



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE CIENCIAS

**ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LA
PLAYA EN PROGRESO, YUCATÁN DURANTE
EL 2016-2017**

TESIS

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
LICENCIADO EN MANEJO SUSTENTABLE DE ZONAS

PRESENTA

MARÍA FERNANDA MEDINA NAVARRETE

DIRECTOR DE TESIS

DR. RODOLFO RIOJA NIETO

COMITÉ TUTORAL

**MTRO. CARLOS CRUZ VÁZQUEZ
DRA. GABRIELA MEDELLÍN MAYORAL
DR. JOAQUÍN RODRIGO GARZA PÉREZ
DR. ALEC TORRES FREYERMUTH**



Ciudad Universitaria, Cd. MX., 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

HOJA DE DATOS DEL JURADO

1. Datos del alumno

Medina
Navarrete
María Fernanda
55 43 84 32 28
Universidad Nacional Autónoma de México
Facultad de Ciencias
Manejo Sustentable de Zonas Costeras
313247866

2. Datos del tutor

Doctor
Rodolfo
Rioja
Nieto

3. Datos del sinodal 1

Maestro en Ciencias
Carlos
Cruz
Vázquez

4. Datos del sinodal 2

Doctora
Gabriela
Medellín
Mayoral

5. Datos del sinodal 3

Doctor
Joaquín Rodrigo
Garza
Pérez

6. Datos del sinodal 4

Doctor
Alec
Torres
Freyermuth

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Elia y Mario, por haberme brindado más de lo necesario para poder llevar a cabo mis estudios profesionales, su amor, cariño, comprensión y apoyo durante toda mi vida. Esto es para y por ustedes, espero algún día regresarles un poco de todo lo que me dan. Los amo demasiado.

A mi hermana Ximena, por sus consejos, motivación, apoyo y ayuda para poder lograr culminar esta tesis. Gracias por ser un ejemplo de perseverancia, dedicación y terquedad, te amo.

A la máxima casa de estudios, la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de estudiar en instalaciones con vista a un paraíso y profesores de gran calidad.

A mi asesor de tesis, el Dr. Rodolfo Rioja, por su asesoramiento teórico, brindarme conocimientos y oportunidades únicas, sin usted esta tesis no hubiera sido posible. Gracias por su apoyo durante la licenciatura, motivación y no dejarme vencer.

A mis cuatro miembros del jurado, Mtr. Carlos Cruz, Dra. Gabriela Medellín, Dr. Rodrigo Garza y Dr. Alec Torres, por su disposición, atención, amabilidad, además de compartir sus conocimientos y experiencia conmigo.

A las becas que me fueron brindadas para ampliar mis conocimientos, habilidades, prácticas y apoyo económico para terminar este proyecto, dos de ellas otorgadas por el Dr. Xavier Chiappa para el proyecto BV100118 UNAM. Además de la Beca – 28932 para el proyecto *Green Coastal Geomorphology: A Transdisciplinary Approach as a Baseline for the Solution of Socio-ecological Problems in the Coastal* otorgada por la Dra. Gabriela Mendoza.

A mis amigos de la décima generación, Jaime, André y Luis por su compañía, amistad y atenciones, con ustedes compartí grandes momentos de risas y locuras en las aulas y en prácticas de campo. Gracias, definitivamente no lo hubiera aguantado sin ustedes.

A mi Karencia, mamá ocasional y apoyo emocional, gracias por estar en este proceso y seguir en mi vida.

Al resto de mis amigos que hicieron de mi estancia en Sisal y la lejanía de mi hogar más amena, en especial a Isabel, Kenya y Alberto.

A Josías, por su amor, motivación, comprensión y ternura. Gracias ser una fuente de inspiración y superación todos los días, te amo.

A todos ustedes, les agradezco su apoyo para llegar a esta meta y seguir adelante.

CONTENIDO

Índice de Figuras	6
índice de Tablas.....	8
Capítulo 1. Introducción.....	9
Capítulo 2. Marco Teórico.....	11
2. 1 Ecosistema Costero.....	11
2.2 Problemática Costera.....	15
2.3 Mitigación del Problema.....	16
2.4 Vulnerabilidad Costera	18
2.5 Herramientas de Análisis.....	21
Capítulo 3. Antecedentes.....	23
3.1 Estrategias para la Mitigación de la Erosión Costera.....	24
3.2 Vulnerabilidad Costera.....	25
Capítulo 4. Objetivos de la Investigación.....	29
Capítulo 5. Área de Estudio.....	30
Capítulo 6. Metodología.....	32
6.1 Diagrama de Flujo.....	33
6.2 Adquisición de Imágenes.....	34
6.3 Procesamiento de Imágenes	35
6.4 Digitalización de las Características	35
6.4.1 Determinación de la Línea de Costa.....	35
6.4.2 Digitalización de Construcciones.....	37
6.4.3 Cambio de la Línea de Costa.....	39

6.4.4 Estructura de Protección Costera.....	40
6.4.5 Vegetación.....	44
6.4.6 Índice de Vulnerabilidad Costera.....	45
6.4.7 Análisis Exploratorio de los Grupos de Vulnerabilidad.....	48
Capítulo 7. Resultados.....	49
7.1 Imágenes	49
7.2 Construcciones Costeras.....	50
7.3 Estructuras de Protección Costera	51
7.4 Análisis de la Línea de Costa	52
7.5 Presencia de Vegetación.....	57
7.6 Determinación del Índice de Vulnerabilidad Costera.....	58
7.7 Análisis del Modelo de Vulnerabilidad.....	63
7.8 Análisis Exploratorio de los Grupos de Vulnerabilidad.....	65
Capítulo 8. Discusión.....	70
Capítulo 9. Conclusión.....	75
Referencias.....	78

Índice de Figuras

Figura 1. Evolución de una playa ante el efecto de tormentas	12
Figura 2. Perfil del sistema de dunas costeras tropicales	14
Figura 3. Escenarios de las construcciones	20
Figura 4. Mapa regional de zonas críticas	23
Figura 5. Índice de vulnerabilidad <i>de Cuevas-Jiménez, et al. (2016)</i>	26
Figura 6. Elementos generales para un índice de vulnerabilidad costero	27
Figura 7. Polígono del área de interés	30
Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología	33
Figura 9. Dron “C-Astral Bramor-Geo”	34
Figura 10. Determinación la línea de costa con el índice GNDVI	36
Figura 11. Área influencia de las estructuras de protección costera	42
Figura 12. Tipos de vegetaciones presentes en el frente de playa	44
Figura 13. Ortomosaicos construidos	49
Figura 14. Gráfica del tipo de construcciones por año	50
Figura 15. Porcentaje de los tipos de estructuras de protección costera	52
Figura 16. Valores NSM y SCE para el área de estudio	54
Figura 17. Grafica de los valores SCE	55
Figura 18. Imagen a color del monitoreo del 12/2017	56
Figura 19 Grafica del SCE para los diferentes tipos de construcciones	57

Figura 20. Presencia de vegetación para las construcciones	58
Figura 21. Índices de vulnerabilidad (Porcentajes)	59
Figura 22. Índice de vulnerabilidad de la línea de costa de Progreso, Yucatán ...	60
Figura 23. Zonas A, B, C del Índice de vulnerabilidad	61
Figura 24. Índice de vulnerabilidad por tipo de construcciones	62
Figura 25. Análisis de componentes principales	63
Figura 26. Cambio de línea de costa por grupo de vulnerabilidad	65
Figura 27. Vegetación por grupo de vulnerabilidad	66
Figura 28. Construcciones por grupo de vulnerabilidad	67
Figura 29. Estructuras de protección por grupo de vulnerabilidad	68
Figura 30. Estructuras con efecto sombra por grupo de vulnerabilidad	68
Figura 31. Diferentes temporalidades y diferencias entre estructuras de protección.....	71
Figura 32. Imagen de casas con menor presión antropogénica	72
Figura 33. Imagen de casas con mayor presión antropogénica	73
Figura 34. Diagrama del procedimiento para el DSAS	78

Índice de Tablas

Tabla 1. Características las propiedades aledañas a la costa	38
Tabla 2. Características las estructuras de protección costera	41
Tabla 3. Cálculos para el índice de vulnerabilidad multicriterio	47
Tabla 4. Estructuras de protección costera presentes en cada tiempo.....	50
Tabla 5. Resumen del análisis de componentes (ACP).....	64
Tabla 6. Registro de vuelos con el nivel de marea	77

CAPITULO 1:

INTRODUCCIÓN

La costa es la zona de interacción entre el continente y el mar, considerada como ecotono por sus diferentes ecosistemas como son los pastos marinos, arrecifes, manglares, duna, entre otros (Ahmed *et al.*, 2018). Asimismo, la zona costera brinda servicios ambientales de soporte, provisión, regulación y culturales al ser humano (Cuevas-Jiménez *et al.*, 2016; SEMARNAT, 2021) además de funcionar como base para diversas actividades económicas, un ejemplo es la pesca y el turismo, creando un desarrollo económico y de infraestructura (Nava-Fuentes *et al.*, 2016).

El 21% de la población mundial se concentra en la franja que comprende los primeros 100 km de la línea de costa de todo el mundo. Es considerada como una de las regiones del planeta con mayor intervención humana debido a las actividades que se desarrollan en esta área (Ahmed *et al.*, 2018). Las actividades antropogénicas pueden alterar el equilibrio de los ecosistemas, afectando funciones ecológicas y haciendo vulnerable al sistema costero ante distintas perturbaciones (Barragán-Muñoz, 1996; Cuevas-Jiménez *et al.*, 2016).

Por otra parte, en términos geomorfológicos la costa norte de la Península de Yucatán es caracterizada con determinadas zonas que presentan un transporte sedimentario con tendencia a la erosión, consecuencia de la morfología de la costa, orientación de la línea de costa, características del oleaje y actividad antropogénica. El problema de la erosión es agravado por acciones como deforestación del área de duna, construcciones que alteran la dinámica natural de los procesos costeros y el aumento del nivel medio del mar (Appendini *et al.*, 2012; Jiménez *et al.*, 1993; Torres-Freyermuth *et al.*, 2021). Ejemplo de la problemática de erosión son las playas del municipio de Progreso (Yucatán), pues la disminución del ancho de playa en la línea de costa de este municipio ha causado que estructuras aledañas a la costa se vean afectadas.

Asimismo, el municipio de Progreso es de importancia económica debido a sus actividades turísticas y de infraestructura (Appendini *et al.*, 2012), por lo que autoridades como la STC¹ y SEMARNAT², junto con los habitantes afectados por la problemática, han tomado medidas para mitigar la pérdida de sedimento.

Sin embargo, las medidas no han sido la respuesta correcta ante el problema, puesto a que han “solucionado” el problema en ciertas zonas y agravado la erosión en otras, por lo tanto, las construcciones siguen siendo afectadas por la transgresión del mar (Appendini *et al.*, 2012; Muñoz-Pérez y Gutiérrez-Mas, 1999; Cuevas *et al.*, 2016; (Torres-Freyermuth, *et al.*, 2019). En general existe una falta de proyectos de conservación, educación ambiental y manejo sustentable en esta zona (Mendoza-González *et al.*, 2021).

Este trabajo tiene como objetivo examinar las características morfológicas, de infraestructura y vegetación de la línea de costa en el área de Progreso, para estimar la vulnerabilidad en el área durante el periodo de 2016-2017. Los resultados obtenidos pueden ser de utilidad para el diseño de un plan de manejo costero correcto, proporcionando un análisis aproximado en las tendencias de erosión y desarrollo urbano.

El análisis presente considera diferentes características para determinar las áreas vulnerables del área de interés, su evolución y las medidas que actualmente se ejercen para mitigar el impacto. La información resultante de esta investigación es de suma importancia, por ejemplo, dado que pueden ser utilizados para coadyuvar a los programas de protección civil en caso de desastres naturales en este tipo de zonas (Nayak, *et al.*, 2000), y para la gestión de programas de manejo adecuados para el municipio.

¹ Secretaria de Comunicaciones y Transportes

² Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales

CAPITULO 2:

MARCO TEORICO

2.1 ECOSISTEMA COSTERO

Las playas son ambientes dinámicos, su morfología es determinada por el transporte de sedimento asociado a los regímenes de mareas, olas y vientos que constantemente depositan o remueven los sedimentos respondiendo a cambios en diferente escala de tiempo (Jiménez, 1993). Asimismo, los ambientes de duna y playa, forman un sistema funcional en el cual depende uno del otro (Boxcretto, *et al.*, 2018).

Las dunas costeras son acumulaciones o montículos de sedimentos, formadas principalmente por la acción del viento (SEMARNAT, 2013), además de ser ecosistemas que tienen una amplia diversidad de especies, brindan servicios ambientales importantes, como el de protección contra eventos de tormentas, huracanes y disminuyen la erosión provocada por el oleaje y viento (CONAFOR, 2018).

Los ambientes costeros presentan un gradiente de vegetación que va del mar hacia tierra adentro, debido a factores como: el movimiento de arena, el efecto del oleaje, el pH del suelo, entre otros, y conforme la vegetación se aleja del nivel medio del mar, incrementa la materia orgánica y nutrientes del suelo permitiendo que se establezcan especies típicas de playa (SEMARNAT, 2013). Debido a esto autores como Rzedowski (1978), Miranda y Hernández (1963) consideran a los ambientes de duna costera como vegetación halófila, debido a que se desarrollan en suelos con altos contenidos de sales solubles.

Cabe resaltar que la vegetación más cercana al mar presenta etapas iniciales de colonización debido a las condiciones del sedimento como la salinidad y el movimiento consecuencia de la dinámica de la costa, mientras que tierra adentro las dunas se van estabilizando (Martínez, 2009).

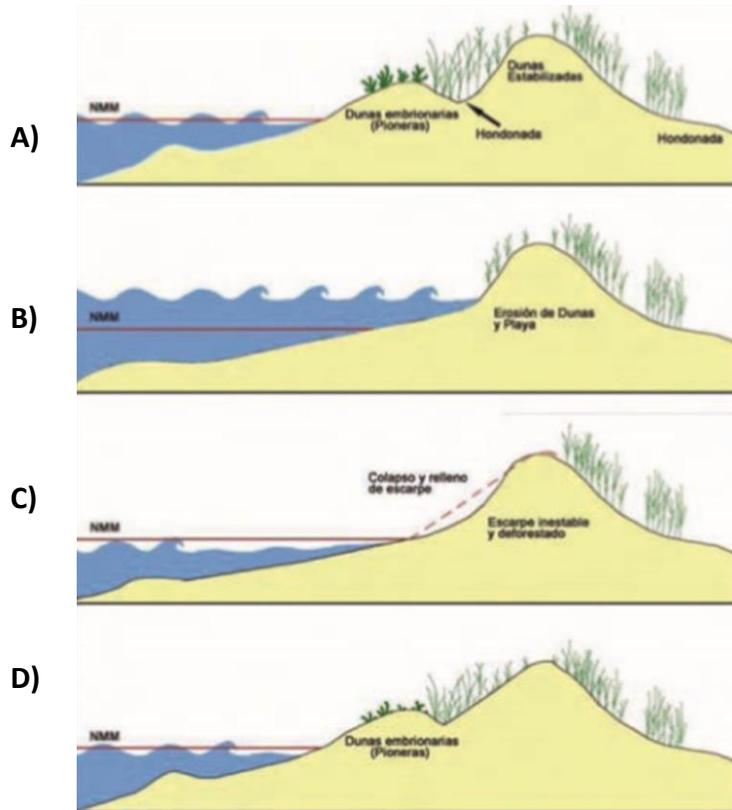


Figura 1. Evolución de una playa ante el efecto de tormentas, señaladas las partes del perfil de playa. En la figura A se muestra el perfil de playa previo a la tormenta, durante la tormenta el nivel medio del mar crece (figura B), la duna embrionaria junto con su vegetación se pierde (figura C). Por último, el sedimento es acumulado enfrente de la duna estabilizada creándose nuevamente la duna embrionaria, la cual con el tiempo ira recuperando su vegetación (figura D). Extraído de *Manejo De Ecosistemas De Duna Costera, Criterios Ecológicos Y Estrategias* (SEMARNAT, 2013).

Por otra parte, el perfil del sistema playa-duna se puede clasificar en tres partes:

- 1) Dunas embrionarias o incipientes: son los primeros montículos formados por la sedimentación eólica de la arena alrededor. No presentan suelo desarrollado, por lo que su vegetación es escasa y su morfología cambia según la estación del año en función de la dirección e intensidad del viento (SEMARNAT, 2013).
- 2) Dunas secundarias: tienen influencia del viento, la vegetación en éstas se encuentra más desarrollada debido a que el sustrato en estas zonas es fijo.

Sin embargo, también sufren cambios durante las diferentes temporadas como se muestra en la Figura 1 (SEMARNAT, 2013).

- 3) Dunas terciarias: tienen influencia del viento y dependen de las temporadas, con vegetación desarrollada, mayor altura y sedimento que en las dunas secundarias (SEMARNAT, 2013).

En cuanto a la fauna de las dunas costeras, existe una gran variedad de hábitats y nichos, resultado de los gradientes de topografía, en donde se pueden encontrar invertebrados como insectos, arañas, abejas, entre otros; y vertebrados como anfibios (sapos y ranas), reptiles (tortugas, lagartijas y serpientes), aves (garzas, zopilotes, etc.) y mamíferos (como tlacuaches) (CONAFOR, 2018).

Por otro lado, la vegetación puede ser clasificada en función de los rangos de tolerancia de los factores físicos-bióticos a los que son expuestos debido a su cercanía con el mar. En este sentido, Espejel (1984), clasifica la vegetación de duna costera en dos categorías:

- a) Vegetación Pionera: ubicada en las partes más cercanas a la costa en donde la arena no se encuentra fija, caracterizada por especies herbáceas y arbustivas de pequeño tamaño, tolerantes a las condiciones ambientales extremas.
- b) Vegetación de Matorral: alejada del mar en sustrato fijo y con nutrientes suficientes para su crecimiento, pueden llegar a tener una mayor altura a la vegetación pionera.

Como resultado, las diferencias hidrológicas, climáticas y edáficas de los ambientes de duna tienen diversas funciones ecológicas que contribuyen a la formación de suelo mediante la acumulación de arena por medio de sus raíces y materia orgánica de su follaje, retienen sedimentos -evitando la erosión-, funcionan como proveedores de refugio y alimento a numerosas especies de fauna debido a su alta diversidad de flora y estructura (Torres *et al.*, 2010).

Además de los servicios ambientales mencionados anteriormente, las dunas protegen la costa ya que disipa la energía del mar, vientos, mareas, tormentas tropicales y huracanes sobre la infraestructura costera (Figura 1), resguardando así a las comunidades costeras (Sallenger, 2000; Miller, *et al.*, 2010; Contestabile y Vicinanza, 2020).

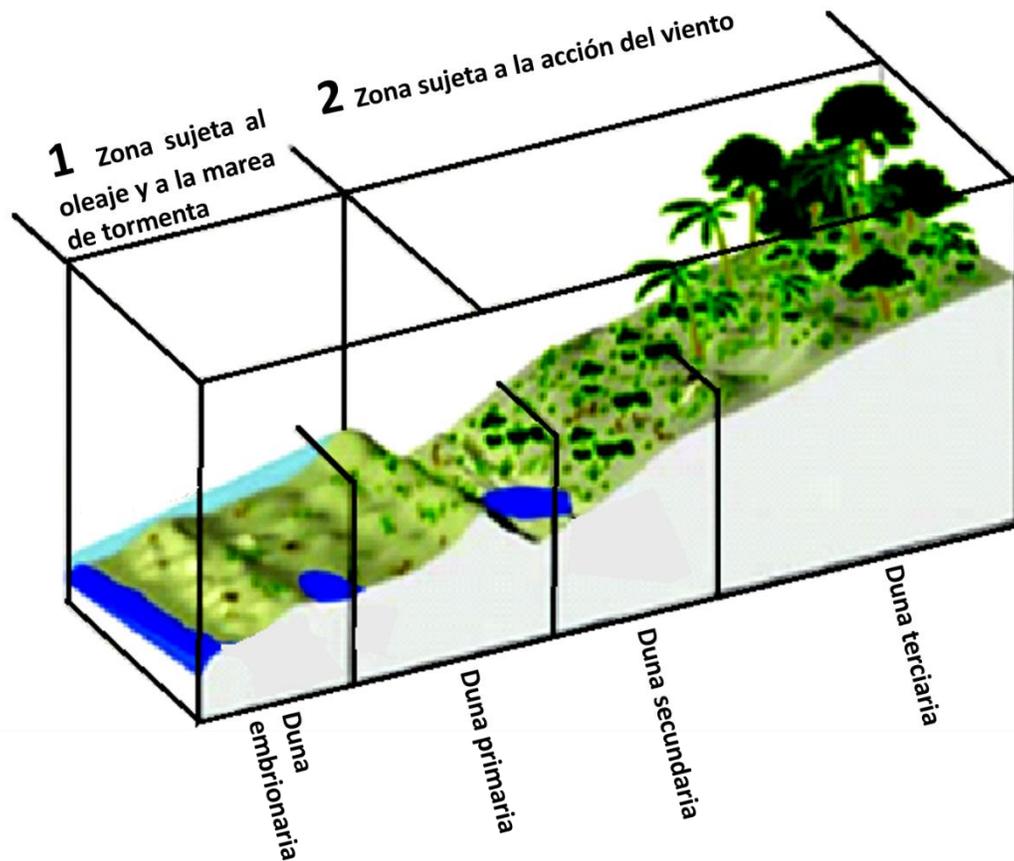


Figura 2. El perfil del sistema de dunas costeras tropicales se divide en dos zonas de influencia: La primera (1) sujeta a cambios por el oleaje y la marea de tormenta, siendo considerada la de mayor dinamismo, compuesta por las dunas embrionarias y primarias. La segunda (2) está sujeta a cambios por la acción del viento y se compone por las dunas secundarias y terciarias, siendo la zona más estable en cuanto a sedimento. Extraído de *Manejo De Ecosistemas De Duna Costera, Criterios Ecológicos Y Estrategias* (SEMARNAT, 2013).

Por otra parte, los ecosistemas de dunas varían de acuerdo al origen, composición, características del material sedimentario que las conforman y temporada, en cuanto al área de estudio, la costa de Yucatán presenta un perfil de dunas costeras tropicales como el de la Figura 2 (SEMARNAT, 2013) y un crecimiento máximo en los meses de primavera (Medellín, G. & Torres-Freyermuth, A. , 2021).

En resumen, en condiciones óptimas las dunas tienen un ciclo de formación asociada al transporte eólico en el que la vegetación facilita la acumulación de los sedimentos y pueden ser erosionadas por el efecto de tormentas o huracanes, regenerándose cuando las condiciones climáticas le favorezcan para consecuentemente restablecer la vegetación.

