



Universidad Nacional Autónoma de
México

Facultad de Filosofía y Letras

Colegio de Geografía

Adaptación y aplicación de un índice de
vulnerabilidad costera en el litoral norte del
municipio de Actopan, Veracruz, México.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE

LICENCIADA EN GEOGRAFÍA

P R E S E N T A

Andrea Mancera Flores

DIRECTOR DE TESIS

Dr. José Ramón Hernández Santana

Ciudad Universitaria, Cd. Mx.

2021



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.

Dedicatoria

*A mi mamá y mi abuelita por ser dos mujeres increíbles llenas de fortaleza
por todo su amor, porque son un ejemplo de vida,
de esfuerzo y alumbran mi camino*

Verónica Flores

Y

Socorro Espinoza

Ya mi abuelito Balbino Cortez

*Por ser como mi papá, por enseñarme el valor del trabajo,
la familia y el amor sincero.*

*“En cada promontorio, en cada playa curva,
en cada grano de arena,
está la historia de la Tierra.”*

- Rachel Carson

Agradecimientos

A mi madre Verónica que con dedicación y esfuerzo me ha guiado a convertirme en la mujer que soy, por darme la oportunidad de dedicarme a lo que me gusta, por enseñarme a ser responsable, comprometida y a que sin importar la situación que pase, una sonrisa puede ser el impulso necesario para seguir adelante, te amo con todo mi ser.

A mis abuelitos Socorro y Balbino, por ser la base de la familia, por estar siempre pendiente de nosotras, por cuidarme desde que soy niña, por las enseñanzas, por creer en mí y formar un hogar donde sé que siempre me esperan, los amo mucho.

A mi hermana Casandra, por todas las aventuras que vivimos juntas, por los juegos, por hacerme fuerte, gracias por el apoyo incondicional, los consejos y porque de ti he aprendido a que renunciar no es opción, gracias por nunca darte por vencida, por ser tan paciente, cuidarme y defenderme contra todo, te amo con todo mi ser.

A mi Tía Martha por tu sinceridad, y por siempre hacerme ver la realidad, por apoyarnos cuando más lo necesitamos, siempre te estaré agradecida y te amo.

A mis tíos Jaco, Hilda, Costa, Bitá, Lupe, Juan, Omar y a mi madrina Silvia por formar parte de mi familia, por apoyarnos y por sus consejos, a mis primos Juanito, Thali, Tavo, Elsi, Victor, Hildis y Auris, por las experiencias a su lado, los momentos gratos y su apoyo, y al resto de la familia, gracias por estar allí siempre, los amo mucho.

A mi papá Carlos por siempre estar cuando más lo necesitaba, porque nunca me faltó una palabra de apoyo, por darme la oportunidad de estudiar una carrera, lo amo. Y a mi familia paterna que siempre me ha recibido con los brazos abiertos.

A mi dulce Mae, porque a tu lado he vivido cosas increíbles, por las risas, la sinceridad y la objetividad ante todas las cosas, por confiar en mí, por dejarme aprender contigo y de ti, porque desde el principio hemos sido mejores amigas, gracias por formar parte de mi vida y por dejarme ser parte de la tuya, sé que seremos amigas siempre, te amo.

A Laura (Kelly) porque me has enseñado a ver la vida desde otra perspectiva, porque nunca dejas de sorprenderme, por la infinita paciencia y escucharme en mis crisis, porque eres una amiga increíble, por dejarme ser parte de tu vida hoy y siempre, te amo.

A Moni y Arthur que me han acompañado desde la preparatoria, por las aventuras, por las risas y los consejos, por creer en mí, los amo.

A Saúl, que ha sido como mi mejor amigo, que siempre me hace reír sin importar la situación, por cuidarme y ser un fuerte apoyo, por creer ciegamente en mí, por apoyarme en mis crisis, por las aventuras y porque de ti aprendí que la vida no siempre es lo que esperas, pero que de uno depende que sea bueno o no, gracias por enseñarme lo que es el amor, siempre te voy a amar.

A José que ha sido un gran apoyo en mi vida, que me ha enseñado que los mejores amigos sí existen y que el amor verdadero nunca va a terminar, gracias. Te amo.

A Daniel por las experiencias vividas a tu lado y por enseñarme que el conocimiento es también responsabilidad, a Emilio por enseñarme el valor y lo agradable que es el silencio, por confiar en mí y por enseñarme a escuchar y a Emmanuel porque gracias a tu clase me gustó la geomorfología costera y por tu apoyo al inicio de mi estancia en el instituto, a los tres, gracias por dejarme aprender con ustedes y de ustedes, los quiero.

A mis amigos Arturo, Héctor, Iván, Sofía, Ricardo, Luis E., Andrés, Cristóbal, Yolanda, Johanna y a los que falten, gracias por su compañía, por su amistad, por el tiempo y las experiencias agradables que viví a su lado, los quiero mucho.

A mis asesores el Dr. José Ramón Hernández Santana porque desde el inicio de mi estancia en el Instituto de Geografía confió y creyó en mí, por darme la oportunidad de aprender de usted, por incluirme en proyectos, por asesorarme y por ser un gran ejemplo como geomorfológico y como

persona. Y a la Mtra. Patricia Méndez por su apoyo en mi vida académica y personal, por confiar y creer en mí, por enseñarme tantas cosas y guiarme cuando tenía algún problema con mi tesis, por sus valiosos comentarios, por brindarme su amistad, por las pláticas y la paciencia, por preocuparse por mí, gracias por todo, los quiero mucho.

A la Dra. Blenda del Instituto de Geología, por ayudarme en la parte estadística de mi tesis, por el tiempo y la paciencia, gracias por los valiosos comentarios.

A mis sinodales Dr. Mauricio Galeana, Dra. Leticia Gómez, Mtro. Sergio Salinas y Mtro. Jesus Manuel Tapia, no solo por sus valiosos comentarios, si no por las cátedras impartidas, muchas gracias.

A la Universidad Nacional Autónoma de México y a la Facultad de Filosofía y Letras, por recibirme y por otorgarme una formación profesional donde nunca se ha dejado de lado la calidad humana, por darme la oportunidad de conocer a personas increíbles y es donde he vivido grandes experiencias de vida.

Al Instituto de Geografía por abrirme las puertas y darme la oportunidad de entrar como becaria del proyecto Iniciación a la Investigación, y por formar parte fundamental de mi desarrollo profesional, y al Proyecto del Centro Mexicano de Innovación en Energía Océano (CEMIE O) por el apoyo económico y porque a través de este puede desarrollar importantes habilidades profesionales y de investigación.

Y a todos aquellos que han formado parte de mi vida académica y personal, a profesores, compañeros e instituciones gracias por todo.

