irwin	30 de agosto 1981	Depresión tropical	B.C.S.
2	Knut	21 de septiembre 1981	Tormenta tropical	Sinaloa
3	Lidia	10 de julio 1981	Tormenta tropical	B.C.S.
4	Norma	12 de octubre 1981	Huracán nivel 2	Sinaloa
5	Paul	30 de septiembre 1982	Huracán nivel 2	Sinaloa
6	Adolph	28 de mayo 1982	Tormenta tropical	Sinaloa
7	Tico	19 de octubre 1983	Huracán nivel 3	Sinaloa
8	Polo	3 de octubre 1984	Depresión tropical	B.C.S.
9	Waldo	9 de octubre 1985	Huracán nivel 2	Sinaloa
10	Newton	23 de septiembre 1986	Huracán nivel 1	Sonora
11	Paine	2 de octubre 1986	Huracán nivel 1	Sinaloa
12	Roslyn	22 de octubre 1986	Huracán nivel 1	Sinaloa
13	Kiko	27 de agosto 1989	Huracán nivel 3	B.C.S.
14	Rachel	2 de octubre 1990	Tormenta tropical	B.C.S.
14	Rachel	2 de octubre 1990	Tormenta tropical	Sinaloa
15	Calvin	8 de Julio 1993	Tormenta tropical	B.C.S.
16	Lidia	13 de septiembre 1993	Huracán nivel 2	Sinaloa
17	Rosa	14 de octubre 1994	Huracán nivel 2	Sinaloa
18	Ismael	15 de septiembre 1995	Huracán nivel 1	Sinaloa
19	Fausto	14 de septiembre 1996	Huracán nivel 1	Sinaloa
20	Isis	3 de septiembre 1998	Huracán nivel 1	Sinaloa
21	Norman	22 de septiembre 2000	Depresión tropical	Sinaloa
22	Ignacio	26 de agosto 2003	Huracán nivel 1	B.C.S.
23	Marty	22 de septiembre 2003	Huracán nivel 2	B.C.S.
23	Marty	25 de septiembre 2003	Depresión tropical	B.C.
24	Nora	9 de octubre 2003	Depresión tropical	Sinaloa
25	Unnamed	26 de octubre 2004	Depresión tropical	Sinaloa

26	John	2 de septiembre 2006	Huracán nivel 2	B.C.S.
26	John	4 de septiembre 2006	Depresión tropical	B.C.
27	Lane	16 de septiembre 2006	Huracán nivel 3	Sinaloa
28	Paul	26 de octubre 2006	Depresión tropical	Sinaloa
29	Henriette	4 de septiembre 2007	Huracán nivel 1	Sinaloa
29	Henriette	6 de septiembre 2007	Tormenta tropical	Sonora
30	Julio	25 de agosto 2008	Tormenta tropical	B.C.S.
31	Lowell	11 de septiembre 2008	Depresión tropical	B.C.S.
32	Norbert	11 de octubre 2008	Huracán nivel 2	B.C.S.
32	Norbert	12 de octubre 2008	Huracán nivel 1	Sonora
33	Rick	21 de octubre 2009	Tormenta tropical	Sinaloa
34	Georgette	21 de septiembre 2010	Tormenta tropical	B.C.S.
34	Georgette	22 de septiembre 2010	Depresión tropical	Sonora
35	Norman	29 de septiembre 2012	Depresión tropical	Sinaloa
35	Norman	30 de septiembre 2012	Depresión tropical	B.C.S.
36	Manuel	19 de septiembre 2013	Huracán nivel 1	Sinaloa
37	Sonia	4 de noviembre 2013	Tormenta tropical	Sinaloa
38	Odile	15 de septiembre 2014	Huracán nivel 3	B.C.S.
38	Odile	17 de septiembre 2014	Tormenta tropical	B.C.
38	Odile	17 de septiembre 2014	Depresión tropical	Sonora
39	Javier	9 de agosto 2016	Tormenta tropical	B.C.S.
40	Newton	7 de septiembre 2016	Huracán nivel 1	B.C.S.
40	Newton	7 de septiembre 2016	Tormenta tropical	Sonora
41	Bud	15 de junio 2018	Tormenta tropical	B.C.S.
42	Willa	24 de octubre 2018	Huracán nivel 3	Sinaloa
43	Lorena	21 de septiembre 2019	Huracán nivel 1	B.C.S.
43	Lorena	22 de septiembre 2019	Depresión tropical	Sonora
44	Narda	1 de octubre 2019	Tormenta tropical	Sinaloa

Los efectos de los ciclones tropicales (huracanes y depresiones) y los fuertes vientos del norte conocidos como Nortes, como las olas de tormenta y las marejadas de tormentas, también juegan un papel importante en los cambios morfológicos de la playa de Golfo de California ya que la impactan directamente. Debido a que el Golfo de California se encuentra entre una zona de transición entre los regímenes climáticos tropicales y subtropicales, las costas están expuestas a procesos multianuales, como el Índice del Niño y Índice de Oscilación del Pacífico Norte (S. E. Lluch-Cota et al., 2013), y otros fenómenos como el Monzón de América del Norte y Frentes Fríos.

El Monzón de América del Norte generalmente cubre el período de julio a septiembre y está relacionado con el inicio de las lluvias, ciclones tropicales, la formación de un centro de baja presión y el cambio de vientos del noroeste de invierno a los del sur o incluso el sureste (Anderson et al., 2000).

También es importante considerar la presencia de los Frentes Fríos (tabla 18) los cuales se presentan de septiembre a marzo, con vientos del noroeste que soplan sobre el Golfo de California (Mart, 2018; Ponce Bastidas, 2015), la figura 31 muestra La playa de Las Bocas en Sonora afectada por pasajes fríos entre octubre de 2015 y marzo de 2016.

Tabla 18. Promedio mensual de 1981-2020 de frentes fríos en México.

Mes	Frentes fríos
Septiembre	3
Octubre	5
Noviembre	6
Diciembre	6
Enero	7
Febrero	8
Marzo	6
Abril	5
Mayo	4
Total	50



Figura 31. Impactos de ciclones tropicales y frentes fríos en la costa Golfo de California. Fuente: (Franco-Ochoa et al., 2020).

Al realizar el análisis, se obtuvo un mapa de peligro por ciclones tropicales para el Golfo de California (Figura 32). Los resultados revelaron que tanto el estado de Sinaloa como Baja California Sur presentan un mayor riesgo en comparación con otras regiones del Golfo. Esta evaluación proporciona información valiosa sobre las áreas más vulnerables a los impactos de los ciclones tropicales en la región, lo cual es fundamental para la planificación y la implementación de medidas de gestión del riesgo en estas zonas costeras.

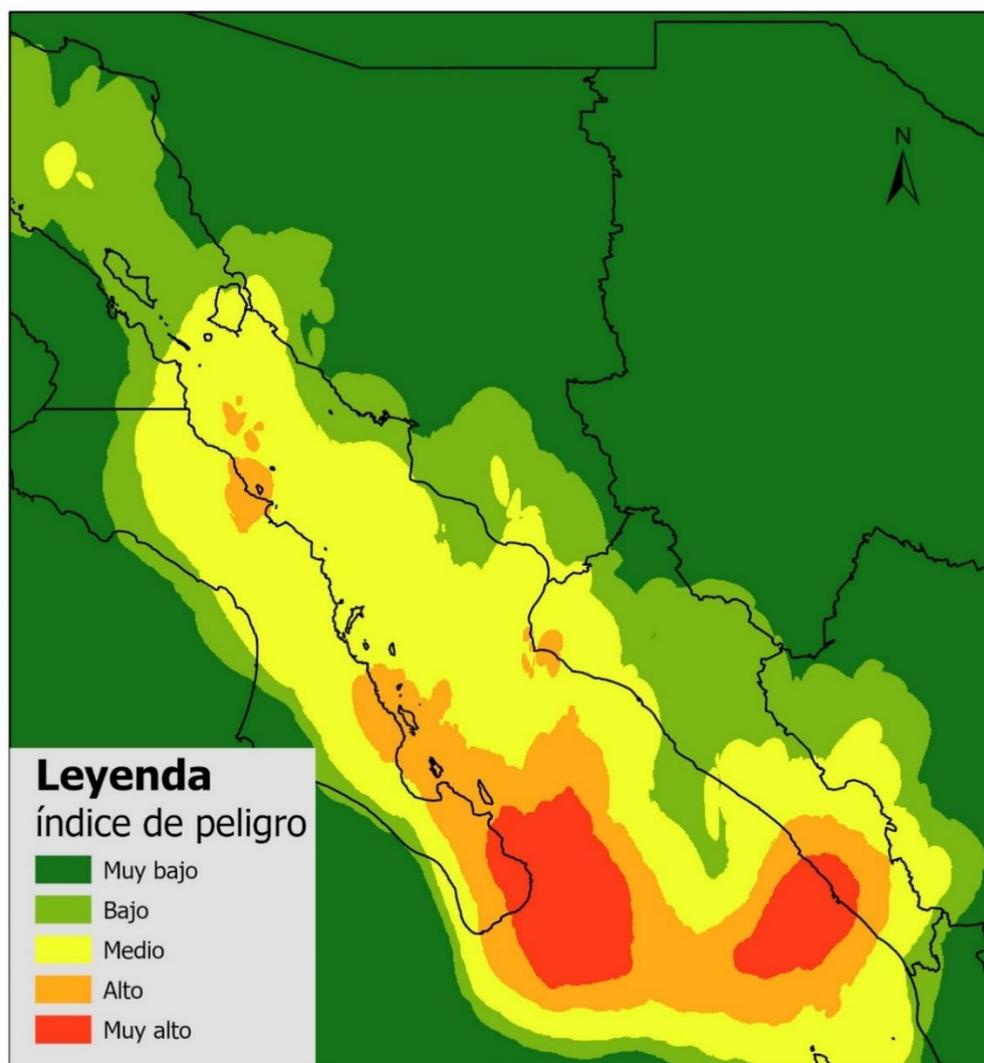


Figura 32. Peligro por ciclones tropicales

El mapa obtenido revela un alto riesgo de impacto de ciclones tropicales en las costas de Sinaloa así como en Baja California Sur, se profundiza más en las costas de Mazatlán sumado

a que también se presenta una erosión constante en algunos sectores de este municipio de Sinaloa, se ha seleccionado esta área como prioritaria para llevar a cabo un estudio más detallado y exhaustivo. Asimismo, se presentará un análisis detallado sobre Mazatlán como la área seleccionada, profundizando en sus características específicas y su exposición al riesgo de ciclones tropicales.

Se analizaron los fenómenos meteorológicos tomando en consideración el periodo de 1957 al 2020, teniendo como resultado un total de 16 eventos encontrados, tal como semuestra en la Tabla 19 y figura 33 . La información de ciclones fue extraída de la base de datos HURDAT2 (Hurricane Databases) publicada por la NHC de la NOAA. Se determinó un radio de búsqueda de 100 km para Mazatlán. En este período, Sinaloa y B.C.S. son los estados con mayor número de ciclones tropicales que tocan tierra y que impactan directamente en la costa coincidiendo con (Farfán et al., 2014) que definió a estos dos estados como puntos críticos de ciclones tropicales para el período 1970-2010.

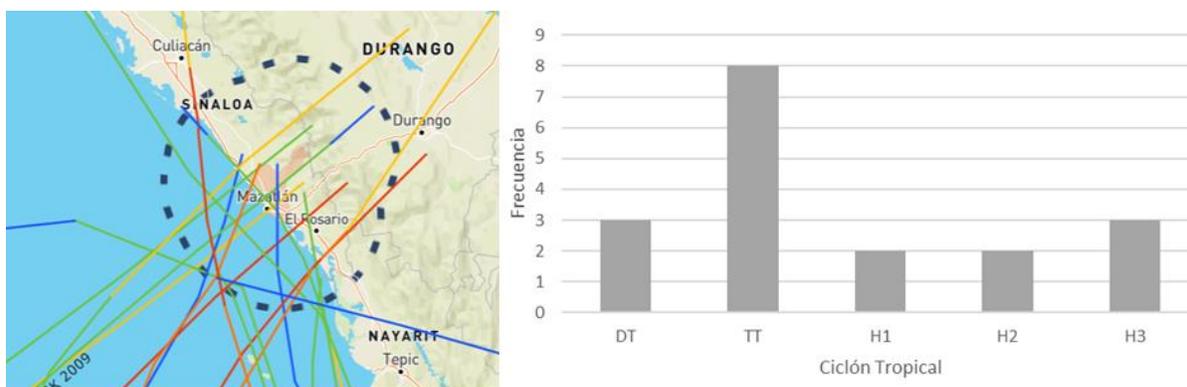


Figura 33. Ciclones tropicales que afectaron a Mazatlán en un radio de 100 km durante 1980-2020.

Fuente: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA):(<https://coast.noaa.gov/hurricanes>).

La costa de Mazatlán es una de las más afectadas dentro del Golfo de California por estos fenómenos que cada vez se intensifican debido al cambio climático, en la figura 31a se observa cómo fue afectada por el ciclón Willa en 2018. Existen algunos estudios locales playa de Mazatlán que se centran en la dinámica de la costa como el realizado por (Oyedotun et al., 2018) donde el objetivo principal de su investigación fue examinar el cambio de la línea de costera por interferencias naturales y antropogénicas, apoyándose de imágenes satelitales Landsat (2012-2016) y el Sistema de análisis digital de la costa. Sus resultados indicaron que

aproximadamente el 96% de la costa está sufriendo de erosión y lo atribuyo al aumento del nivel del mar, aumento de la amplitud de las mareas y al movimiento de sedimentos inadecuados. Sin embargo la costa de Mazatlán como todos los litorales está en constante cambio y estudios como el realizado por (Montaño-Ley & Peraza-Vizcarra, 1986b) donde observó el movimiento neto de sedimentos hacia el sureste y lo atribuyo a cambios en los regímenes de olas, por otra parte (Montaño-law et al., 1988; Montaño-Ley & Gutiérrez-Estrada, 1987b) encontraron volúmenes de sedimentos erosionados a lo largo de la playa.

Tabla 19. Ciclones que han impactado Mazatlán.

NOMBRE DE CICLÓN TROPICAL	RANGO DEFECHAS	VELOCIDAD MÁXIMA DEL VIENTO km/h	PRESIÓN MÍNIMA mb	CATEGORÍA MÁXIMA
HERNAN 2020	25 a 28 de Agosto	40	1001	Ts
NARDA 2019	28 Sep a 01 Oct, 2019	83	997	TS
Willa 2018	18 al 24 de octubre	140	925	H3
Pilar 2017	22 al 25 de sep	45	1003	Ts
Rick 2009	15 al 21 de octubre	155	1000	Ts
Carril 2006	13 al 17 de sep	110	952	H3
Nora 2003	1 al 9 de oct	90	969	Td
Norman 2000	20 al 22 de sep	45	998	Td
Rosa 1994	8 al 15 de oct	90	974	H2
Diana 1990	4 al 9 de agostp	85	1010	Td
Roslyn 1986	15 al 22 de octubre	125	-1	H1
Tico 1983	11 al 19 de oct	115	-1	H3
Adolfo 1983	21 al 28 de mayo	95	-1	Ts
Otis 1981	24 al 30 de oct	75	-1	Ts
Norma 1981	8 al 12 de oct	110	-1	H2
Knut 1981	19 al 21 de sep	55	-1	Ts

En el contexto del estudio sobre la gestión del riesgo ante ciclones tropicales en la región costera de Mazatlán, se realizó la investigación detallada que utilizó el huracán Willa como caso de estudio para comprender los patrones de inundación en la zona costera y para destacar la importancia de la preparación, la planificación y la gestión adecuada de los riesgos climáticos en regiones propensas a eventos meteorológicos extremos.

El huracán Willa, un fenómeno meteorológico que impactó de manera significativa en la región de Mazatlán, Sinaloa. Clasificado como un huracán de categoría 3 en la escala Saffir-Simpson, Willa tocó tierra el 23 de octubre de 2018, dejando a su paso una serie de efectos

devastadores (Figura 34). El huracán WILLA tocó tierra a las 20:00 horas, tiempo del centro de México en la población de Isla del Bosque, Sin., a 15 km al sur de Escuinapa con vientos máximos de 195 km/h y rachas de 240 km/hora como huracán categoría 3. La combinación de vientos fuertes, intensas lluvias y marejadas ciclónicas generó una emergencia climática que puso a prueba las capacidades de respuesta de la ciudad y su infraestructura.

Uno de los aspectos más notables del huracán Willa fue su capacidad para generar una considerable inundación costera. Las lluvias torrenciales provocaron desbordes en ríos y arroyos, exacerbando el riesgo de inundación en áreas bajas. Las marejadas ciclónicas contribuyeron al aumento del nivel del mar, provocando que las olas alcanzaran hasta 4 m y que llegaran a zonas que normalmente están fuera del alcance del agua. Estos fenómenos combinados resultaron en inundaciones extensas en Mazatlán y sus alrededores.