2.2 PROBLEMÁTICA COSTERA

Una de los principales problemas que afecta a la línea de costa es el problema de la erosión, afectando en un 70% a nivel global. Este proceso de origen natural o antropogénico es responsable de la reducción del ancho, volumen de arena de las playas y dunas. Así mismo, el proceso puede verse exacerbado por el incremento en el nivel del mar como consecuencia del cambio climático (Ahmed *et al.*, 2018; CORIMAT, 2019).

De acuerdo con el Coastal Risk Management (2019), las costas tienen un balance de entrada y salida del material sedimentario, donde si el gradiente es positivo se presenta el fenómeno de acreción, esto quiere decir que la playa crecerá. Por el contrario, si el balance de sedimentos es negativo, el transporte de sedimentos de salida es mayor al de entrada la playa presenta el fenómeno de erosión, y por consiguiente el ancho de playa disminuirá (CORIMAT, 2019).

Asimismo, debido a la reducción del sistema playa-duna por problemas de erosión, la resistencia de estos ecosistemas disminuye ante perturbaciones naturales (huracanes y tormentas) o antropogénicas tengan mayores afectaciones en las comunidades costeras (Ahmed, *et al.*, 2018).

Por su parte, las playas disipativas -las cuales están compuestas de sedimento fino o blando- tienen su equilibrio en la cantidad de sedimento que es depositado y removido por los patrones de oleaje y viento (CORIMAT, 2019). Por lo que cambios en estos dos factores, podrían alterar la dinámica del ecosistema, modificando la morfología de la línea de costa.

Además de los problemas de erosión naturales que suelen presentar las playas, como se ha mencionado, pueden ser agravados por la urbanización de la línea de costa debido a actividades antropogénicas y modificaciones en el flujo natural de los sedimentos afectando la dinámica del litoral y degradando el ecosistema de duna (Gopikrishna y Deo, 2017; Torres-Freyermuth, *et al.*, 2021). Por ejemplo, al llevar a cabo la construcción de casas veraniegas que incluyan la deforestación o afectaciones al área de duna, infraestructura portuaria que altere los patrones de oleaje y arrastre de sedimentos; y/o estructuras de protección costera.

2.3 MITIGACIÓN DEL PROBLEMA

Una de las medidas para mitigar la pérdida de sedimento, son las estructuras de protección costera. Éstas tienen como objetivo estabilizar la línea de costa, obstruyendo o modificando el flujo del sedimento para acumularlo en determinada zona (Appendini, *et al.*, 2012; Muñoz y Gutiérrez, 1999; Cuevas-Jiménez, *et al.*, 2016; Torres-Freyermuth, *et al.*, 2021).

Una de las estructuras de protección más comunes son los espigones o espolones, los cuales consisten en estructuras duras perpendiculares a la línea de costa que se construyen con el objetivo de interrumpir el transporte litoral y retener sedimentos para aumentar el ancho de playa. No obstante, estas estructuras detienen la erosión localmente, es decir únicamente aportan protección para el frente de playa de una casa y generan erosión en zonas aledañas, causando un *efecto sombra*³ del lado contrario al flujo del oleaje. Estructuras de mayor tamaño como escolleras y muelles,

³ Efecto sombra: es el resultado de la colocación de un espigon o espolon, consiste en la erosión del lado contrario donde la arena se deposita para la zona requerida.

tienen el impacto similar a un espigón sin embargo por el tamaño causan un mayor impacto en la línea de costa.

Diferentes autores como Appendini, *et al.* (2012); Muñoz y Gutiérrez (1999); Cuevas-Jiménez, *et al.* (2016); Torres-Freyermuth, *et al.* (2021), señala que estas estructuras de protección costera detienen la erosión localmente, esto quiere decir que en la mayoría de los casos las estructuras únicamente aportan protección para el frente de playa de una casa, en caso de tener un tamaño mayor, el área de influencia incrementará.

La restauración de dunas costeras es una alternativa para mitigar la erosión de playas con el fin de restaurar y rehabilitar las funciones ecológicas del ambiente de duna costera. Esto contribuye a que los procesos litorales se lleven a cabo naturalmente al incrementar la vegetación. Estas medidas de restauración de duna requieren eliminar o disminuir factores antropogénicos que influyan en la dinámica costera, un ejemplo son las estructuras portuarias, espigones y muelles. Sin embargo, el quitar estructuras portuarias o estructuras de protección costera es poco viable desde el punto de vista socio-económico, por lo que no es una medida de mitigación a la erosión y se opta por otras soluciones a corto plazo como rellenos de playas o estructuras duras como recubrimientos, espigones, entre otros. (SEMARNAT, 2013).

Los dueños de casas aledañas al mar que sufren problemas de erosión pueden llegar a gastar hasta \$7,400 por metro lineal para la construcción de un rompeolas de geotubo, de \$5,000-\$7000 por metro para la construcción de un rompeolas de reef balls⁴ y \$7,500 por metro para la construcción de espigones (LIPC, 2017). Aunado a este costo, también debe considerarse un monto adicional por la realización de una Manifestación de Impacto Ambiental y la autorización de SEMARNAT.

⁴ Estructura de material duro -como cemento- de forma esférica y agujerada, tiene como finalidad la creación de hábitat.

De esta manera, en la costa de Yucatán las estructuras más utilizadas para mitigar en problema de la erosión son los espigones o espolones, los cuales en la mayoría de los casos en donde son utilizadas crean un déficit de sedimento corriente abajo, dando como resultado el retroceso lineal de costa en playas aledañas (Williams y Barugh, 2014; Cuevas-Jiménez, *et al.*, 2016; Jiménez, *et al.*, 2009).

En la mayoría de los casos en donde se colocan las medidas de mitigación para la erosión sin previa investigación sobre los procesos costeros, regulación y monitoreo; resulta en una mayor inestabilidad del material sedimentario, incrementando así el problema de erosión de playas (Williams y Barugh, 2014; Cuevas-Jiménez, *et al.*, 2016; Jiménez, *et al.*, 2009).

En el caso de la costa de Yucatán se ha visto que la línea de costa es altamente sensible a la presencia de estructuras debido a la persistencia del transporte de sedimento de este a oeste. Medellín *et al* (2018) menciona que las playas de la Península de Yucatán son sensibles a la presencia de estructuras de protección, dado que limitan el transporte de sedimentos a lo largo de la costa y que, por el contrario, retirar una estructura es positiva con la difusividad a lo largo de la costa acumulando sedimentos en ella.

2.4 VULNERABILIDAD COSTERA

La vulnerabilidad se define como la susceptibilidad de un sistema a sufrir alteraciones, en otras palabras, puede definirse como la falta de capacidad de un ecosistema, especie, etc., para anticiparse, resistir y recuperarse de un evento natural o antropogénico atípico (Calderón, *et al.*, 2017), aunque el concepto de vulnerabilidad puede no ser igual para grupos e individuos (Rygel, *et al.*, 2006).

Al mismo tiempo, autores como Contestabile y Vicinanza (2020) definen el concepto de vulnerabilidad costera como la identificación de personas o lugares que son susceptibles a sufrir daños física, económica y socialmente, a consecuencia de eventos de tormenta, erosión e inundaciones en el área donde se encuentran.

La vulnerabilidad se encuentra compuesta por dos conceptos: resistencia (habilidad de absorber daños y continuar funcionando) y resiliencia (habilidad de recuperarse después de un evento extremo). A su vez está determinada por factores como la exposición a amenazas, fragilidad de los elementos expuestos, la capacidad de adaptación y respuesta ante las amenazas (Calderón, *et al.*, 2017; Rygel, *et al.*, 2006).

Por su parte el nivel de vulnerabilidad es determinado por diferentes factores como la fragilidad de los medios de subsistencia, la organización social en las comunidades, la percepción de los riesgos, capacidad institucional para responder a las afectaciones, estabilización económica, equilibrio ambiental del ecosistema, recuperación, entre otros aspectos (Calderón, *et al.*, 2017).

Las personas o lugares con menos recursos son más vulnerables a desastres, teniendo una tasa de mortalidad y pérdidas materiales más difíciles de recuperar, dado que no cuentan con el capital suficiente para medidas preventivas, requerimientos durante y después del desastre (Rygel, *et al.*, 2006).

En particular, la vulnerabilidad ha sido un concepto importante con relación a las zonas costeras y los posibles panoramas contemplados ante el incremento de la temperatura en la tierra consecuencia del calentamiento global, y los (Rygel, *et al.*, 2006).

Para esta investigación, definiremos el concepto de vulnerabilidad como la falta de capacidad de un sistema para resistir alteraciones naturales o antropogénicas. Así mismo, para fines del estudio se tomó en cuenta la resistencia del sistema, es decir las características que permiten absorber los daños y continuar funcionando.

La costa es una zona vulnerable debido a su potencial de urbanización, ambiente dinámico y los diferentes servicios ambientales que brinda, por lo que conocer sus componentes y procesos es importante. Los procesos de índole natural, social y económico de la línea de costa son de importancia para el Programa de Ordenamiento Ecológico Territorial del Estado de Yucatán, por lo cual tienen un

modelo de desarrollo con políticas y estrategias con criterios ecológicos para poder llevar a cabo correctamente la expansión demográfica del estado (POETCY, 2005).

La Unidad de Gestión Ambiental⁵ hecha para el municipio de Progreso en la cual se aplicó el Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero del Estado de Yucatán⁶, menciona los puntos principales para la vulnerabilidad de la zona costera: capacidad de carga, expansión demográfica, organización de los asentamientos, componentes sociales, amenazas naturales -incremento del nivel medio del mar, huracanes- y problemas ambientales -remoción de cubierta vegetal, degradación de los ecosistemas- (PROOBAR, 2014).



Figura 3. Escenarios de las construcciones presentes en la línea de costa de Progreso, Yucatán. a) Escenario ideal de las construcciones realizadas en la línea de costa, en donde la construcción se encuentra detrás de la primera duna y no alteran la vegetación, respetando los lineamientos del

⁵ UGA

⁶ POETCY

Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorio Costero de Yucatán. b) Escenario real de la mayoría de las construcciones en la costa, cimentadas sobre el área de duna y sin vegetación nativa.

De esta forma, considerando las amenazas y condiciones que tiene una construcción aledaña a la costa, el escenario ideal según el POETCY (Figura 3. a) es construir las casas después de la primera duna sin afectar la vegetación, la cimentación debe realizarse a 60 metros de la línea de pleamar, respetando los 20 metros de la zona federal marítimo terrestre (ZOFEMAT) para libre tránsito y 40 metros de protección para la primera duna (POETCY, 2004). En el escenario ideal, al presentarse eventos de tormenta la infraestructura de la casa se verá protegida por la vegetación de duna y la energía del mar se disiparía en la playa controlando la pérdida de sedimento.

Sin embargo, el escenario con degradación del ecosistema es común en la costa de Yucatán. Las construcciones fueron realizadas sobre el área de duna, desmontando la vegetación y llevando a cabo la cimentación dentro de los 60 metros contemplados en el POETCY (Figura 3. b). De esta manera, la infraestructura de la casa se vería desprotegida al haber eventos de tormenta por no contar con las condiciones necesarias para disipar la energía de las olas.

En definitiva, la consecuencia de malas prácticas de ordenamiento territorial y falta de aplicación en la legislación ambiental da como resultado un ecosistema vulnerable a perturbaciones ambientales y antropogénicas, siendo importante identificar las zonas vulnerables para la elaboración de planes de manejo costero (Ahmed, *et al.*, 2018).

2.5 HERRAMIENTAS DE ANÁLISIS

Los métodos para determinar la vulnerabilidad dependen del nivel de los factores que se requieren según el objetivo del estudio, donde la búsqueda de soluciones a las problemáticas costeras mencionadas anteriormente ha propiciado nuevas técnicas para la generación de información sobre estos ecosistemas.

Por un lado, el análisis de vulnerabilidad está enfocado en el equilibrio ambiental del litoral, utilizando Sistemas de Información Geográfica⁷, los cuales consisten en un software que permite integrar, analizar y representar información conectando mapas con bases de datos (Sistema Geológico Mexicano, 2017). Además, una herramienta que complementa los SIG's son los Vehículos Aéreos No Tripulados⁸ o drones, lo cuales pueden utilizar distintos sensores para la captura de información (Madjid, *et al.*, 2018) y tienen la capacidad para realizar un monitoreo aéreo, obteniendo fotografías con alta definición para después construir ortomosaicos y modelos digitales de elevación mediante algoritmos. De los más utilizados actualmente son los métodos SfM⁹, que consisten en obtener un modelo 3D de una superposición de imágenes en 2D de diferentes ángulos.

De esta manera el uso de VANT y SIG's permite comprender los problemas que afectan a la sociedad desde un contexto espacialmente explícito, y de este modo proponer soluciones basándose en el análisis de largas extensiones espaciales, determinando variables como cambios en la línea de costa, cubierta de vegetación de duna, tipo de costa y uso del suelo; permiten enfocar áreas vulnerables y comprender mejor el estado general del sistema litoral del área de interés en este estudio (Cuevas-Jiménez, *et al.*, 2016).

⁷ SIG's

⁸ VANT

⁹ Structure from motion, por sus siglas en inglés

CAPITULO 3:

ANTECEDENTES

En el área de la península se han llevado a cabo diferentes estudios sobre la dinámica costera y los procesos en la costa norte de Yucatán. Por ejemplo, Appendini *et al* (2012) utilizaron modelos de oleaje y de transporte de sedimento para determinar el potencial erosivo de la costa de la Península de Yucatán bajo condiciones naturales (Figura 4), concluyendo que la erosión es un fenómeno natural en algunas zonas debido a la orientación de la península y el clima de oleaje medio en la zona.

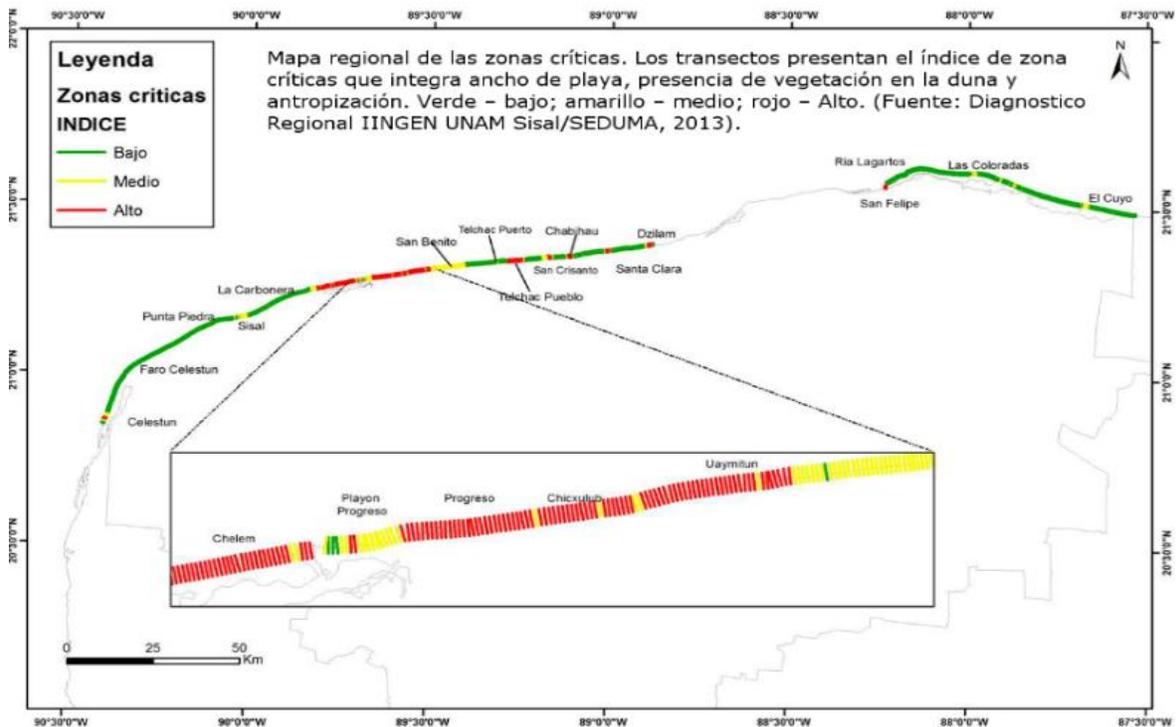


Figura 4. Mapa regional de zonas críticas, basándose en las características de ancho de playa, presencia de vegetación en la duna y antropización de la línea de costa del estado de Yucatán, siendo una de las zonas críticas la parte de Progreso, Chicxulub y Chelem. Extraído de *Diagnostico Regional* (IINGEN Sisal/ SEDUMA, 201).

En suma, el problema de erosión de la costa de Yucatán es agravado por la urbanización y la presencia de estructuras costeras que alteran la dinámica del litoral, incrementando el problema de erosión o creando zonas de acreción (Jiménez, *et al.*, 2009; Gopikrishna y Deo, 2017). Los cambios estacionarios y los ciclos de erosión-acreción en la zona de playa pueden deberse a los patrones de transporte de sedimento y de oleaje, (Aubrey, 1979).

3.1 ESTRATEGIAS PARA LA MITIGACIÓN DE LA EROSIÓN COSTERA

Como se ha mencionado anteriormente, una de las medidas que han tomado los propietarios de hoteles o viviendas en las playas es utilizar espigones para detener la erosión de su frente de playa, sin embargo, la ubicación y diseño de las estructuras de protección se basan en su mayoría en el criterio de los dueños de las propiedades y no en el conocimiento de expertos. Por lo tanto, en la mayoría de los casos crean perturbaciones e inestabilidad en el sistema litoral, ocasionando un “efecto sombra” reteniendo arena en el área corriente arriba y agravando la erosión en dirección al flujo (Ruiz-Martínez, *et al.*, 2016).

Por su parte, se han realizado distintos estudios en el área para definir las consecuencias de colocar estructuras de protección costera, donde González-Herrera *et al* (2015) determinaron el transporte de sedimentos en la costa Norte de Yucatán con el modelo GENESIS considerando diferentes escenarios como la colocación de espigones, rompeolas paralelos o realizado relleno de playas. El estudio concluye que estas medidas tienen poca eficiencia, debido a que el beneficio está limitado para determinada área, afectando a otras.

Concluyendo, para el caso de los rompeolas, se deben tomar en cuenta rutas de embarcaciones y la estética del paisaje; y para el caso del relleno no es rentable puesto que se perderá rápidamente el sedimento.

Otro estudio relacionado con las estructuras de protección costera fue el de Pranzini, *et al.*, (2018) en el cual se elaboró un análisis acerca de cómo el sedimento

pasa entre diferentes estructuras acomodadas en un litoral de Italia, las conclusiones se centraron en que la colocación de una estructura de protección no solucionará el problema de la erosión, puesto que no se recuperará el área de playa perdida, sino que la zona con problemas de erosión se moverá a otra parte de la costa.

3.2 VULNERABILIDAD COSTERA

Por su parte, McLaughlin y Cooper (2010) realizaron el índice de vulnerabilidad para tres escalas espaciales diferentes -general, regional y local- para el norte de Irlanda, donde hacen énfasis en los distintos parámetros de la vulnerabilidad y la manera de integrarlos con SIG's, al poder representar de forma fácil el efecto de los diversos rangos, concluyendo que se debe de considerar la escala espacial y temporal del índice de vulnerabilidad debido a la influencia de variables obteniendo valores sesgados.

$$S = \sum_i w_i$$

Ecuación 1. Índice de vulnerabilidad de erosión (S : es el índice de vulnerabilidad, w_i : atributo o criterio considerado, x_i : peso asignado a cada atributo). Extraído de *Classification of Beach Erosion Vulnerability on the Yucatan Coast* (Cuevas-Jiménez, et al., 2016).

Para continuar, Cuevas-Jiménez et al (2016) llevó a cabo la clasificación de las playas al norte del estado de Yucatán, determinando el índice de vulnerabilidad a erosión con un modelo multicriterio cuyos elementos consideran las características del ancho de playa, presencia de duna, presión antropogénica y orientación de la costa, en este estudio, se utilizaron imágenes satelitales y una combinación lineal ponderada para el análisis, asignando peso a cada atributo (Ecuación 1) y dando como resultado un mapa del índice de vulnerabilidad a la erosión (Figura 5).

De acuerdo con Zetina (2009), las variables en los modelos multicriterio pueden ser directas o inversas, las primeras corresponden a las características que representan factores positivos y por lo tanto incrementan el valor; y las segundas, son aquellas que restan valor entre mayor número tengan.

El índice de vulnerabilidad creado por Cuevas-Jiménez, *et al.* (2016), dio como resultado la identificación de las áreas vulnerables a erosión (Figura 5) principalmente en el municipio de Progreso, caracterizado por un ancho de playa menor a 10 metros, generalizado en el área norte de Yucatán con un 75.8% de modificaciones por el desarrollo urbano, implicando deforestación del área de duna y cambio de uso de suelo en la mayoría de la línea de costa.

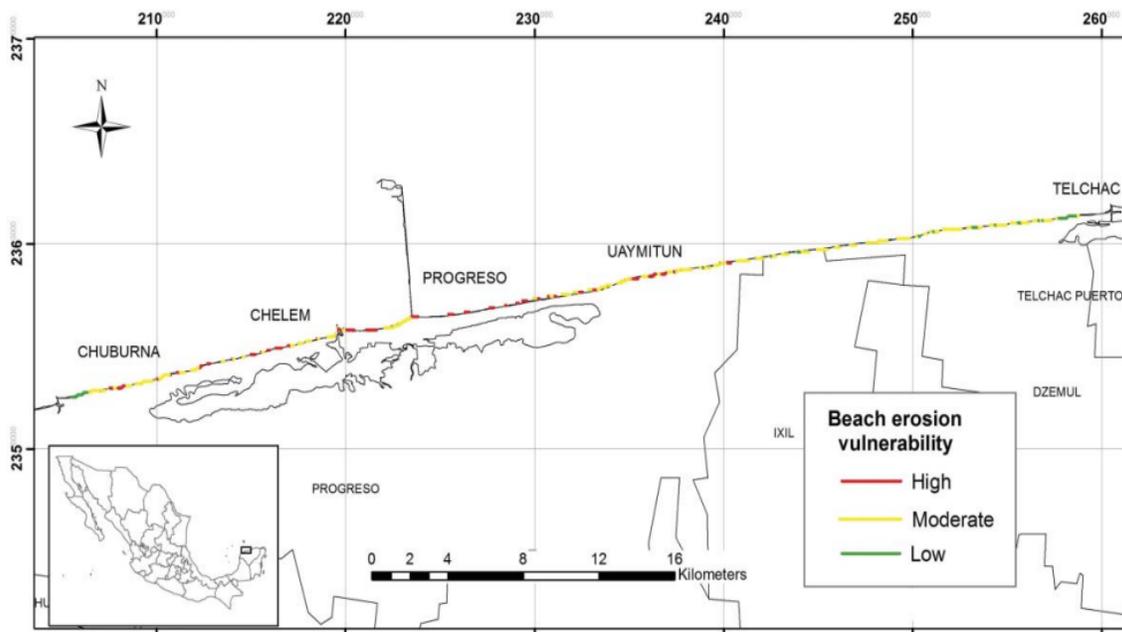


Figura 5. Índice de vulnerabilidad de erosión de playa de diferentes playas de la línea de costa de Yucatán (Chuburná, Chelem, Progreso, Uaymitun y Telchac), de acuerdo a su índice de vulnerabilidad se clasificaron en alta, moderada y baja vulnerabilidad de erosión. El índice fue estimado con el ancho de playa, presencia de vegetación de duna, desarrollo urbano y orientación de la costa. De manera general la línea de costa se encuentra con vulnerabilidad moderada, donde la zona con más alto índice de vulnerabilidad se observa en las playas de Progreso. Extraído de *Classification of Beach Erosion Vulnerability on the Yucatan Coast* (Cuevas-Jiménez, *et al.*, 2016).