Índice

INTRODUCCIÓN	1
ANTECEDENTES Y ACTUALIDAD CIENTÍFICA	2
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	6
JUSTIFICACIÓN	7
OBJETIVO GENERAL	8
OBJETIVOS PARTICULARES	8
HIPÓTESIS	8
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO-METODOLÓGICO	9
1.1 GEOMORFOLOGÍA COSTERA Y MORFODINÁMICA	9
1.1.1 Zona costera	10
1.1.2 Tipos de costa	12
1.2 COSTAS ABRASIVAS Y ACUMULATIVAS	13
1.2.1 Playas, morfología y dinámica	15
1.2.2 Línea de costa	16
1.3 AGENTES Y PROCESOS GEOMORFOLÓGICOS COSTEROS	17
1.3.1. Mareas, oleaje y corrientes litorales	17
1.3.2 Otros agentes geomorfológicos costeros	19
1.3.3 Acreción y erosión	20
1.4 FACTORES FORZANTES DE LA MORFODINÁMICA COSTERA	21
1.5 MARCO METODOLÓGICO	23
1.5.1 Metodología de análisis de procesos costeros	23
1.5.2 Medición de la variabilidad de la línea de costa	23
1.5.2.1 Perfiles de playa y obtención de datos de campo	24
1.5.3 Métodos de análisis estadísticos	25
1.5.3.1 Tasas de cambio de la línea de costa	25
1.5.3.2 Incertidumbre en la medición de la línea de costa	26
1.5.3.3 Análisis multivariante	27
1.5.3.3.1 Análisis de redundancia	28

1.5.3.4 Índices y vulnerabilidad	30
1.5.3.4.1 Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC)	30
1.5.3.4.1.1 Índice de Gornitz <i>et al.</i> (1994)	31
1.5.3.4.1.2 Índice de McLaughlin y Cooper (2010)	32
1.5.3.4.1.3 Índice de Palmer <i>et al.</i> (2011)	33
1.5.3.4.1.4 Índice de Kumar y Kunte (2012).....	34
1.5.3.4.1.5 Índice de Núñez <i>et al.</i> (2016)	35
1.5.4 Materiales y métodos: Cuadro general de la metodología.....	36
CAPÍTULO 2. CARACTERIZACIÓN GEOGRÁFICA DEL ÁREA DE ESTUDIO... 38	
2.1 LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA	38
2.2 CARACTERÍSTICAS GEOGRÁFICAS.....	40
2.2.1 Constitución y estructuras geológicas.....	40
2.2.2 Morfogénesis y morfometría del relieve costero	43
2.2.3 Características climáticas, régimen de vientos y eventos hidrometeorológicos extremos.....	57
2.2.4 Hidrología y sistemas costeros	61
2.2.5 Oleaje, corriente y mareas.....	63
2.2.6 Variaciones en el nivel del mar	65
2.2.7 Tipo de suelo	66
2.2.8 Uso de suelo y vegetación.....	67
2.3 CARACTERÍSTICAS SOCIODEMOGRÁFICAS, ACTIVIDADES SOCIOECONÓMICAS E INFRAESTRUCTURA COSTERA.....	69
CAPÍTULO 3. ÍNDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA (IVC): VARIABLES Y ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE SU CÁLCULO..... 71	
3.1. OBTENCIÓN DE INDICADORES PARA EL DESARROLLO DEL IVC.....	71
3.1.1. Variables físicas	72
3.1.2. Variables socioeconómicas	90
3.2 DESARROLLO METODOLÓGICO PARA DETERMINAR EL IVC	93
3.2.1. Preprocesamiento de los datos para el análisis de redundancia	93
3.2.2. Análisis estadístico de los datos	94

3.3 DETERMINACIÓN DEL ÍNDICE DE VULNERABILIDAD COSTERA.....	100
CAPÍTULO 4. VULNERABILIDAD COSTERA: ZONIFICACIÓN Y GESTIÓN COSTERA.....	103
4.1 APLICACIÓN DEL IVC.....	103
4.1.1 Evaluación de la vulnerabilidad costera.....	104
4.1.2 Índice de vulnerabilidad y gestión costera	109
DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	114
BIBLIOGRAFÍA	118
ANEXOS	132

Relación de Figuras

Fig. 1. Ambientes de la zona costera	10
Fig. 2. Esquema de la zona costera y sus elementos geomorfológicos	11
Fig. 3. Ejemplos de morfologías costeras.....	13
Fig. 4. Diagrama morfológico de una playa.	16
Fig. 5. Parámetros para la detección de la línea de costa.....	17
Fig. 6. Movimiento de refracción del oleaje.....	19
Fig. 7. Diagrama de obtención de un perfil de playa.....	25
Fig. 8. Diagrama general de la metodología	37
Fig. 9. Localización del área de estudio.....	39
Fig. 10. Mapa geológico general.	41
Fig. 11. Mapa morfogenético.....	45
Fig. 12. Morfologías acumulativas.....	47
Fig. 13. Plataforma de abrasión expuesta	47
Fig. 14. Barra de arena que forma el Tómbolo de Villa Rica	48
Fig. 15. Acantilado de Punta Villa Rica, costa abrasiva.....	48
Fig. 16. Dunas como evidencia de la acumulación de sedimentos por actividad eólica	49
Fig. 17. Dunas fósiles de Punta Jicacos	50
Fig. 18. Fotografía panorámica de la boca de la laguna El Llano.....	51
Fig. 19. Mapa altimétrico	53
Fig. 20. Mapa batimétrico.....	54
Fig. 21. Mapa de inclinación del terreno	56
Fig. 22. Mapa de uso de suelo y vegetación 2017.....	68
Fig. 23. Evolución de la barra de arena en boca de la laguna El Llano	74
Fig. 24. Mapa de la tasa de cambio de la línea de costa (EPR)	75
Fig. 25. Mapa de distancia de la línea de costa a la isóbata de 20m	76
Fig. 26. Mapa de elevación para la zona costera	78
Fig. 27. Mapa de pendiente local	79
Fig. 28. Tipología de la costa para costas secundarias	80
Fig. 29. Mapa de la marea de tormenta	82
Fig. 30. Mapa de distancia de la vegetación de trasplaya a la línea de costa.....	83
Fig. 31. Estaciones de playa	85
Fig. 32. Carreteras y caminos	92
Fig. 33. Mapa del índice de vulnerabilidad costera general para la costa norte del municipio de Actopan, Veracruz. Elaboración propia.....	105
Fig. 34. Mapa del índice de vulnerabilidad costera en la zona de influencia directa de los procesos marinos. Elaboración propia.....	107

Fig. 35. Zonificación de la vulnerabilidad costera. Elaboración propia	108
Fig. 36. Evolución del azolvamiento de la laguna El Llano	111