La simulación de inundación y sus efectos derivados del huracán Willa despierta un interés particular en la evaluación de riesgos futuros y la planificación de estrategias de mitigación. Al seleccionar este huracán como punto focal de la simulación, fue para comprender la magnitud y la extensión de las inundaciones que ocurrieron y sus repercusiones en términos de daños materiales, evacuaciones y respuesta comunitaria. La implementación de modelos de simulación permitió analizar la vulnerabilidad de distintas áreas ante eventos climáticos extremos y los resultados son una base para la formulación de estrategias de preparación y adaptación a escenarios similares en el futuro.

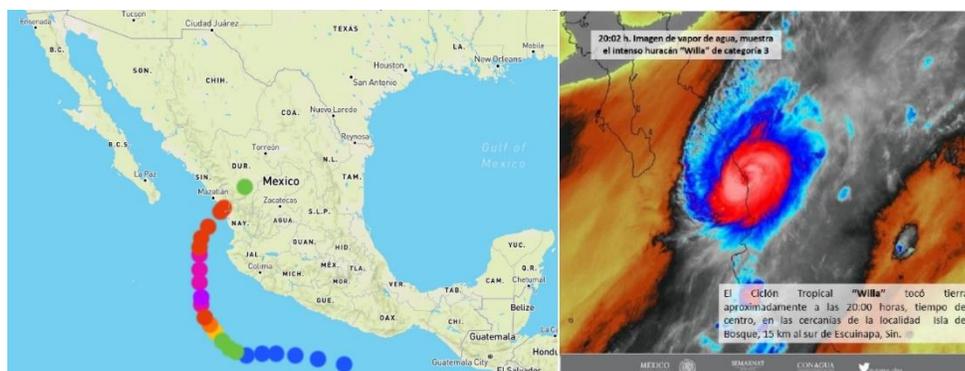


Figura 34. Huracán Willa.

Los cálculos subsiguientes se ejecutaron específicamente para el huracán Willa con el propósito de determinar la cota de inundación en el área de investigación. Este enfoque se centra en la evaluación detallada de las características y el impacto del huracán Willa en la región costera de interés.

4.2.1. Cota de inundación:

La magnitud máxima alcanzada en la elevación de marea de tormenta inducida por el ciclón Willa registró un valor de 1.54. En concordancia con los datos de mareas recabados del servicio Mareográfico Nacional de Marina, los registros reflejaron que el punto culminante en términos astronómicos fue 1.27, según se detalla en la Tabla 20. De igual manera se procedió a la obtención de Run-up de 1.66 metros como se muestra en la tabla 21.

Tabla 20. Niveles de marea en Mazatlán.

Elevación	Metros sobre el nivel del mar
Altura máxima registrada	1.462
Marea astronómica más alta	1.27
Pleamar media superior	0.528
Pleamar media	0.455
Nivel del mar	0.000
Baja mar media	-0.444
Baja mar media inferior	-0.616
Marea astronómica más baja	-1.250
Altura mínima registrada	-1.342

Tabla 21. Run-up para la costa de Mazatlán

CICLÓN	H_s	T	g	p	$L_{\#}$	Z	RUN UP
VALOR MAXIMO	4.26	8.15	9.81	3.14	103.70	0.848	1.66

A partir de la información previamente expuesta, se procedió a calcular la cota de inundación correspondiente a la influencia del ciclón tropical WILLA, tal como se evidencia en la Tabla 22. En este contexto, se obtuvo una cota de 4.47 metros, sin considerar las proyecciones de incremento futuro en el nivel del mar.

Tabla 22. Cota de inundación, contemplando ciclones tropicales.

WILLA (23/10/2018)	MAREA DE TORMENTA	RUN UP 2%	MAREA ASTRONOMICA	COTA DE INUNDACIÓN
VALOR MAXIMO	1.54	1.66	1.270	4.47

En un esfuerzo por plasmar el panorama más completo, se procedió a identificar y ubicar las áreas propensas a inundaciones debido al aumento del nivel del mar para las costas del Golfo de California (Figura 35), considerando el peor de los escenarios proyectados hasta el año 2100. Este enfoque permitió una evaluación detallada de las zonas costeras vulnerables ante los efectos del cambio climático, particularmente en relación con el aumento del nivel del mar y claramente la costa de Mazatlán sería una de las más afectadas. Por tales motivos se determinó que la simulación o representación del peligro sobre la ciudad de Mazatlán debe comprender el aumento del nivel de mar siendo elemento inherente al análisis.

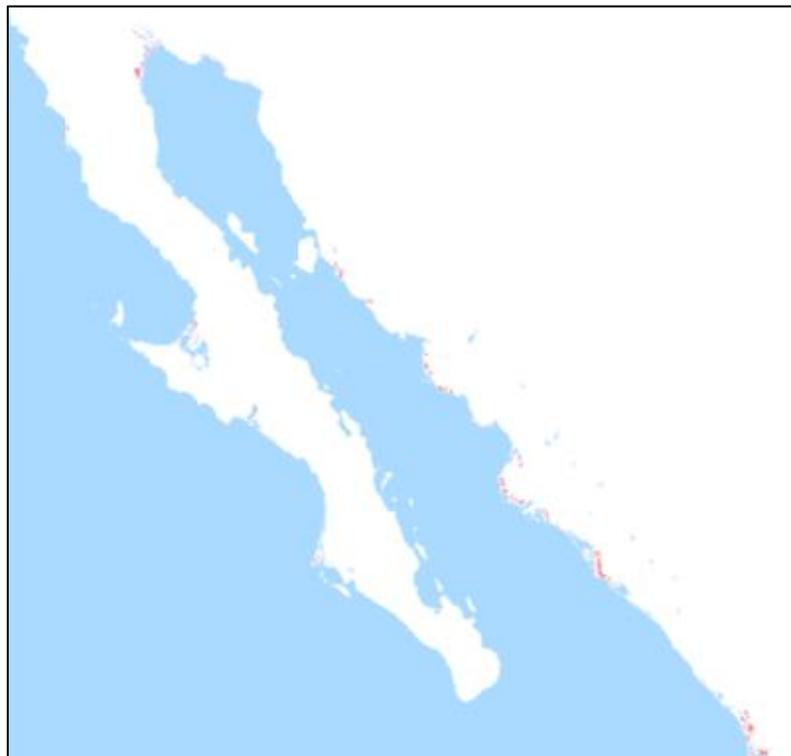


Figura 35. Peligro por aumento del nivel medio del mar en el Golfo de California.

En consecuencia, se incorporó a la cota previamente determinada, obtenida a partir de la posible ocurrencia de un fenómeno similar al huracán Willa para el año 2050. Esta

consideración se basó en un aumento proyectado en el nivel del mar, conforme al escenario Intermedio-Alto de los escenarios del nivel medio del mar global (GMSL), que indica un aumento de 0.14 metros para el año 2030 y de 0.29 metros para el año 2050, como se ilustra en la Figura 36 y 37. Por lo tanto, las cotas finales proyectadas para el año 2050 fueron de 4.76 metros y para el año 2030 de 4.61 metros, según se detalla en la Tabla 23.

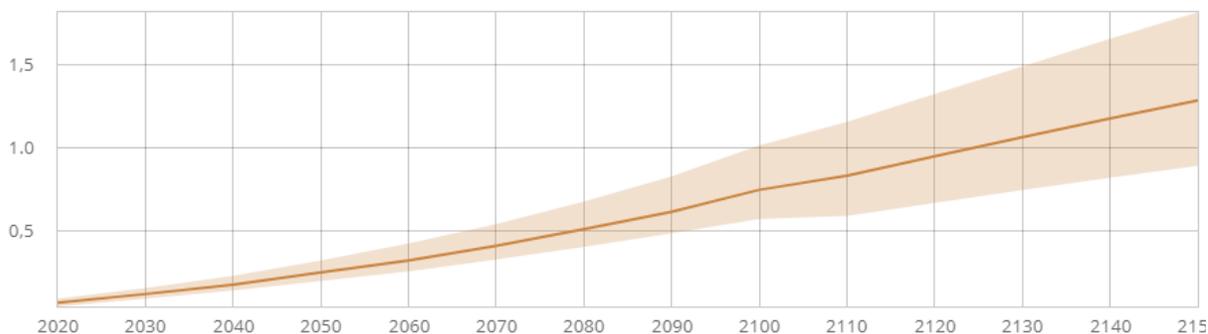


Figura 36. Aumento del nivel del mar para Mazatlán de acuerdo con el IPCC.

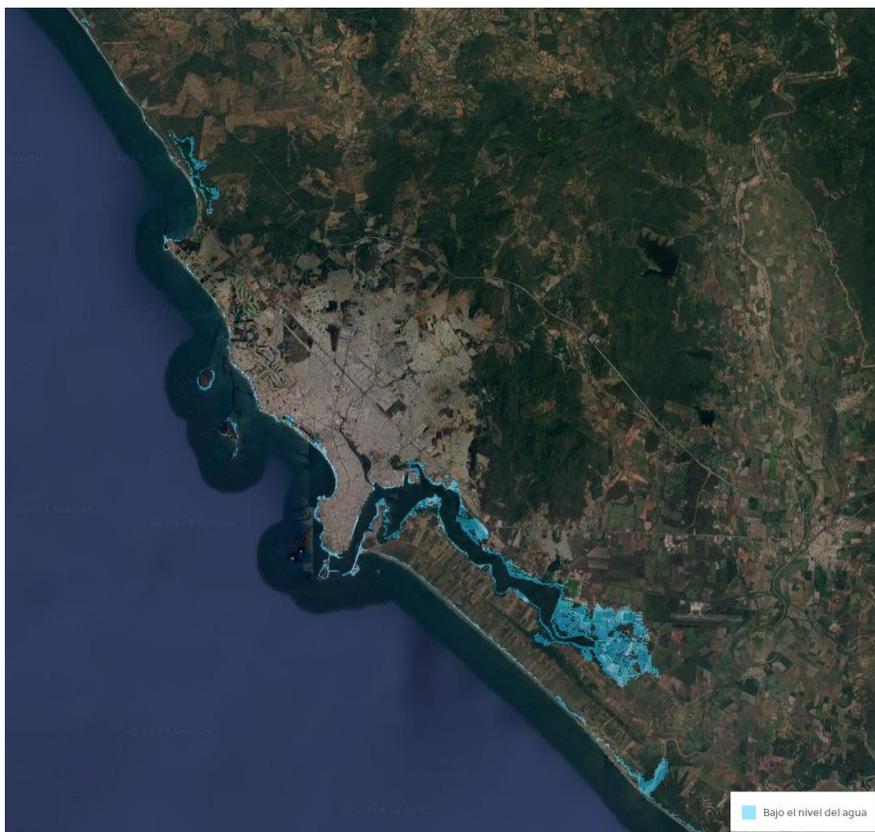


Figura 37. Áreas en peligro por aumento del nivel del mar en Mazatlán.

Tabla 23. Cota de inundación considerando el incremento del nivel del mar.

Willa (23/10/2018)	Marea de tormenta	Run Up	Marea astronomica	Cota de inundación	Considerando el ANMM al 2030	Considerando el ANMM al 2050
Valor maximo	1.54	1.66	1.270	4.47	4.61	4.76

Se llevó a cabo la implementación de un modelo hidro-hidráulico con el propósito de emular el fenómeno de inundación pluvial en el área de Mazatlán en respuesta a la influencia del huracán WILLA. En esta metodología, se procedió a incorporar los datos de precipitación provenientes de la base de datos ERA5 (con referencias precisadas en la Tabla 24 y la figura 38) como componente esencial para la caracterización del evento meteorológico bajo análisis.

Tabla 24. Huracán WILLA, del 20 al 24 de octubre de 2018
(mm) Precipitation (ERA5_AG) at -106.3978E,23.2552N, 2018-10-20 to 2018-10-25

20/10/2018	0.06
21/10/2018	3.48
22/10/2018	2.73
23/10/2018	81.12
24/10/2018	13.78
25/10/2018	0.29

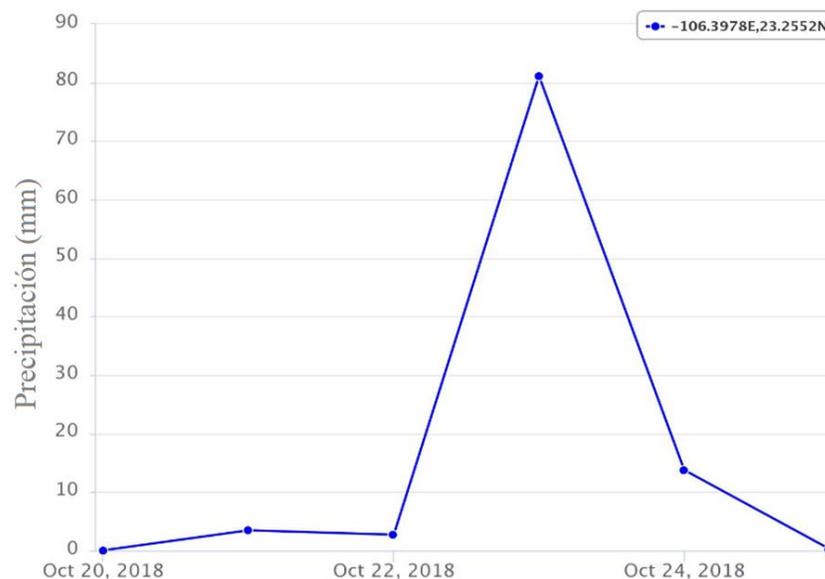


Figura 38. Precipitación obtenidos de ERA5.

Resultados ilustrativos se presentan en las imágenes siguientes, que visualizan de manera evidente la situación de extensa inundación en el núcleo urbano central, así como la aparición de fenómenos de inundación en las zonas costeras adyacentes.

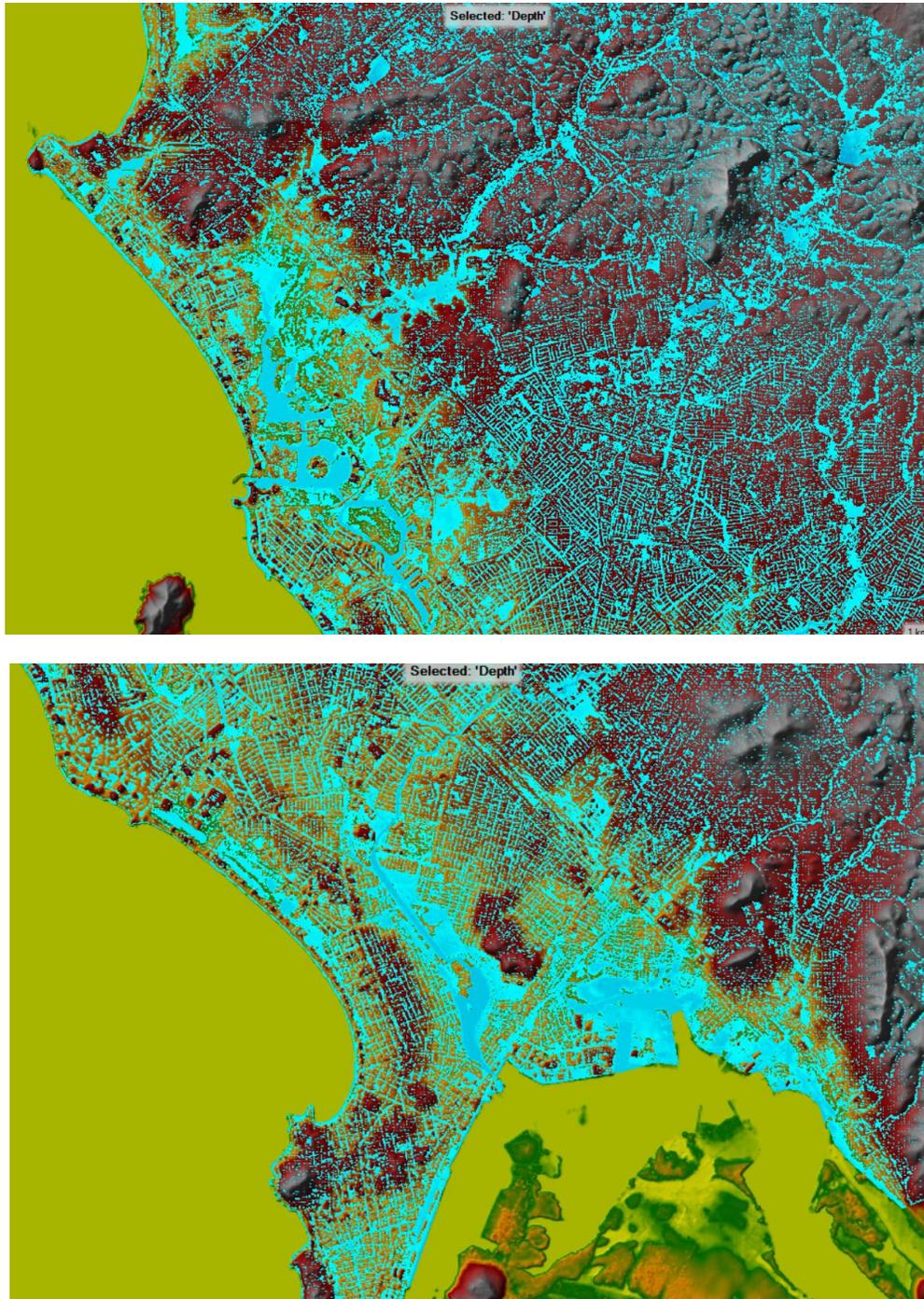


Figura 39. Ilustración general de inundación ante la presencia del Huracán Willa.