Como conclusión, los autores mencionan que la zona costera del municipio de Progreso es vulnerable a erosión, resaltando que las zonas con un índice de vulnerabilidad menor son aquellas en las que hay una presión antropogénica baja y la vegetación de duna no tiene grandes perturbaciones.

Así mismo, los autores recomiendan como medida de mitigación para el problema de erosión estructuras paralelas a la costa como revestimientos, estructuras duras (rompeolas), blandas (rompeolas), acompañadas de rehabilitación de vegetación de duna para estabilizar el sedimento de la playa. También mencionan que para obtener un índice de vulnerabilidad a erosión más certero se necesita una base de datos con una periodicidad menor, que sirva de línea base para futuros análisis en la zona, resaltando la importancia de determinar el funcionamiento de las estructuras de mitigación utilizadas en el área (Cuevas-Jiménez, *et al.*, 2016).



Figura 6. Diagrama de elementos generales para crear un índice de vulnerabilidad para la costa con sus diferentes variables. Extraído de *A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers?* (McLaughlin y Cooper, 2010).

El índice presentado por Cuevas-Jiménez, *et al.* (2016) está basado en tres elementos generales: características costeras, socioeconómicas y de oleaje-

tormentas (Figura 6). Estos pueden ser representados con distintas variables de acuerdo al riesgo considerado para los fines de la investigación.

En el artículo de Cuevas-Jiménez, *et al.*, (2016) se tomaron en cuenta las metodologías de McLaughlin y Cooper (2010) y Mendoza *et al* (2013), en los cuales se calculó el índice de vulnerabilidad costera general y vulnerabilidad ante tormentas basándose en características de la línea de costa, nivel de urbanización y ancho máximo de la zona de berma.

De otra manera, en la costa norte de Yucatán para el estudio de Mendoza *et al* (2016) se realizó un índice de vulnerabilidad compuesto por tres indicadores: físicos -perfiles de playa e impactos potenciales por tormentas-, biológicos -presencia/ausencia de vegetación- y socioeconómicos -presencia/ausencia de asentamientos humanos-, utilizando un método de agregación simple.

Para el municipio de Progreso se obtuvo un valor de vulnerabilidad de 93% para la erosión y 66% para inundación, además los autores recomiendan que los resultados deben ser interpretados con precaución debido a que no se tomó en cuenta los efectos de tormenta en las zonas (Mendoza, *et al.*, 2016).

Por lo anterior y dado que ninguno de los estudios previos a este, considera la vegetación presente en la zona, una mayor resolución espacial, por lo que en este estudio tuvo como principal objetivo determinar la vulnerabilidad de la zona costera en el área de Puerto Progreso-Chixchulub, considerando las características físicas, de infraestructura y vegetación de la línea de costa, considerando los puntos anteriores y demás.

CAPITULO 4:

OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

➤ GENERAL

Determinar la vulnerabilidad espacio-temporal de un tramo de costa ubicado entre el Puerto de Progreso y Chixchulub, considerando las características de morfología, infraestructura y vegetación de la línea de costa para el periodo de 2016-2017.

➤ ESPECIFICOS

1. Identificar la variación de la línea de costa para cada tiempo.
2. Caracterizar y establecer la infraestructura costera presente para cada tiempo.
3. Determinar el cambio de la línea de costa.
4. Determinar y cuantificar el tipo de estructuras de protección costera presente.
5. Determinar presencia y estado de la vegetación en el frente de playa para cada casa.
6. Desarrollar un índice de vulnerabilidad espacialmente explícito tomando en cuenta las características determinadas anteriormente.
7. Evaluar la variación temporal del índice de vulnerabilidad durante el período de estudio.

CAPITULO 5:

ÁREA DE ESTUDIO

La presente investigación se llevó a cabo en un tramo de 7 kilómetros de línea de costa (Figura 7) de la localidad de Chicxulub Puerto y perteneciente al municipio de Progreso, Yucatán (coordenadas generales: 21°17'56.61"N, 89°35'14.85"W a 21°18'44.56"N, 89°31'17.88"W).

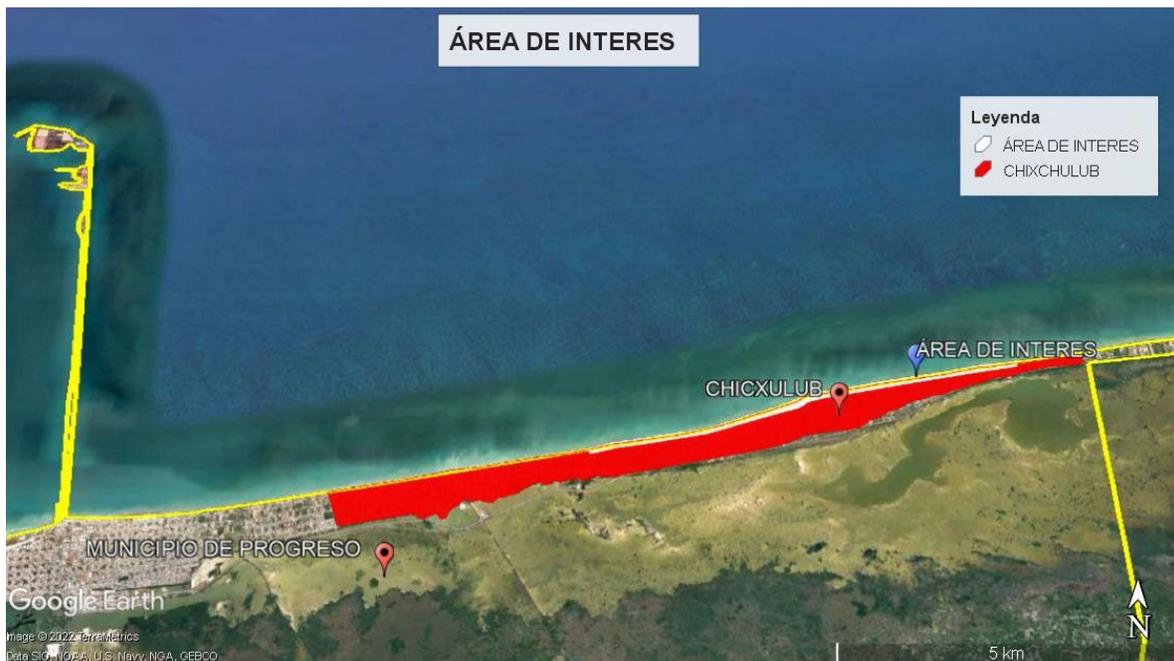


Figura 7. El polígono de color rojo es la localidad de Chicxulub, mientras que el pequeño polígono de color blanco es el área de interés, en la cual se tomaron las imágenes aéreas tomadas para el estudio. La línea amarilla muestra los límites del municipio de Progreso.

Después de la caída de la industria henequenera en Yucatán se buscaron alternativas para la población que quedó desempleada, impulsando actividades en la costa como la pesca y turismo. Esto ha resultado en la migración de personas y urbanización de la línea de costa de la península de Yucatán (Lapointe, 2008; Williams y Barugh, 2014).

Debido a la belleza escénica de las playas y ecosistemas de manglar del estado, la zona costera permite llevar a cabo el servicio ecosistémico de recreación, siendo de interés para actividades turísticas de sol y playa, ecoturismo, o también para la industria inmobiliaria. Esto último, en su mayoría con el fin de construir casas habitación para uso veraniego de uso personal o con fines productivos (Begoña-Álvarez, 1999).

Por otra parte, las sociedades occidentales han tenido un aumento en la demanda de espacios naturales con fines recreativos, ocasionando que el ecosistema se vea modificado con el objetivo de tener la infraestructura adecuada para llevar a cabo las actividades turísticas (Begoña-Álvarez, 1999).

Además, actualmente el sector de servicios es el principal contribuyente a los ingresos del estado de Yucatán (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, 2019). Para el primer semestre del año 2018, la industria turística dejó una derrama económica estimada mayor a \$3,500 millones de pesos (Secretaría de Fomento Turístico, 2018), empleando a más de 100,000 personas de forma directa y otros más de forma indirecta (Observatorio Turístico de Yucatán, 2018).

La península de Yucatán se formó por sedimentos depositados que construyeron una placa de carbonato de calcio (Sánchez, 2007; González-Herrera, *et al.*, 2015). Sus playas de origen calcáreo, están compuestas por sedimentos de materia orgánica como algas, moluscos, corales, etc. (Cuevas-Jiménez, *et al.*, 2016).

Al mismo tiempo el transporte de sedimentos del litoral de la península, depende de patrones de olas de baja energía, la orientación de la plataforma continental y patrones de viento, donde las olas predominantes son procedentes del noreste, por lo que el transporte de sedimentos es de este a oeste (Appendini, *et al.*, 2012).

Por otro lado, la geografía y topografía del norte de la Península de Yucatán, causa que la costa se encuentre expuesta a diversos eventos. Sumado a lo anterior, la construcción de desarrollos turísticos, inmobiliarios y/o portuarios y deforestación del área de duna, alteran la dinámica natural de los ecosistemas costeros y agravan

el problema de erosión crónica de las playas de la Península, trayendo consigo afectaciones a largo plazo a infraestructura y actividades que se realizan en la costa. Las personas afectadas por los problemas de erosión han recurrido a la construcción de espigones y espolones (Appendini, *et al.*, 2012; Jiménez, *et al.*, 1993; Muñoz y Gutiérrez, 1999; Cuevas, *et al.*, 2016).

Los anteriores problemas son reconocidos por las autoridades del estado, por lo que existen planes de ordenamiento territorial como el Programa de Ordenamiento Ecológico del Territorios de la Costa de Yucatán que engloba los problemas costeros y da las bases para la creación de políticas públicas que regulan el territorio (Gobierno de Yucatán, 2007). Sin embargo, estas bases se desarrollaron hace poco más de diez años, por lo que zonas urbanizadas antes de este periodo no consideraron las reglas y medidas establecidas para no alterar la dinámica del sistema costero.

Puesto que la dinámica costera en la Península se ha visto modificada, el análisis de la vulnerabilidad de las construcciones aledañas a la costa, el monitoreo de las condiciones de la costa durante diferentes tiempos, son de suma importancia para prever y tomar decisiones adecuadas ante diversos eventos naturales.

CAPITULO 6:

METODOLOGÍA

6.1 DIAGRAMA DE FLUJO

En el siguiente diagrama de flujo se presenta la metodología sintetizada utilizada para este estudio, desde la toma de las imágenes, el procesamiento de éstas, hasta su análisis.

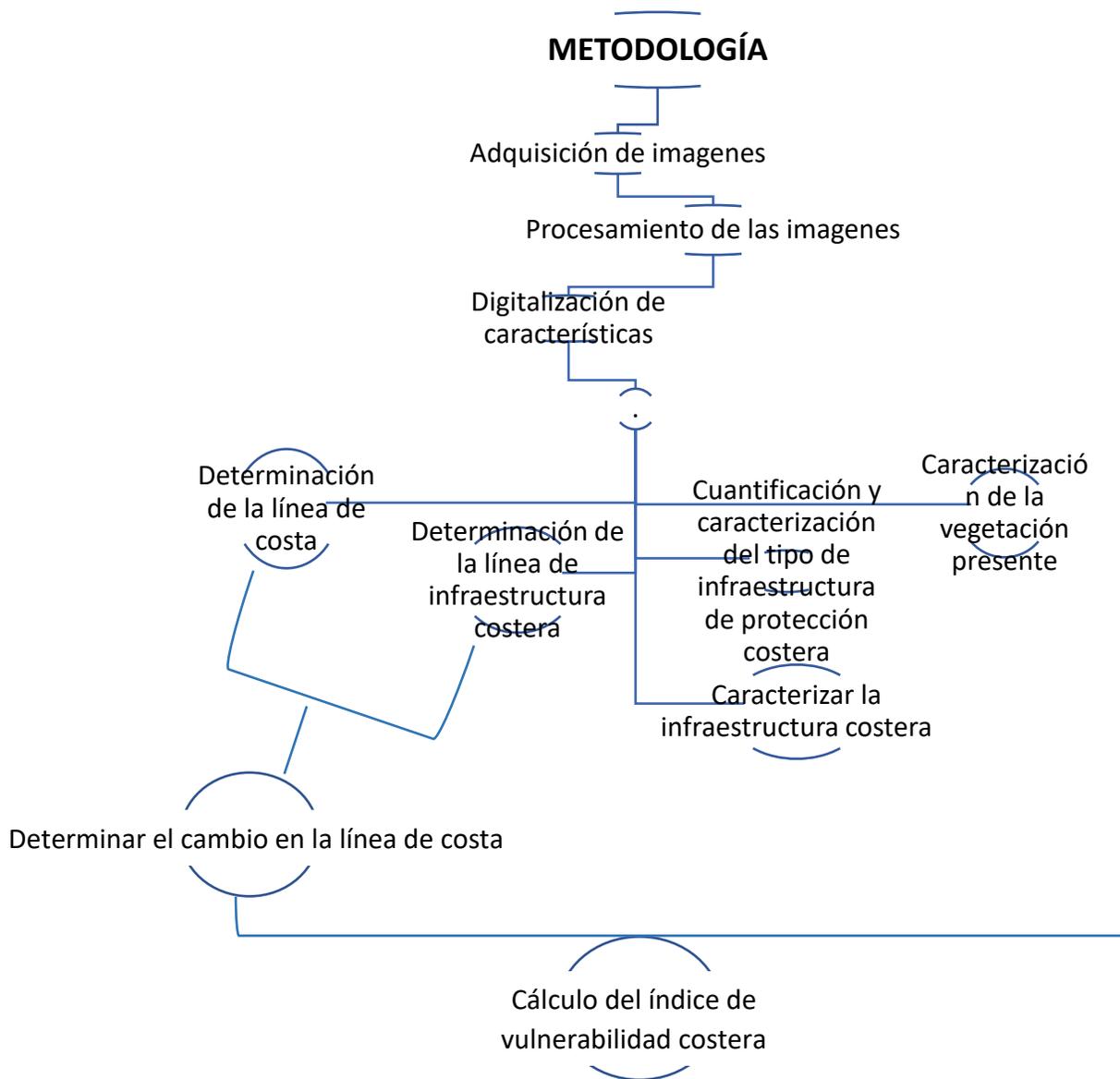


Figura 8. Diagrama de flujo de la metodología utilizada para este estudio

6.2 ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

Para llevar a cabo el monitoreo mensual de 7 km de la línea de costa del municipio de Progreso se utilizó un VANT modelo “C-Astral Bramor-Geo” (Figura 9), dron de ala fija fue equipado con una cámara multispectral MicaSense RedEdge Multispectral. La cámara permite capturar información en intervalos angostos del espectro electromagnético del Rojo (R), Verde (G), Azul (B), Cercano al Infrarojo (NIR) y Red Edge, con una resolución de dos megapíxeles. Previo al inicio de cada vuelo, se obtuvo una imagen de un panel de reflectancia calibrado para transformar los valores de las imágenes obtenidas a reflectancia.



Figura 9. Dron “C-Astral Bramor-Geo” (dron de ala fija) utilizado para los levantamientos fotogramétricos del estudio, junto con el material necesario para su lanzamiento.

Las misiones de vuelo se planearon teniendo en cuenta el clima y la hora para evitar distorsiones por sombras en las imágenes, así como evitar la influencia de la marea en la línea de costa, realizándose a la altura de 120 metros. Mientras que los vuelos tuvieron una duración aproximada de 90 minutos y fueron programados con el software propio del sistema, diseñado para la operación del dron. Cada vuelo se realizó con traslapes horizontales de las imágenes del 80 y 60% lateral; con un ángulo de captura de 90° (C-Astral d.o.o, 2014).

Para tener un control de las imágenes al momento de su georreferenciación, previo al primer vuelo se colocaron mantas como puntos de control distribuidas sobre toda

el área de interés, cada uno georreferenciado con un GPS diferencial, obteniendo así una precisión de 0.9996 cm en la coordenada.

6.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Las imágenes adquiridas, fueron seleccionadas tomando en consideración su claridad para su correcto análisis. El procesamiento de éstas, se llevó a cabo con el software Pix4D, utilizando la técnica SfM. Este programa reconstruye la geometría de la escena de forma automática, realizando un ajuste al utilizar las coincidencias en las imágenes (Machine Intelligence Laboratory, s.f.). La técnica ha sido descrita como un método eficaz y flexible para capturar la topografía del terreno (Westoby, *et al.*, 2012).

El análisis de las imágenes se hizo por etapas. Primero se importaron en la interfase del programa las imágenes y los puntos de control, especificando los metadatos que se requieren para que se realice el procesamiento. El software realizó la construcción del ortomosaico, corrigiendo la distorsión geométrica para que cada punto en el área sea observado desde una perspectiva perpendicular y la imagen sea continua en su balance de color (FLYNORTH, 2015). Finalmente, el programa genera el modelo de elevación para lo cual se verificaron los puntos manualmente.

Por último, para obtener la imagen multispectral se utilizó el programa Erdas Imagine, uniendo las bandas *Red*, *Green*, *Blue*, *NIR* y *Red Edge*. Esto permitió visualizar la imagen a color natural, modificar el orden de las bandas y calcular posteriormente el índice de NDVI.

6.4 DIGITALIZACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS

6.4.1 DETERMINACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA

Primero, tomando como base los ortomosaicos multispectrales, se calculó el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI) para cada uno de los tiempos de estudio, utilizando el software ERDAS Imagine. El GNDVI utiliza los valores de la reflectancia de las bandas verde e infrarroja (Ecuación 2), índice elegido debido a su excelente detección en la concentración de la clorofila en las

plantas y a que puede utilizarse para discriminar el suelo, de la vegetación y la línea de agua en una imagen (Ramírez, 2005; Pastor-Guzmán, 2018).

$$\frac{NIR - Green}{NIR + Green}$$

Ecuación 2. Fórmula para calcular el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde (GNDVI por sus siglas en inglés), *NIR*= banda infrarroja, *Green*= banda verde. Este índice muestra el estado de la vegetación presente, puede ser utilizado para discriminar el suelo de la vegetación y el agua.

El índice de GNDVI como método para determinar la línea de costa es descrito por autores como Boak y Turner (2005) como una forma certera de realizar análisis de cambio en la línea de costa.

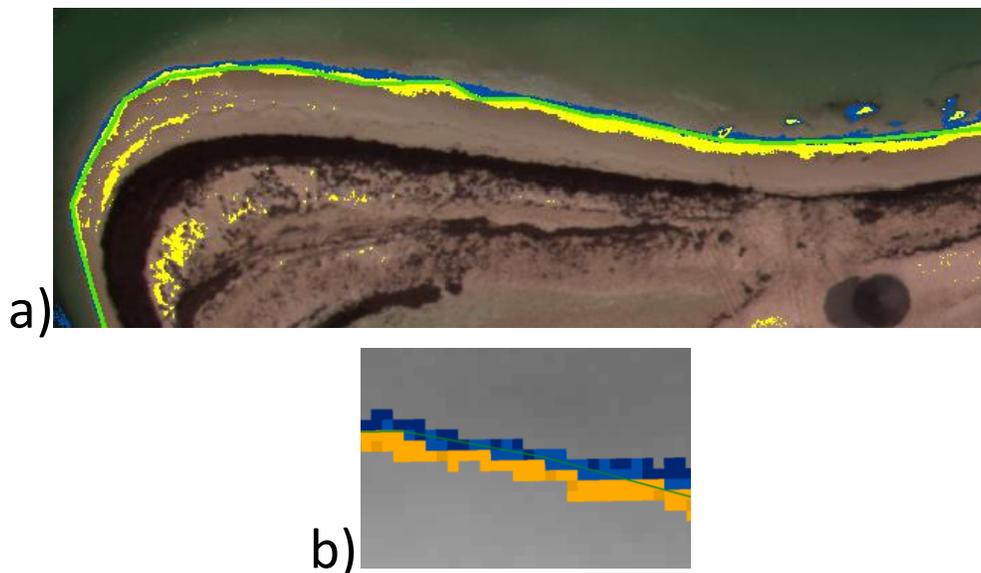


Figura 10. Procedimiento para determinar la línea de costa con el índice GNDVI. En la figura a) se tiene una imagen de una parte del área de influencia del rompeolas, en donde se pueden observar la línea de costa. La línea verde corresponde a la línea de costa de la imagen tomada el 07/2017. En la figura b) se muestra la diferencia entre las clasificaciones de los pixeles del GNDVI para determinar la línea de costa.

Se determinó como línea de costa el límite en donde se podía apreciar el cambio en los valores del GNDVI de la arena seca (AS) y la húmeda (AH). La AH mostró valores de 0 – 0.1, mientras que la AS valores de 0.1 - 0.2 -la diferencia de los valores se puede apreciar en los pixeles resaltados de la figura 9. B-. Tomando como límite el cambio entre los valores se trazó manualmente la diferencia utilizando el software ArcMap (Figura 10).

6.4.2 DIGITALIZACIÓN DE CONSTRUCCIONES

Para determinar la línea de las construcciones aledañas a la costa se utilizó el ortomosaico correspondiente al periodo 12/2016, primero se digitalizaron manualmente los límites visibles de cada construcción y el límite visible de las propiedades a la línea de costa tomando en cuenta bardas y límites visibles como aplanado, desmonte de vegetación y recubrimientos.

Cabe recalcar el uso del software ArcMap 10.5 durante todo el proceso, donde se obtuvieron dos archivos vectoriales, el primero con la línea límite de las construcciones y el segundo con los polígonos de cada propiedad en el área de estudio.

De esta forma los polígonos se clasificaron por tipo de construcción divididos en tres grupos: casas, terrenos y calles. La revisión fue visual, basándonos en la apariencia de los terrenos y sus estructuras (Tabla 1).

Tabla 1. Características de los principales tipos de propiedades aledañas a la costa que se encontraron en el área de interés del estudio.