Relación de Cuadros

Cuadro. 1. Clasificación de los elementos geomorfológicos de la zona costera	11
Cuadro. 2. Tipos de infraestructura de protección costera	22
Cuadro. 3. Variables empleadas por cada índice de vulnerabilidad costera	31
Cuadro. 4. Principales fenómenos meteorológicos de 1950 a 2016	60
Cuadro. 5. Planos de mareas para la estación de Veracruz con datos de 2002-2015	64
Cuadro. 6. Variables seleccionadas	71
Cuadro. 7. Datos de perfiles para determinar el parámetro de Dean.	88
Cuadro. 8. Datos de perfiles para determinar el Índice de Playa (BI)	89
Cuadro. 9. Valores propios y porcentaje de varianza para cada componente principal en análisis de redundancia para la zona de influencia directa de los procesos marinos.	95
Cuadro. 10. Puntajes de variables o coordenadas de variables de la zona de influencia directa de los procesos marinos en PC1 y PC2	97
Cuadro. 11. Valores propios y porcentaje de varianza para cada componente principal en análisis de redundancia para la zona costera	98
Cuadro. 12. Puntajes de variables o coordenadas de variables de la zona costera general en PC1 y PC2	99
Cuadro. 13. Rangos de clasificación de vulnerabilidad para cada variable.	102

Relación de Gráficos

Gráfico. 1. Perfil batimétrico de la costa norte del municipio de Actopan, Veracruz	55
Gráfico. 2. Climograma correspondiente a la estación del SMN Tecolutla Ver. 2018	58
Gráfico. 3. Tendencia del nivel del mar para la estación de Veracruz	65
Gráfico. 4. Población total por localidad 1990-2010	69
Gráfico. 5. Ancho de playa	86
Gráfico. 6. Ancho de la berma	87
Gráfico. 7. Comparativa de índices de estado morfodinámico	90
Gráfico. 8. Criterio de Broken Stick para la selección de variables de la zona de influencia directa de los procesos costeros	96
Gráfico. 9. Análisis de redundancia canónica, para la zona costera de influencia directa de los procesos marinos. eigenvalues y ejes canónicos para PC1 y PC2	97
Gráfico. 10. Criterio de Broken Stick para la selección de variables de la zona de estudio general	98
Gráfico. 11. Análisis de redundancia canónica, para la zona costera general. eigenvalues y ejes canónicos para PC1 y PC2	99

Introducción

En México durante los últimos años, la población en las zonas costeras se ha visto incrementada (Moreno-Casasola, 2010) y en el mundo cerca del 60% de la población vive en estas áreas (UNESCO, 2003), lo que implica una mayor presión sobre éstas, a causa de la demanda de recursos naturales y a la urbanización de los litorales. En este sentido, se requiere de un óptimo manejo de estas regiones, a través de la realización de estudios sobre su vulnerabilidad potencial, que conlleven a reconocer múltiples aspectos, tanto geomorfológicos y socioeconómicos, bajo un contexto espacio-temporal (Pethick y Crooks, 2000), con el objetivo de comprender la morfodinámica de la costa y modelar sus posibles respuestas ante la exposición a eventos (forzantes), que modifican las condiciones normales. De esta respuesta depende el grado de vulnerabilidad del sistema litoral.

Las zonas costeras se consideran altamente susceptibles a sufrir alteraciones en un corto periodo de tiempo, por ello, en la presente investigación, se expone una metodología de valorización de la vulnerabilidad costera, a partir de elementos físicos y cambios morfodinámicos en la costa, que son consecuencia de la alteración de los componentes naturales y de la intervención humana. Para ello, mediante la aplicación de un Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC), se lleva a cabo un análisis para determinar el grado de vulnerabilidad en la costa norte del municipio de Actopan lo que componentes naturales permite realizar una evaluación de la vulnerabilidad física.

El IVC propuesto se fundamenta en índices de diferentes autores y se adapta a las condiciones físicas y socioeconómicas del área de estudio; se pretende, que las variables empleadas se interrelacionen y posibiliten la estimación de la vulnerabilidad relativa a través de una ponderación, que establezca rangos de valores estandarizados con el objetivo de expresar la vulnerabilidad zonificada de manera simple, a través de la aplicación de análisis estadístico multivariado y plataformas de sistemas de información geográfica.

Antecedentes y actualidad científica

Actualmente el estudio de las zonas costeras tiene sus fundamentos teóricos en investigaciones realizadas a finales del siglo XVIII con los estudios de Giovanni Targioni-Tarzetti (1712–1783), Jean-Etienne Guettard (1715-1786), Mikhail Lomonosov (1711-1765), James Hutton (1726-1797) y Charles Lyell (1797-1875), donde se plantea la relación de los procesos morfológicos y la geología, así como el reconocimiento de la geografía de las costas (Oldroyd y Grapes, 2008). Como consecuencia de la multiplicidad de elementos y procesos que se desarrollan en torno a éstas, es posible encontrar criterios y enfoques de distintas disciplinas, sin embargo, la perspectiva actual de la geomorfología costera está fuertemente influenciada por los estudios de William Morris Davis a principios del siglo XX con la relación de la morfología costera y la geología (Bird, 2008), y estudios de erosión costera en Europa con la creación de la Comisión de Erosión Costera (*Royal Commission on Coastal Erosion*) en 1906, y la publicación de libros como *Shore Processes and Shoreline Development* de Johnson (1919), donde se describen las costas de Estados Unidos y plantean los primeros enfoques para el estudio de las costas (Davidson-Arnott, 2010). Lugo-Hubp (2001) y Azuela-Bernal y Vega-Ortega (2018) exponen que, en México, existen estudios de esta categoría con un marcado carácter regional como los de Ordóñez (1900) y Balarezo (1909).

En la década de 1950 el interés por la morfodinámica costera experimentó un marcado auge, por la aparición de estudios de morfología de playas y erosión costera, con la primera edición de *Beaches and Coasts* de Cuchlaine King (1959), estudios de ingeniería costera en Estados Unidos de América y la Unión Soviética, hasta culminar en los análisis de procesos costeros y la interrelación de ambientes físicos por Jack Davies en 1972 (Davidson-Arnott, 2010), autores que se convirtieron en los pioneros de los estudios de costas, definiéndolas como regiones altamente dinámicas.

Este concepto que tuvo repercusión en todos los estudios de morfodinámica costera, como el de Pethick y Crooks (2000), Rangel-Buitrago y Posada-Posada (2005), Phillips (2006) y ANIDE *et al.* (2013), que destacan la convergencia de

factores, entre los que predominan los geológicos, oceanográficos, biológicos, meteorológicos y antropológicos, resaltando la importancia del análisis evolutivo de las zonas costeras, que están expuestas al embate de múltiples fenómenos complejos (Jiménez-Orocio, 2010).