4.3. Simulación del crecimiento urbano a través de Autómatas Celulares-Markov

Se utilizaron tres mapas correspondientes a los años 2002, 2011 y 2020 de uso del suelo y vegetación de INEGI (Figuras 40, 41 y 42), para realizar un análisis de los cambios en los usos de suelo presentes en el área de estudio. Estos mapas fueron empleados para generar matrices de detección de cambio durante los períodos 2002-2011 y 2002-2020, así como para calcular las matrices de probabilidad de cambio para las fechas mencionadas.

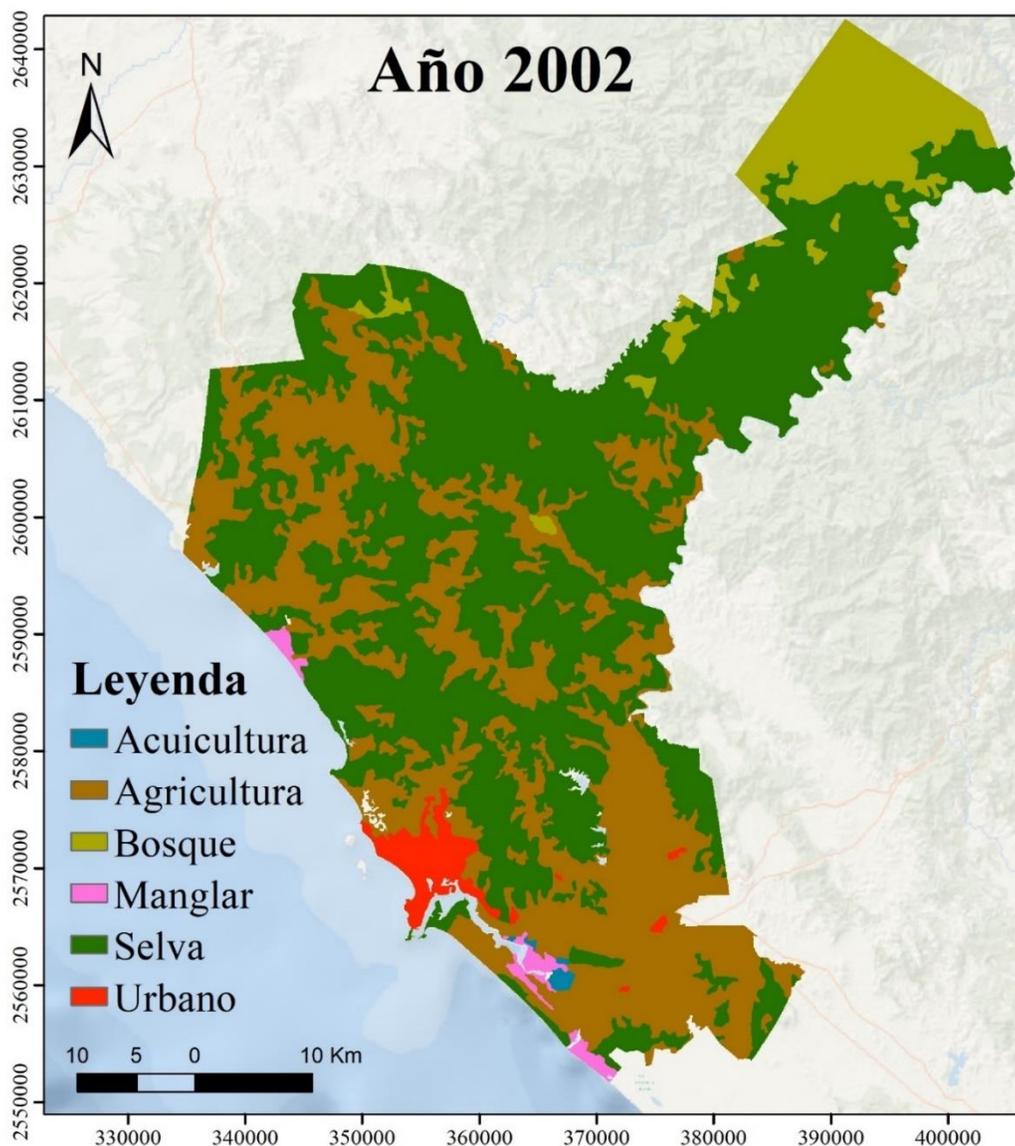


Figura 40. Uso de Suelo y Vegetación año 2002.

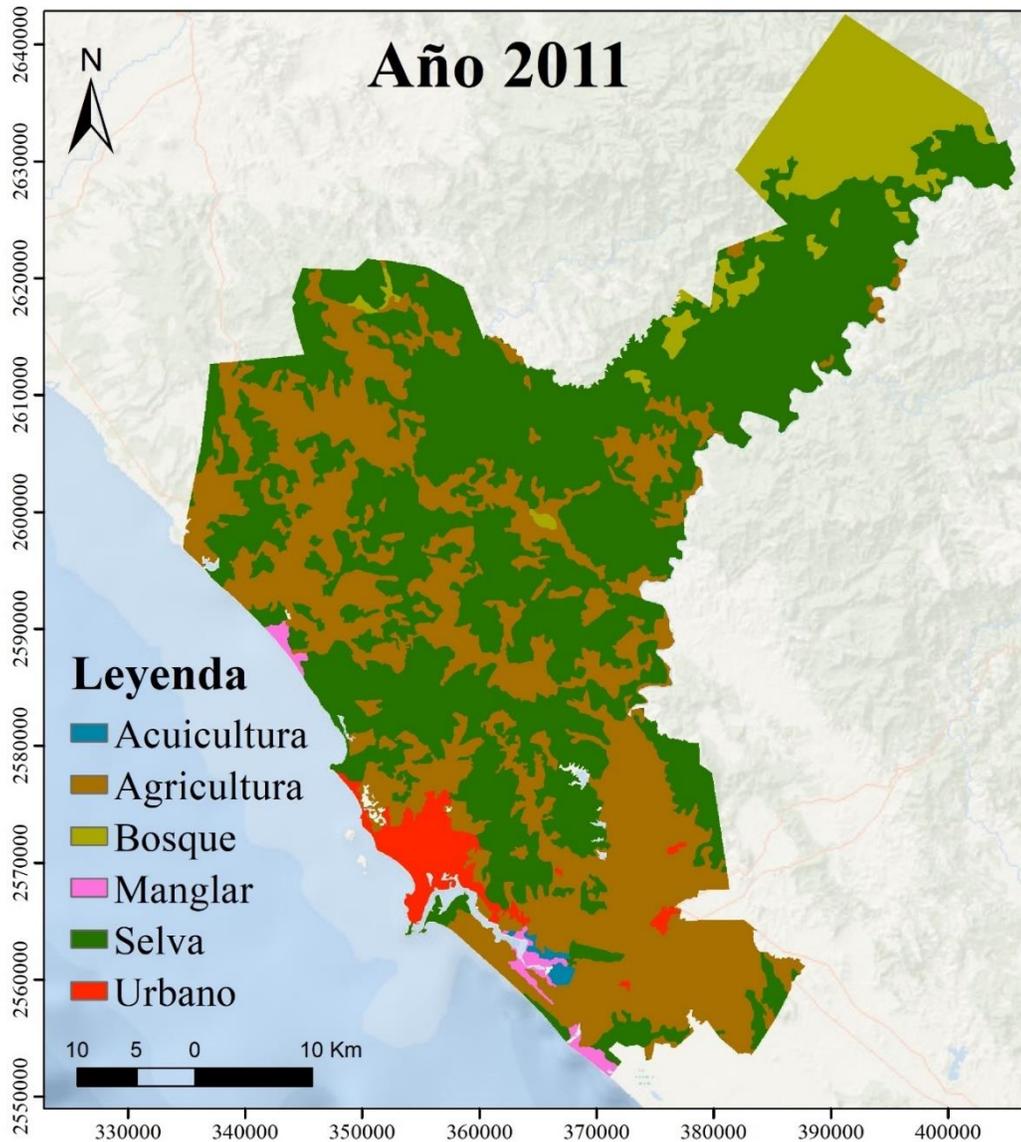


Figura 41. Uso de Suelo y Vegetación año 2011.

Tabla 25. Distribución del uso de suelo y su variación del 2002 al 2020 en el municipio de Mazatlán.

Categoría	Superficie (hectáreas)			Variación neta (hectáreas)		
	2002	2011	2020	2002-2011	2011-2020	2002-2020
Acuicultura	462.5	614.5	618	152	3.5	155.5
Agricultura	85905.25	89302.75	77026.5	3397.5	-12276.25	-8878.75
Bosque	21264.5	21064.5	21222.5	-200	158	-42
Manglar	2030.5	1734.5	1343.5	-296	-391	-687
Selva	136188.75	131987	142275	-4201.75	10288	6086.25
Urbano	4857.75	6006	8223.75	1148.25	2217.75	3366

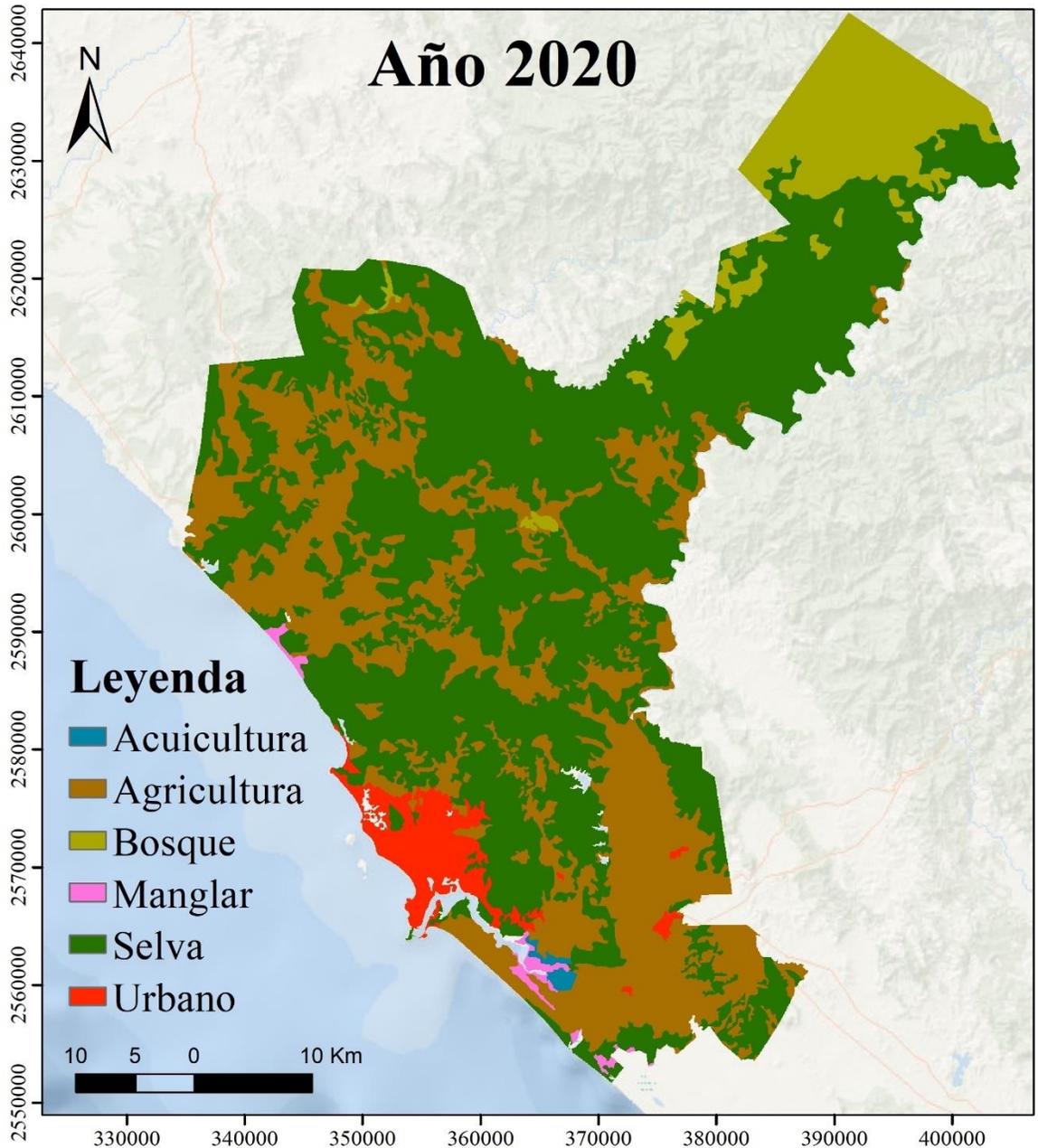


Figura 42. Uso de Suelo y Vegetación año 2020.

4.3.1. Probabilidades de transición y área de transición obtenidos del modelo de Cadenas de Márkov

Con este modelo se obtuvo la matriz de áreas de transición (2002-2011-2020) que expresa el área total (en células) que se espera que cambie del año de 2011 al año de 2020 de

acuerdo con los cambios ocurridos de 2002 a 2011 (Tabla 26). Y la matriz de probabilidad de transición (2002-2011-2020) expresa la probabilidad de que un píxel de una clase dada cambie a cualquier otra clase (o permanezca igual) en el próximo período de tiempo (Tabla 27).

Tabla 26. Matriz de zonas de Transición para 2002- 2011.

Celdas en 50 m	Se espera que haga transición a					
	Acuicultura	Agricultura	Bosque	Manglar	Selva	urbano
Acuicultura	2442	7	0	7	1	0
Agricultura	3	340458	5	60	12567	4827
Bosque	0	1091	82079	0	1089	0
Manglar	525	372	0	5862	169	0
Selva	0	27823	1352	3	498678	82
Urbano	0	172	0	0	1	23846

Tabla 27. Matriz de probabilidad de Transición para 2002- 2011.

Celdas en 50 m	Probabilidad de cambiar a					
	Acuicultura	Agricultura	Bosque	Manglar	Selva	urbano
Acuicultura	0.9941	0.0027	0	0.0027	0.0005	0
Agricultura	0	0.9512	0	0.0002	0.0351	0.0135
Bosque	0	0.0129	0.9741	0	0.0129	0
Manglar	0.758	0.0537	0	0.8460	0.0244	0
Selva	0	0.0527	0.0026	0	0.9446	0.0002
Urbano	0	0.0072	0	0	0.0001	0.9928

Los resultados de la matriz de probabilidad y zonas de transición se integran como datos de entrada en el modelo CA-Markov para tener el mapa simulado de 2020. Este mapa se realizó para validar el modelo comparando los mapas de uso del suelo de referencia de 2020 y los mapas de uso del suelo simulados de 2020 el cual se detalla en la sección 4.3.2.

4.3.2. Mapa de idoneidad

Para obtener el mapa de idoneidad previamente se analizaron y normalizaron los factores (Gómez y Barredo, 2005), para que quedaran en las mismas unidades de medida (Figura 43). Con la propósito de equilibrar el modelo, la ponderación de cada factor se ejecutó a partir de la comparación por pares de cada uno de estos factores independientes con el dependiente en nuestro caso el crecimiento urbano, obteniendo los siguientes pesos para cada uno de los factores: Pendientes (0.05), Distancia a Carreteras (0.30), Distancia a la zona urbanizada (0.28) y Distancia a cuerpos de agua (0.11) y distancia a la línea de costa (0.26).