<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Foto</i>
<i>Casa</i>	Construcciones de casas veraniegas y aparentes complejos hoteleros de pequeña escala	
<i>Terreno</i>	Delimitados por bardas o no, sin ninguna construcción y sin vegetación dañada por el constante paso de vehículos	
<i>Calle</i>	Entradas aparentes a la playa, caracterizadas normalmente con vegetación dañada por el paso de vehículos o peatones y delimitados por bardas de casas	

6.4.3 CAMBIO DE LA LÍNEA DE COSTA

Al mismo tiempo para determinar el cambio en el ancho de playa se utilizó el software del Sistema Digital de Análisis de Costas (DSAS por sus siglas en inglés) complemento de ESRI ArcGIS (versión .9.2), el cual permite calcular diferentes estadísticas para analizar el cambio de la línea de costa. El software utiliza una línea base de la costa y diferentes tiempos de la línea de costa para el cálculo de las diferentes tasas.

Se trazaron transectos perpendiculares a la costa con orientación de tierra a mar, con intervalos de cinco metros entre transectos y respetando la orientación de la costa. Dependiendo del tamaño de la casa, terreno o calle, cada polígono presentó de uno a cinco transectos dentro de su frente de playa.

Por último, para cada una de las propiedades se llevó a cabo el registro del promedio del cambio que presentaron los distintos transectos en su frente de playa obteniendo el valor de cambio en la línea de costa para la propiedad. Mientras que en los casos donde solo se tenía un transecto en la propiedad se ocupó únicamente un valor de *Cambio de Línea de Costa*¹⁰ para determinar el cambio en la línea de costa para la propiedad.

Así mismo, también se obtuvo el valor del *Movimiento Neto de Línea de Costa*¹¹ es la distancia entre la línea de costa más antigua y más reciente, se concluye que para estos valores los transectos con valores negativos tuvieron erosión o pérdida de sedimento en el ancho de la playa para los tiempos del estudio, mientras que las zonas con los valores positivos tuvieron un aumento del ancho de playa o proceso de acreción. Esto puede variar dependiendo de la primera línea de costa puesto que si el primer valor fue negativo y el segundo fue positivo, puede reflejar aún valores negativos.

¹⁰ SCE

¹¹ NSM

Por su parte, el SCE proporciona información sobre la magnitud de cambio en la línea de costa, entre más alto sea el valor, mayor fue la magnitud de cambio en esa zona (Figura 16) cabe recalcar que esta estadística muestra únicamente el dato del área que tuvo cambio, no es el incremento o decremento del área de playa. De esta forma, en la región donde se estableció el rompeolas se pueden observar valores altos en el cambio de la línea de costa. También se observan regiones que en general permanecieron bastante estables durante el periodo de tiempo que considera este estudio.

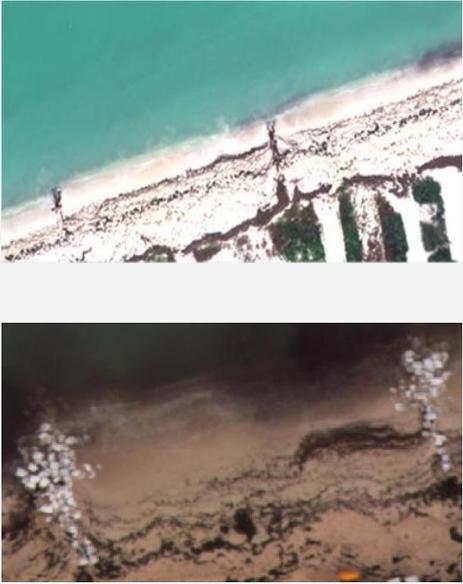
En el anexo 2 se presenta un diagrama describiendo los pasos realizados para la obtención de las estadísticas de cambio en la línea de costa obtenidas con el software DSAS y utilizadas para realizar el análisis.

6.4.4 ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN COSTERA

En cuanto a la cuantificación y determinación del tipo de estructuras, se utilizó el programa ArcMap 10.5 para visualizar los ortomosaicos realizando una revisión detallada del área de estudio presente para cada uno de los tiempos de estudio. De igual manera se consideró la influencia -positiva/negativa- en el frente de playa para cada propiedad.

Conviene subrayar que la clasificación estuvo basada en la evaluación visual y de literatura donde se describen las principales estructuras de protección utilizadas en la península de Yucatán, las utilizadas en este estudio se describen a continuación en la tabla 2.

Tabla 2. Características de las principales estructuras de protección costera utilizadas en la península de Yucatán y encontradas en el área de estudio.

<i>Tipo</i>	<i>Descripción</i>	<i>Foto</i>
<i>Espigón o espolón</i>	Estructuras perpendiculares a la línea de costa, pueden ser de diferentes materiales como costales de arena, madera, piedras, entre otros. Su principal función es acumular sedimento.	
<i>Recubrimiento</i>	Estructuras paralelas construidas pegadas a la línea de costa, pueden construirse de diferentes materiales como costales de arena, piedras, entre otros. Suelen ser utilizados para cubrir las construcciones de daños por la intrusión del mar.	
<i>Rompe olas</i>	Estructuras paralelas a la línea de costa y separadas de esta, pueden ser de diferentes materiales como costales de arena, madera, piedras, geotubos, entre otros; su principal función es proteger la costa y retener sedimento.	 <p data-bbox="922 1833 1182 1864">(TECNOCEANO, 2022)</p>

Se puede apreciar que la influencia de las estructuras en el frente de playa se basó en la revisión bibliográfica anterior y tomando en cuenta el tipo de estructuras construida cercana a las propiedades.

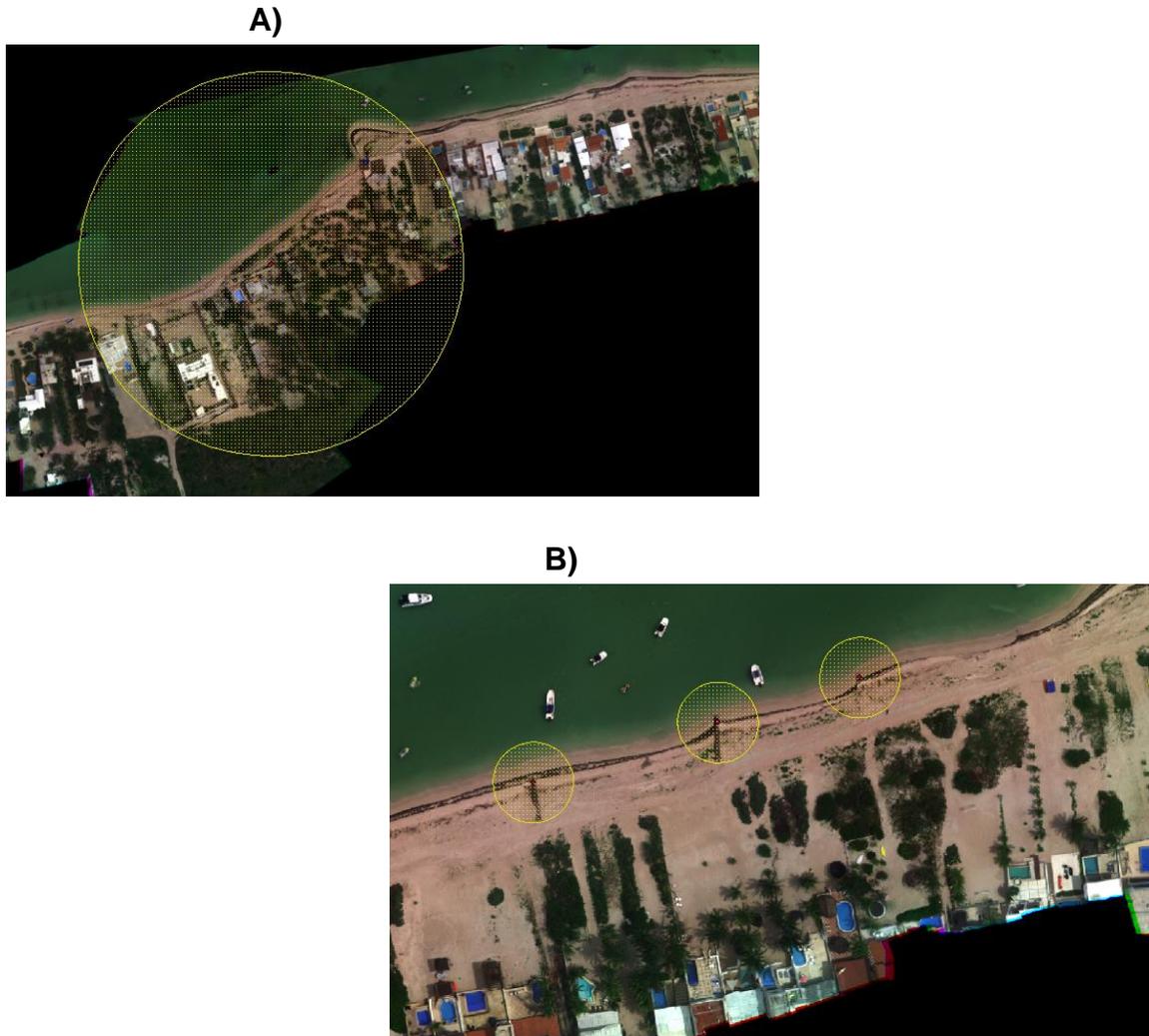


Figura 11. Área de alcance de la influencia de las estructuras de protección costera en los frentes de playa. En la Figura A) se observa el alcance de la influencia de un recubrimiento; y en la Figura B) se pueden observar tres espigones con el alcance de la influencia que tienen.

Por lo que se refiere a la estructura de protección costera, si esta se ubicaba del lado izquierdo de la propiedad se tomó como influencia positiva en el frente de playa debido a que, por la posición y el flujo predominante de sedimentos (Este-Oeste), el frente de playa para esa casa tiende a crecer (Garza-Pérez y Ize-Lema, 2017; SEMARNAT, 2013). Mientras que se consideró como negativo si la estructura

estaba ubicada del lado derecho, debido a que el frente de esta propiedad sufrirá de efecto sombra en su línea de costa (Williams y Barugh, 2014; Cuevas-Jiménez, *et al.*, 2016; Jiménez, *et al.*, 2009).

Así mismo, se consideró la influencia en el medio circundante de las estructuras dependiendo del tipo y tamaño de la estructura. Para los recubrimientos se tomaron en cuenta el tamaño de su medida de largo sobre la costa, tomando como radio este mismo tamaño y realizando un buffer¹² (Figura 11. A) los frentes de playa dentro de este, se consideraban con presencia de estructura, dependiendo del lado que se encontraran se consideraba para la influencia negativa/positiva.

Así mismo, para los espigones se tomó en cuenta la medida de la estructura, tomando su tamaño como radio y realizando un buffer a partir de la estructura, los frentes de playa que quedaran dentro se consideraban con presencia (Figura 11. B). Por último, para el rompeolas se consideraron con presencia de esta estructura todos los frentes de playa en donde los índices de NSM y SCE fueron más variables y cercanos al área. El área de influencia se consideró de esta forma puesto que son estructuras de longitud corta y en su mayoría se encuentran continuos, por lo que el área de influencia únicamente es el frente de playa siguiente.

Finalmente, el caso del rompeolas, debido a que se tenía los cambios de antes de la implementación de la estructura y después, se tomaron con presencia todas las propiedades que presentaron valores de SCE mayores cercanas al área en un radio de 350 metros para ambos lados, tomando como punto centro la esquina de la propiedad más cercana al rompeolas.

¹²Buffer es el espacio Euclidiano y se sirve de un algoritmo bidimensional.

6.4.5 VEGETACIÓN

Con relación a la vegetación, es importante que la flora de duna presente en las propiedades se encuentre en buen estado debido a que al presentarse eventos de tormenta la infraestructura de la propiedad se verá protegida por la misma, pues la energía del mar se disipará en la playa controlando la pérdida de sedimento durante el evento y las diferentes temporadas (POETCY, 2004).

Es así que una propiedad debió de contar con vegetación desarrollada característica de la duna costera, la mancha de vegetación debió ser mayor a un metro cuadrado y cubrir más del 50% del frente de playa de la casa para ser considerada con presencia de duna (CONAFOR, 2018; SEMARNAT, 2013).



Figura 12. En la imagen se pueden apreciar los tipos de frente de playa presentes en el área de estudio y las características de la vegetación. La vegetación mostrada en el círculo verde fue tomada como “presencia de vegetación” debido a que no muestra influencia humana y cubre más del 50% del frente de la casa. Para la vegetación en el círculo rojo fue tomada como “ausencia de vegetación” debido a la influencia humana, límites definidos y dado que no se pudo corroborar en la imagen que esta fuera vegetación de duna o alguna especie introducida, no fue tomada en cuenta como vegetación.

Por otra parte, la vegetación presente se apreciaba con influencia humana es decir vegetación exótica (ej. palmeras, vegetación apreciable en las imágenes de los diferentes tiempos de estudio) y jardineras delimitadas se consideró como ausencia de vegetación (Figura 12).

Por último, se realizó un registro de los valores del índice de vegetación de diferencia normalizada verde -o *GNDVI*- para cada una de las propiedades que presentaron vegetación de duna en su frente de playa y se calculó el promedio para cada tipo de propiedad considerando los valores de los diferentes tiempos.

6.4.6 ÍNDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA

Para comenzar es importante mencionar los escritos de autores como Rygel *et al* (2006) que mencionan las diferentes formas de realizar un índice de vulnerabilidad: la primera tomando a los componentes como contribuyentes iguales a la vulnerabilidad y la segunda, con componentes que contribuyen con valores diferentes, esta última debido a decisiones subjetivas basadas en investigaciones científicas.

En este mismo orden de ideas, para determinar el índice de vulnerabilidad costera e incluir las diferentes variables mencionadas anteriormente se realizó un modelo multicriterio que permite mantener la confiabilidad en la determinación del valor, disminuyendo la subjetividad en las ponderaciones y facilitando la comprensión de las vinculaciones entre las variables y los objetivos de la investigación (Zetina, 2009; Ospina, 2012).

Además, el índice de vulnerabilidad está determinado para el servicio ecosistémico de regulación y soporte, teniendo como principal objetivo el identificar las construcciones costeras que no cuentan con las condiciones físicas ideales en su frente de playa para su protección, conservar el sedimento presente en esta área ante fenómenos naturales o por los procesos costeros que se llevan a cabo en diferentes temporadas del año.

$$\sum IP (C + EPC) + VLC(CLC + V (30 - (GNDVI * 25)))$$

Ecuación 3. Fórmula para calcular el Índice de Vulnerabilidad utilizado. IP= Infraestructura Presente, C= Construcciones, EPC= Estructuras de protección costera, VLC= Variación de la línea de costa, CLC= Cambio de la línea de costa, V= Vegetación y GNDVI= el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde.

En el caso de este trabajo, las características fueron divididas en dos grupos: (1) infraestructura presente -consintió de las construcciones y estructuras de protección costera- y (2) variación de la línea de costa -cambio de la línea de costa y la vegetación presente-. En la tabla 3 se mencionan las categorías y subcategorías utilizadas para el cálculo, mientras que en la ecuación 3 se muestra matemáticamente el índice de vulnerabilidad.

Debido a que las variables del estudio tienen distintas unidades, se normalizaron ponderando los valores de acuerdo a su concepto. También, si proporcionaban protección o cumplían alguna función ecológica o artificial que beneficiara el frente de playa, su valor era bajo; si debido a su existencia o falta de ella afectaba el frente de playa, su valor era alto

La clasificación de los índices de vulnerabilidad se basó en la literatura leída y se realizó de la siguiente manera: los valores bajos de vulnerabilidad fueron los menores de 40, los valores medios de vulnerabilidad fueron considerados los valores entre 40-75, y por último la vulnerabilidad alta fue considerada entre 70-100.

Tabla 3. Variables, ponderaciones y valores utilizados para calcular el índice de vulnerabilidad multicriterio. Se consideran dos grupos de características: construcción y variación de la línea de costa. En la primera, se encuentran las características de construcción e infraestructuras de protección costera. En la segunda, se agruparon la distancia de la línea de costa y la vegetación. Los valores que se le dieron a cada una de las características fueron pensados para que sumaran o restaran valor al índice de vulnerabilidad dependiendo de su concepto. Los números entre paréntesis indican la ponderación utilizada para el cálculo del modelo. El valor asignado a las categorías se encuentra en una escala entre 1 y 5.

TIPO	CARACTERÍSTICA	SUBCATEGORIAS	EVALUACIÓN	VALOR	OBSERVACIONES	
INFRAESTRUCTURA PRESENTE (40%)	CONSTRUCCIÓN (20%)	CASA	PRESENCIA	5	<i>Característica excluyente</i>	
		TERRENO		0		
		CALLE		2.5		
	ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN COSTERA (20%)	PROTECCIÓN (10%)	ESPIGON O ESPOLON	PRESENCIA	2.5	
			ROMPEOLAS		5	
		RECUBRIMIENTO		1		
		EFECTO SOMBRA (10%)	ESPIGON O ESPOLON		2.5	
			ROMPEOLAS		5	
			RECUBRIMIENTO		1	
		CAMBIO EN LA LÍNEA DE COSTA (30%)				
VARIACIÓN DE LA LÍNEA DE COSTA (60%)	VEGETACIÓN (30%)	VEGETADA	DUNA	GNDVI	5-0	<i>Característica excluyente. Fórmula para duna vegetada: 30- (GNDVI*25).</i>
		NO VEGETADA			5	

6.4.7 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS GRUPOS DE VULNERABILIDAD

Utilizando el programa de Rstudio (2020) se construyeron diagramas de caja para cada una de las características utilizadas en el índice de vulnerabilidad costera que van desde el tipo de construcción, cambio de la línea de costa, estructuras de protección costera, estructuras de protección costera con efecto sombra, hasta de vegetación, mostrando la distribución de cada uno de los grupos de vulnerabilidad en medida alta, mediana y baja.

CAPITULO 7:

RESULTADOS

7.1 IMÁGENES

En primera instancia, se obtuvieron tres ortomosaicos de los vuelos realizados para los meses de diciembre del 2016, junio 2017 y diciembre 2017 (Figura 13), para 7 km de la línea de costa del municipio de Progreso.

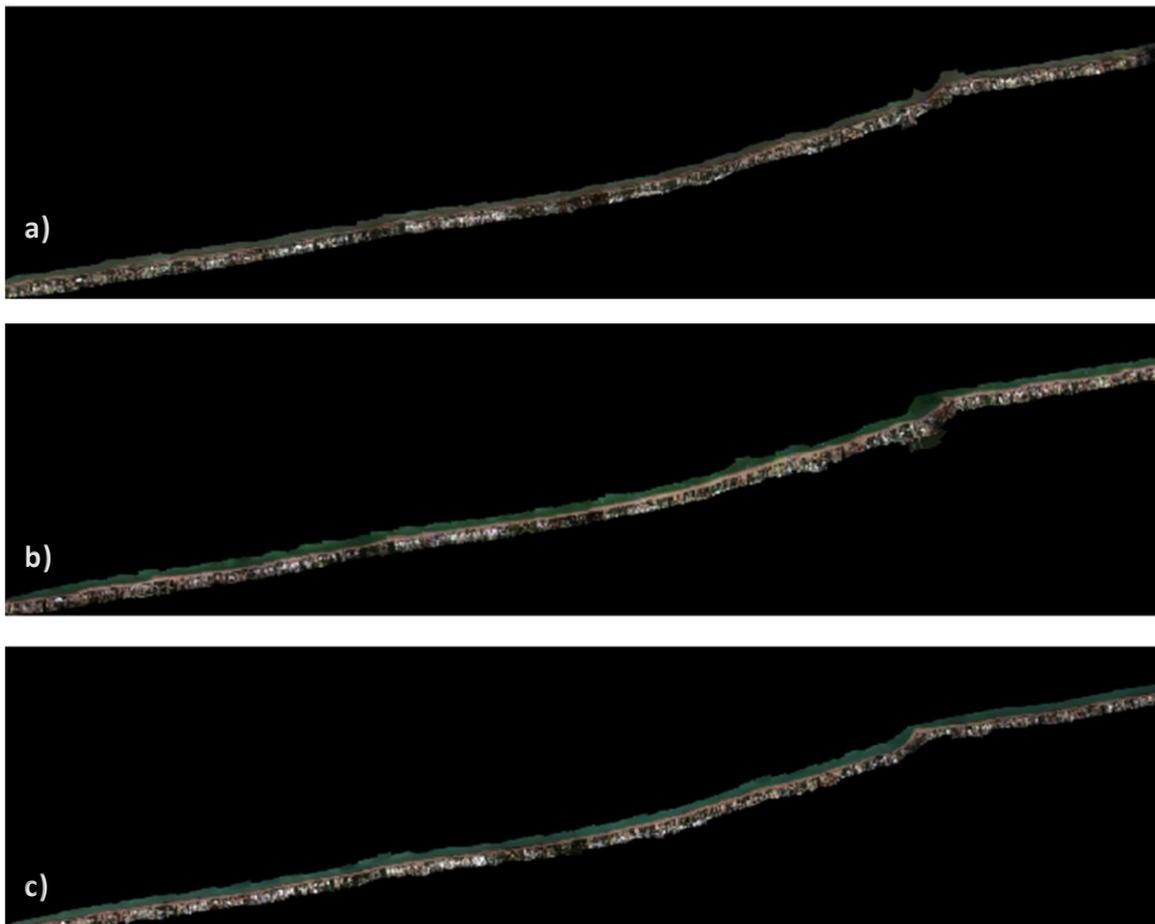


Figura 13. Ortomosaicos construidos en siete kilómetros de la línea de costa del municipio de Progreso, Yucatán. a) ortomosaico del vuelo con fecha de diciembre del 2016, b) ortomosaico del vuelo con fecha de julio del 2017 y c) ortomosaico del vuelo realizado con fecha de diciembre del 2017.

Estas imágenes se construyeron utilizando las bandas rojo (R), verde (G), azul (B), cercano al infrarrojo (NIR) y red edge, con una resolución espacial de 8 cm por píxel.

7.2 CONSTRUCCIONES COSTERAS

En primer lugar, no se observaron cambios importantes en la línea de construcciones -límite determinado entre la infraestructura presente de casas aledañas y la línea de costa- de los siete kilómetros de costa, excepto por cambios dentro de un área previamente delimitada por bardas. Prosiguiendo así al análisis del cambio en los tipos de construcción costera para la fecha inicial y final de las imágenes tomadas, correspondientes a los meses de diciembre del 2016 y diciembre del 2017, comparando los tipos de propiedades que se encontraron para cada tiempo (Figura 14).