En los estudios actuales de geomorfología costera, la caracterización morfológica tiene un marcado enfoque cuantitativo, con la aplicación de métodos estadísticos y técnicas de percepción remota. Los estudios de geomorfología costera aplicada consideran estos ambientes como sistemas en constante intercambio de materia y energía, donde cualquier alteración de los mecanismos que controlan la mecánica, tiene importantes repercusiones en el comportamiento de la costa, siendo zonas altamente sensibles a las fluctuaciones locales de energía, su modificación tiene efecto en la respuesta y posibilidad de recuperación del sistema ante algún fenómeno, como lo explican Steers (1971), Charlier y De Meyer (1998), Stephenson y Brander (2003), y Barros y Bonetti (2017).

Estos estudios de geomorfología aplicada, se caracterizan por la generación de modelos predictivos con utilidad potencial en las áreas de planificación, ingeniería y desarrollo costero, centrándose en las interrelaciones existentes entre las actividades antrópicas y el relieve (Pedraza-Guilsanz, 1996), así como en el análisis de riesgos naturales o inducidos, con lo que se relaciona la determinación de la vulnerabilidad (Rangel-Buitrago y Posada-Posada, 2013). El concepto de vulnerabilidad costera (VC) introducido en la década de los 90, se basa en una serie de juicios sobre el riesgo, a través de la consideración de diferentes elementos presentes en el ambiente, ya sean naturales o humanos, como lo explican Green y McFadden (2007). La vulnerabilidad es comúnmente relacionada con fragilidad, sensibilidad o susceptibilidad y se define como la exposición de un sistema social o ambiental a condiciones de estrés en respuesta al cambio, producto de una combinación de fuerzas naturales y antrópicas en las condiciones normales (Adger, 1999).

Una de las principales características de la vulnerabilidad es la capacidad de un sistema para recuperarse de las alteraciones sufridas, su cuantificación es

complicada dadas las interrelaciones y las respuestas de cada sistema (Escofet *et al.*, 2010). Sin embargo, para su evaluación en los litorales, el índice de vulnerabilidad costera (IVC) es una herramienta con extensa aplicación, ya que considera elementos físicos y sociales, con la intención de combinar una serie de variables ponderadas, de tal manera, que es posible adaptar cada uno de los indicadores a la zona de interés (Ortiz-Pérez *et al.*, 2010).

Si bien la vulnerabilidad costera depende de diferentes factores, además de la erosión costera, se considera la variación relativa en el nivel medio del mar, como uno de los principales forzantes de las condiciones normales a nivel mundial. Trabajos como el de Bijlsma *et al.* (1996), Doukakis (2005), Rivera-Arriaga *et al.* (2010), Martínez *et al.* (2014), Masselink y Ronals (2014), El Hattab (2015) o Andreeva *et al.* (2016), se enfocan en el análisis del impacto por el incremento relativo en el nivel del mar y las afectaciones de fenómenos asociados, como son los eventos hidrometeorológicos extremos (huracanes) e inundaciones severas, que provocan cambios irreversibles en la costa.

Pethick y Crooks (2000), explican que los índices para medir la VC, presentan aproximaciones de primer orden sobre la variabilidad temporal de las zonas costeras ante sus diferentes componentes. Es una metodología que se basa en el uso de un conjunto de factores, que identifican la vulnerabilidad ante un peligro en concreto como expone Ramos-Reyes *et al.* (2016), con el objetivo de expresarla de una manera simple. Los parámetros compuestos, las variables cuantitativas y cualitativas categorizan la vulnerabilidad, lo que resulta útil para el manejo de las zonas costeras (Harvey y Woodroffe, 2008; Bontetti *et al.*, 2015).

Desde la década de los 90's con estudios de Gornitz *et al.* (1991) y Gornitz *et al.* (1994) se realizan estudios para valorar la vulnerabilidad costera, de tal forma que se consideran los recursos presentes y los elementos que se encuentren bajo amenaza, para desarrollar metodologías sintéticas como lo presentan Palmer *et al.* (2011), Kumar y Kunte (2012), para medir estos parámetros y, consecuentemente la vulnerabilidad

Es importante señalar, que el IVC es una herramienta aplicable a múltiples escalas (desde lo regional hasta lo local), por lo que las variables empleadas en el estudio guardan una relación directa con la escala que se maneje y también dependen de los recursos disponibles y los objetivos de la investigación como es evidente en el trabajo de McLaughlin y Cooper (2010).

Existen múltiples propuestas de IVC como los de Thieler y Hammer, (2000), Boruff *et al.*, (2005); - Vittal-Hegde y Radhakrishnan-Reju (2007), McLaughlin y Cooper, (2010), Palmer *et al.*, (2011), Kumar y Kunte (2012), Ciccarelli *et al.*, (2017), Bernard *et al.* (2015), Aguilar-Lynch, (2015), Barros y Bonetti, (2017), Gianluigi *et al.* (2017), Bishnupriya y Bhaskaran, (2018), con un enfoque relacionado a la evaluación multivariada, o los trabajos de Abuodha y Woodroffe (2006) en las costas australianas, o Rakib *et al.*, (2019) para determinar el riesgo en la costa suroeste de Bangladesh, aplican técnicas estadísticas de reducción de la dimensionalidad para la aplicación de índices de vulnerabilidad física o para destacar la vulnerabilidad social y la percepción del riesgo.

En México, existen diferentes trabajos sobre cambios en el nivel del mar (Ortiz-Pérez y Méndez Linares, 1999; Ortiz-Pérez, 2005; Zavala-Hidalgo *et al.*, 2010; Carbajal-Domínguez, 2010; Azuz *et al.*, 2010), que caracterizan el Golfo de México y plantean la situación ante los escenarios de cambio climático, también existen estudios de vulnerabilidad costera física y social (Botello *et al.*, 2010; Yáñez-Arancibia y Day, 2010; Ramos-Reyes *et al.*, 2016; Núñez *et al.*, 2016), que presentan un amplio panorama y conforman un precedente para el análisis de la vulnerabilidad costera ante el incremento en el nivel del mar, alteraciones por fenómenos hidrometeorológicos, modificación de corrientes y aportes fluviales, así como los impactos de las actividades humanas, encontrándose también investigaciones de geomorfología litoral que forman la base del conocimiento de la dinámica costera (Geissert, 1995; Ortiz-Pérez y De la Lanza-Espino, 2006; Moreno-Casasola, 2006; Jiménez-Orocio, 2010; Moreno-Casasola, 2010; Martínez *et al.*, 2012).

Trabajos como el de Hernández-Santana *et al.* (2008), Ramos-Reyes *et al.* (2016) y Núñez *et al.* (2016) se enfocan en estudiar la dinámica costera y la vulnerabilidad de manera regional en el estado de Tabasco. A lo largo del presente trabajo, se mencionarán distintas propuestas de IVC, con el propósito de adaptar uno a las condiciones físicas y socioeconómicas del área de estudio.