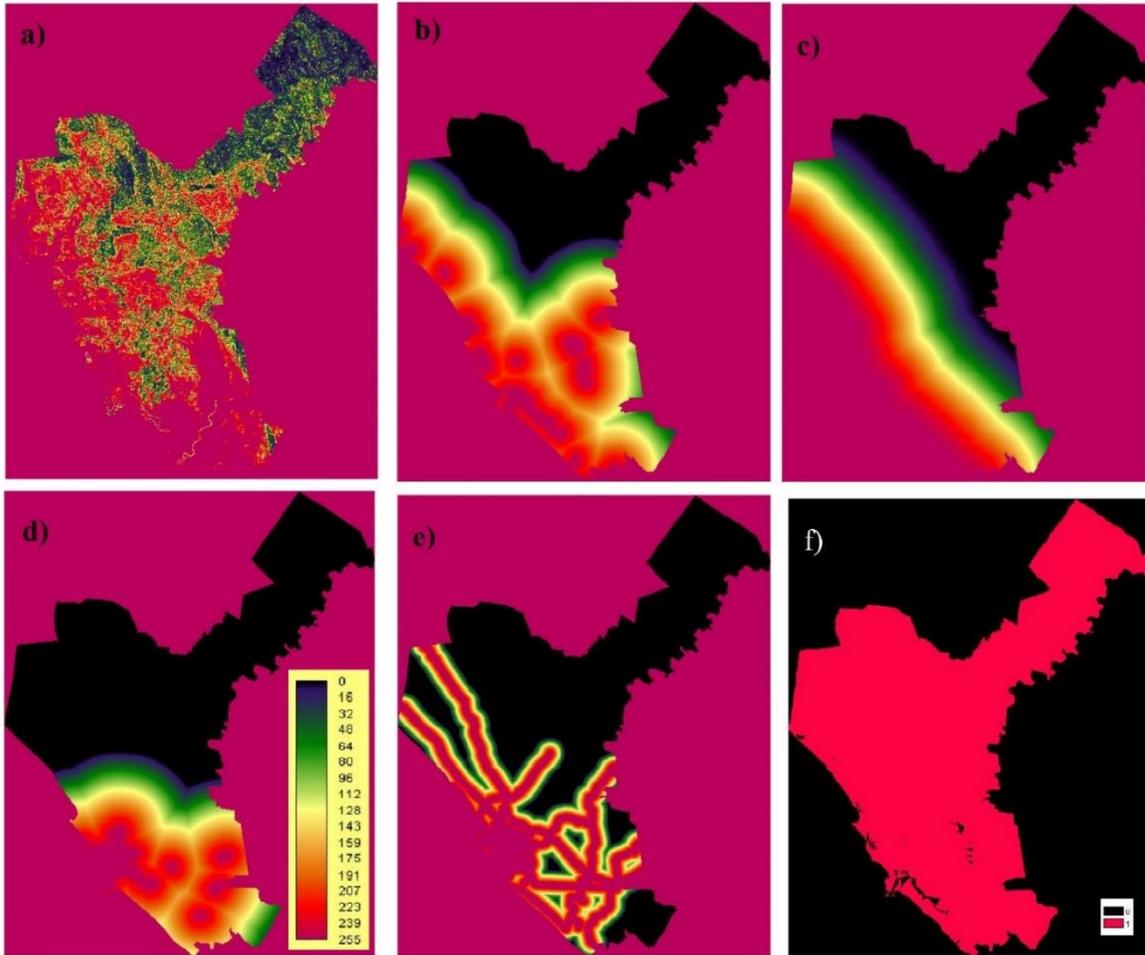


Figura 43. Factores considerados para generar los mapas de idoneidad. a) pendientes, b) distancia a cuerpos de agua, c) distancia a la línea de costa, d) distancia a la zona urbanizada y distancia a Carreteras.

Después de determinar los pesos de los factores, se procedió a realizar la evaluación multicriterio utilizando la herramienta MCE (Evaluación Multicriterio) en el software TerrSet. Los resultados obtenidos no representan directamente una probabilidad, sino que generan un mapa que muestra el nivel de idoneidad o aptitud de cada píxel para ser convertido en suelo urbano. En este estudio, nos referimos a este mapa como "mapa de idoneidad", mostrado en la Figura 44, el cual destaca los pixeles que son idóneos para el crecimiento urbano, a través de una escala de 0 a 255, donde 0 indica cero idoneidad y 255 la máxima. Este mapa de idoneidad obtenido representa las áreas más adecuadas o propicias para el desarrollo urbano en función de los criterios establecidos y los datos analizados. Es decir, identifica las zonas con mayor potencial para la expansión urbana y el crecimiento de la ciudad.

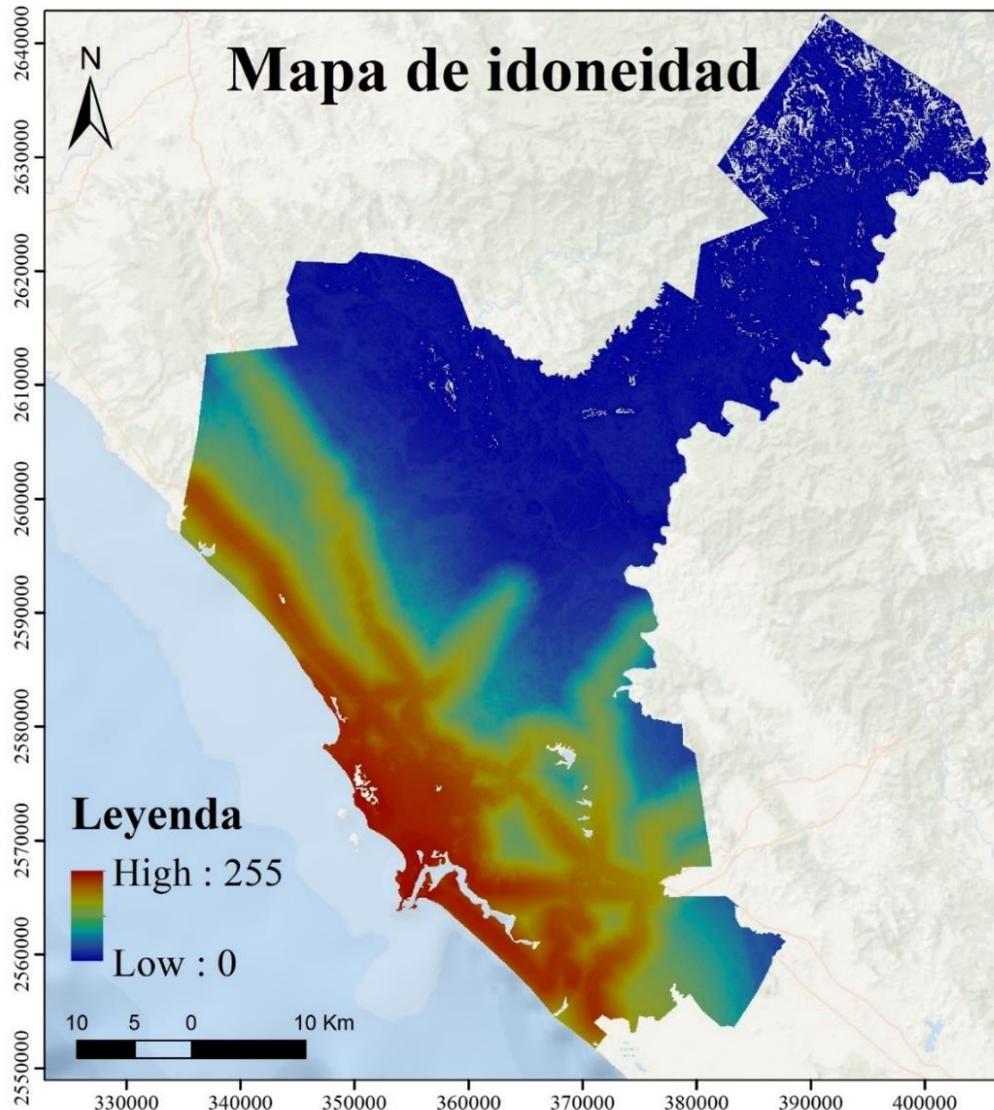


Figura 44. Mapa de idoneidad para el crecimiento urbano

El mapa de idoneidad para el uso urbano sirve como una herramienta fundamental en la planificación del desarrollo urbano sostenible, ya que ayuda a identificar áreas óptimas para la ubicación de nuevas infraestructuras, viviendas, y servicios urbanos, minimizando así los impactos negativos en el medio ambiente y optimizando el uso del suelo disponible. Este mapa proporciona una base sólida para la aplicación de modelos de simulación, como el autómata celular y el modelo de Márkov, que permiten prever y analizar los posibles escenarios de expansión urbana y evaluar su impacto en el entorno.

4.3.3. Validación del modelo de simulación AC

La validación es un procedimiento para conocer la calidad del mapa predicho obtenido frente a un mapa de referencia, y siguiendo a (Robert G. Pontius et al., 2004), se requiere de un mapa de referencia del tiempo (pasado), un mapa de referencia del tiempo (real) y un mapa de predicción del tiempo (simulado) para validar un modelo. Se usaron los usos de suelo de los años 2002 y 2011 para calibrar el modelo, y el modelo se validó simulando el reciente mapa 2020. Todos los estadísticos Kappa mostraron un valor por encima de 0.80% ($K_{\text{standard}} = 0.95$ % $K_{\text{location}} = 0.98\%$, y $K_{\text{no}} = 0.96\%$), indicando un alto nivel de concordancia entre el mapa simulado y el pronosticado y un nivel de precisión satisfactorio (Tabla 28, Figura 45 y 46). Además, el desacuerdo de cantidad QD, y el desacuerdo de asignación AD fueron de 2% y 1% respectivamente. Estos resultados confirman la validez del modelo CA-Markov e indica que el modelo puede ser utilizado para generar los posibles escenarios a los años 2030 y 2050 de los cambios de uso de suelo. Después de verificar la capacidad predictiva del modelo entre periodos de tiempo 2002 y 2011 para el 2020, se repitió el proceso de simulación para proyectar los mapas de los años 2030 y 2050.

Tabla 28. Valores de Kappa para el uso de suelo previsto para el año 2020.

Estadísticas de Kappa	Valores
Kstandard	0.9524
Kno	0.9687
Klocation	0.9840

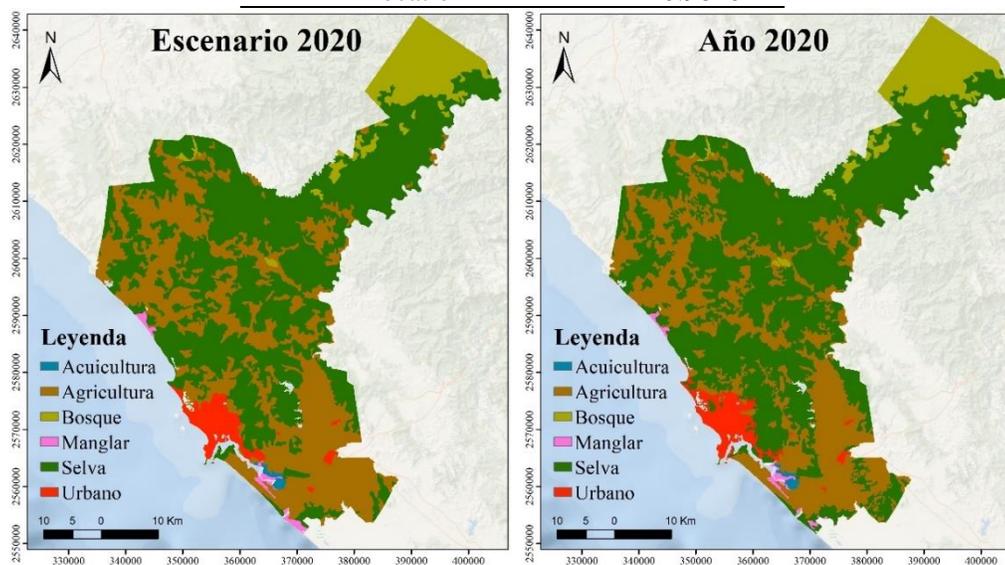


Figura 45. Validación del modelo CA-Markov

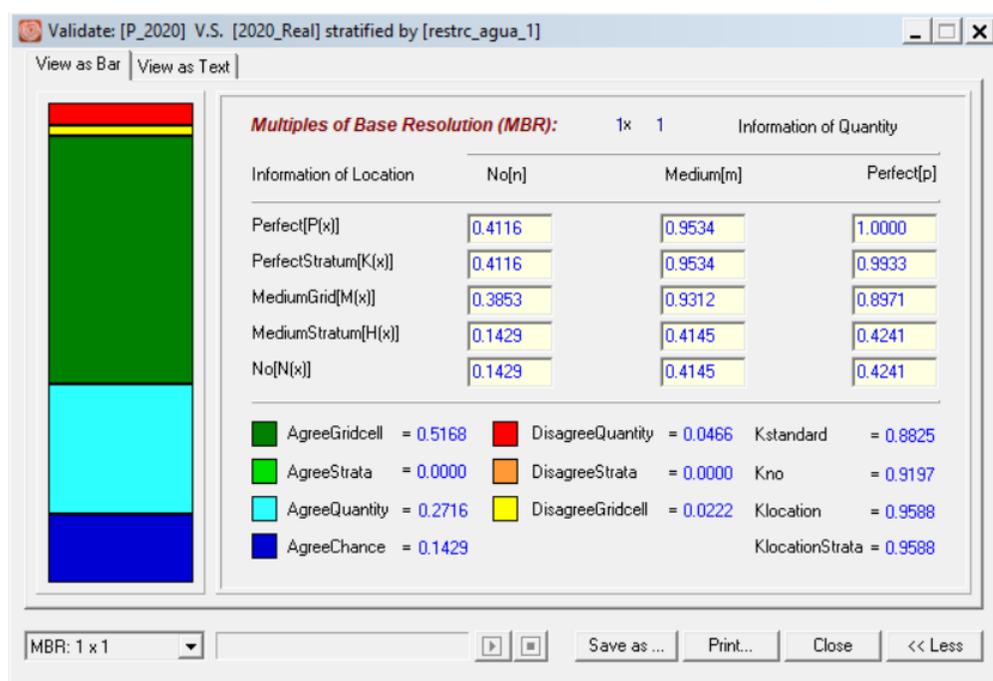


Figura 46. Registro de la validación del modelo

4.3.4. Proyección del mapa de uso de suelo a través del modelo Autómatas Celulares-Markov.

Después de la validación y aceptación del modelo, se ejecutó el modelo CA-Markov para predecir el uso de suelo para 2030 y 2050. De acuerdo a los resultados de la simulación del modelo CA-Markov, se observan cambios en los diferentes tipos de uso de suelo para los años 2030 y 2050 en comparación con el año base de 2020 (Tabla 29). Sin embargo, esta evolución solo es válida si la tendencia pasada discutida en este manuscrito persiste linealmente en el futuro.

Tabla 29. Cambios en el uso del 2020 al 2050 en el municipio de Mazatlán.

Categoría	Superficie (hectáreas)			Variación neta (hectáreas)		
	2020	2030	2050	2020-2030	2030-2050	2020-2050
Acuicultura	618	618	619.5	0	1.5	1.5
Agricultura	77026.5	66756.5	67303.75	-10270	-547.25	-9722.75
Bosque	21222.5	21222.5	21029.75	0	-192.75	-192.75
Manglar	1343.5	1079.5	939.5	-264	-140	-404
Selva	142275	150741	147988	8466	-2753	5713
Urbano	8223.75	10291.75	12828.75	2068	2537	4605

Las matrices de probabilidad y la matriz de área de transición obtenidas por la cadena de Márkov con el número de periodos de proyección de 10 para 2030 y 30 para 2050 se presentan en las siguientes tablas.

Tabla 30. Matriz de zonas de Transición para el año 2030.

Celdas en 50 m	Se espera que haga transición a					
	Acuicultura	Agricultura	Bosque	Manglar	Selva	urbano
Acuicultura	2361	0	0	0	2	0
Agricultura	7	259334	875	25	42500	5362
Bosque	0	337	84445	0	109	0
Manglar	5	2	0	3985	1379	0
Selva	1	7376	64	363	55835	2932
Urbano	0	7	0	0	10	32852

Tabla 31. Matriz de probabilidades de Transición para el año 2030

Celdas en 50 m	Probabilidad de cambiar a					
	Acuicultura	Agricultura	Bosque	Manglar	Selva	urbano
Acuicultura	0.9991	0	0	0	0.0009	0
Agricultura	0	0.8417	0.0028	0.0001	0.1379	0.0174
Bosque	0	0.0040	0.9948	0	0.0013	0
Manglar	0.0009	0.0003	0	0.7420	0.2568	0
Selva	0	0.0130	0.0001	0.0006	0.9811	0.0052
Urbano	0	0.0002	0	0	0.0003	0.9995

Tabla 32. Matriz de zonas de Transición para el año 2050.