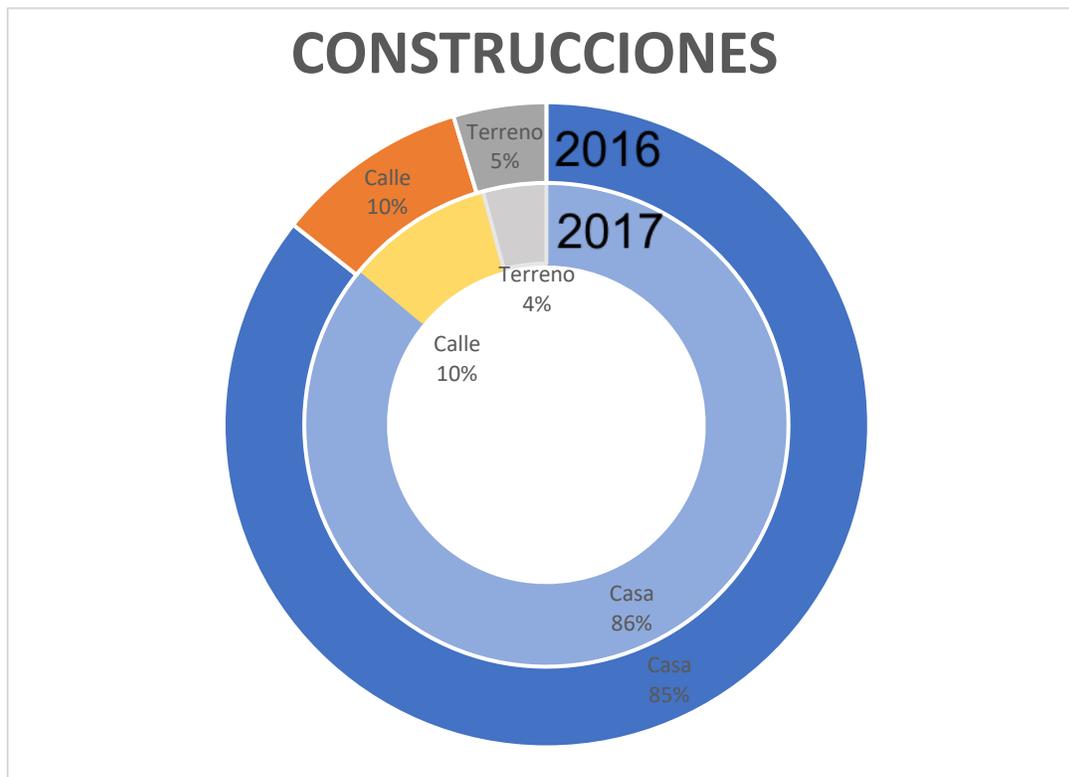


Figura 14. Gráfica que muestra el número de polígonos caracterizados por el tipo de construcciones en la línea de costa para el periodo de diciembre del 2016 y diciembre del 2017. Las calles (tonos naranjas), casas (tonos azules) siendo las de mayor presencia en el área de interés y en ambos tiempos, y terreno (tonos grises) siendo el de menor presencia en ambos tiempos.

En general, se observa que el 86.07% de las propiedades aledañas cuentan con construcción de tipo casa, el 9.70% de los polígonos presentaron características de calle y solo el 4.21% de los polígonos no cuentan con construcciones y por sus características entraron en la categoría de terreno. En otro orden, no se observó mucha variación en los tipos de construcción, pues los cambios en los polígonos fueron en su mayoría de terreno a casa y calle, y en un polígono pasó de casa a terreno.

7.3 ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN COSTERAS

Las estructuras de protección costera se determinaron por sus características físicas y se cuantificaron por grupo para cada uno de los tiempos de estudio, obteniéndose un total de estructuras por año y por tipo -Tabla 4 y Figura 13-.

Tabla 4. Estructuras de protección con más presencia en los tres tiempos de estudio por cada tipo: espigones, rompeolas y recubrimientos en los diferentes tiempos de estudio.

<i>ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN</i>	<i>Diciembre 2016</i>	<i>Julio 2017</i>	<i>Diciembre 2017</i>
<i>ESPIGONES</i>	132	217	115
<i>ROMPEOLAS</i>	0	1	1
<i>RECUBRIMIENTOS</i>	7	6	10
<i>TOTAL</i>	139	224	126

De inicio, en la Figura 15 se graficaron el porcentaje de estructuras que estuvieron presentes en los diferentes tipos de construcciones, de esta forma se obtiene que para las construcciones del tipo casa, los espigones estuvieron presentes en todos los tiempos, siendo más del 80% del total de estructuras. De esta forma, las casas fueron las construcciones que mayor tipo de estructuras presentaron y la única clase que presentó los tres tipos de estructuras de protección.

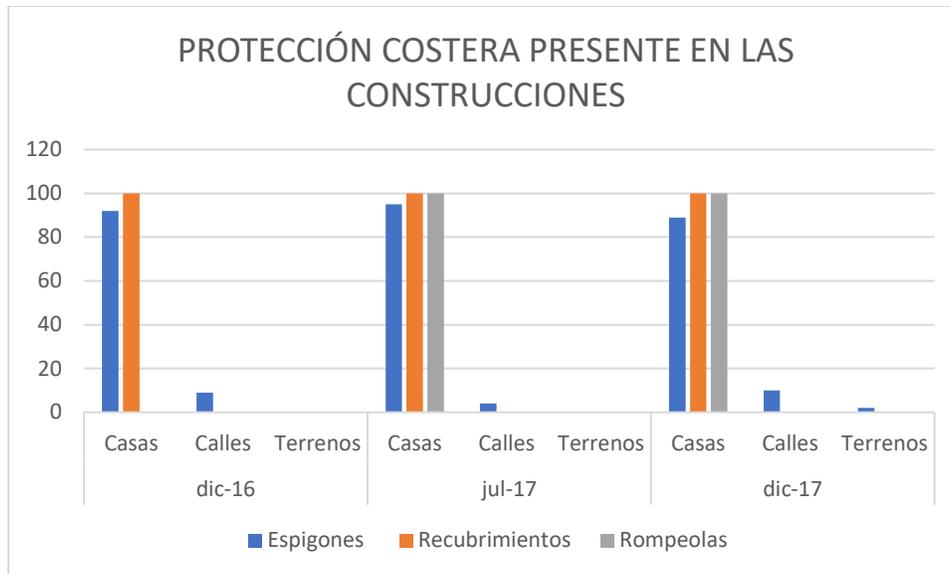


Figura 15. Porcentaje de los tipos de estructuras de protección costera (espigones, recubrimientos y rompeolas) presentes en el área de estudio para cada uno de los tipos de construcciones: casas, calles y terrenos, durante los tres tiempos de estudio. Las construcciones del tipo casa, fueron las únicas que presentaron estructuras de recubrimiento y rompeolas, los recubrimientos estuvieron presentes en los tres tiempos, en el caso del rompeolas estuvo presente a partir del año 2017.

Por su parte, las construcciones tipo calle y terreno únicamente presentaron espigones en los tres tiempos, pues tuvieron entre 2-9% del total de las estructuras de espigones presentes en toda la línea de costa.

7.4 ANÁLISIS DE LA LÍNEA DE COSTA

Utilizando el software DSAS se calcularon las estadísticas: Net Shoreline Movement (NSM: movimiento neto de la línea de costa) y Shoreline Change Envelope (SCE: cambio de la línea de costa) para analizar el cambio de la línea de costa de los siete km de costa en el municipio de Progreso, Yucatán. El SCE (línea azul) que es la distancia máxima (metros) de la mayor medida de las diferentes líneas de costa que se cruzan para cada transecto, en la gráfica se pueden apreciar valores siempre positivos, más frecuentes menores de 10 metros. El NSM (línea naranja) que es la distancia entre la línea de costa más antigua y la más reciente, muestra valores negativos.

En los siete kilómetros de la línea de costa que se aprecian en las imágenes (Figura 11), los cambios en el ancho de playa varían de 1-10 metros en más de seis kilómetros. En las zonas cercanas al rompeolas (1 km aproximadamente) el ancho de playa tuvo mayor variación, desde los 9 a los 49 metros de ancho, en la imagen se aprecia en los valores más altos y bajos de la gráfica.

Para el análisis del cambio en la línea de costa se tomaron en cuenta el NSM¹³ y SCE¹⁴, ambas estadísticas graficadas en la Figura 16, donde se pueden observar valores negativos en el NSM y solo positivos para el SCE. En la figura 16 se muestran las zonas donde se tuvo mayor cambio y movimiento -ejemplo de ello la ubicación del rompeolas-, donde hay procesos de acreción y cerca de erosión.

Dado que el NSM es la distancia entre la línea de costa más antigua y más reciente, se concluye que los transectos con valores de NSM negativos tuvieron erosión o pérdida de sedimento en el ancho de la playa para los tiempos del estudio, mientras que las zonas con los valores positivos tuvieron un aumento del ancho de playa o proceso de acreción. Esto puede variar dependiendo de la primera línea de costa puesto que si el primer valor fue negativo y el segundo fue positivo, puede reflejar aún valores negativos.

Por su parte, el SCE proporciona información sobre la magnitud de cambio en la línea de costa, entre más alto sea el valor, mayor fue la magnitud de cambio en esa zona (Figura 16) cabe recalcar que esta estadística muestra únicamente el dato del área que tuvo cambio, y que dicho dato no da reflejo el incremento o decremento del área de playa.

¹³ NSM: movimiento neto de la línea de costa, considera la distancia entre la línea de costa más antigua y la más reciente.

¹⁴ SCE: cambio de la línea de costa

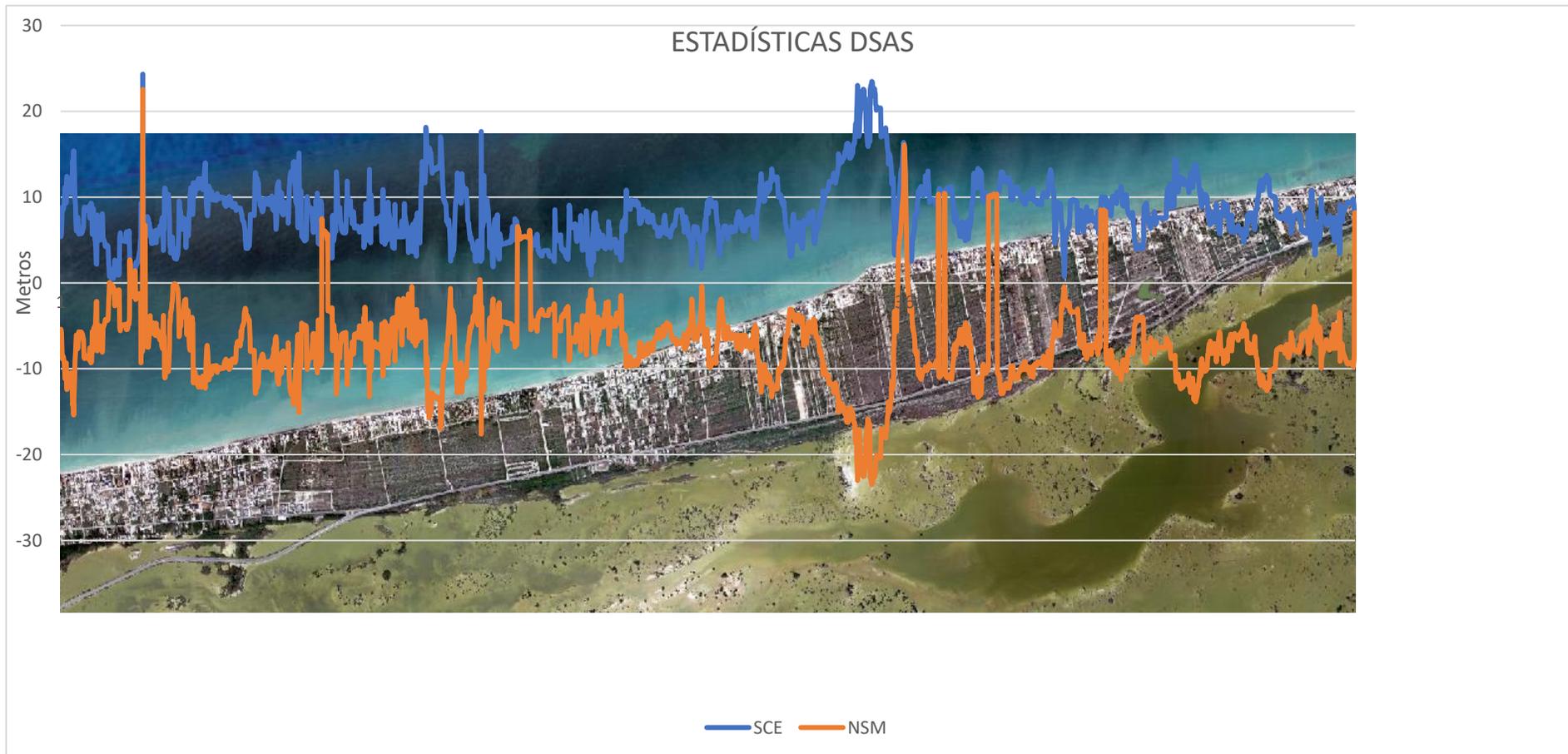


Figura 16. Valores de movimiento neto (NSM) y cambio de línea de costa (SCE) para el área de estudio.

Es importante mencionar a la Figura 17, pues muestra el SCE. Existen áreas - señaladas en verde- donde la magnitud de cambio de la línea de costa es baja, sin embargo, en algunas zonas se observan cambios mayores de 12 metros en el frente de playa, lo que resalta el área en la parte del rompeolas, una sección aproximada de 600 metros, en donde se observa un proceso de mayor magnitud de cambio en la línea de costa (> 18 metros).

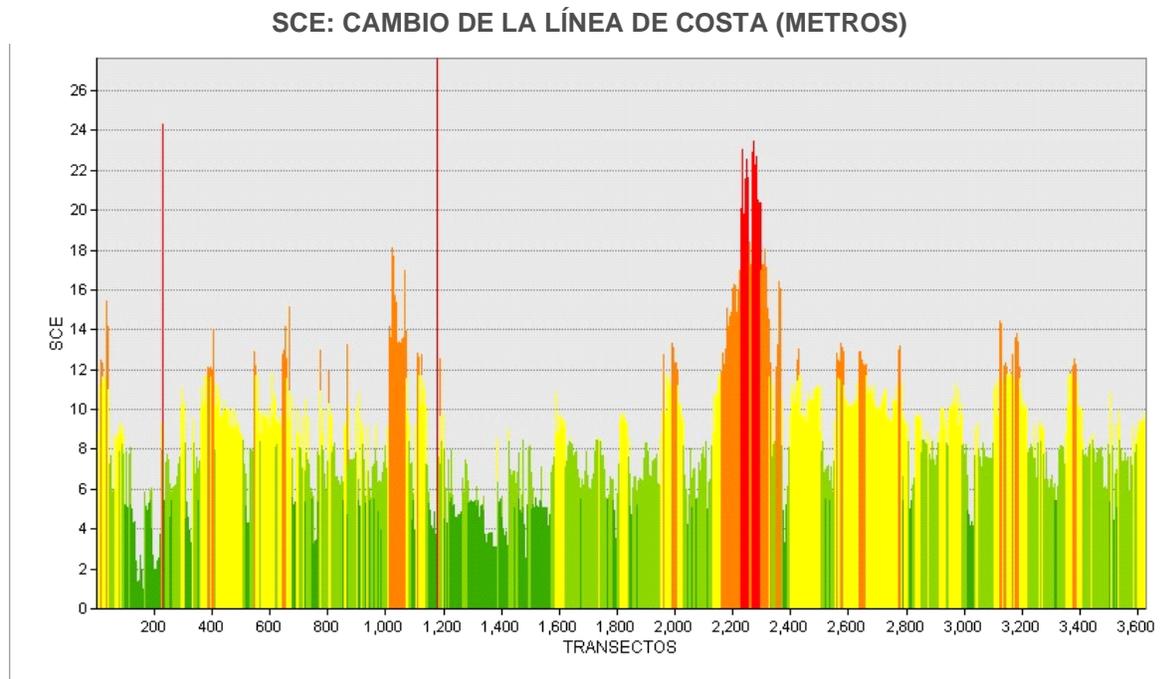


Figura 17. SCE definido como el cambio de línea costera considerando todos los tiempos de estudio del área de estudio del Norte de la Península Yucatán. Valores de SCE (se encuentran en metros) en colores verdes indican una distancia menor a 8 metros, color amarillo de 8-12 m, naranja de 12-18 m y roja valores mayores a 18 m. En general en la línea de costa predominaron los valores menores de 12 m (colores amarillo y verde).

Por su parte, en la Figura 18 se puede observar un área de la línea de costa que tuvo valores más altos del SCE -transectos color rojo y naranja en la Figura 17-. En el NSM se obtuvieron valores negativos y positivos para el área mostrada puesto que en algunas partes de gana playa y en otras se perdió. De esta forma, los valores en el SCE y el NSM de esta zona se relacionan a la implementación del rompeolas, con partes favorecidas y otras afectadas, esta locación y sus aledañas fueron las que obtuvieron los valores más altos o bajos de cambio.



Figura 18. Imagen a color del monitoreo del 12/2017 de la zona principal de influencia del rompeolas de San Miguel, señalando la línea de costa para los tres periodos (rojo - 12/2016, verde - 07/2017 y amarillo - 12/2017) utilizados para determinar el cambio de la línea de costa.

Por último, se realizó un diagrama de cajas de los valores de SCE para cada una de los tipos de construcciones: casa, calle y terreno (Figura 19). En general se puede observar que los valores de SCE son similares entre los tipos de construcciones y en particular para las casas se observan valores extremos de SCE.

Cambio de línea de costa por tipo de construcción

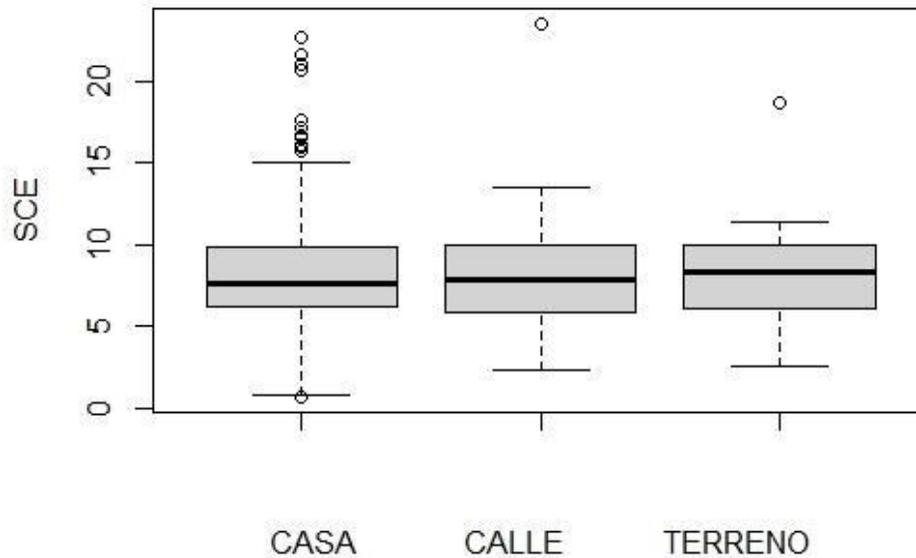


Figura 19. Gráficas de caja del SCE sobre el cambio de la línea de costa en relación con los diferentes tipos de construcciones. Las construcciones del tipo casa tuvieron valores menores a 15 y varios datos extremos. Las calles presentaron valores menores de 13 con únicamente un valor extremo y, por último, las construcciones de terreno tuvieron valores menores a 11 y un dato extremo. La línea horizontal representa la mediana, el tamaño de la caja el primer y tercer cuartil y los bigotes la variabilidad fuera de los cuartiles superior e inferior.

7.5 PRESENCIA DE VEGETACIÓN

Comparando el primer monitoreo de diciembre del 2016 y el último realizado en diciembre del 2017, se observó una pérdida de vegetación, principalmente relacionado con modificaciones por el tipo de construcción, pues las que cuentan con vegetación presente en su frente de playa para el área de estudio disminuyeron un 6.10% del primer monitoreo en diciembre del 2016 al último en diciembre de 2017, aumentando así la cantidad de construcciones sin vegetación (Figura 20).

En su mayoría, los cambios fueron en relación con los tipos de construcciones. Por ejemplo, terrenos que pasaron a la categoría de calles por pérdidas de vegetación principalmente por el constante paso de vehículos donde la vegetación no estaba

limitada con bardas para impedir el paso o en terrenos en donde se realizó desmonte de duna para futuros cimientos o remodelaciones.

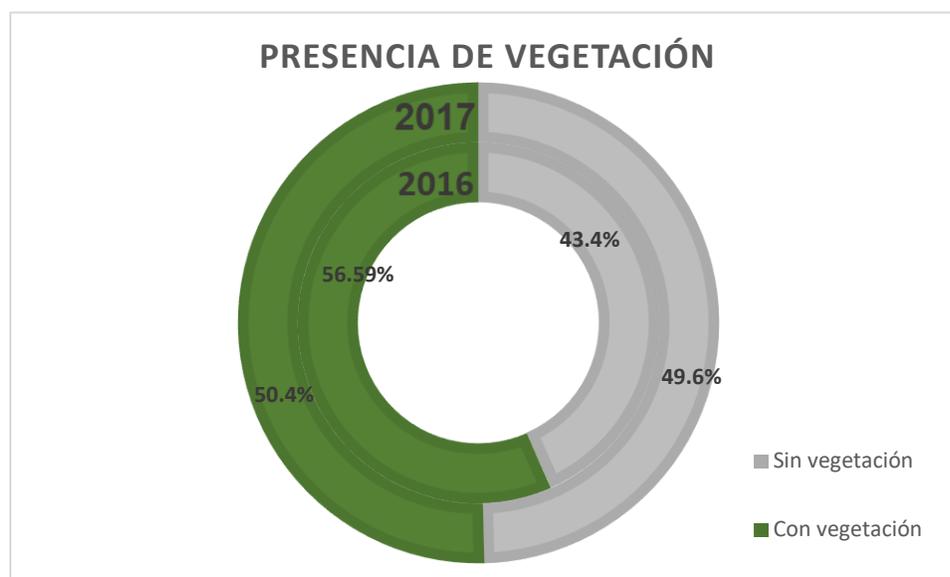


Figura 20. Porcentaje de polígonos (construcciones) con presencia de vegetación en el área de estudio.

Después de observar las imágenes obtenidas, se concluye que los 475 polígonos totales registrados en el área de estudio, únicamente 215 presentaron vegetación en su frente de playa. En aquellas construcciones donde se observó vegetación, se calculó el GNDVI o *Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada Verde* de la duna presente en su frente de playa, mientras que el resto de los polígonos o construcciones que no contaban con las características suficientes para ser considerados con presencia de vegetación de duna fueron tomados como ausencia de vegetación y en el índice de vulnerabilidad fueron considerados con un valor de 0.

7.6 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD

El análisis realizado a través del cálculo de un índice de vulnerabilidad permitió identificar tres diferentes grupos de vulnerabilidad (Figura 21): baja (verde: valores de vulnerabilidad menores de 40), mediana (naranja: valores de vulnerabilidad entre

40-75) y alta (rojo: valores de vulnerabilidad entre 70-100). El 30.3% de las construcciones presentaron un índice de vulnerabilidad bajo, el 49.1% presentaron un índice de vulnerabilidad mediano y, por último, solo el 20.4% de las propiedades presentaron un índice alto.