Planteamiento del problema

Las modificaciones en las zonas costeras, tanto por procesos naturales como por actividades humanas, tienen implicaciones a corto y largo plazo, de tal manera, que la ocurrencia de fenómenos como tormentas tropicales, variaciones en el volumen de sedimentos, erosión costera, variaciones verticales de la corteza, así como las variaciones en el nivel del mar que, según datos del Servicio Mareográfico Nacional, en el Golfo de México se observa un aumento de entre +1.79 y +2.82 mm/año y se espera que para el año 2025, el aumento sea de >20 cm (Maul, 1993; Vázquez-Botello, 2008) tienen impactos ambientales y promueven alteraciones morfológicas de los sistemas costeros (Vázquez-Botello, 2008), que se evidencian en la incipiente erosión de las playas, transgresiones marinas, salinización de los mantos freáticos, retroceso de la línea de costa, pérdidas de humedales, etc. (Moreno-Casasola, 2010).

En el municipio de Actopan, se encuentra uno de los sistemas humedales más importantes de la zona central del Golfo de México, forma parte del sitio RAMSAR “La Mancha-El Llano”, un área designada de acuerdo a los criterios establecidos en la “Convención Relativa a los Humedales de Importancia Internacional Especialmente como Hábitat de Aves Acuáticas” que promueve la conservación ambiental de los humedales reconociendo sus funciones ecológicas con el fin de impedir el deterioro progresivo y la pérdida de estos ambientes (RAMSAR, 2014). Actualmente presenta problemáticas de retroceso en la línea de costa, pérdida y deterioro de las playas por el embate de fenómenos hidrometeorológicos, el transporte y la alteración en las tasas de sedimentación, que, en conjunto con las actividades económicas como la urbanización, la colocación de ductos de hidrocarburos, el turismo, la ganadería, la colocación de barreras vivas, etc., alteran

la morfología costera, contribuyen a la acumulación de sedimentos en la laguna, erosionan las playas y, constituyen barreras para el sedimento que se moviliza por la acción del viento, estos procesos desembocan en la degradación de los sistemas de humedales, cambio en la dinámica costera, así como el deterioro de zonas de manglar, contaminación y azolvamiento de la laguna El Llano, que dificulta el manejo sustentable de la zona costera (Moreno *et al.*, 2000). Por lo tanto, se considera relevante evaluar la vulnerabilidad costera, desde el punto de vista físico, para establecer una zonificación de las áreas con mayor afectación.

Justificación

En México, a pesar de que se cuenta con aproximadamente más 10 000 km de costa (Ortiz-Pérez y De la Lanza-Espino, 2006) pocos son los trabajos que se realizan para la determinación de la vulnerabilidad costera. Si bien, se tienen varios trabajos con respecto al incremento en el nivel medio del mar en el Golfo de México, es necesario el estudio de la vulnerabilidad en distintas escalas y regiones, para tener de esta manera, un apto manejo de los litorales. Las presiones antrópicas sobre las zonas costeras por el incremento poblacional que provoca importantes modificaciones en los espacios costeros, causadas por la demanda de servicios básicos, infraestructura, expansión urbana, espacios para el desarrollo de actividades económicas, zonas de recreación, etc., cambios que tienen importantes alteraciones en los ecosistemas y en la dinámica natural del litoral (Azuz y Rivera, 2009), aunadas a otros fenómenos naturales, tales como los huracanes, el ascenso del nivel medio del mar y la dinámica natural de la costa representan componentes y situaciones importantes para determinar la vulnerabilidad costera.

El caso de estudio se enmarca en la porción norte del municipio de Actopan, Veracruz, en donde las condiciones físicas de la playa, los fenómenos hidrometeorológicos, el régimen de vientos, los constantes “Nortes” estacionales del invierno y las corrientes marinas, así como las actividades antrópicas, son factores que modifican la morfodinámica costera. En este sentido, la relevancia de la aplicación de un Índice de Vulnerabilidad Costera en el área de estudio, resulta de gran utilidad, no solo para la conservación ambiental dada la presencia de

humedales y de campos de dunas, sino que también es aplicable a planes de desarrollo económico y manejo comunitario de la región, por las problemáticas de azolvamiento, deforestación, disminución de los niveles de agua de las lagunas, degradación por actividades agrícolas y pecuarias, modificación en la línea de costa (acreción y erosión), contaminación e incremento en el nivel del mar (Moreno, 2000; Moreno-Casasola *et al.* 2015).

Objetivo general

Adaptar y aplica un Índice de Vulnerabilidad Costera (IVC), acorde a las características físicas, socioeconómicas y ambientales en la costa norte del municipio Actopan, Veracruz.

Objetivos particulares

- Identificar cuáles son los elementos y procesos físicos, sociales y económicos que se presentan en la zona costera norte del municipio de Actopan, Veracruz.
- Seleccionar las variables con mayor influencia en la zona de estudio, para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera.
- Reconocer cuáles son los sectores con mayor vulnerabilidad y realizar una evaluación de la costa norte del municipio de Actopan, Veracruz.

Hipótesis

La implementación de métodos estadísticos multivariantes permiten calcular y adoptar un índice de vulnerabilidad costera acorde a las características físicas de la zona costera norte del municipio de Actopan, donde el sector frontal norte y la porción centro-norte corresponden a las áreas más vulnerables con respecto al sector sur, a causa de su exposición al transporte de sedimentos por acción del viento y del oleaje, al desarrollo de las actividades antrópicas y a los fenómenos meteorológicos, con notables modificaciones de la dinámica costera.

Capítulo 1. Marco teórico-metodológico

1.1 Geomorfología costera y morfodinámica

La exposición de la costa a la interacción de diferentes procesos naturales y antrópicos, determina un impacto directo en su configuración, que afecta todas las relaciones que se realizan en torno a ésta (Lalbiakzuali *et al.*, 2013). En este sentido, la geomorfología costera se encarga del estudio de las formas del relieve (morfología, morfometría, morfoestructura, génesis y dinámica), y del proceso de modelación litoral producto de la actividad de procesos exógenos (erosión, depositación, denudación, modificación antrópica) y endógenos (tectónica, sismicidad, vulcanismo), consecuencia de la relación entre la atmósfera, litósfera e hidrósfera (Davidson-Arnott, 2010; Bustamante-Fernández *et al.*, 2016).

Esta interacción determina la conformación de accidentes geográficos por la acción de procesos que alteran la morfología de los litorales, de tal forma, que permite enfocarse en los análisis de los cambios históricos y las evidencias geológicas de las variaciones en el nivel del mar, la alteración y el movimiento de sedimentos, respuesta a la perturbación particularmente de costas acumulativas, así como transformaciones asociadas a la línea de costa (Bird, 2008).