Celdas en 50 m	Se espera que haga transición a					
	Acuicultura	Agricultura	Bosque	Manglar	Selva	urbano
Acuicultura	2359	1	0	1	0	0
Agricultura	1	247390	909	74	50177	9553
Bosque	0	1428	82283	0	1179	0
Manglar	420	110	0	3356	1487	0
Selva	0	31596	1493	354	532544	3109
Urbano	0	216	0	0	2	32660

Tabla 33. Matriz de probabilidad de Transición para el año 2050

Celdas en 50 m	Probabilidad de cambiar a					
	Acuicultura	Agricultura	Bosque	Manglar	Selva	urbano
Acuicultura	0.9989	0.0006	0	0.0006	0.	0
Agricultura	0	0.8029	0.0030	0.0002	0.1629	0.0310
Bosque	0	0.0168	0.9693	0	0.0139	0
Manglar	0.782	0.0206	0.	0.6245	0.2767	0
Selva	0	0.0555	0.0026	0.0006	0.9358	0.0055
Urbano	0	0.0066	0	0	0.0001	0.9934

En particular se predice que el área de asentamiento experimentará un crecimiento significativo a lo largo del tiempo. En concreto, se espera que el área de asentamiento aumente de 2068 ha en el año 2030 a 4605 ha en el año 2050 (Figura 47). Mientras que la superficie dedicada a la acuicultura se mantiene constante entre 2020 y 2030, y experimenta un aumento de 1.5 hectáreas para el año 2050. Agricultura disminuye en 10,270 hectáreas para el año 2030, y esta disminución continúa hasta el año 2050, con una reducción adicional de 547.25 hectáreas. La extensión del bosque permanece estable hasta el año 2030, pero disminuye en 192.75 hectáreas para el año 2050. El manglar experimenta una disminución de 264 hectáreas para el año 2030, y esta tendencia continúa con una reducción adicional de 140 hectáreas para el año 2050. La superficie de selva aumenta en 8,466 hectáreas para el año 2030, pero disminuye en 2,753 hectáreas para el año 2050, lo anterior se puede apreciar espacialmente mediante las Figuras 47 y 48.

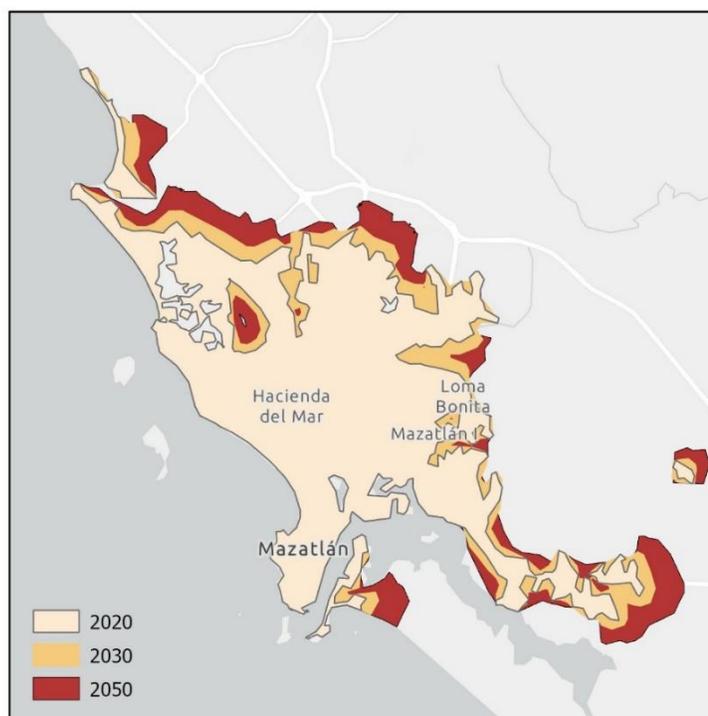


Figura 47. Crecimiento urbano de la ciudad de Mazatlán.

Las alteraciones observadas en la distribución de los usos del suelo indican ciertas direcciones y fuerzas impulsoras en el avance urbano y la actividad económica en el área, lo que podría tener consecuencias significativas en la planificación territorial y la preservación de

los recursos naturales. Este análisis revela un proceso de expansión gradual hacia las áreas periféricas del territorio estudiado, lo que ha resultado en la transformación de zonas agrícolas y forestales en áreas urbanas. Este crecimiento urbano conlleva la pérdida de terrenos naturales y agrícolas valiosos para la economía regional. Además, indica que este cambio en el uso del suelo tiene un impacto en la economía local, con la disminución de tierras agrícolas y el aumento de áreas urbanizadas. En consecuencia, es necesario implementar nuevas políticas y estrategias gubernamentales para mitigar la pérdida de tierras agrícolas y forestales debido al desarrollo urbano descontrolado.

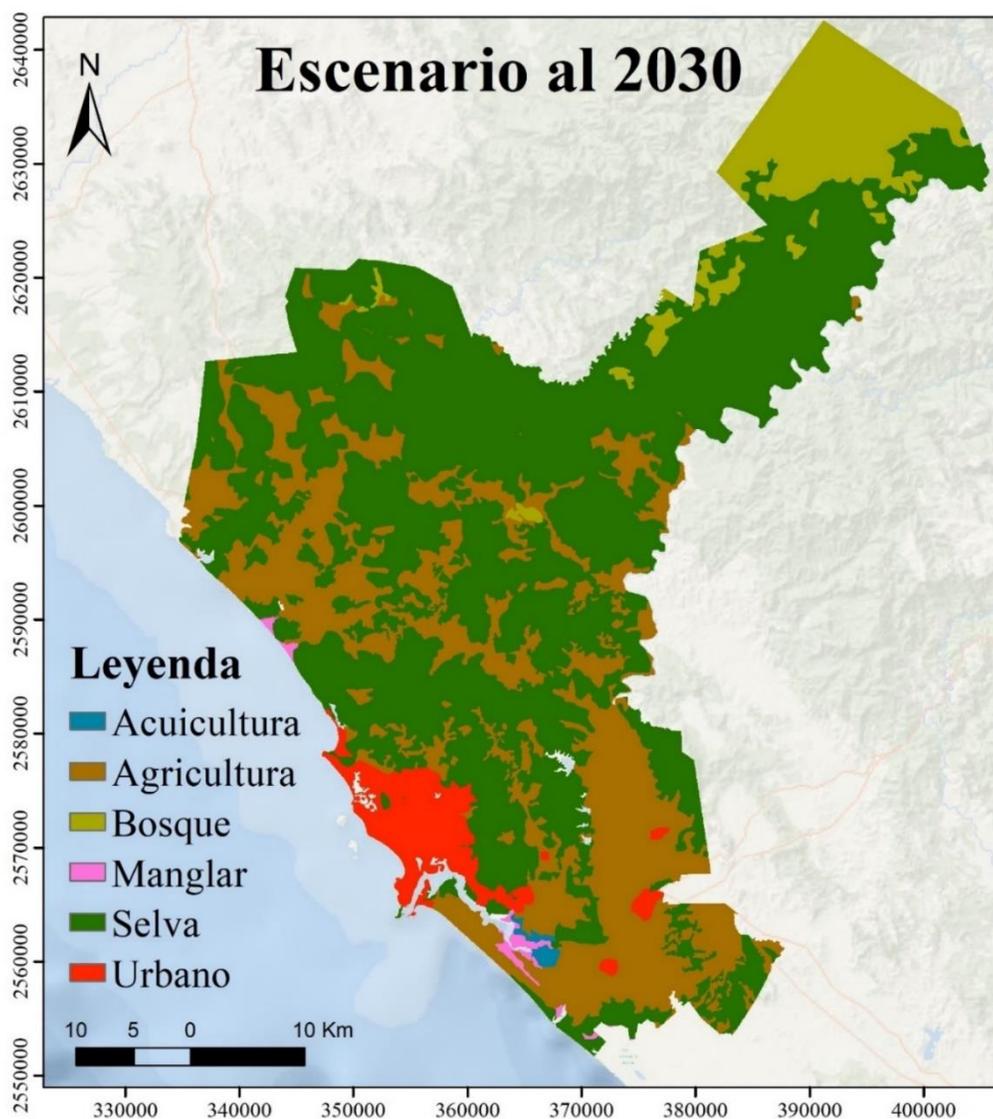


Figura 48. Escenario de uso de suelo al 2030

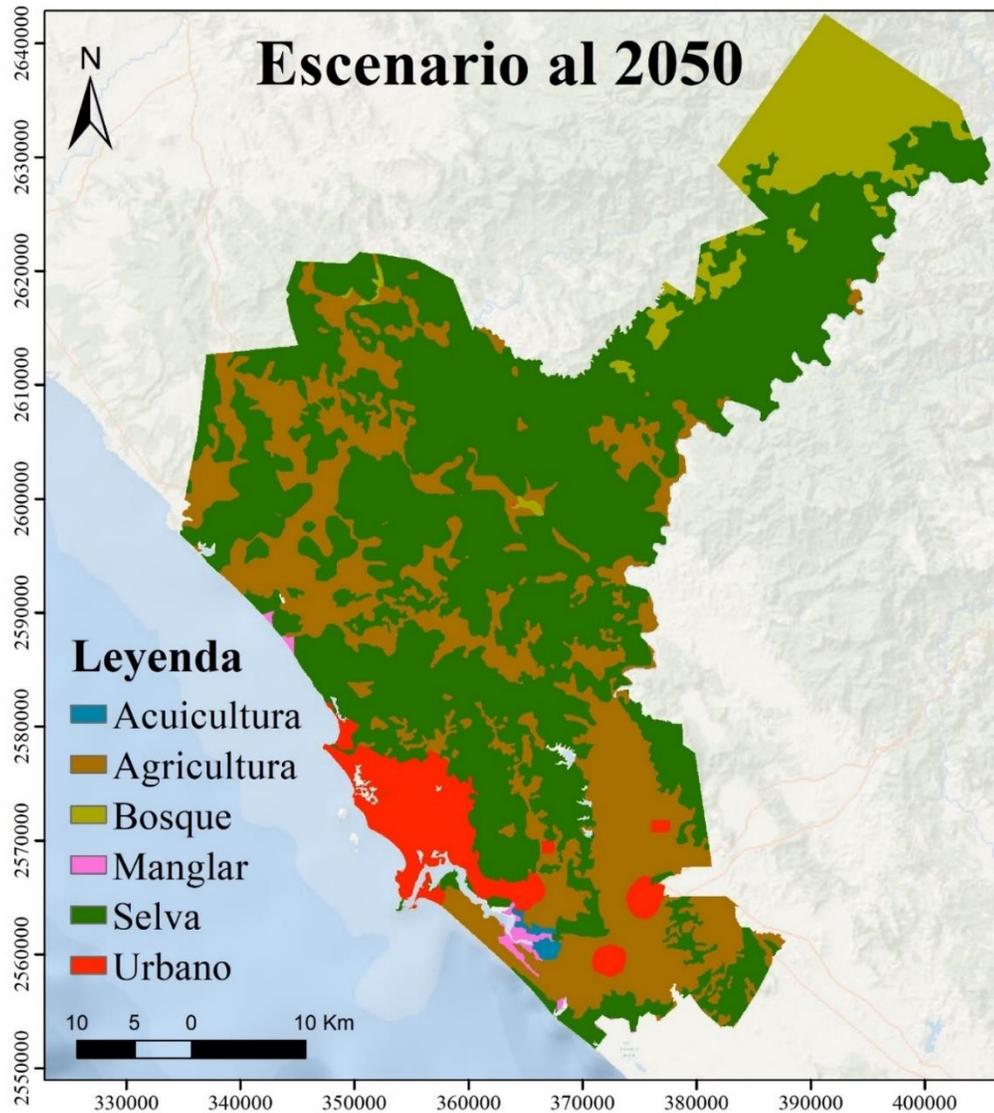


Figura 49. Escenario de uso de suelo al 2050

4.4. Riesgo ante impactos del cambio climático.

Este segmento representa una culminación derivada de la consideración de todos los factores objeto de análisis en la investigación. El resultado final incorpora el escenario de uso de suelo urbano para el año 2050 obtenido mediante el modelo CA-Markok, con el objetivo de identificar las áreas que en un futuro inmediato enfrentarán un nivel de riesgo ante el cambio climático.

CAPITULO V. CONCLUSIONES

La presente tesis doctoral se centró en el diseño de un marco metodológico integral destinado a la evaluación y análisis del riesgo asociado a los impactos del cambio climático en áreas costeras. Se priorizó la consideración de procesos como la erosión costera, fenómenos tropicales extremos y el aumento del nivel del mar, con el propósito de comprender de manera holística los efectos climáticos adversos. Se emplearon tecnologías de la información geográfica para la recolección, análisis y representación de datos geospaciales pertinentes. Además de evaluar los efectos directos del cambio climático y los eventos extremos, se investigó la influencia de la expansión urbana en la exacerbación del riesgo costero. El objetivo primordial radica en el diseño de una metodología robusta que permitió obtener resultados base para la planificación y gestión efectiva de áreas vulnerables, contribuyendo así a la mitigación de los impactos del cambio climático en las zonas costeras.

En el diseño de esta metodología, se adoptó el Marco Conceptual de Riesgo del IPCC como un marco de referencia fundamental para la obtención del mapa de riesgo frente a los impactos del cambio climático. Al utilizar este enfoque, se pudo abarcar una amplia variedad de variables y factores pertinentes para evaluar el riesgo climático en la región de manera integral y sistemática. Además, se llevó a cabo un análisis de impacto desde una perspectiva local hasta global, en consonancia con los Objetivos de Desarrollo Sostenible 2030, para comprender mejor las interconexiones entre los riesgos climáticos locales y los desafíos globales de sostenibilidad. Este enfoque integrado proporciona una base sólida para la formulación de estrategias de adaptación y mitigación que aborden eficazmente los riesgos climáticos en el litoral del Golfo de California y en específico la zona costera de Mazatlán, al tiempo que contribuyen al logro de los objetivos de desarrollo sostenible a nivel mundial.

El marco metodológico diseñado en esta investigación presenta la versatilidad necesaria para ser aplicada en otros golfos y ciudades costeras, tanto con características

similares como diferentes. Esto convierte a este diseño metodológico en una herramienta valiosa y adaptable para diversas áreas geográficas. Su enfoque se fundamenta en la integración de modelos para evaluar los múltiples peligros a los que están expuestas las zonas costeras, así como en la evaluación de la expansión urbana que estará en riesgo. El objetivo principal de este trabajo fue diseñar una nueva metodología holística para la evaluación de los riesgos, la cual se logró satisfactoriamente.

Los resultados de esta tesis muestran que el Golfo de California enfrenta y enfrentará desafíos significativos debido al aumento del nivel del mar y la intensificación de las tormentas tropicales. El incremento proyectado en el nivel del mar amenaza con causar graves impactos en las costas, principalmente por erosión y pérdida de hábitats costeros. Por otro lado, las tormentas tropicales, cada vez más intensas, representan un peligro creciente para las comunidades costeras, con el potencial de causar inundaciones, erosión y daños a la infraestructura. Ante estas condiciones, es crucial implementar medidas de adaptación y mitigación, así como promover una planificación urbana resiliente, con el fin de proteger tanto a las comunidades como a los ecosistemas costeros frente a los impactos del cambio climático en el Golfo de California.

El 72% de la costa del Golfo de California está experimentando una erosión constante y el 28% está sujeto a acreción. La costa que mostró mayor estabilidad fue Baja California Sur. Se encontró que las erosiones más altas ocurren alrededor de las desembocaduras de los ríos represados y en áreas con alta densidad de población, así como en usos agrícolas y acuícolas. Los puntos calientes de erosión más prominentes se observaron en la costa norte de Baja California, en las costas norte y sur de Sonora, y a lo largo de la costa de Sinaloa. La acreción se notó principalmente a lo largo de las costas de BC y BCS (excepto la costa norte). Estos resultados permitieron una primera aproximación de la ubicación de sectores en alto riesgo para aplicar en ellos un análisis más detallado.

El modelo para pronosticar la posición futura de la línea de costa indicó que las líneas continuarán retrocediendo, por lo tanto, el mapeo, monitoreo y pronóstico de cambios en la costa del Golfo de California son cruciales en la formulación de políticas y regulaciones de mitigación, ya que los resultados proporcionan una mejor comprensión del cambio histórico que ha experimentado la costa, así como su pronóstico futuro. Aunque este estudio no

examinó las causas exactas de los cambios observados en la línea de costa, pueden atribuirse a procesos naturales, actividades humanas y cambio climático, que están obligando al movimiento hacia tierra de las posiciones de la costa. Dado el pronóstico de un aumento continuo en la erosión costera, es crucial llevar a cabo investigaciones adicionales en las zonas costeras donde se está observando un retroceso considerable de la línea de costa. Además, surge la necesidad de implementar políticas de gestión de riesgos costeros que aborden esta realidad de manera efectiva. Esto significa tomar medidas concretas para proteger las áreas vulnerables y reducir el impacto de la erosión en las comunidades y los ecosistemas costeros.

En específico para Mazatlán además de los procesos naturales que afectan a su costa se suma el estrés costero atribuido principalmente a las acciones antrópicas presentes en la zona. Por lo que, la compresión costera o presión antrópica es un factor muy importante presente en la costa de Mazatlán la cual fue necesario contemplar en esta investigación analizándola mediante el crecimiento urbano en la Ciudad mediante el modelo CA-Markov, los resultados de este modelo de simulación del crecimiento urbano, muestra que se dará un crecimiento de 2,068 ha en el año 2030 a 4,605 ha en el año 2050. Este modelo demuestra ser una herramienta eficaz para generar escenarios futuros alternativos de expansión urbana en la zona de Mazatlán. Estos resultados pueden ser base sólida para la toma de decisiones por parte de los planificadores urbanos.