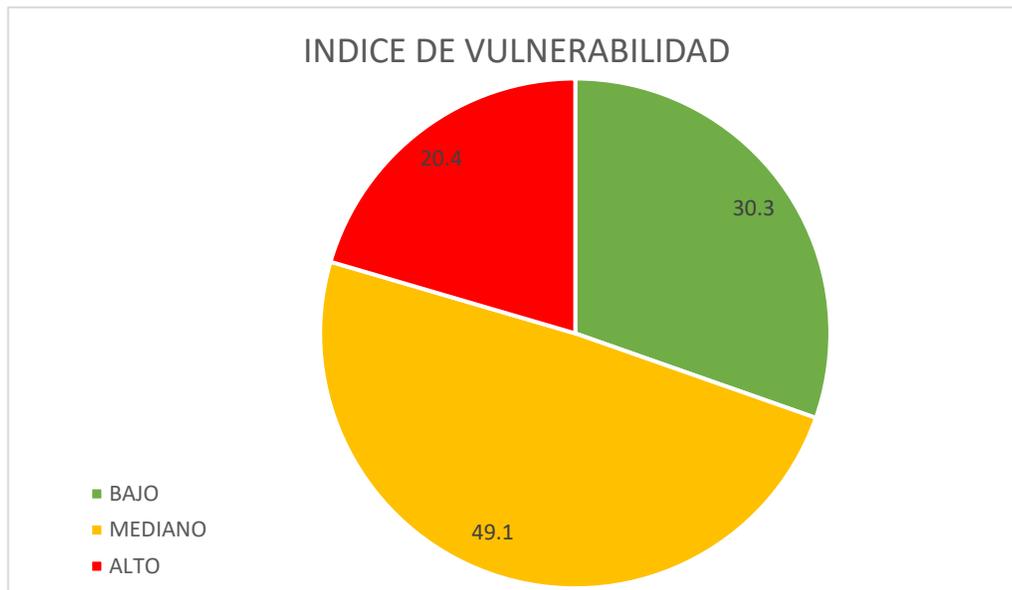


Figura 21. Grafica de pastel de las diferentes categorías de vulnerabilidad que se identificaron en el área de estudio.

De esta forma, en la Figura 22 se pueden observar los polígonos obtenidos para cada una de las construcciones, terrenos y calles con el color del valor del índice de vulnerabilidad estimado. Los valores de vulnerabilidad más altos se observan en mayor proporción al centro de la zona de estudio (Figura 23 B), y los valores de vulnerabilidad baja principalmente se encuentran en el centro y este de la zona de estudio (Figura 23 B y C).

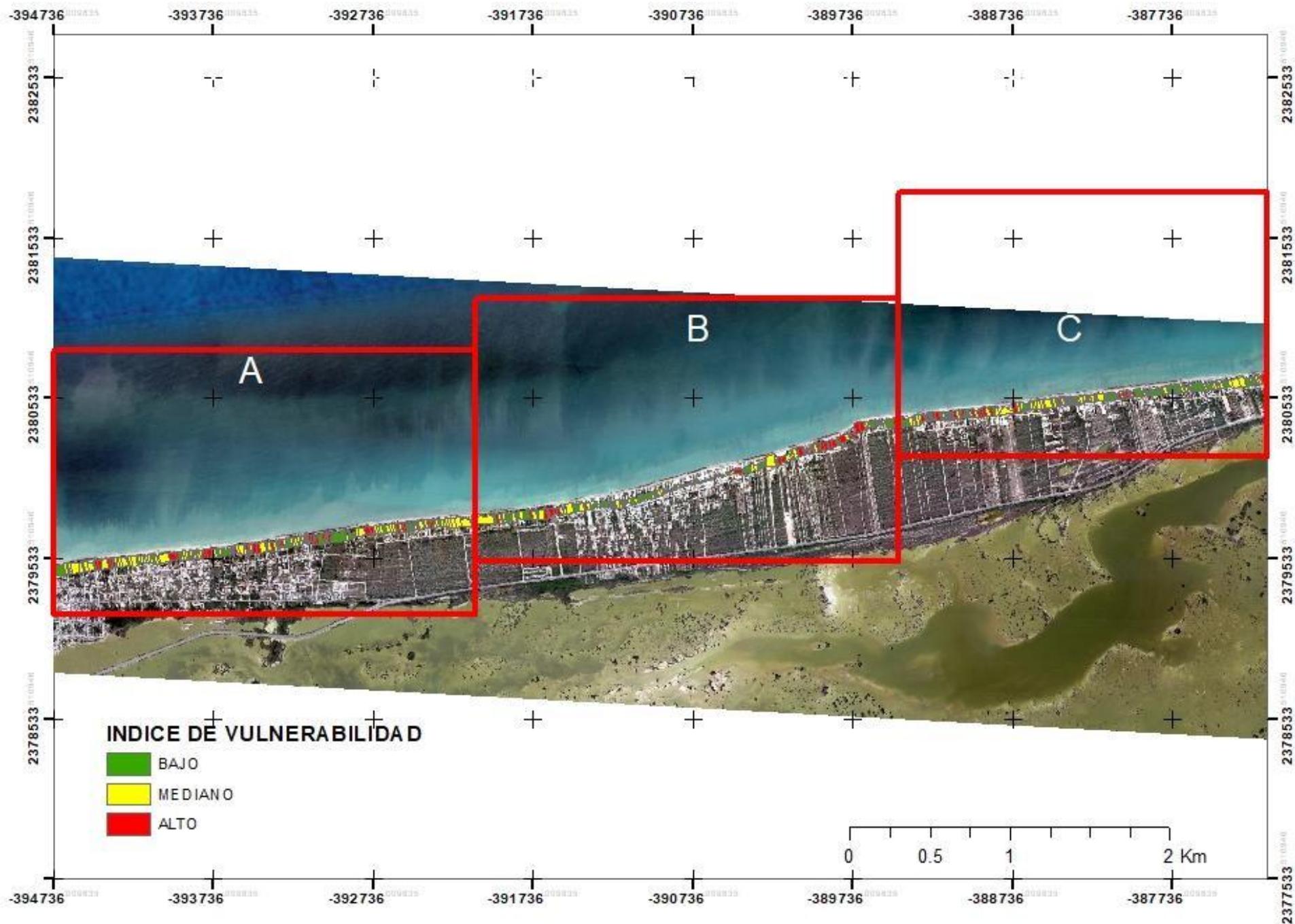


Figura 22. Índice de vulnerabilidad de la línea de costa de Progreso, Yucatán. El índice de vulnerabilidad se clasificó en alta, mediana y baja vulnerabilidad, estimado con las características de tipo de construcción, cambio de la línea de costa, estructuras de protección costera y vegetación. Los rectángulos color rojo y letras indican la zona considerada en la figura 23 (A, B y C)

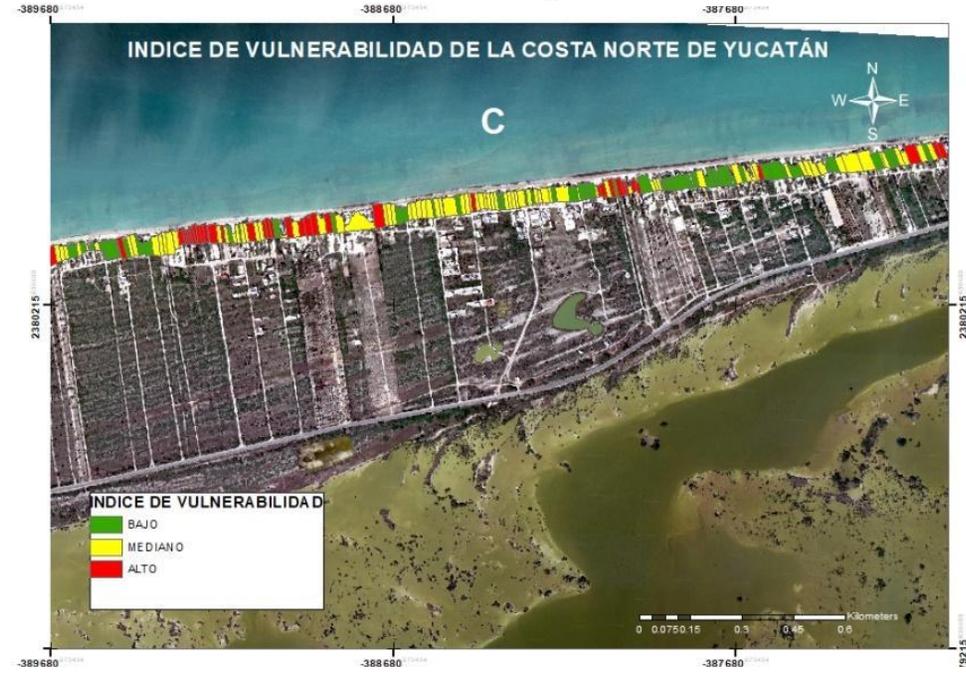
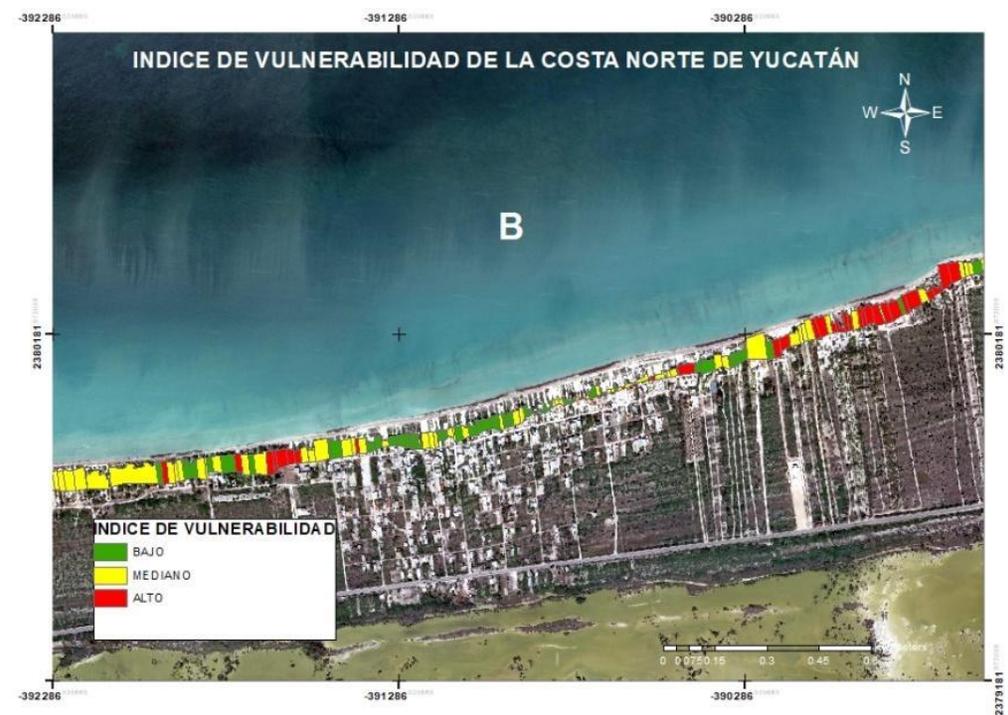
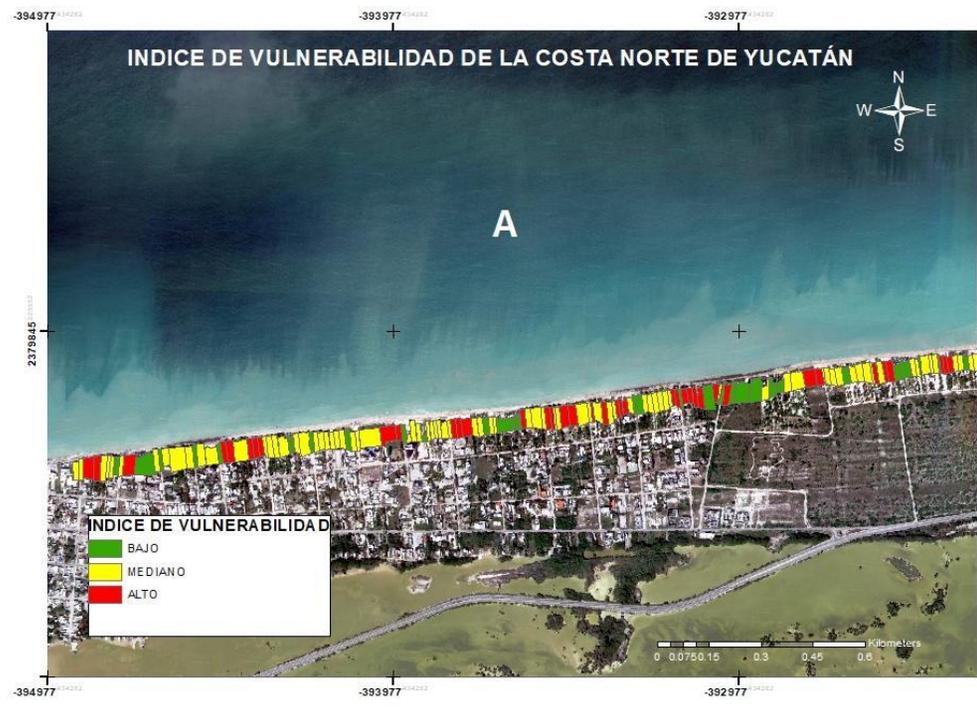


Figura 23. Índice de vulnerabilidad de la línea de costa de Progreso, Yucatán. El índice de vulnerabilidad se clasificó en alta, mediana y baja vulnerabilidad, estimado con las características de tipo de construcción, cambio de la línea de costa, estructuras de protección costera y vegetación. Se encuentran separados por secciones: A zona oeste, B zona centro y C zona este del área de estudio.

En cuanto al tipo de construcción, se puede observar que los terrenos mostraron valores de índice de vulnerabilidad menores a 40, mientras que las casas presentaron los índices de vulnerabilidad más altos y dos valores extremos. Por último, las calles mostraron valores intermedios y predominaron valores menores de 60 (Figura 24).

Por lo anterior, las casas fueron las construcciones que presentaron índices de vulnerabilidad más altos con una variabilidad mayor a los otros dos tipos de construcciones.

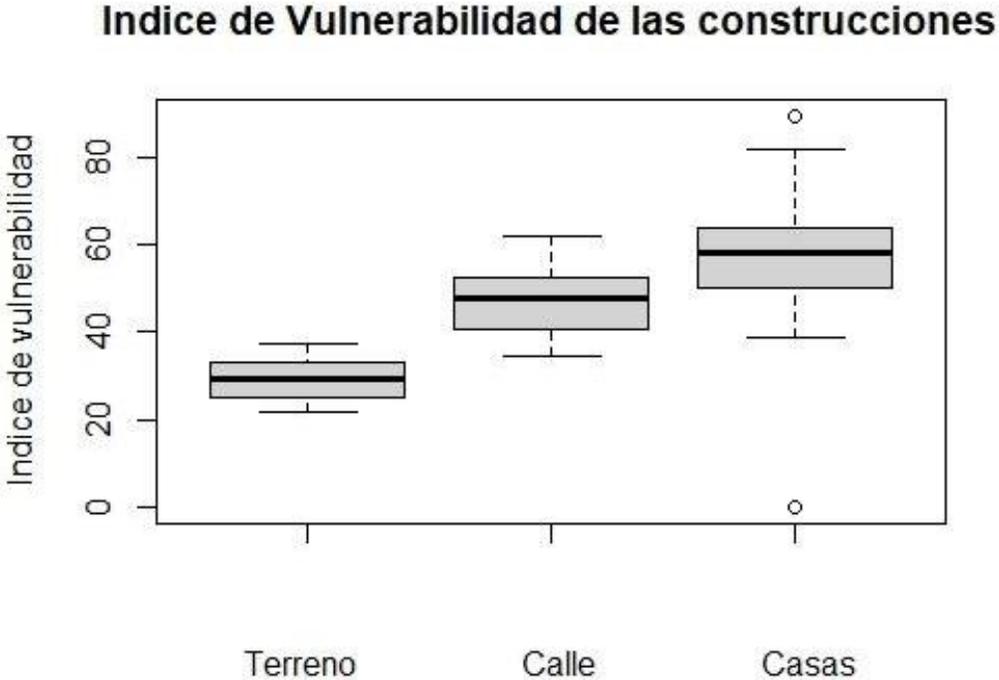


Figura 24. Grafica de cajas con bigotes del índice de vulnerabilidad que presentaron cada uno de los polígonos (construcciones): terreno, calle y casa, dentro del área de estudio. La línea horizontal representa la mediana, el tamaño de la caja el primer y tercer cuartil; y los bigotes la variabilidad fuera de los cuartiles superior e inferior.

7.7 ANÁLISIS DEL MODELO DE VULNERABILIDAD

Se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP), de las variables utilizadas en el modelo del índice de vulnerabilidad (Figura 25). El ACP muestra que las variables como estructuras de protección costera y con efecto sombra se asocian al componente 1, mientras que las variables de tipo construcción, cambio en la línea de costa y vegetación se asocian en el componente 2.

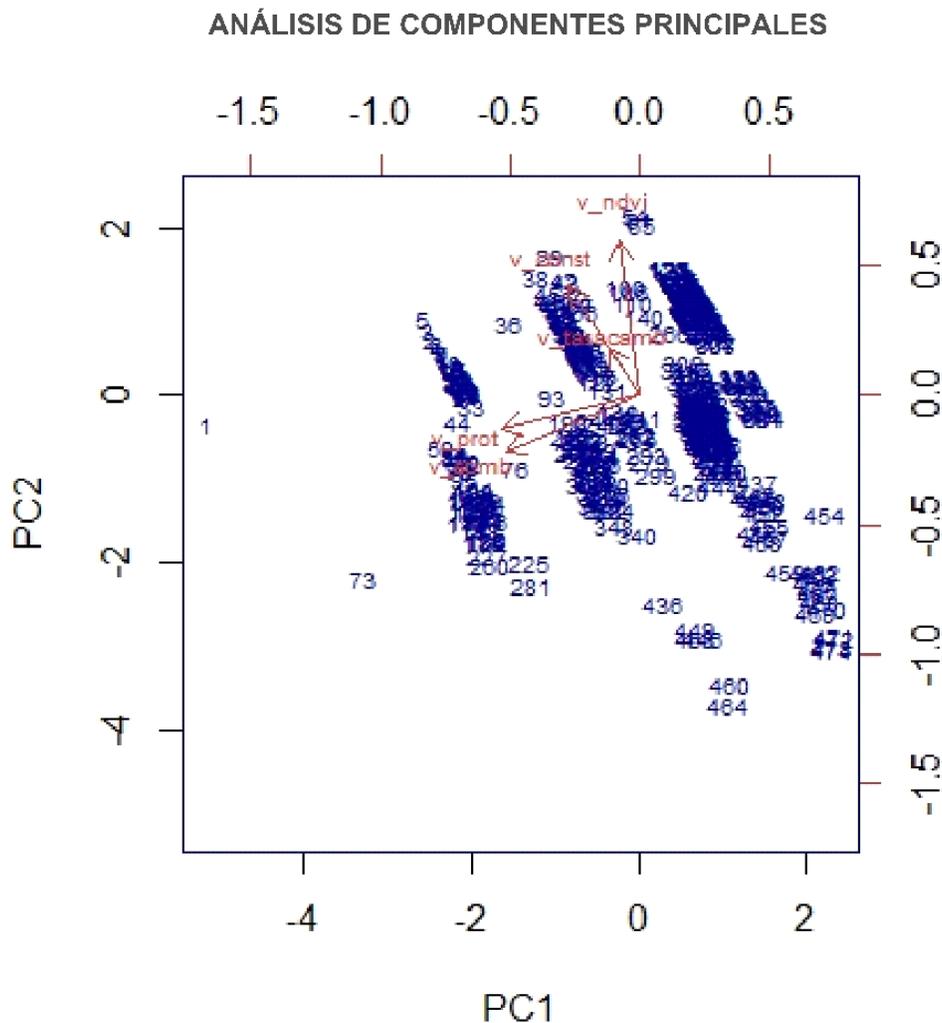


Figura 25. Análisis de componentes principales (ACP) y las variables utilizadas para calcular el modelo de vulnerabilidad de la península de Yucatán: tipo de construcción (*v_const*), cambio de la línea de costa (*v_camb*), estructuras de protección costera (*v_prot*), estructura de protección costera con efecto sombra (*v_somb*), vegetación (*v_veg*) e índice de vulnerabilidad (*index*).

En resumen, el ACP (tabla 4) muestra que en los componentes principales los dos primeros explican el 50% de los cambios en los datos. El 80% de los cambios se explican hasta el cuarto componente (87.22% de la varianza explicada).

Tabla 5. Resumen del análisis de componentes principales (ACP). Realizada con el programa RStudio para las variables del modelo multicriterio de vulnerabilidad para la península de Yucatán.

<i>COMPONENTES</i>	<i>PC1</i>	<i>PC2</i>	<i>PC3</i>	<i>PC4</i>	<i>PC5</i>
<i>Desviación estándar</i>	1.183	1.0669	1.0068	0.8992	0.7994
<i>Proporción de variación</i>	0.280	0.2277	0.2028	0.1617	0.1278
<i>Proporción Acumulativa</i>	0.280	0.5077	0.7105	0.8722	1.000

Con lo anterior, podemos asumir la necesidad de tener un modelo de vulnerabilidad costera que incluya distintas variables para su cálculo. En el obtenido en este trabajo, se utilizaron tanto variables de infraestructura, cambio a lo largo del tiempo y de condición de la vegetación.

7.8 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE LOS GRUPOS DE VULNERABILIDAD

En la Figura 26 se observa que el grupo de vulnerabilidad alta presentó valores de SCE más altos a los demás grupos, así mismo presentó valores extremos mayores de 25. El grupo de vulnerabilidad mediana y baja presentaron valores de SCE similares, siendo más estrecho el rango de datos de la vulnerabilidad baja.