Para analizar los cambios que se presentan en el relieve costero, Wright y Thom, en 1977, introducen el concepto de morfodinámica costera, definida como “los ajustes mutuos de la topografía y la dinámica de los fluidos involucrados en el transporte de sedimentos” (Masselink *et al.*, 2011), es decir, hace referencia a que el relieve costero es consecuencia del constante intercambio de materia y energía, por lo que, la determinación de la morfología costera responde a una escala temporal relativamente corta (Davidson-Arnott, 2010). La morfodinámica costera depende directamente de tres componentes, la geología, los sedimentos y los forzantes (Masselink *et al.*, 2011), estos últimos divididos en externos que corresponden a la acción marina del oleaje, del viento y de las actividades antrópicas, y los forzantes internos que competen a la estructura del litoral y a la dinámica marina que interfieren con el transporte del sedimento (Flaqués *et al.*, SF).

1.1.1 Zona costera

La zona costera, es la franja que corresponde al área de influencia de los procesos costeros, por lo que no tiene un límite exacto, puede abarcar desde el borde de la plataforma continental hasta varios kilómetros dentro del continente (Clark, 1977; Davidson-Arnott, 2010), es en esta área donde ocurren toda una serie de fenómenos como la erosión, abrasión, sedimentación y transporte de sedimentos (Ortiz-Pérez y De La Lanza-Espino, 2006). En este sentido, es la zona de transición entre los ambiente marino y terrestre, donde interactúan los fenómenos y procesos geólogo-geomorfológicos, marinos, atmosféricos y antrópicos, que son los responsables de la morfología y de la configuración de la costa.



Fig. 1 .Ambientes de la Zona Costera. A. Zona de Plataforma; B. Zona de asomeramiento; C. Zona de Rompiente; D. Zona de Surf; E. Zona de Swash; F. Zona Supralitoral. Elaboración propia

La zona costera se divide en tres diferentes áreas (Figs.1 y 2), la zona supralitoral o supramareal^(F), en la que la influencia marina afecta únicamente en condiciones extraordinarias (tormentas), se caracteriza por cambios de la pendiente, donde las dunas y bermas son sus principales características morfológicas; esta zona se delimita por los ecosistemas costeros existentes, como lagunas, humedales, marismas, desembocaduras, etc. (Silva-Casarín *et al.*, 2014). La zona interlitoral o intermareal^(C,D,E), que comprende el espacio superior e inferior de la marea normal,

que a su vez, está constituida por dos ambientes, el terrestre o *shoreland* y el marino que se encuentran íntimamente conectados por la acción del oleaje, las mareas y las corrientes que transportan los sedimentos e impactan en la morfología litoral y, por último la zona Infralitoral o submareal (A,B) que corresponde al área de influencia del oleaje, abarca desde el límite inferior de la bajamar, hasta el nivel de refracción donde las olas se ven directamente afectadas en su altura y curso por la topografía marina (Guillén y Díaz, 1990; Silva-Casarín *et al.*, 2014).

- Elementos geomorfológicos de la zona costera

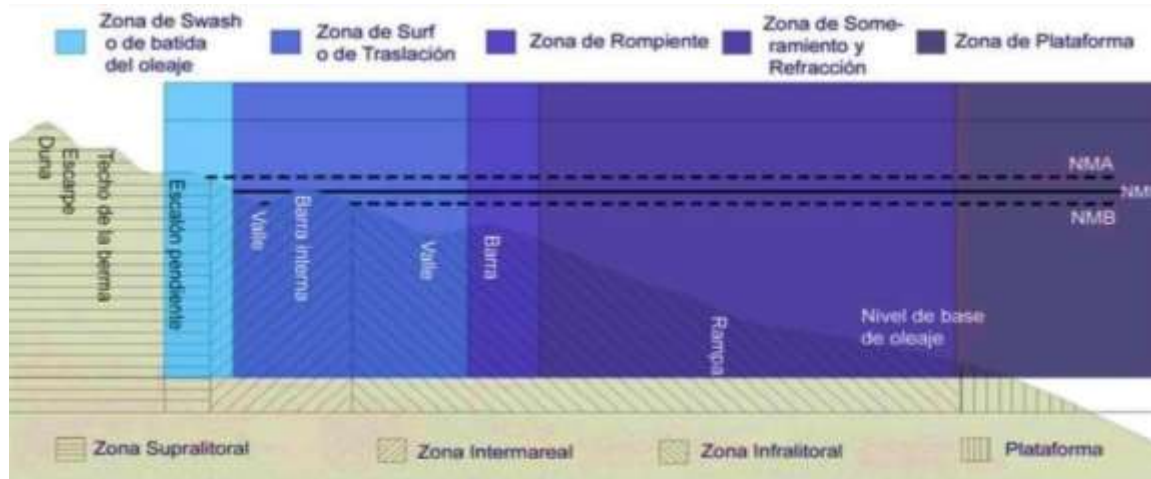


Fig. 2. Esquema de la zona costera y sus elementos geomorfológicos. Tomado de Silva *et al.* (2014)

En cada una de las áreas que conforman la zona costera, se encuentran distintas morfologías, como consecuencia de la interacción de diferentes agentes; Guillén y Díaz (1990) plantean las formas representativas de cada área, que se mencionan en el Cuadro 1.

Cuadro. 1.: Clasificación de Guillen y Díaz (1990) de los elementos geomorfológicos de la zona costera.

Zona	Formas
Supralitoral	Campos de dunas, llanuras de arena, berma, escarpes, humedales
Interlitoral	Pendiente de playa, escalón, topografía rítmica, barra interna o surco
Infralitoral	Barras de arena y rampas limitadas por ruptura de pendiente

Otros elementos geomorfológico-hidrográficos que se presentan dentro de la zona costera, son las lagunas, entendidas como depresiones en la costa que aíslan o semiaíslan masas de agua por cordones o barras de arena de escasa pendiente;

los estuarios, que corresponden a la desembocadura de un río, en donde la acción de la marea establece un gradiente de salinidad; las bahías, que son porciones de las costas de forma cóncava que suelen acumular sedimentos y las marismas, definidas como llanuras con un drenaje deficiente, también conocidas como planicies de inundación y en el caso de humedales como llanuras lodosas (Ortiz - Pérez y De La Lanza-Espino, 2006).

1.1.2 Tipos de costa

Cada porción de la zona costera se ve afectada, de forma diferencial, por agentes geomorfológicos que dan como resultado diferentes tipos de costa. Existen distintas clasificaciones de tipos de costa, con base en una amplia variedad de parámetros en razón de los principales controles o características físicas del litoral. Johnson (1919) caracteriza las costas según el nivel del mar, en sumergidas y emergidas. Shepard (1963) distingue las costas con base en el proceso morfogenético, el terrestre (primarias) que corresponden a aquellas que tienen su origen en agentes terrestres que, a su vez, se subdivide en costas de erosión como los fiordos, costas de deposición subaéreas como los deltas o llanuras aluviales y costas volcánicas o geológicas. Las segundas (o marinas) se distinguen por la dominancia de los procesos hidrodinámicos. Inman y Nordstrom (1971) dividen a las costas de acuerdo con la evidencia de procesos tectónicos. Cada una de las clasificaciones enfatizan la relación que existe entre los elementos geológicos y los procesos hidrodinámicos (Masselink *et al.*, 2011).