En el caso del Golfo de California y en específico de Mazatlán, pueden ser tomados los resultados de esta investigación por los administradores de recursos costeros municipales, estatales e incluso nacionales en la toma de decisiones en pro de la conservación de las costas y de los riesgos a los que podrán enfrentar la población que habita cercana a ella. En los municipios costeros de México son mínimos los marcos legales que regulen y protejan el uso de las playas, así como de programas para su recuperación y restauración. Por lo que, para cumplir con los ODS y en específico el 14 es necesario que los Gobiernos de cada una de las regiones tomen como base el diseño de esta metodología presentada u otras dentro del ámbito científico para identificar las áreas de mayor riesgo y las estrategias de adaptación más integrales y eficaces para poder gestionar y salvaguardar de manera sostenible los ecosistemas marinos y costeros para prevenir impactos adversos significativos.

En futuras investigaciones, se podría profundizar en la integración de modelos predictivos más precisos para evaluar el comportamiento del aumento del nivel del mar y la frecuencia y severidad de los fenómenos climáticos, como ciclones tropicales, a lo largo del Golfo de California. Además, sería valioso investigar en mayor detalle los mecanismos de la erosión costera y su interacción con la expansión urbana en ciudades costeras específicas. Asimismo, ampliar el estudio a otras ciudades costeras para obtener un panorama más completo de los riesgos asociados al cambio climático.

También, se podría considerar la inclusión de otros tipos de análisis para enriquecer la evaluación de los impactos del cambio climático en las costas. Por ejemplo, sería relevante contemplar el análisis del oleaje y las corrientes marinas, así como la temperatura superficial del mar, para comprender mejor los procesos oceanográficos que influyen para que aumenten los riesgos en las zonas costeras. Además, se podría investigar los cambios en los usos del suelo en las áreas costeras y la pérdida de ecosistemas clave, como los manglares, para evaluar su impacto en la resiliencia costera frente al cambio climático. Integrar estos análisis adicionales en el estudio podría proporcionar una comprensión más holística y detallada de los riesgos asociados al cambio climático en las zonas costeras y mejorar la efectividad de las estrategias de adaptación y mitigación.

En las futuras investigaciones es importante considerar datos geoespaciales actualizados y tecnologías de modelado avanzadas para mejorar la precisión y la utilidad del mapa final de riesgo, proporcionando así una base más sólida para la planificación y la toma de decisiones en la gestión del cambio climático.

REFERENCIAS

- Aarathi, A. D., & Gnanappazham, L. (2018). Predicción del crecimiento urbano utilizando el modelo de Automatas Celulares basados en agentes acoplados a redes neuronales para Sriperumbudur Taluk, Tamil Nadu, India. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 21(3), 353–362. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2017.12.004>
- Aguilar, P., Mendoza, E., & Silva, R. (2021). Interaction between Tourism Carrying Capacity and Coastal Squeeze in Mazatlan, Mexico. *Land*, 10, 2–24.
- Amini Parsa, V., Yavari, A., & Nejadi, A. (2016). Spatio-temporal analysis of land use/land cover pattern changes in Arasbaran Biosphere Reserve: Iran. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2(4), 1–13. <https://doi.org/10.1007/s40808-016-0227-2>
- Anderson, B. T., Roads, J. O., Chen, S. C., & Juang, H. M. H. (2000). Regional simulation of the low-level monsoon winds over the Gulf of California and southwestern United States. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 105(D14), 17955–17969. <https://doi.org/10.1029/2000JD900161>
- Assaf, C., Adams, C., Ferreira, F. F., & França, H. (2021). Land use and cover modeling as a tool for analyzing nature conservation policies – A case study of Juréia-Itatins. *Land Use Policy*, 100, 104895. <https://doi.org/10.1016/J.LANDUSEPOL.2020.104895>
- Avalos Jiménez, A., Gómez Delgado, M., Aguilera Benavente, F., & Flores Vilchez, F. (2019). Simulación del crecimiento urbano de la zona metropolitana Tepic-Xalisco, México. *Estudios Geográficos*, 80(287), 021. <https://doi.org/10.3989/estgeogr.201938.018>
- Baig, M. R. I., Ahmad, I. A., Shahfahad, Tayyab, M., & Rahman, A. (2020). Analysis of shoreline changes in Vishakhapatnam coastal tract of Andhra Pradesh, India: an application of digital shoreline analysis system (DSAS). *Annals of GIS*, 26(4), 361–376. <https://doi.org/10.1080/19475683.2020.1815839>
- Barbaro, G., Bombino, G., Foti, G., Borrello, M. M., & Puntorieri, P. (2019). Shoreline evolution near river mouth: Case study of Petrace River (Calabria, Italy). *Regional Studies in Marine Science*, 29, 100619. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100619>
- Bardají, T., Caridad Zazo, A. C., Cristino, J. D., Goy, J. L., Lario, J., & Silva, P. G. (2009). Impacto del cambio climático en el litoral. *Enseñanza de Las Ciencias de La Tierra*, 17(2), 141–154.
- Barredo, J. I., & Engelen, G. (2010). Land use scenario modeling for flood risk mitigation. *Sustainability*, 2(5), 1327–1344. <https://doi.org/10.3390/su2051327>
- Bera, R., & Maiti, R. (2019). Quantitative analysis of erosion and accretion (1975–2017) using DSAS

- A study on Indian Sundarbans. *Regional Studies in Marine Science*, 28, 100583. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2019.100583>
- Beraud Lozano, J. L. (1997). Interacciones sociedad-naturaleza. *Región y Sociedad*, VIII. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=10201304>
- Bernal, G., Ripa, P., & Herguera, J. C. (2001). Oceanographic and climatic variability in the lower Gulf of California: Links with the Tropics and North Pacific. *Ciencias Marinas*, 27(4), 595–617. <https://doi.org/10.7773/cm.v27i4.498>
- Bird, E. C. F. (1985). Coastline changes: A global review. In *John Wiley: Chischester, U.K.* John Wiley: Chischester, U.K. <https://doi.org/10.1002/gj.3350210215>
- Boak, E. H., & Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 214, 688–703. <https://doi.org/10.2112/03-0071.1>
- Bruun, P. (1962). Sea-Level Rise as a Cause of Shore Erosion. *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 88(1), 117–132.
- Cabezas-Rabadán, C., Pardo-Pascual, J. E., Almonacid-Caballer, J., Palomar-Vázquez, J., & Fernández-Sarría, A. (2019). Monitorizando La Respuesta De Playas Mediterráneas a Temporales Y Actuaciones Antrópicas Mediante Imágenes Landsat. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 23, 119–139. <https://doi.org/10.21138/gf.640>
- Cantergiani, C., & Delgado, M. G. (2016). Diseño de un modelo basado en Agentes para simular el crecimiento urbano en el corredor del Henares (Comunidad de Madrid). *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 70(70). <https://doi.org/10.21138/bage.2171>
- Cantergiani, C., Vergara, C., & Gómez, M. (2014). Desarrollo de un Modelo Basado en Agentes para la simulación del crecimiento urbano: Submodelo de asignación de nuevo suelo urbanizable. *XVI Congreso Nacional de Tecnologías de La Información Geográfica*. <http://congresotig.ua.es/index.php/tig/tig2014/paper/download/12/92>
- Canul, R., Mendoza, E., & Silva, R. (2020). A probabilistic approach to a Coastal Vulnerability Index: a tool for coastal managers. *Coastal Engineering Proceedings*, 36v, 37. <https://doi.org/10.9753/icce.v36v.papers.37>
- Cao, Y., Zhang, X., Fu, Y., Lu, Z., & Shen, X. (2020). Modelado de crecimiento espacial urbano utilizando regresión logística y autómatas celulares: un estudio de caso de Hangzhou. *Ecological Indicators*. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106200>
- Carriquiry, J. D., & Sánchez, A. (1999). Sedimentation in the Colorado River delta and Upper Gulf of California after nearly a century of discharge loss. *Marine Geology*, 158(1–4), 125–145. [https://doi.org/10.1016/S0025-3227\(98\)00189-3](https://doi.org/10.1016/S0025-3227(98)00189-3)

- Carriquiry, José D., Sánchez, A., & Camacho-Ibar, V. F. (2001). Sedimentation in the northern Gulf of California after cessation of the Colorado River discharge. *Sedimentary Geology*, 144(1–2), 37–62. [https://doi.org/10.1016/S0037-0738\(01\)00134-8](https://doi.org/10.1016/S0037-0738(01)00134-8)
- Castillo, M., Muñoz-Salinas, E., Sanderson, D. C. W., & Cresswell, A. (2020). Landscape evolution of Punta Arena sand spit (SE Baja California Peninsula, NW Mexico): Implications of ENSO on landscape erosion rates. *Catena*, 193. <https://doi.org/10.1016/J.CATENA.2020.104601>
- CENAPRED. (2006). *Guía Básica para la Elaboración de Atlas Estatales y Municipales de Peligros y Riesgos: Fenómenos Hidrometeorológicos*.
- CENECAM. (2002). *Informe del director General del CENECAM y Secretario Técnico del Consejo Estatal de Protección Civil de la temporada de ciclones, lluvias e inundaciones*.
- Chuvieco, E. S. (2008). *Teledetección Ambiental* (Tercera ed).
- Cifuentes, M. A., & Rosero, Leydy Viviana; Selvaraj, J. J. (2017). DETECCIÓN DE CAMBIOS DE LA LÍNEA COSTERA AL NORTE DEL DISTRITO DE BUENAVENTURA MEDIANTE EL USO DE SENSORES REMOTOS. *Boletín de Investigación MARina y Costera*, 46(1), 137–152. <http://www.scielo.org.co/pdf/mar/v46n1/0122-9761-mar-46-01-00137.pdf>
- Coca, O., & Ricaurte-Villota, C. (2022). Regional Patterns of Coastal Erosion and Sedimentation Derived from Spatial Autocorrelation Analysis: Pacific and Colombian Caribbean. *Coasts 2022*, Vol. 2, Pages 125-151, 2(3), 125–151. <https://doi.org/10.3390/COASTS2030008>
- CONABIO. (2022). *Cartografía de la Línea de costa de México fundamental para la toma de decisiones sobre los recurso naturales costeros*. <https://www.gob.mx/conabio/prensa/conabio-genera-nueva-cartografia-de-la-linea-de-costa-de-mexico?idiom=es>.
- Crowell, M., Leatherman, S. P., & Buckley, M. K. (1991). Historical Shoreline Change : Error Analysis and Mapping Accuracy. *Journal of Coastal Research*, 839–852. <http://www.jstor.org/stable/4297899%5Cnhttp://about.jstor.org/terms>
- Dawahidi, T., Marinas, D. I., & Gomariz-Castillo, F. (2019). Accuracy measurement of sea level rise due to effect of Climate Change through tide gauge data and NASA Topex-Poseidon/Jason satellite series. The case of Valencia. *Anales de Geografía de La Universidad Complutense*, 39(1), 39–58. <https://doi.org/10.5209/aguc.64676>
- Douglas, B. C., & Crowell, M. (2000). Long-term shoreline position prediction and error propagation. *Journal of Coastal Research*, 16(1), 145–152.
- Durgappa, R. (2008). Coastal protection works. *Seventh International Conference of Coastal and Port Engineering in Developing Countries, Dubai*.
- Eastman, R. J. (2003). *IDRISI Kilimanjaro Guide to GIS and Image Processing.USA: IdrisiProduction*.
- Engelen, G., Lavalle, C., Barredo, J. I., Meulen, M., & White, R. (2007). The MOLAND Modelling

- Framework for Urban and Regional Land-Use Dynamics,. In *in: Modelling Land-Use Change*. (pp. 297–319). <https://doi.org/10.1002/ccd.1810290311>
- Enríquez-Andrade, R., Anaya-Reyna, G., Barrera-Guevara, J. C., De Los Ángeles Carvajal-Moreno, M., Martínez-Delgado, M. E., Vaca-Rodríguez, J., & Valdés-Casillas, C. (2005). An analysis of critical areas for biodiversity conservation in the Gulf of California Region. *Ocean and Coastal Management*, *48*(1), 31–50. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2004.11.002>
- Espejel, I., Espinoza-Tenorio, A., Cervantes, O., Popoca, I., Mejía, A., & Delhumeau, S. (2007). Proposal for an integrated risk index for the planning of recreational beaches: Use at seven Mexican arid sites. *Journal of Coastal Research, SPEC. ISSUE 50*, 47–51.
- Fairbridge, R. W. (1961). Eustatic changes in sea level. *Physics and Chemistry of the Earth*, *4*(C), 99–185. [https://doi.org/10.1016/0079-1946\(61\)90004-0](https://doi.org/10.1016/0079-1946(61)90004-0)
- Farfán, L. M., D'Sa, E. J., Liu, K. biu, & Rivera-Monroy, V. H. (2014). Tropical Cyclone Impacts on Coastal Regions: the Case of the Yucatán and the Baja California Peninsulas, Mexico. *Estuaries and Coasts*, *37*(6), 1388–1402. <https://doi.org/10.1007/s12237-014-9797-2>
- Feng, Y., Liu, Y., & Batty, M. (2016). Modeling urban growth with GIS based cellular automata and least squares SVM rules: a case study in Qingpu–Songjiang area of Shanghai, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, *30*(5), 1387–1400. <https://doi.org/10.1007/s00477-015-1128-z>
- Fotsi, Y. F., Pouvreau, N., Brenon, I., Onguene, R., & Etame, J. (2019). Temporal (1948-2012) and dynamic evolution of the Wouri estuary coastline within the gulf of Guinea. *Journal of Marine Science and Engineering*, *7*(10). <https://doi.org/10.3390/jmse7100343>
- Fraille-Jurado, P., & Fernández-Díaz, M. (2018). Escala, Esfuerzo Digitalizador Y Fractalidad En La Línea De Costa. *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, *21*, 253–277. <https://doi.org/10.21138/gf.568>
- Franco-Ochoa, C., Zambrano-Medina, Y., Plata-Rocha, W., Monjardín-Armenta, S., Rodríguez-Cueto, Y., Escudero, M., & Mendoza, E. (2020). *Long-Term Analysis of Wave Climate and Shoreline Change along the Gulf of California*. 1–17. <https://doi.org/10.3390/app10238719>
- Fu, X., Wang, X., & Yang, Y. J. (2018). Deriving suitability factors for CA-Markov land use simulation model based on local historical data. *Journal of Environmental Management*, *206*, 10–19. <https://doi.org/10.1016/J.JENVMAN.2017.10.012>
- G.I.O.C. (2000). *Dinámicas. Documento de Referencia. Universidad de Cantabria*.
- Gallina, V., Torresan, S., Zabeo, A., Critto, A., Glade, T., & Marcomini, A. (2020). A multi-risk methodology for the assessment of climate change impacts in coastal zones. *Sustainability (Switzerland)*, *12*(9). <https://doi.org/10.3390/su12093697>

- Gao, X., Wang, J., Li, C., Shen, W., Song, Z., Nie, C., & Zhang, X. (2021). Land use change simulation and spatial analysis of ecosystem service value in Shijiazhuang under multi-scenarios. *Environmental Science and Pollution Research*, 1–16. <http://link.springer.com/10.1007/s11356-021-12826-9>
- García Contreras, D., Herrero Lantarón, J., Baquerizo Azofra, A., & Losada Rodríguez, M. . (2013). Cálculo de la cota de inundación en áreas litorales considerando de forma conjunta forzamientos marítimos y terrestres. *XII Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos*, 234-35.
- García Cueto, R., Tejeda Martínez, A., & CastilloPerez, N. I. (2010). *México ante el cambio climático. October.*
- Gemitzi, A. (2021). Predicting land cover changes using a CA Markov model under different shared socioeconomic pathways in Greece. *GIScience and Remote Sensing*, 58(3), 425–441. https://doi.org/10.1080/15481603.2021.1885235/SUPPL_FILE/TGRS_A_1885235_SM9605.DOCX
- Genz, A. S., Fletcher, C. H., Dunn, R. A., Frazer, L. N., & Rooney, J. J. (2007). The Predictive Accuracy of Shoreline Change Rate Methods and Alongshore Beach Variation on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research*, 23(1 (231)), 87–105. <https://doi.org/10.2112/05-0521.1>
- Gharaibeh, A., Shaamala, A., Obeidat, R., & Al-Kofahi, S. (2020). Improving land-use change modeling by integrating ANN with Cellular Automata-Markov Chain model. *Heliyon*, 6(9), e05092. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05092>
- Ghosh, P., Mukhopadhyay, A., Chanda, A., Mondal, P., Akhand, A., Mukherjee, S., Nayak, S. K., Ghosh, S., Mitra, D., Ghosh, T., & Hazra, S. (2017). Application of Cellular automata and Markov-chain model in geospatial environmental modeling- A review. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 5, 64–77. <https://doi.org/10.1016/J.RSASE.2017.01.005>
- Gidey, E., Dikinya, O., Sebege, R., Segosebe, E., & Zenebe, A. (2017). Cellular automata and Markov Chain (CA_Markov) model-based predictions of future land use and land cover scenarios (2015–2033) in Raya, northern Ethiopia. *Modeling Earth Systems and Environment*, 3(4), 1245–1262. <https://doi.org/10.1007/S40808-017-0397-6/FIGURES/6>
- Godwyn-Paulson, P., Jonathan, M. P., Roy, P. D., Rodríguez-Espinosa, P. F., Muthusankar, G., Muñoz-Sevilla, N. P., & Lakshumanan, C. (2021). Evolution of southern Mexican Pacific coastline: Responses to meteo-oceanographic and physiographic conditions. *Regional Studies in Marine Science*, 47, 101914. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2021.101914>
- Gómez-Pazo, A., Pérez-Alberti, A., & Pérez, X. L. O. (2019). Recent evolution (1956-2017) of rodas beach on the Cíes Islands, Galicia, NW Spain. *Journal of Marine Science and Engineering*, 7(5). <https://doi.org/10.3390/jmse7050125>