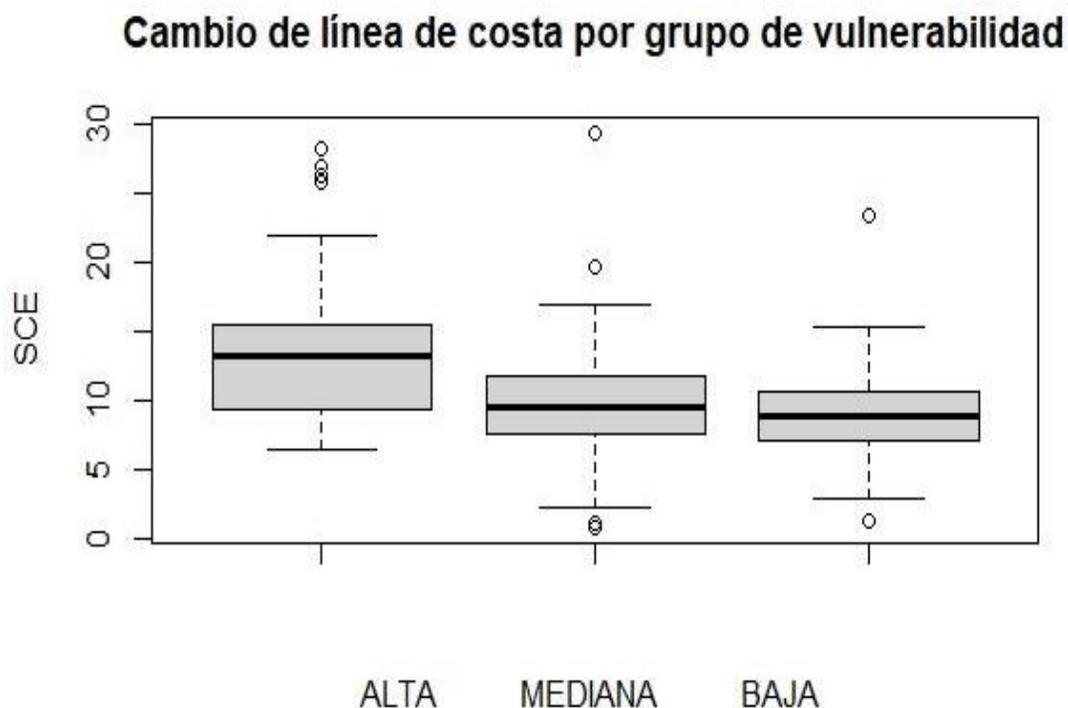


Figura 26. Diagrama de cajas con bigotes de los valores SCE por cada grupo de vulnerabilidad identificado. La línea horizontal representa la mediana, el tamaño de la caja el primer y tercer cuartil y los bigotes los valores mínimos y máximos.

Dado que para la característica de vegetación (Figura 27) se tomó en cuenta principalmente la presencia/ausencia de vegetación de duna y únicamente el índice de GNDVI si la construcción contaba con presencia de vegetación. Cabe aclarar que, los valores mostrados en la figura 27, es el resultado de la fórmula para dicha característica (Tabla 3), no el índice de vegetación (GNDVI).

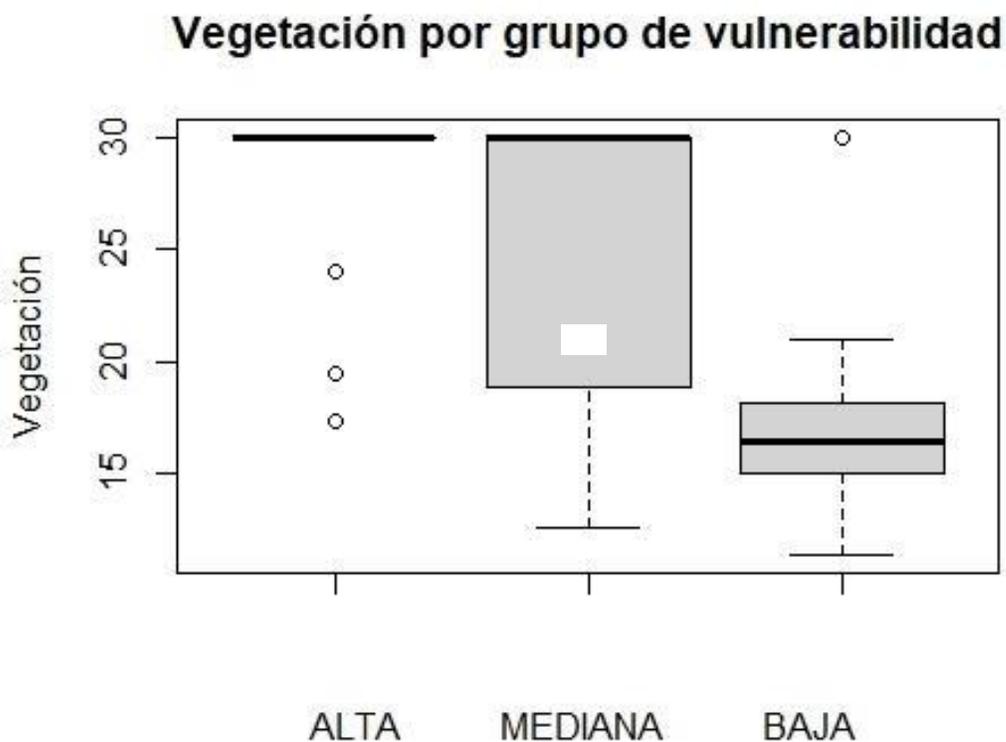


Figura 27. Graficas de caja de la vegetación incluyendo el valor del NDVI¹⁵ para cada grupo de vulnerabilidad: alta, mediana y baja. El grupo de vulnerabilidad baja presentó valores menores a los grupos alta y mediana. El grupo de vulnerabilidad mediana presentó más variación en sus datos a comparación del grupo alta. La línea horizontal representa la mediana, el tamaño de la caja el primer y tercer cuartil. Los bigotes los valores mínimos y máximos.

¹⁵ El valor graficado corresponde a la característica de vegetación para el índice de vulnerabilidad, tomando en cuenta la fórmula: $30 - (\text{GNDVI} * 25)$. Revisar la tabla 3 para la fórmula de esta característica, puesto que entre mayor sea el valor de la vegetación será mayor la vulnerabilidad.

Para la característica de construcciones (Figura 28) el grupo de vulnerabilidad alta y mediana presentan únicamente construcciones del tipo casa, mientras que el grupo de vulnerabilidad mediana presenta una calle, mostrándose como valor extremo. El único grupo que presentó construcciones de los tres tipos fue la vulnerabilidad baja, sin embargo, también fueron más comunes las construcciones del tipo casa.

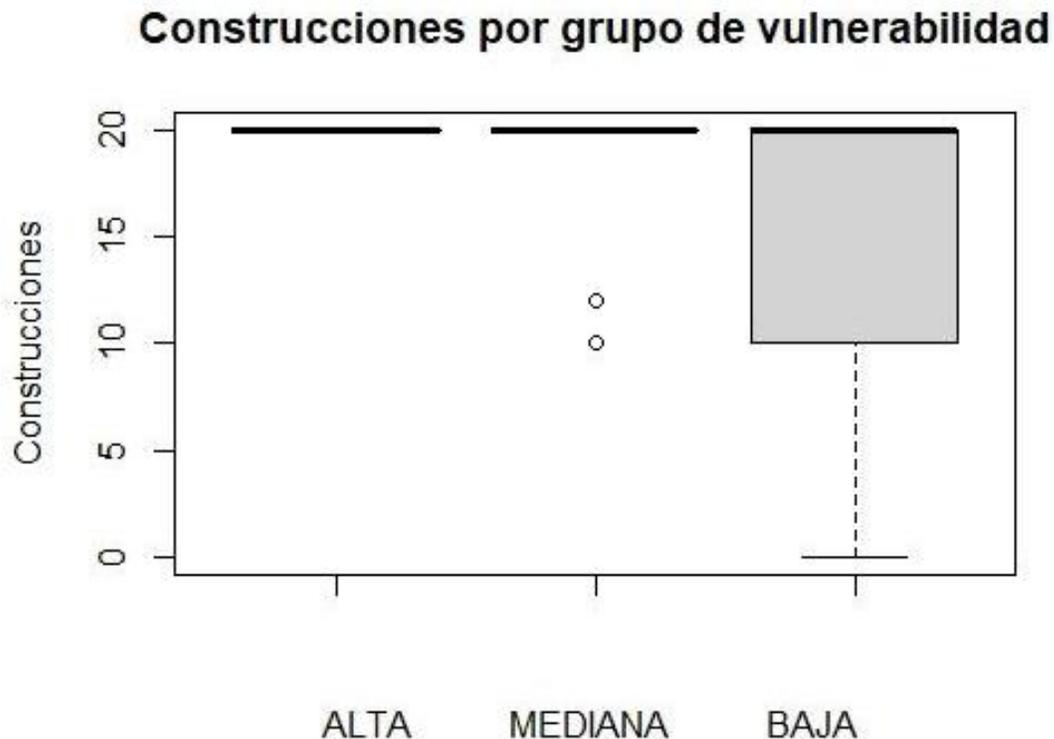


Figura 28. Número Construcciones por cada uno de los diferentes grupos de vulnerabilidad que se presentaron en el área de estudio. Los grupos de vulnerabilidad alta y mediana se presentan en la gráfica como líneas, únicamente el grupo de *mediana* presenta dos valores extremos. La línea horizontal representa la mediana, el tamaño de la caja el primer y tercer cuartil y los bigotes los valores mínimos y máximos.

Para la característica de protección costera (Figura 29), el grupo de vulnerabilidad baja no presentó estructuras de protección en su frente de playa (con dos valores extremos), mientras que el grupo de vulnerabilidad mediana contó con estructuras de protección (un valor extremo). Por último, el grupo de vulnerabilidad alta presentó en su mayoría espigones en sus construcciones, también presentaron estructuras

como recubrimientos y rompeolas, que en este caso fueron más recurrentes que en los otros dos grupos.

Estructuras de protección por grupo de vulnerabilidad

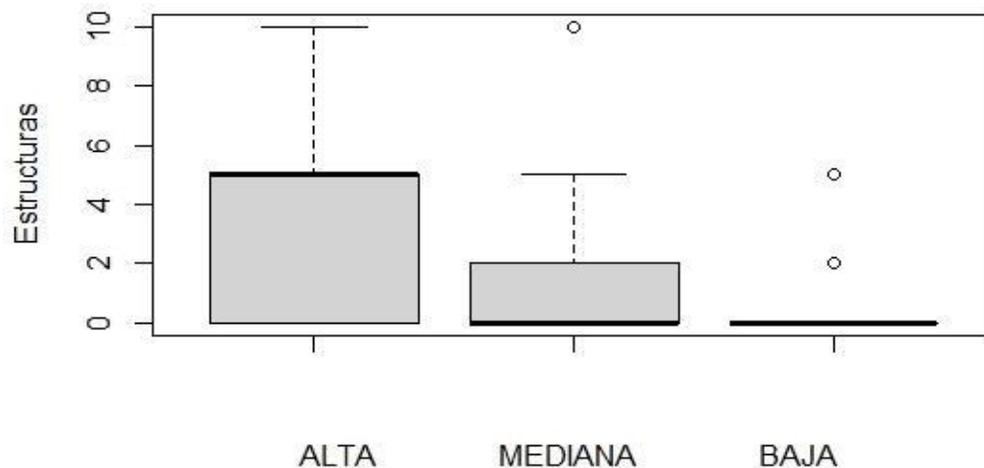


Figura 29. Número de estructuras de protección costera por los diferentes grupos de vulnerabilidad que se presentaron en el área de estudio. La línea horizontal representa la mediana, el tamaño de la caja el primer y tercer cuartil y los bigotes los valores mínimos y máximos.

Estructuras con efecto sombra por grupo de vulnerabilidad

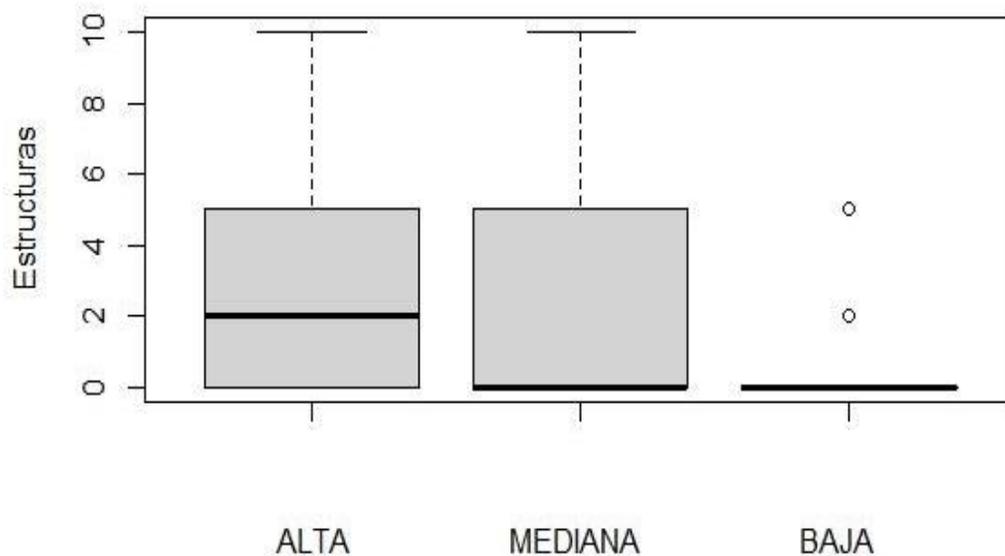


Figura 30. Número de estructuras con efectos sombra por los diferentes grupos de vulnerabilidad. La línea horizontal representa la mediana, el tamaño de la caja el primer y tercer cuartil y los bigotes los valores mínimos y máximos.

En cuanto a la estructuras con efecto de sombra (Figura 30), el grupo de vulnerabilidad baja no presentó estructuras con efecto sombra más que en dos construcciones (datos extremos). En el grupo de vulnerabilidad mediana estuvieron presentes los tres diferentes tipos de estructuras, y, por último, el grupo de vulnerabilidad alta tuvo presencia de los tres tipos de estructuras.

Comparando las dos últimas características -estructuras de protección y con efecto sombra- para cada uno de los grupos, la vulnerabilidad baja presentó pocas estructuras de protección y con efecto sombra en su frente de playa, así mismo el grupo de vulnerabilidad mediana presentó más construcciones con presencia de estructuras con efecto sombra, siendo más frecuentes las estructuras de recubrimiento, espigones y rompeolas.

En otro orden, el grupo de vulnerabilidad alta presentó una gráfica similar entre las características de estructuras de protección y con efecto sombra, con la diferencia de que la mediana se encuentra más baja en las estructuras con efecto sombra, por lo que fueron más comunes las estructuras con efecto sombra (por ejemplo, los recubrimientos) en el grupo de vulnerabilidad alta.

CAPITULO 8:

DISCUSIÓN

En cuanto al índice de vulnerabilidad se analizaron las características primordiales de un sistema costero para resistir daños o alteraciones naturales y antropogénicas (Calderón, *et al.*, 2017; Rygel, *et al.*, 2006 y Contestabile-Vicinanza, 2020), tomando en cuenta los diferentes conceptos, sugerencias y recomendaciones.

Así mismo, diferentes autores mencionan la complejidad en la elección de las variables que integran el índice de vulnerabilidad (Ibarra, *et al.*, 2020; Zetina, 2009; Ospina, 2012, Mendoza, *et al.*, 2013), resaltando que deben ser elegidas en base a los objetivos de la investigación y a los factores que contribuyen a los cambios costeros.

Por otro lado, las características que no fueron consideradas en el estudio fueron: socioeconómicas, la geomorfología de la costa, frecuencia en eventos (extremos como huracanes y tormentas) y tiempo de recuperación. Estas variables no fueron consideradas debido a la temporalidad de la toma de datos para el estudio, puesto a que en esa temporada no existieron eventos de huracanes o tormentas de gran tamaño, además autores como Frausto (2014) mencionan que el peligro de un huracán es de baja frecuencia en esta área.

En conclusión, podemos decir que las estructuras de protección costera del tipo *espigones* no hubo un incremento considerable, la diferencia del primer tiempo (diciembre 2016) y el último (diciembre 2017) fue de menos de 20 espigones, sin embargo, para julio del 2017 el incremento en la cantidad fue del doble llegando a contabilizar 217 estructuras. Lo anterior fue consecuencia de la variación de las diferentes temporadas ya que algunas estructuras fueron cubiertas por sedimento y/o algas en los diferentes tiempos de estudio, haciéndolas no visibles en las imágenes (Figura 31).

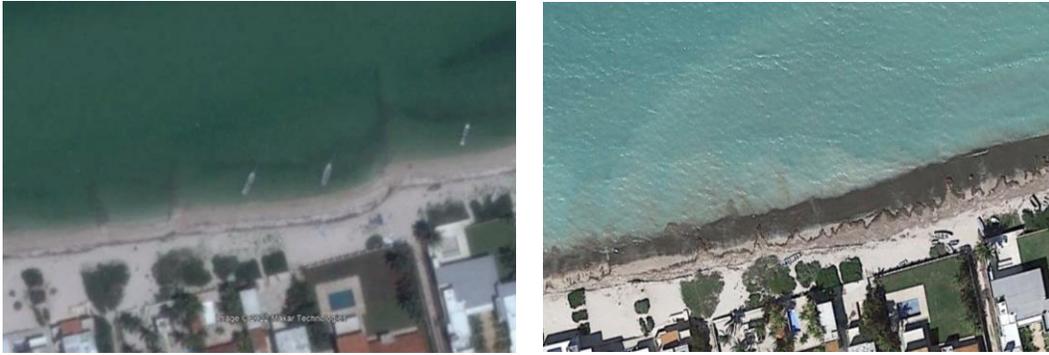


Figura 31. Imagen satelital de una parte de la costa del área de interés en diferentes temporadas del año 2016 con y sin la visibilidad para determinar las estructuras de protección.

También, en relación a los espigones es importante mencionar que diversos estudios como el Martínez & Arévalo (2021) mencionan la efectividad de estas estructuras para mitigar la pérdida de sedimento, sin embargo, se menciona además que estas estructuras si no son correctamente instaladas, sin previa investigación y sin monitoreo causan el efecto contrario en las zonas donde no se colocaron y agravando los problemas de erosión.

Por otro lado, para la estructura del rompeolas se observaron modificaciones considerables en la línea de costa, en este caso se observaron afectaciones e incrementos en los alrededores del área de la implementación de la estructura.

Estudios como el de Gonzáles (2013) mencionan que para la implementación de las estructuras de protección en alguna playa deben de ser analizadas y estudiadas en diferentes simulaciones físicas y numéricas que permitan dimensionar su eficacia ante los problemas de mitigación, además menciona que

Del mismo modo, la característica de vegetación presento problemas en la visualización de las imágenes, puesto que para determinar si la vegetación era de duna o exótica, por lo que para corroborar la clasificando es necesario confirmar los datos en campo con sitios de entrenamiento para determinar especie, problema que se debe de tomar en cuenta si se quiere trabajar nuevamente con el índice y utilizar esta característica.

Las características de estructuras de protección costera, efecto sombra de las estructuras, tipo de construcciones presentes, cambios en la línea de costa y vegetación costera explican cerca del 50% de la variabilidad observada en los datos, por lo que estas características son las más importantes para considerar en un índice de vulnerabilidad en una costa. El índice de vulnerabilidad considerado lo recomendado por Rygel *et al* (2006) para la creación de índices, analizando las variables en singular para no disminuir la importancia de los valores y considerando en el diseño del índice la dinámica de la zona costera y no únicamente el criterio del investigador.

Distintos estudios han abordado el tema de vulnerabilidad desde distintas perspectivas en el área de interés, uno de ellos el índice creado por Cuevas-Jiménez (2016) cuyos resultados coinciden con los resultados obtenidos para el índice de vulnerabilidad de este trabajo. Así mismo, la zona fue caracterizada con un ancho de playa menor a 10 metros, modificaciones por el desarrollo urbano, deforestación del área de duna, siendo las zonas con un índice de vulnerabilidad menor en las que existe una presión antropogénica baja y la vegetación de duna no tiene grandes perturbaciones (Figura 32).

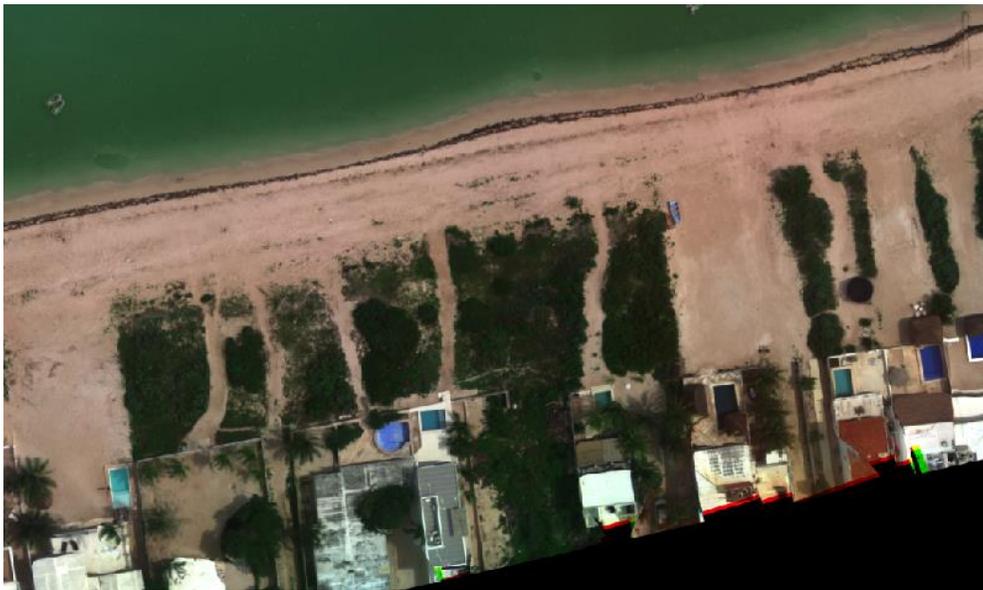


Figura 32. Imagen aérea de algunas casas que presentan menor presión antropogénica: con presencia de vegetación de duna y ausencia de estructuras de protección.

Otros autores como Torres-Freyermuth *et al* (2021) realizaron un índice de resiliencia costera (CRI) en la costa de noroeste de Yucatán, definiendo *resiliencia* como la capacidad de un sistema de absorber, recuperar y adaptarse a algún evento adverso. Los resultados obtenidos en el CRI, concuerdan con los obtenidos por nuestro índice de vulnerabilidad, siendo los lugares con menor resiliencia (es decir, mayor vulnerabilidad) los que presentaron un alto impacto antropogénico (Figura 33), áreas con vegetación de duna degradada o cercanas a estructuras costeras.



Figura 33. Imagen aérea de algunas casas que presentan mayor presión antropogénica: con ausencia de vegetación de duna y presencia de varias estructuras de protección.

Torres-Freyermuth *et al* (2021) mencionan que el CRI resalta por el enfoque integrado debido a que fue realizado para un ecosistema dinámico, teniendo una resolución espacial y temporal de los datos adecuada, enfoque que tomamos en cuenta para la realización de nuestro índice de vulnerabilidad y que en futuros trabajos relacionados a este tema debería de ser considerados. Sumado a esto, debido al tiempo en el que se realizó la investigación no se pudieron considerar aspectos socioeconómicos, sin embargo, si se quisiera realizar nuevamente se debería tomar como parte fundamental este aspecto.