Gómez *et al.* (2014) expone una clasificación similar a la expuesta por Shepard (1963), las separa en dos clases, la primera, con base en el cambio relativo del nivel del mar, dividiéndose en costas de emersión o levantamiento, resultado del descenso en el nivel del mar, por isostasia o por elevación de bloques y costas de inmersión o subsidencia, como resultado de ajustes eustáticos, hundimientos tectónicos o incremento en el nivel del mar; y la segunda clasificación, según la procedencia de los materiales (Fig.3) divididas en costas acumulativas o de avance, entendidas como aquellas en las que los sedimentos principalmente de origen fluvial se acumulan (playas, dunas, deltas, barras, flechas) y costas de erosión o abrasión,

donde los materiales producto del intemperismo son transportados por el agua marina, éstos pueden ser acantilados, fiordos, terrazas o plataformas de abrasión. (Bird, 2008).

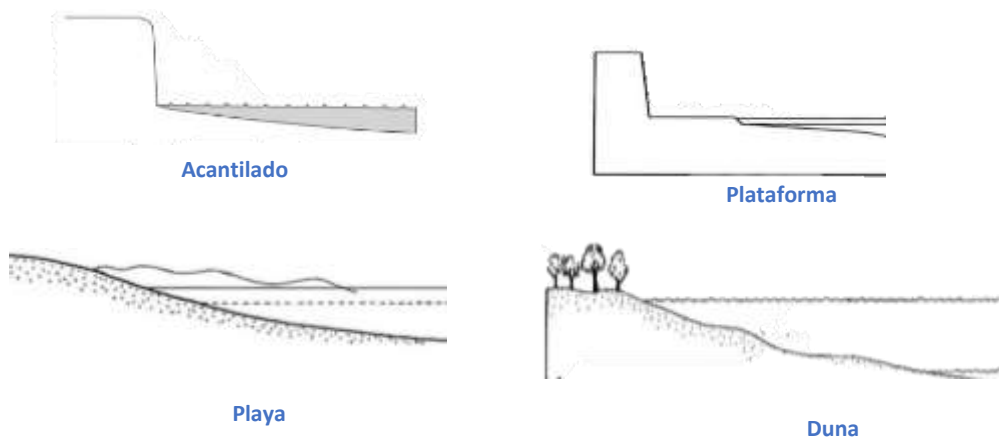


Fig. 3. Ejemplos de morfologías costeras. Modificado de Bird (2008).

1.2 Costas abrasivas y acumulativas

En la presente investigación se ha considerado emplear la clasificación de costas expuesta por Sheppard en (1963) para costas secundarias, es decir, aquellas cuyo origen es la acción del oleaje y otros procesos costeros, que se subdividen en costas de erosión, costas de deposición y costas bióticas (corales o manglares) (Davidson-Arnott, 2010), se empleará esta clasificación ya que engloba en su totalidad la amplia variedad de elementos y procesos morfodinámicos de cuya interacción depende la morfología costera (Davidson-Arnott, 2010).

La clasificación con base en el proceso dominante por la acción del oleaje, divide al litoral en dos grupos, costas de erosión o abrasión del oleaje y costas de deposición marina, cada una con marcadas características, que expresan morfologías y dinámicas particulares del tipo de costa al que pertenecen.

Se consideran costas erosivas o abrasivas, aquellas cuyo agente dominante es el oleaje, que al impactar contra la costa ejerce una acción erosiva o abrasiva, la línea de costa se encuentra definida en material rocoso o sedimentos con alta cohesión, que ofrecen resistencia al oleaje, si bien, es posible encontrar material de playa, este suele ser escaso y forma una capa delgada al pie del acantilado.

Resaltan dos principales morfologías (Fig. 3)

- Acantilados: Se caracterizan por pendientes rocosas costeras, usualmente superan los 40° de inclinación que se elevan abruptamente desde el agua o de la porción interior de una plataforma generalmente estrecha; la morfología de éstos depende directamente de la litología y de la estructura, que responde a la acción del intemperismo y la erosión, así mismo, pueden ser consecuencia de procesos estructurales locales como fallas, o procesos tectónicos de levantamiento de la corteza (Bird, 2008).
- Plataformas costeras o de abrasión: resultado de la acción abrasiva del oleaje, éstas son superficies rocosas casi horizontales que se extienden en la zona intermareal, cuyo límite se marca por la continuidad del perfil litoral o por un escarpe que se define en la línea de bajamar (Davidson-Arnott, 2010).

Los tipos de costas con características acumulativas, son aquellas donde el mar o los ríos son los principales agentes de formación; estas acumulaciones por su naturaleza no consolidada son altamente sensibles a la dinámica litoral, de tal forma, que, una costa acumulativa adquiere distintas morfologías:

- Flechas: es una franja de arena extendida, generalmente por la corriente de deriva litoral en la costa, donde el material es depositado en ángulo casi recto (Lugo-Hubp, 2015).
- Barras: Son formaciones alargadas originadas por la acumulación de material costero o fluvial, se extienden por encima del nivel de las mareas medias, pueden llegar a unirse con pantanos, marismas o lagunas, que promueven la acreción de la costa (Bird, 2008).
- Tómbolo: Son acumulaciones de arena o barreras que unen islas entre sí o al continente, mediante la formación de un puente de arena cuyo origen está en la refracción y difracción del oleaje en torno a la isla, y al gradiente litoral que genera la deposición en sotavento de las islas, a causa de la influencia y dirección del oleaje y el viento, es común que un lado del tómbolo este sujeto a una mayor hidrodinámica (Bird, 2008; Davidson-Arnott, 2010).

- Playas: Representan un depósito de sedimentos finos a medios no consolidados, de pendiente suave, que se extiende desde la duna hasta el límite interno en donde el oleaje ya no interfiere con la superficie (Lugo- Hubp, 2015). En ocasiones, en sitios de fuerte oleaje y de gradientes fluviales fuertes suelen presentarse playas de guijarros y de sedimentos gruesos.

1.2.1 Playas, morfología y dinámica.

La playa corresponde a la zona de depósito de los materiales no consolidados de distinto tamaño, desde limos o arenas, hasta gravas, que se encuentran sometidas a la acción de procesos hidrodinámicos, como las mareas y el oleaje (Dabrio, 2010). Las playas están constituidas, desde el punto de vista morfológico, por escarpes, bermas y dunas embrionarias, en las que la acción del mar o el viento son determinantes para su formación (Suárez, 1999). De acuerdo con las características sedimentológicas de las playas, la distribución y movimiento de los materiales constitutivos se relacionan íntimamente con los procesos hidrológicos, como el régimen de mareas, la intensidad y orientación del oleaje, mismos que se determinan por la morfología de la anteplaya.