- González Terrazas, D. I., Vermonden Thibodeau, A., Montes Rojas, R. T., Nava Assad, Y. S., López Díaz, F., Gress Carrasco, F., Rojas Barajas, M., Linares Munguía, M. A., Machorro Reyes, J., & Enríquez Guadarrama, C. (2019). *Atlas nacional de vulnerabilidad al cambio climático: Mexico*. 221. www.gob.mx/inecc
- Greiving, S., Fleischhauer, M., & Lückenköter, J. (2006). A methodology for an integrated risk assessment of spatially relevant hazards. *Journal of Environmental Planning and Management*, 49(1), 1–19. <https://doi.org/10.1080/09640560500372800>
- Hamad, R., Balzter, H., & Kolo, K. (2018). Predicting land use/land cover changes using a CA-Markov model under two different scenarios. *Sustainability (Switzerland)*, 10(10), 1–23. <https://doi.org/10.3390/su10103421>
- Harb, M., Garschagen, M., Cotti, D., Krätzschar, E., Baccouche, H., Ben Khaled, K., Bellert, F., Chebil, B., Ben Fredj, A., Ayed, S., Shekhar, H., & Hagenlocher, M. (2020). Integrating Data-Driven and Participatory Modeling to Simulate Future Urban Growth Scenarios: Findings from Monastir, Tunisia. *Urban Science*, 4(1), 10. <https://doi.org/10.3390/urbansci4010010>
- Hernández-Valdés, K., & Córdova-López, L. F. (2016). Calibración y validación de un modelo matemático para la simulación de los cambios morfológicos durante eventos extremos en una playa del Caribe. *Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(3), 135–153.
- Hernández Azcúnaga, L. (2005). *Dinámica del transporte de sedimentos como carga de fondo en el Alto Golfo de California* [Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica]. <https://repositorio.ipicyt.edu.mx/bitstream/handle/11627/62/HernandezAzcunaga.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Himmelstoss, E.A. Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. . (2018). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.0*. <https://doi.org/10.3133/ofr20181179>.
- Himmelstoss, E. A., Henderson, R. E., Kratzmann, M. G., & Farris, A. S. (2021). Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 5.1 user guide. *Open-File Report*. <https://doi.org/10.3133/OFR20211091>
- Hinkel, J., & Klein, R. J. T. (2007). Integrating Knowledge for Assessing Coastal Vulnerability to Climate Change. *Managing Coastal Vulnerability: An Integrated Approach*, 1–20.
- INE-SEMARNAT. (2006). *Tercera Comunicación Nacional ante la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*.
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023, July 6). *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis; Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- IPCC. (2007). *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working*

- Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.*
- IPCC. (2012). *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation.*
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Impactos, adaptación y vulnerabilidad - Contribución del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.* www.ipcc.ch.
- Jafari, M., Majedi, H., Monavari, S. M., Alesheikh, A. A., & Zarkesh, M. K. (2016). Simulación dinámica de expansión urbana basada en autómatas celulares y modelo de regresión logística: estudio de caso de la región hircaniana de Irán. *Sustainability (Switzerland)*, 8(8). <https://doi.org/10.3390/su8080810>
- Jäger, W. S., Christie, E. K., Hanea, A. M., den Heijer, C., & Spencer, T. (2018). A Bayesian network approach for coastal risk analysis and decision making. *Coastal Engineering*, 134(May), 48–61. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.05.004>
- Jalaludin, M., Setiawan, C., Zid, M., & Utomo, R. T. (2020). Analysis of Shoreline Changes before and after the Tsunami at Tanjung Lesung Beach, Banten Province of Indonesia. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 412(1). <https://doi.org/10.1088/1755-1315/412/1/012004>
- Jana, A., Biswas, A., Maiti, S., & Bhattacharya, A. K. (2014). Shoreline changes in response to sea level rise along Digha Coast, Eastern India: An analytical approach of remote sensing, GIS and statistical techniques. *Journal of Coastal Conservation*, 18(3), 145–155. <https://doi.org/10.1007/s11852-013-0297-5>
- Jiménez-Illescas, Á. R., Zayas-Esquer, M. M., & Espinosa-Carreón, T. L. (2019). Integral Management of the Coastal Zone to Solve the Problems of Erosion in Las Glorias Beach, Guasave, Sinaloa, Mexico. In R. R. Krishnamurthy, M. P. Jonathan, S. Srinivasalu, & B. Glaeser (Eds.), *Coastal Management* (pp. 141–163). <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-810473-6.00010-8>
- Jiménez-Illescas Ángel, R., Ma Magdalena, Z. E., & Leticia, E. C. T. (2018). Integral management of the coastal zone to solve the problems of erosion in Las Glorias Beach, Guasave, Sinaloa, Mexico. *Coastal Management: Global Challenges and Innovations*, 141–163. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810473-6.00010-8>
- Jiménez, A., Marinone, S. G., & Parés-Sierra, A. (2005). Efecto de la variabilidad espacial y temporal del viento sobre la circulación en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 31(2), 357–368. <https://doi.org/10.7773/cm.v31i2.58>
- Jiménez López, E. (2019). Cadenas de Markov Espaciales para simular el crecimiento del Área Metropolitana de Toluca, 2017-2031. *Economía Sociedad y Territorio*, xix, 109–140. <https://doi.org/10.22136/est20191324>

- Jiménez López, E., Chávez Soto, T., & Garrocho, C. (2018). Modelando la expansión urbana con autómatas celulares: aplicación de la estación de inteligencia territorial (Christaller)®. *Geografía y Sistemas de Información Geográfica (GEOSIG)*, 10(2), 29–50. <http://www.revistageosig.wixsite.com./geosig> (ISSN
- Johnson, M. E., Johnson, E. M., Guardado-France, R., & Ledesma-Vázquez, J. (2020). Holocene Hurricane Deposits Eroded as Coastal Barriers from Andesite Sea Cliffs at Puerto Escondido (Baja California Sur, Mexico). *Journal of Marine Science and Engineering 2020, Vol. 8, Page 75*, 8(2), 75. <https://doi.org/10.3390/JMSE8020075>
- Jonah, F. E., Boateng, I., Osman, A., Shimba, M. J., Mensah, E. A., Adu-Boahen, K., Chuku, E. O., & Effah, E. (2016). Shoreline change analysis using end point rate and net shoreline movement statistics: An application to Elmina, Cape Coast and Moree section of Ghana's coast. *Regional Studies in Marine Science*, 7, 19–31. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2016.05.003>
- Kallepalli, A., Kakani, N. R., & James, D. B. (2017). Digital shoreline analysis system-based change detection along the highly eroding Krishna–Godavari delta front. *Journal of Applied Remote Sensing*, 11(03), 1. <https://doi.org/10.1117/1.jrs.11.036018>
- Kasper-Zubillaga, J. J., Carranza-Edwards, A., & Morales De la Garza, E. (2007). Caracterización textural de la arena de playa del Golfo de California, México: Implicaciones para los procesos costeros y el relieve. *Ciencias Marinas*, 33(1), 83–94. <https://doi.org/10.7773/cm.v33i1.1018>
- Kermani, S., Boutiba, M., Guendouz, M., Guettouche, M. S., & Khelfani, D. (2016). Detection and analysis of shoreline changes using geospatial tools and automatic computation: Case of jijelian sandy coast (East Algeria). *Ocean and Coastal Management*, 132, 46–58. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2016.08.010>
- Kityuttachai, K., Tripathi, N. K., Tipdecho, T., & Shrestha, R. (2013). CA-Markov Analysis of Constrained Coastal Urban Growth Modeling: Hua Hin Seaside City, Thailand. *Sustainability 2013, Vol. 5, Pages 1480-1500*, 5(4), 1480–1500. <https://doi.org/10.3390/SU5041480>
- Kuleli, T., Guneroglu, A., Karsli, F., & Dihkan, M. (2011). Automatic detection of shoreline change on coastal Ramsar wetlands of Turkey. *Ocean Engineering*, 38(10), 1141–1149. <https://doi.org/10.1016/J.OCEANENG.2011.05.006>
- Kumar Das, S., Sajan, B., Ojha, C., & Soren, S. (2021). Shoreline change behavior study of Jambudwip island of Indian Sundarban using DSAS model. *Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3), 961–970. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.09.004>
- Le Cozannet, G., Garcin, M., Yates, M., Idier, D., & Meyssignac, B. (2014). Approaches to evaluate the recent impacts of sea-level rise on shoreline changes. *Earth-Science Reviews*, 138, 47–60. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.08.005>

- Ledesma-Vázquez, J., Johnson, M. E., Gonzalez-Yajimovich, O., & Santamaría-del-Angel, E. (2009). Gulf of California geography, geological origins, oceanography, and sedimentation patterns. *Atlas of Coastal Ecosystems in the Western Gulf of California. The University of Arizona Press, Tucson.*, 1–10.
- Lee, S., Kang, J. E., Park, C. S., Yoon, D. K., & Yoon, S. (2020). Multi-risk assessment of heat waves under intensifying climate change using Bayesian Networks. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 50(January), 101704. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101704>
- Lee, Y., Eom, J., Do, J., Kim, B., & Ryu, J. (2019). Shoreline Movement Monitoring and Geomorphologic Changes of Beaches Using Lidar and UAVs Images on the Coast of the East Sea, Korea. *Journal of Coastal Research*, 90(sp1), 409. <https://doi.org/10.2112/si90-052.1>
- Leta, M. K., & Demissie, T. A. (2021). Modeling and prediction of land use land cover change dynamics based on land خوب. *Sustainability (Switzerland)*, 13(7).
- Linares, S., & Picone, N. (2018). Modelización de la expansión urbana y su impacto en el paisaje natural mediante Sistemas de Información Geográfica y Autómatas Celulares. Caso de estudio: Tandil, Argentina. *Revista de Estudios Ambientales*, 6(1), 5–25.
- Liu, Z., Nadim, F., Garcia-Aristizabal, A., Mignan, A., Fleming, K., & Luna, B. Q. (2015). A three-level framework for multi-risk assessment. *Georisk*, 9(2), 59–74. <https://doi.org/10.1080/17499518.2015.1041989>
- Lizarraga, O. (2019). Impacts of US Residential Tourism in Northwest Mexican Coastal Destinations: the cases of Mazatlán, Sinaloa; Cabo San Lucas, Baja California Sur and Puerto Peñasco, Sonora. *Revista Latino-Americana de Turismología*, 5(1 e 2), 1–14. <https://doi.org/10.34019/2448-198X.2019.v5.25892>
- Lluch-Cota, S. E., Tripp-Valdez, M., Lluch-Cota, D. B., Lluch-Belda, D., Verbesselt, J., Herrera-Cervantes, H., & Bautista-Romero, J. J. (2013). Recent trends in sea surface temperature off Mexico. *Atmosfera*, 26(4), 537–546. [https://doi.org/10.1016/S0187-6236\(13\)71094-4](https://doi.org/10.1016/S0187-6236(13)71094-4)
- Lluch-Cota, Salvador E., Aragón-Noriega, E. A., Arreguín-Sánchez, F., Auriolos-Gamboa, D., Jesús Bautista-Romero, 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., ... Sierra-Beltrán, A. P. (2007). The Gulf of California: Review of ecosystem status and sustainability challenges. *Progress in Oceanography*, 73(1), 1–26. <https://doi.org/10.1016/J.POCEAN.2007.01.013>
- Lluch-Cota, Salvador E., Parés-Sierra, A., Magaña-Rueda, V. O., Arreguín-Sánchez, F., Bazzino, G., Herrera-Cervantes, H., & Lluch-Belda, D. (2010). Changing climate in the Gulf of California.

- Progress in Oceanography*, 87(1–4), 114–126. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2010.09.007>
- Maestri, M. L., Castets, F., Bayala, M., & Canziani, G. (2019). Análisis comparativo de cinco métodos de procesamiento para calcular el área de lagunas pampeanas a partir de imágenes satelitales Landsat. *Biología Acuática*, 33(33), 003. <https://doi.org/10.24215/16684869e003>
- Mani Murali, R., Ankita, M., Amrita, S., & Vethamony, P. (2013). Coastal vulnerability assessment of Puducherry coast, India, using the analytical hierarchical process. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(12), 3291–3311. <https://doi.org/10.5194/nhess-13-3291-2013>
- Manson, R., & Jardel, P. E. (2009). Perturbaciones y desastres naturales: impactos sobre las ecorregiones, la biodiversidad y el bienestar socioeconómico. *Capital Natural de México. Síntesis: Conocimiento Actual, Evaluación y Perspectivas de Sustentabilidad.*, II, 131–184.
- Mart, B. S. (2018). *Morphology and sediments of the beaches of the coastal cell of San Jose del Cabo BCS Mexico*. Autonomous University of Baja California Sur.
- Martínez, M. L., Gallego-Fernández, J. B., García-Franco, J. G., Moctezuma, C., & Jiménez, C. D. (2006). Assessment of coastal dune vulnerability to natural and anthropogenic disturbances along the Gulf of Mexico. *Environmental Conservation*, 33(2), 109–117. <https://doi.org/10.1017/S0376892906002876>
- Maskrey, A. (1993). *Los Desastres No Son Naturales*.
- Mauricio, M. S., & Maturana-Miranda, F. (2019). Análisis de patrones espaciales: en la expansión urbana de ciudades medianas. El caso de San Fernando, Chile. *Cuadernos de Vivienda y Urbanismo*, 12(24). <https://doi.org/10.11144/Javeriana.cvu12-24.apee>
- McFeeters, S. K. (1996). The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing*, 17(7), 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Meentemeyer, R. K., Tang, W., Dorning, M. A., Vogler, J. B., Cunniffe, N. J., & Shoemaker, D. A. (2013). FUTURES: Multilevel Simulations of Emerging Urban-Rural Landscape Structure Using a Stochastic Patch-Growing Algorithm. *Annals of the Association of American Geographers*, 103(4), 785–807. <https://doi.org/10.1080/00045608.2012.707591>
- Merlotto, A. ., & R. Bértola, G. (2008). Evolución urbana y su influencia en la erosión costera en el balneario parque mar chiquita, argentina. *Papeles de Geografía*, January.
- Montaño-law, Y., Gutiérrez-Estrada, M., & Ramírez, A. o J. (1988). Análisis de Eigen empírico en perfiles de playa de Mazatlán, Sinaloa, México. *Anales Del Instituto de Ciencias Marinas y Limnología, UNAM.*, 15(2), 121–127.
- Montaño-Ley, Y., & Gutiérrez-Estrada, M. (1987a). Control de perfiles de playa en el área de Mazatlán, Sinaloa, México. *Anales Del Instituto de Ciencias Del Mar y Limnología, UNAM.*,

- 14(1), 1–11. [http:// biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1987-1/Aarticulo258.html](http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1987-1/Aarticulo258.html)
- Montaño-Ley, Y., & Gutiérrez-Estrada, M. (1987b). Control de perfiles de playa en el área de Mazatlán, Sinaloa, México. *Anales Del Instituto de Ciencias Del Mar y Limnología, UNAM.*, 14(1), 1–11.
- Montaño-Ley, Y., & Peraza-Vizcarra, R. (1986a). Aplicación de un modelo de tipo predictivo para cuantificar el transporte litoral de arenas en dos playas de la costa Sur de Sinaloa. *Anales Del Instituto de Ciencias Del Mar y Limnología, UNAM.* [http:// biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1986-1/Aarticulo206.html](http://biblioweb.tic.unam.mx/cienciasdelmar/instituto/1986-1/Aarticulo206.html)
- Montaño-Ley, Y., & Peraza-Vizcarra, R. (1986b). Aplicación de un modelo de tipo predictivo para cuantificar el transporte litoral de arenas en dos playas de la costa Sur de Sinaloa. *Anales Del Instituto de Ciencias Del Mar y Limnología, UNAM.*
- Murshed, S., Paull, D. J., Griffin, A. L., & Islam, M. A. (2021). A parsimonious approach to mapping climate-change-related composite disaster risk at the local scale in coastal Bangladesh. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 55(February 2020), 102049. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2021.102049>
- Nava-sánchez, E. H., Martínez-flores, G., & Murillo-jiménez, J. M. (2018). *Factores que provocan la erosión de playas en Baja California Sur, México. 4.*
- Nicholls, R. J., Wong, P. P., Burkett, V., Codignotto, J., & Hay, J. (2007). *Coastal systems and low-lying areas.* <https://ro.uow.edu.au/scipapershttps://ro.uow.edu.au/scipapers/164>
- Nicholls, Robert J., & Cazenave, A. (2010). Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science*, 328(5985), 1517–1520. <https://doi.org/10.1126/science.1185782>
- Nowrouzifar, A., Rashedi, E., Rajabi, M. A., & Naseri, F. (2017). Modelado de crecimiento urbano utilizando autómatas celulares integrados y algoritmo de búsqueda gravitacional (Estudio de caso: Ciudad de Shiraz, Irán). *Journal of Geomatics Science and Technology*, 29–39.
- Ojeda-Ruiz, M. Á., Guerrero-Izquierdo, C. S., & Petatán-Ramírez, D. (2020). Proyecciones de cambio climático en el Golfo de California y sus posibles implicaciones ambientales, sociales y económicas. In E. A. Marín Monroy, V. Hernández Trejo, G. Avilés Polanco, & R. Valdivia Alcalá (Eds.), *Cambio Climático Adaptación y Resiliencia en el Noroeste de México.* (Primera ed, pp. 35–57).
- Ojeda Zújar, J. (2000). Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín de La Asociación de Geógrafos Españoles*, 30, 103–118.
- Olivas, J. M. de la P., & González, J. F. S. (2018). Respuesta de la costa a las variaciones del nivel del mar: efecto sobre las playas en España. *Revista Digital Del Cedex*, 191, 74–85.