Otro estudio elaborado cerca del área de interés, fue el realizado por Rey *et al* (2020) en donde evaluando diferentes indicadores socioeconómicos y bienes del hogar realizó un modelo de inundaciones ante un evento de huracán, con una inundación del 25% de las cuadras de la ciudad de Progreso puede llegar a costar miles de dólares. Esto es de suma importancia dado que el área de estudio es parte de la ciudad de Progreso haciendo importante el incluir este tipo de información en el análisis de vulnerabilidad.

En general, se observó que en la zona de estudio predominó un índice de vulnerabilidad media y baja, el índice de vulnerabilidad media tuvo mayor presencia (49%), seguido por el bajo (30.38%) y, por último, el alto (20.49%).

De las 475 construcciones que se encuentran en el área de estudio solo el 30.31% presentaron las características físicas, de infraestructura y vegetación para ser considerada un frente de playa estable y resistente para cumplir con el servicio ambiental de protección a las construcciones aledañas antes eventos de tormenta.

CAPITULO 9:

CONCLUSIÓN

La investigación muestra el panorama de las características físicas, infraestructura y vegetación de la línea de costa de Progreso en el periodo de 2016-2017, mostrando el desarrollo urbano en este periodo y el efecto de las estructuras de protección costera en la línea de costa que se implementaron y/o removieron durante el tiempo de estudio.

Este análisis permitió identificar las zonas en la línea de costa con cambios drásticos en su ancho de playa, zonas con mayor densidad de estructuras costeras, áreas sin presencia de duna, la urbanización de la costa, entre otros elementos. El 30.38% de las construcciones presentaron un índice de vulnerabilidad bajo, el 49.16% presentaron un índice de vulnerabilidad mediano y, por último, solo el 20.49% de las propiedades presentaron un índice alto. El porcentaje de construcciones con vulnerabilidad mediana y baja se relaciona principalmente con poca o mediana presencia de estructuras protección, mayor presencia de vegetación de duna y menores cambios en la línea de costa. Mientras que el porcentaje de vulnerabilidad alta está relacionado con la presencia de estructuras de protección, ausencia de vegetación de duna y cambios drásticos en la línea de costa.

De manera que, el ecosistema en el periodo del estudio no sufrió cambios a gran escala (exceptuando el área del rompeolas) considerando entonces que el ecosistema no se degrado considerablemente en el tiempo de duración del estudio, puesto que muchas características de la costa fueron similares a los primeros datos y no fueron tan comunes las construcciones en la categoría de vulnerabilidad alta.

En conclusión, el índice de vulnerabilidad demuestra que la costa de Progreso se encuentra medianamente vulnerable, son pocas las zonas vulnerables, sin embargo, entre mayor sean las modificaciones a la dinámica costera, es decir afectaciones en el flujo de sedimentos, desmonte de vegetación de duna, alteraciones con infraestructura mayor será la vulnerabilidad de la costa.

Para ser más específicos, la línea de costa de Progreso se ve modificada ante cualquier construcción de una estructura de protección, incrementando los problemas de erosión por consecuencia del efecto sombra de estas estructuras, ocasionando que construcciones aledañas al mar sufran daños por la erosión, y tomando como medida de mitigación estructuras como espigones, recubrimientos, rompeolas, etc.

De acuerdo con los resultados y a la bibliografía consultada, los aspectos esenciales para la realización de un índice de vulnerabilidad costera son los siguientes puntos:

1. Definir el concepto de “vulnerabilidad”, los riesgos que podrían presentarse en la zona y determinar variables.
2. Delimitar el área, lugar o individuos (región, ecosistema, pueblo, ciudad, estructura, grupo de personas, etc.) considerados para determinar su vulnerabilidad.
3. Considerar aspectos socioeconómicos dentro de las variables del índice de vulnerabilidad y así hacerlo integral para el ecosistema.
4. Para las herramientas SIG´s se debe definir la resolución espacial en base las variables utilizadas en el índice de vulnerabilidad.
5. Temporalidad de los datos contemplando un el mayor número de monitoreos posibles para dar un resultado más cercano a la realidad de la vulnerabilidad de la línea de costa.
6. El índice de vulnerabilidad creado para determinada área, ciudad, región, estado, etc., solo es de utilidad para el lugar para el que se realizó, dado que los aspectos y características son diferentes para cada ecosistema, ciudad, lugar o personas.

Los resultados obtenidos en esta investigación para el área de Progreso pueden servir en el diseño de un plan de manejo costero, programas de restauración, implementación de estructuras de protección costeras o estructuras portuarias, programas de protección civil en caso de desastres naturales, indicadores de áreas con especial atención por problemas de erosión, entre otros.

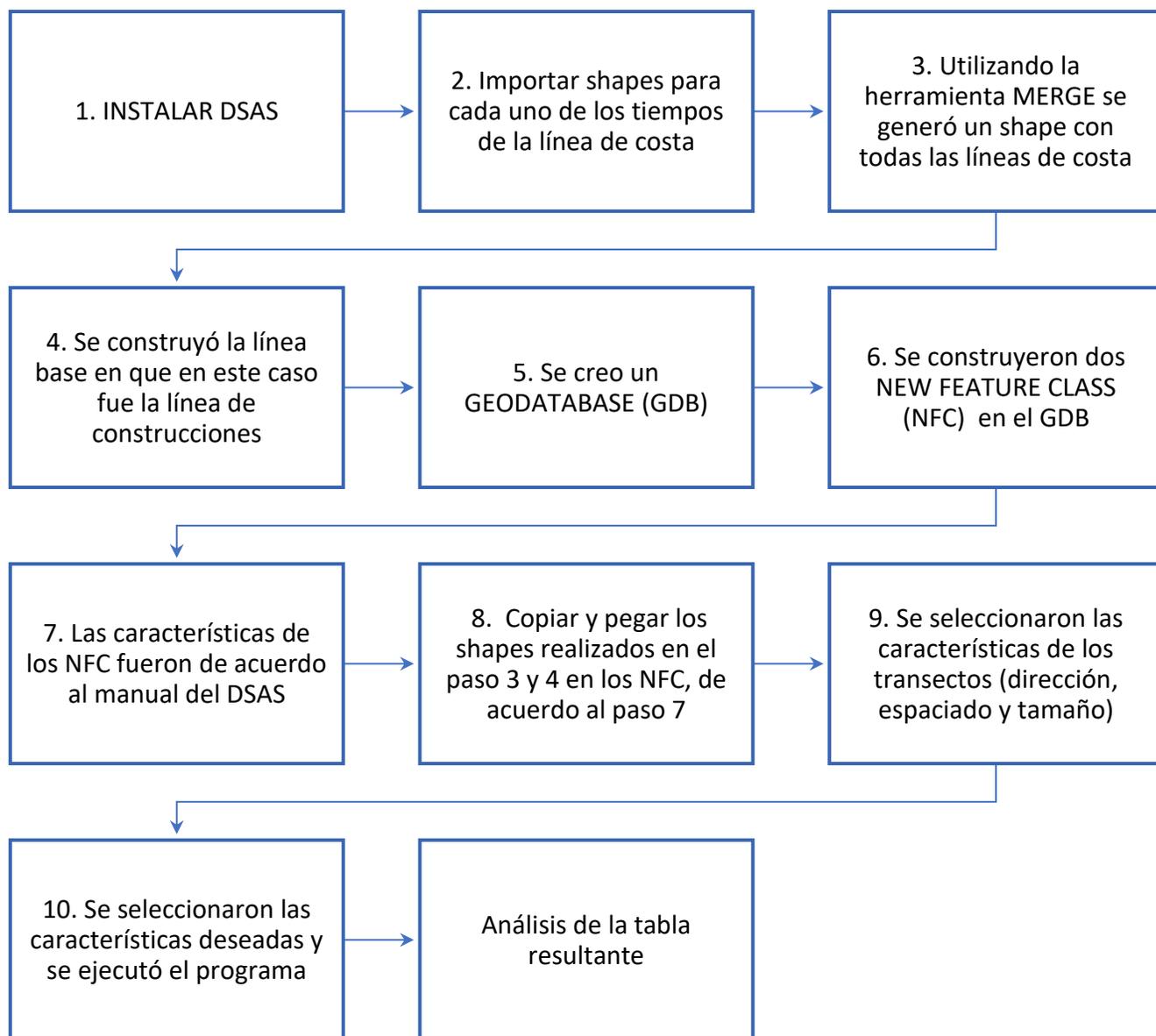
ANEXO 1.

Tabla 6. Registro de vuelos con el nivel de marea.

ID	Fecha (d/m/a)	Hora aprox.	Nivel de marea (cm)
1	16/12/2016	10:30	0
3	26/07/2017	10:15	0
2	11/12/2017	10:10	20

ANEXO 2.

FIGURA 34. Diagrama de la metodología utilizada para el sistema digital de análisis de costas (DSAS).



REFERENCIAS

1. Ahmed, A.; Woulds, C.; Drake, F. y Nawaz, R. (2018). Beyond the tradition: Using Fuzzy Cognitive Maps to elicit expert views on coastal susceptibility to erosion in Bangladesh. *ELSEVIER*, 36-50.
2. Allaire, J. (2020, 09 10). *RStudio*. Retrieved from RStudio: <https://rstudio.com/>
3. Appendini, C.M., P. Salles, E.T. Mendoza, J. López y A. Torres-Freyermuth. (2012). Longshore sediment transport on the Northern coast of the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 1404-1417.
4. ArcGIS. (2005, s.f.). *User Guide & Tutorial for the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.2*. Retrieved from User Guide & Tutorial for the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 3.2: https://woodshole.er.usgs.gov/project-pages/DSAS/version3/images/pdf/DSASv3_2.pdf
5. Aubrey, D. G. (1979). Seasonal patterns of onshore/offshore sediment movement. *J. Geophys. Res.* 84 6347-6354.
6. Barragán-Muñoz, J. (1996). Planificación y gestión en las regiones litorales latinoamericanas. *Revista de Estudios Regionales*, 111-127.
7. Begoña-Álvarez, F. (1999). La demanda de servicios ambientales. El método del costo de viaje en la estimación de la demanda recreativa de espacios naturales. *Facultad de Ciencias Económicas*, Encuentro de Economía Pública.
8. Boak y Turner. (2005). Shore Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 688 – 703.
9. Boretto, G.M.; Rouzaut, S.; Cioccale, M.; Gordillo, S. y Benitez, Y. (2018). Dinámica costera y antropización en playas uruguayas: Un

análisis integrado para su conservación. *REVISTA MEXICANA DE CIENCIAS GEOLÓGICAS*, 291-306.

10. Calderón, J. M.; Rodríguez, V. y Albarracín A. P. (2017). Metodología para el análisis de vulnerabilidad ante amenazas de inundación, remoción en masa y flujos torrenciales en cuencas hidrográficas. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, p. 109-136.
11. C-Astral p.o. (2014). *USER MANUAL FOR ORTOPHOTO AND GIMBAL VERSION WITH VIRTUAL COCKPIT 2.6*. Desc.: Desc.
12. CONAFOR. (2018). Fauna de las playas y dunas costeras. *SEMARNAT*, file:///C:/Users/Personal/Documents/Pendientes/Restauración/FaunaPlayaDunas.pdf.
13. Contestable, P. y Contestable, D. (2020). Coastal vulnerability and Mitigation Strategies from Monitoring to Applied. *Wáter*, 12-25.
14. CORIMAT. (2019, 04 02). *Coastal Risk Management*. Retrieved from Erosion: <https://corimat.net/es/erosion/>
15. Cuevas-Jiménez, A.; Euán-Ávila, J. I.; Villatoro-Lacouture, M. M. y Silva-Casarín, R. (2016). Classification of Beach Erosion Vulnerability on the Yucatan Coast. *Coastal Management*, 333-349.
16. Filograsso, L. C. (s.f.). Debilidad científica y problemas de sostenibilidad en Yucatán. *La jornada en la ciencia*.
17. FLYNORTH. (2015). *CARTOGRAFÍA, FOTOGRAMETRÍA Y SIG*. Retrieved from CARTOGRAFÍA, FOTOGRAMETRÍA Y SIG: <http://flynorthgroup.com/es/fotogrametria/>.
18. Frausto Martínez, O. (2014). Monitoreo de riesgo y desastre asociados a fenómenos hidrometeorológicos y cambio climático. *REDESCLIM*, 91.

19. Garcia-Ayllon, Salvador. (2018). Long-term GIS Analysis of Seaside Impacts Associated to Infrastructures and Urbanization and Spatial Correlation with Coastal Vulnerability in a Mediterranean Area. *Water*, 1642.
20. Garza-Pérez, J.R. y Ize-Lema I.A.R. (2017). *Caracterización Multidisciplinaria de la Zona Costera de Sisal, Yucatán*. Yucatán, México: LANRESC.
21. Gobierno de Yucatán. (2007). PROGRAMA DE ORDENAMIENTO ECOLÓGICO DEL TERRITORIO COSTERO DEL ESTADO DE YUCATÁN. *DOF*, 97.
22. González-Herrera, R.; Solís-Pimentel, A.; Zetina-Moguel, C. y Mariño-Tapia, I. (2015). Modeling the Northern Coastline of Yucatan, Mexico, with GENESIS. *The Geological Society of America*, 47-61.
23. Gopikrishna y Deo. (2017). Changes in the shoreline at Paradio Port, India in response to climate change. *ELSERVIER*, 243-255.
24. Ibarra, D.; Ballesteros, G.; Sánchez, J.; García, P.; Belmonte, F. (2020). Evaluación del índice de vulnerabilidad costera en la Manga del Mar Menor (Murcia, España). *Anales de Geografía de la Universidad Complutense*, 373-392 .
25. Instituto Nacional de Estadística y Geografía. (2019). *Indicadores de Bienestar por entidad federativa*. Retrieved from Indicadores de Bienestar por entidad federativa:
<http://www.beta.inegi.org.mx/app/bienestar/?ag=31>
26. Jiménez, J.; Sánchez, A. y Stive, M. (1993). Discussion on Prediction of storm/normal beach profiles. *Coastal and Ocean Engineering*, 466-468.
27. Lapointe, M. (2008). *Historia de Yucatán: Siglos XIX-XXI*. Mérida: Universidad Autónoma de Yucatán.

28. LIPC. (No Publicado). *Estudio integral de restauración y Estabilización costera del estado de Yucatán*. Mérida: Desconocida.
29. Machine Intelligence Laboratory. (s.f., 08 28). *Structure for motion*. Retrieved from Chapters:
<http://mi.eng.cam.ac.uk/~cipolla/publications/contributionToEditedBook/2008-SFM-chapters.pdf>
30. Madjid, M.Y.A.; Vandeginste, V.; Hampson, G.; Jordan, C.J. y Booth, A.D. (2018). Drones in carbonate geology: Oportunities and challenges, and application in diagenetic dolomite geobody mapping. *ELSERVIER*, 723-734.
31. Martínez, M. (2009). *Las playas y las dunas costeras: un hogar en movimiento*. Ciudad de México: La ciencia para todos.
32. Martinez Pérez, E. J. & Arévalo Quintero, J. S. . (2021). ESTUDIO Y PLAN DE CONTROL DE LA EROSIÓN COSTERA MEDIANTE ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN COSTERA EN UNA PLAYA DE LA CIUDAD DE RIOHACHA, LA GUAJIRA. *Universidad Católica de Colombia* , 25-27 pág .
33. Mclaughlin, S. y Cooper, A. G. (2014). A multi-scale coastal vulnerability index: A tool for coastal managers? *Environmental Hazards*, 9:3, 233-248.
34. Medellín, G. & Torres-Freyermuth, A. . (2021). Foredune formation and evolution on a prograding sea-breeze dominated beach . *ELSEVIER* , <https://sci-hub.se/https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278434321001515>.
35. Medellín, G-: Torres-Freyermuth, A.; Tomasicchio, G.R.; Francone, A.; Terezkiewicz, P.A.; Lusito, L.; Palemón-Arcos, L. & López, J. . (2018). Estudio de campo y numérico de resistencia y resiliencia en una playa

dominada por la brisa marina en Yucatán (México). *Water* ,
<https://www.mdpi.com/2073-4441/10/12/1806>.

36. Mendoza, E. T.; Trejo-Rangel, M. A.; Salles, P.; Appendini, C. M.; González, J. L. y Torres-Freyermuth, A. (2013). Storm characterization and coastal hazards in the Yucatan Peninsula. *Journal of Coastal Research*, 790–795.
37. Mendoza, E.; Ojeda, E.; Meyer-Arendt, K.; Salles, P. y Appendini, C. (2016). Assessing Coastal Vulnerability in Yucatan (Mexico). *Coastal Management: Changing coast, changing climate, changing minds*, 607-616.
38. Mendoza-González, G., Paredes-Chi, A., Méndez-Funes, D., Giraldo, M., Torres-Irineo, E., & Arancibia, E. &.-N. (2021). Perceptions and Social Values Regarding the Ecosystem Services of Beaches and Coastal Dunes in Yucatán, Mexico. *Sustainability* ,
<https://www.mdpi.com/2071-1050/13/7/3592>.
39. Miller, T.E., Gornish E.S. y Buckley H.L. (2010). Climate and coastal dune vegetation: disturbance, recovery and succession. *Plant ecology* (206), 97-104.
40. Miranda, F. y Hernández X. (1963). Los tipos de vegetación de México y su clasificación. *BOL. SOC: BOTÁNICA MÉXICO* 28:29-179, 1963.
41. Muñoz-Pérez, J. y Gutiérrez-Mas, J. (1999). Tipología y eficacia de los espigones de escollera construidos para la mejora de la estabilidad de las playas del litoral Atlántico de la provincia de Cádiz. *Boletín Geológico y Minero*, 53 - 66.
42. Nava-Fuentes, J.C.; Arenas-Granados, P. y Cardoso-Martins, F. (2016). Coastal management in Mexico: Improvements after the marine and coastal policy publication. *ELSEVIER*, 131-141.

43. Nayak, S. R.; Mitra, D. y Mishra, A.K. (2000). Critical issues in coastal zone management and the role of remote sensing in Sudarshana. *Subtle Issues in Coastal Management: Dehradun, India, Indian Institute of Remote Sensing*, 77-98.
44. Observatorio Turístico de Yucatán. (2018). *INDICADORES*. Retrieved from <http://www.observatoryucatan.org.mx/indicadores>
45. Ospina, B. M. (2012). *Aplicación del Modelo Multicriterio Metodologías AHP Y GP para la Valoración Económica de los Activos Ambientales*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Retrieved from Universidad Nacional de Colombia.
46. Pastor-Guzman, J. J. (2018). Remote sensing of mangrove forest phenology and its environmental drivers. *ELSEVIER*, 71-84.
47. Pethick, J. y Crooks, S. (2000). Development of coastal vulnerability index: a geomorphological perspective. *Environmental Conservation*, 359-267.
48. Pix4D. (2017, 09 13). *Pix4D*. Retrieved from Support: <https://support.pix4d.com/hc/en-us/articles/202560319#gsc.tab=0>
49. Pranzini, E.; Anfuso, G.; Cinelli, I.; Piccardi, M. y Vitale, G. (2018). Shore Protection Structures Increase and Evolution on the Northern Tuscany Coast (Italy): Influence of Tourism Industry. *Water*, 1647.
50. Ramírez, J. S. (2005). Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM. *Ciencia Ergo Sum*, 167-174.
51. Rey, Wilmer.; Martínez-Amador, M.; Salles, P.; Mendoza, E.; Trejo-Rangel, M.; Franklin, G.; Ruiz-Salcines, P.; Appendini, C. y Quintero-Ibáñez, J. (2020). Assessing Different Flood Risk and Damage

Approaches: A Case of Study in Progreso, Yucatán, México. *Marine Science and Engineering*.

52. Ruiz-Martínez, G., Mariño-Tapia, I., Mendoza-Baldwin, E.G., Silva-Casarín, R., and Enríquez-Ortiz C.E. (2016). Identifying Coastal Defence Schemes through Morphodynamic Numerical Simulations along the Northern Coast of Yucatan, Mexico. *Coastal Education and Research Foundation*, 651–669.
53. Rygel, L.; O'Sullivan, D y Yarnal, B. (2006). A METHOD FOR CONSTRUCTING SOCIAL VULNERABILITY INDEX: AN APPLICATION TO HURRICANE STORM SURGES IN A DEVELOPED COUNTRY. *Springer*, 741-764.
54. Rzedowski, J. (1978). Vegetación de México. *ED. LIMUSA. México*, 431 pp.
55. Sallenger Jr., A.H. (2000). Storm impact scale for barrier islands. . *Coast Res*, 890-895.
56. Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico. *BOLETÍN DE LA SOCIEDAD GEOLÓGICA MEXICANA*, 19-42.
57. Secretaria de Fomento Turístico. (2018). *Derrama Económica Turismo*. Retrieved from <http://www.sefotur.yucatan.gob.mx/secciones/dinamicas/24>.
58. SEMARNAT. (2013). *MANEJO DE ECOSISTEMAS DE DUNA COSTERA, CRITERIOS ECOLÓGICOS Y ESTRATEGIAS*. Ciudad de México: Dirección de Política Ambiental e Integración Regional y Sectorial.

59. Sistema Geológico Mexicano. (2017, 05 24). *Aplicaciones de SIG en SGM*. Retrieved from gob.mx: <https://www.gob.mx/sgm/articulos/utiliza-aplicaciones-sig-del-sgm?idiom=es>.
60. TECNOCEANO. (05 de 04 de 2022). *ESTRUCTURAS DE PROTECCIÓN COSTERA*. Obtenido de <https://blog.tecnocéano.com/estructuras-de-proteccion-costera/>
61. Torres, W.; Méndez, M.; Dorantes, A. y Durán, R. (2010). *ESTRUCTURA, COMPOSICIÓN Y DIVERSIDAD DEL MATORRAL DE DUNA COSTERA EN EL LITORAL YUCATECO*. Mérida: Bol.Soc. Bot.Méx.
62. Torres-Freyermuth, A.; Medellín, G. y Salles, P. (2021). Human Impact on the Spatiotemporal Evolution of Beach Resilience on the Northwestern Yucatan Coast. *Frontiers in Marine Science*.
63. Torres-Freyermuth, A.; Medellín, G.; Tonatiuh-Mendoza, E.; Ojeda, E. & Salles, P. . (2019). Morphodynamic Response to Low-Crested Detached Breakwaters on a Sea Breeze-Dominated Coast. *Water*.
64. Westoby, J. Brasington, N.F. Glasser, M.J. Hambrey, J.M. Reynolds. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for. *ELSEVIER*, 300-314.
65. Williams, A. y Barugh, A. (2014). Beach user perceptions at the eastern Yucatan peninsula. *Journal of Coastal Research*, 426–430.
66. Zetina, V. (2009). LA VALUACIÓN FRENTE A NUEVOS RETOS; MODELOS MULTICRITERIO, "CORRECCIÓN POR CRITIC". *Congreso Internacional de Valuación 2009 y XLV* (p. 87). Cancún, Q. Roo: Universidad Politécnica de Valencia.