- <http://ingenieriacivil.cedex.es/index.php/ingenieria-civil/article/view/2355>
- Onat, Y., Marchant, M., Francis, O. P., & Kim, K. (2018). Coastal exposure of the Hawaiian Islands using GIS-based index modeling. *Ocean and Coastal Management*, 163(June), 113–129. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2018.06.003>
- ONU/EIRD. (2004). *Vivir con el riesgo: Informe mundial sobre iniciativas para la reducción de desastres*.
- ONU México. (2015). *ONU México » Objetivos de Desarrollo Sostenible*. <https://www.onu.org.mx/agenda-2030/objetivos-del-desarrollo-sostenible/>
- Oyedotun, T. D. T. (2016). Shoreline Evolution and Metocean Data Behaviour in Southwest England: Is There Any Historical Link? *Environmental Processes*, 3(4), 939–960. <https://doi.org/10.1007/s40710-016-0189-4>
- Oyedotun, T. D. T., Ruiz-Luna, A., & Navarro-Hernández, A. G. (2018). Contemporary shoreline changes and consequences at a tropical coastal domain. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2(2), 104–114. <https://doi.org/10.1080/24749508.2018.1452483>
- Paegelow, M., Camacho Olmedo, M.T. y Menor Toribio, J. (2003). Cadenas de Markov, evaluacion multicriterio y evaluacion multiobjetivo para la modelizacion prospectiva del paisaje. *GeoFocus*, 22–44.
- Páez-Osuna, F., Sanchez-Cabeza, J. A., Ruiz-Fernández, A. C., R. Alonso-Rodríguez, A. C., Piñón-Gimate, A., Cardoso-Mohedano, J. G., Flores-Verdugo, F. J., Carballo, J. L., Cisneros-Mata, M. A., & Álvarez-Borrego, S. (2016). Environmental status of the Gulf of California: A review of responses to climate change and climate variability. *Earth-Science Reviews*, 162, 253–268. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.09.015>
- Painho, M., & Caeiro, S. (2002). Assessment of map similarity of categorical maps using Kappa statistics. *ISEGI*, Lisbon. https://www.academia.edu/2861251/Assessment_of_map_similarity_of_categorical_maps_using_Kappa_statistics
- Palomar-Vázquez, J., Almonacid-Caballer, J., Pardo-Pascual, J. E., Cabezas-Rabadán, C., & Fernández-Sarría, A. (2018). Sistema para la extracción masiva de líneas de costa a partir de imágenes satélite de resolución media para la monitorización costera: SHOREX. In J. M. López García, M. J., Carmona, P., Salom, J., & Albertos (Ed.), *XVIII Congreso de Tecnologías de la información geográfica: Perspectivas multidisciplinares en la sociedad del conocimiento* (pp. 25–35).
- Pardo-Pascual, J. E., Sánchez-García, E., Almonacid-Caballer, J., Palomar-Vázquez, J. M., de los Santos, E. P., Fernández-Sarría, A., & Balaguer-Beser, Á. (2018). Assessing the accuracy of

- automatically extracted shorelines on microtidal beaches from landsat 7, landsat 8 and sentinel-2 imagery. *Remote Sensing*, 10(2), 1–20. <https://doi.org/10.3390/rs10020326>
- Passeri, D., Hagen, S., & Irish, J. (2014). Comparison of Shoreline Change Rates along the South Atlantic Bight and Northern Gulf of Mexico Coasts for Better Evaluation of Future Shoreline Positions under Sea Level Rise. *Journal of Coastal Research*, 68, 20–26. <https://doi.org/10.2112/SI68-003.1>
- Pat Doody, Maria Ferreira, Stéphane Lombardo, Irene Lucius, Robbert Misdorp, H., Niesing, Albert Salman, Marleen Smallegange, Jordi Serra Raventós, E. R., & Pedro Fernández Bautista, C. P. (2005). *VIVIR CON LA EROSIÓN COSTERA EN EUROPA. Sedimentos y Espacio Para La Sostenibilidad Resultados Del Estudio Euroasion*. <http://europa.eu.int>
- Pérez, M. A. O., Santana, J. R. H., & Mah, J. M. F. (2017). Coastline's changes in the Balsas River delta, Mexico, between the years 1943-2009. *Investigaciones Geograficas*, 2017(94), 20–36. <https://doi.org/10.14350/rig.56578>
- Perillo, G. M. E., Piccolo, M. C., Bustos, M. L., Cisneros, A. H., London, S., Scordo, F., & Comet-la, E. (2019). *Evolución de los ambientes costeros de la Provincia de Buenos Aires (Argentina): ¿ Cambio climático o efectos antrópicos ?* 1–14.
- Pinto, N., Antunes, A. P., & Roca, J. (2021). A Cellular Automata Model for Integrated Simulation of Land Use and Transport Interactions. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(3), 149. <https://doi.org/10.3390/ijgi10030149>
- Plomaritis, T. A., Costas, S., & Ferreira, Ó. (2018). Use of a Bayesian Network for coastal hazards, impact and disaster risk reduction assessment at a coastal barrier (Ria Formosa, Portugal). *Coastal Engineering*, 134(July), 134–147. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.07.003>
- Ponce Bastidas, J. S. (2015). *Dinámica costera en las playas de El Cardonal y Cabo Pulmo, Baja California Sur*.
- Pons, J. M. (2009). *La medición del nivel medio del mar: principios y métodos*. Mapping. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3220627>
- Pontius, Robert G., Shusas, E., & McEachern, M. (2004). Detecting important categorical land changes while accounting for persistence. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 101(2–3), 251–268. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2003.09.008>
- Pontius, Robert Gilmore, & Millones, M. (2011). Death to Kappa: Birth of quantity disagreement and allocation disagreement for accuracy assessment. *International Journal of Remote Sensing*, 32(15), 4407–4429. <https://doi.org/10.1080/01431161.2011.552923>
- Ranasinghe, R. (2016). Assessing climate change impacts on open sandy coasts: A review. In *Earth-Science Reviews* (Vol. 160). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.07.011>

- Rangel-Buitrago, N. (2009). Contribución antropogénica a los cambios geomorfológicos y evolución reciente de la costa Caribe Colombiana. *Gestión y Ambiente*, 12(2), 43–56.
- Reguero, B. G., Losada, I. J., & Méndez, F. J. (2019). A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming. *Nature Communications*, 10(1), 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>
- Rizzi, J., Gallina, V., Torresan, S., Critto, A., Gana, S., & Marcomini, A. (2016). Regional Risk Assessment addressing the impacts of climate change in the coastal area of the Gulf of Gabes (Tunisia). *Sustainability Science*, 11(3), 455–476. <https://doi.org/10.1007/s11625-015-0344-2>
- Rosengaus, M. (2002). *Efectos destructivos de ciclones tropicales. México: MAPFRE, S.A.*
- Sans, C. A. (2018). The Gulf of California in its entirety as Mexican Inland or Territorial Waters. *Revista Del Centro de Estudios Superiores Navales*, 39(1), 95–126.
- Sanuy, M., Jiménez, J. A., & Plant, N. (2020). A Bayesian Network methodology for coastal hazard assessments on a regional scale: The BN-CRAF. *Coastal Engineering*, 157(December 2019), 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2019.103627>
- Satta, A., Puddu, M., Venturini, S., & Giupponi, C. (2017). Assessment of coastal risks to climate change related impacts at the regional scale: The case of the Mediterranean region. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24, 284–296. <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2017.06.018>
- Sevilla, N. P. M., Adeath, I. A., Le Bail, M., & Ruiz, A. C. (2018). Coastal development: Construction of a public policy for the shores and seas of Mexico. *Coastal Management: Global Challenges and Innovations*, 21–38. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-810473-6.00003-0>
- Shafizadeh Moghadam, H., & Helbich, M. (2013). Spatiotemporal urbanization processes in the megacity of Mumbai, India: A Markov chains-cellular automata urban growth model. *Applied Geography*, 40, 140–149. <https://doi.org/10.1016/J.APGEOG.2013.01.009>
- Silva-Casarín, R., Lacouture, M., Durón, F., Pedroza-Paez, D., Pérez, M. A., Baldwin, E., Calzadilla, M., Escudero, M., Félix, A., & Cid, A. (2014). *Caracterización de la zona costera y planteamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable.* (Issue January).
- Silva, R., Govaere, G., Salles, P., Bautista, G., & Díaz, G. (2002). Oceanographic vulnerability to hurricanes on the mexican coast. *ICCE Coastal Engineering*, 39–51.
- Silva, R., & Mendoza, E. (2012). *Manual de Diseño de Obras Civiles: A.2.13 Hidráulica Marítima. Aspectos Generales de Meteorología y Descripción de las Oscilaciones del Mar. Comisión Federal de Electricidad, México.*
- Slott, J. M., Murray, A. B., Ashton, A. D., & Crowley, T. J. (2006). Coastline responses to changing storm patterns. *Geophysical Research Letters*, 33(18), n/a-n/a.

<https://doi.org/10.1029/2006GL027445>

- Soto Mardones, L., Marioni, S., & Pares Sierra, A. (1999). Variabilidad espaciotemporal de la temperatura superficial del mar en el Golfo de California. *Ciencias Marinas*, 25(No.1), 1–30.
- Stockdon, H. F., Holman, R. A., Howd, P. A., Sallenger, J., & Asbury, H. (2006). Empirical parametrization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53, 573–588.
- Stockdon, Hilary F., Holman, R. A., Howd, P. A., & Sallenger, A. H. (2006). Empirical parameterization of setup, swash, and runup. *Coastal Engineering*, 53(7), 573–588. <https://doi.org/10.1016/J.COASTALENG.2005.12.005>
- Stolper, D., List, J. H., & Thieler, E. R. (2005). Simulating the evolution of coastal morphology and stratigraphy with a new morphological-behaviour model (GEOMBEST). *Marine Geology*, 218(1–4), 17–36. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2005.02.019>
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J. L., & Ergul, A. (2017). *Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change (ver.4.4, July 2017)*. 1–81. <https://doi.org/10.3133/ofr20081278>
- Thieler, R., Himmelstoss, E., Zichichi, J., & Ayhan, E. (2009). *The Digital Shoreline Analysis System (DSAS) Version 4.0 - An ArcGIS extension for calculating shoreline change*. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20081278>
- Thieler, E. R., Himmelstoss, E. A., Zichichi, J., & Ergul, A. (2009). DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide. Updated for version 4.3 (only compatible with ArcGIS 10). In *U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278*. <http://pubs.usgs.gov/of/2008/1278/>
- Tian, G., Ma, B., Xu, X., Liu, X., Xu, L., Liu, X., Xiao, L., & Kong, L. (2016). Simulation of urban expansion and encroachment using cellular automata and multi-agent system model—A case study of Tianjin metropolitan region, China. *Ecological Indicators*, 70, 439–450. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.021>
- Tian, P., Cao, L., Li, J., Pu, R., & Gong, H. (2021). *Características del paisaje y evaluación de riesgos ecológicos basada en simulaciones de escenarios múltiples: un estudio de caso del humedal costero de*.
- Tian, P., Cao, L., Li, J., Pu, R., Gong, H., & Li, C. (2021). Landscape characteristics and ecological risk assessment based on multi-scenario simulations: A case study of yancheng coastal Wetland, China. *Sustainability (Switzerland)*, 13(1), 1–21. <https://doi.org/10.3390/su13010149>
- Toimil, A., Losada, I. J., & Camus, P. (2016). Metodología para el análisis del efecto del cambio climático en la inundación costera: aplicación a Asturias. *Ribagua*, 3(2), 56–65. <https://doi.org/10.1016/j.riba.2016.07.004>
- Toimil, Alexandra, Losada, I. J., Camus, P., & Díaz-Simal, P. (2017). Managing coastal erosion under

- climate change at the regional scale. *Coastal Engineering*, 128, 106–122. <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2017.08.004>
- Torres-Mota, R., Salles-Afonso-de-Almeida, P., & López-González, J. (n.d.). *Efectos del aumento del nivel del mar por cambio climático en la morfología de la ría de Celestún, Yucatán*.
- Tseng, Y. H., Breaker, L. C., & Chang, E. T. Y. (2010). Sea level variations in the regional seas around Taiwan. *Journal of Oceanography*, 66(1), 27–39. <https://doi.org/10.1007/s10872-010-0003-2>
- Vos, K., Splinter, K. D., Harley, M. D., Simmons, J. A., & Turner, I. L. (2019). CoastSat: A Google Earth Engine-enabled Python toolkit to extract shorelines from publicly available satellite imagery. *Environmental Modelling and Software*, 122, 104528. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104528>
- Wang, C., Yu, M., & Gao, Q. (2017). Continued Reforestation and Urban Expansion in the New Century of a Tropical Island in the Caribbean. *Remote Sensing*, 9(7), 731. <https://doi.org/10.3390/rs9070731>
- Wang, G., Liu, Y., Wang, H., & Wang, X. (2014). A comprehensive risk analysis of coastal zones in China. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 140, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2013.12.019>
- Wang, H., Hu, Y., & Liang, Y. (2021). Simulation and spatiotemporal evolution analysis of biocapacity in Xilingol based on CA-Markov land simulation. *Environmental and Sustainability Indicators*, 11, 100136. <https://doi.org/10.1016/J.INDIC.2021.100136>
- Xu, T., Gao, J., & Coco, G. (2019). Simulación de la expansión urbana mediante la integración de la red neuronal artificial con autómatas celulares de cadena de Markov. *International Journal of Geographical Information Science*, 33(10), 1960–1983. <https://doi.org/10.1080/13658816.2019.1600701>
- Yao, F., Hao, C., & Zhang, J. (2016). Simulando procesos de crecimiento urbano mediante la integración del modelo de autómatas celulares y la optimización artificial en la nueva área de Binhai de Tianjin, China. *Geocarto International*, 31(6), 612–627. <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1073365>
- Zambrano-medina, Y. (2022). Shoreline analysis and erosion risk assessment of a coastal strip subjected to high anthropogenic pressure. *Tecnologías y Ciencias Del Agua*, 0(6), 249–300. <https://doi.org/10.24850/j-tyca-13-06-06>
- Zambrano-Medina, Y. G., Plata-rocha, W., Monjardin-armenta, S. A., & Franco-ochoa, C. (2023). *Assessment and Forecast of Shoreline Change Using Geo-Spatial Techniques in the Gulf of California*.
- Zhang, Y., Wu, T., Arkema, K. K., Han, B., Lu, F., Ruckelshaus, M., & Ouyang, Z. (2021). Coastal

vulnerability to climate change in China's Bohai Economic Rim. *Environment International*, 147, 106359. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.106359>