Por otra parte, las playas pueden clasificarse según la pendiente intermareal, que interactúa directamente con el oleaje y la depositación o transporte de sedimentos en la costa, es decir, en la forma y fuerza con la que impacta el oleaje, esta clasificación (aplicada principalmente en costas micromareales), las divide en reflectivas, cuando la pendiente es pronunciada, a pesar de que el oleaje no tenga una alta energía la berma es corta y las corrientes de resaca intensas, este tipo de playas se caracterizan por corresponder a cordones litorales estrechos de pendiente elevada y estar constituidas de sedimentos de mayor grosor (Dabrio, 2010); disipativas, que son de gran anchura, la pendiente es suave, el oleaje incidente disminuye su energía progresivamente y la corriente de resaca es débil, en general, se constituyen de sedimentos finos; e intermedias, cuanto comparten características de las dos anteriores (Anfuso *et al.*, 2003).

La extensión de la playa comprende tres principales áreas (Fig.4): a) el *Shoreface*, zona sublitoral o la anteplaya, que constituye a la porción sumergida de la costa, generalmente con pendiente suave; b) el *Foreshore* o zona de batida, que es el área de la playa de frente al mar, se encuentra en los límites de la pleamar y la bajamar, por lo que su amplitud está determinada por la amplitud mareal, y es el área donde se da el proceso de *swash* y movimiento *run-up/run-down*; y c) la porción superior de la playa, definida como *Backshore* o trascosta, forma el área emergida de la costa, una zona relativamente plana, donde la berma en zonas con abundante aporte sedimentario está bien desarrollada; en esta área la acción eólica de deflación comienza el dominio hasta consolidarse en la formación de dunas costeras (Nonn, 1987; Dabrio, 2010).

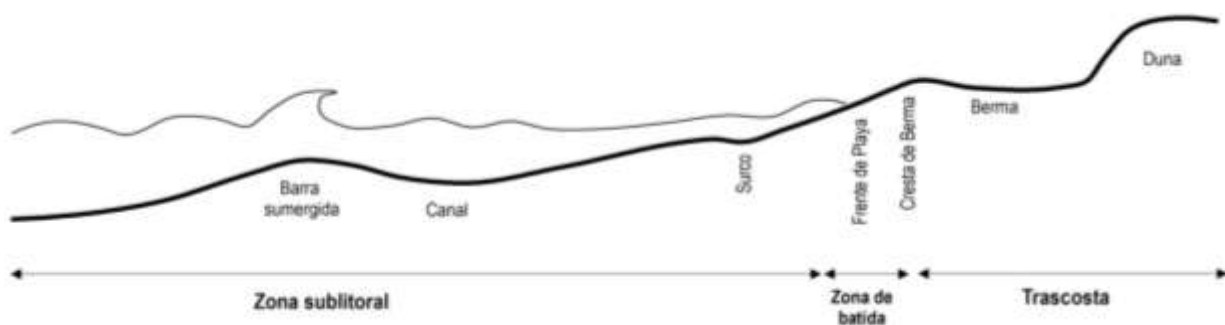


Fig. 4. Diagrama morfológico de una playa. Modificado de Dabrio (2010).

1.2.2 Línea de costa

Un elemento de relevancia para el análisis de la morfodinámica costera es la línea de costa, que se define como el borde terrestre de la costa (Davidson-Arnott, 2010), y refleja el dinamismo presente en las zonas costeras, de tal forma que tiene variaciones en su posición, durante periodos de tiempo relativamente cortos, consecuencia de la interacción de múltiples factores hídricos, terrestres y atmosféricos, si bien, la definición es clara, su determinación exacta para fines de estudio es compleja. En este sentido, no es posible encontrar una sola línea que marque la frontera entre el mar y la tierra, por lo tanto, según los objetivos de cada estudio, del tipo de costa y de los insumos, Boak y Turner (2005) proponen 16 parámetros para cartografiarla, de los cuales se destacan 7, estos indicadores expresan una aproximación de la localización exacta de la línea de costa (Fig.4), en

esta clasificación se incluyen los dos principales tipos de costa propuestas por Shepard (1963) erosivas y acumulativas y se relacionan con la visualización de la línea (Boak y Turner, 2005).



Fig. 5. Parámetros para la detección de la línea de costa. Elaboración propia.

1.3 Agentes y procesos geomorfológicos costeros

La morfología costera, es el resultado de la interacción de agentes, que constantemente intercambian materia y energía, que si bien, en los sistemas geomorfológicos no se mantiene una linealidad entre las respuestas y las salidas de forma proporcional, si es posible considerarlos como sistemas abiertos (Phillips, 2006), en donde el oleaje, las corrientes, las mareas, el viento, los procesos físicos, químicos o biológicos, transportan o depositan material, manifestándose en acreción cuando el material se deposita, o erosión cuando las salidas de sedimentos son significativamente mayores a las entradas (Gómez *et al.*, 2014), así mismo, existen distintos factores principales de control, que influyen directamente en la morfología y la evolución de las zonas costeras.

1.3.1. Mareas, oleaje y corrientes litorales

La morfología de los litorales depende directamente de la interacción entre varios agentes. En este sentido, los procesos hidrológicos son elementos fundamentales para la dinámica litoral.

Mareas

Las mareas, como variaciones periódicas de ascenso y descenso en el nivel del agua, son movimientos de las masas oceánicas provocados por los efectos gravitacionales de la luna y el sol (Lugo-Hubp, 2015). Este movimiento provoca a lo largo de la costa, variaciones en su trazo y en las corrientes. Existen distintos tipos de marea en razón de sus cambios temporales, tanto de la marea alta o pleamar y marea baja o bajamar. Las mareas diurnas producto del ciclo solar, se manifiestan como un ciclo de pleamar y bajamar cada 24 horas; las mareas semidiurnas, provocadas por los ciclos lunares, presentan dos pleamares y dos bajamares en 24 horas, y las mixtas, en donde están mezcladas sin un aparente orden (Bird, 2008).

Oleaje y corrientes

El oleaje, es el movimiento superficial de las masas de agua, tienen un comportamiento de ondas (Fig.5) con amplitud y frecuencia, son producto de la acción del viento sobre la superficie del mar, y su dirección es determinante para su propagación (Nonn, 1987). En la zona costera, es posible dividir morfológicamente las áreas de influencia del oleaje. Silva-Casarín *et al.* (2014) subdividen la zona costera en cinco áreas con base en la hidrodinámica:

1. Zona de plataforma, que corresponde al área en la que el oleaje únicamente está bajo control del viento y mantiene un movimiento circular.
2. Zona de asomeramiento o refracción, en donde la topografía del fondo marino afecta la ola en altura, orientación y la refracta al alterar la cresta del oleaje, y modifica la fuerza de la misma.
3. Zona de rompiente, en donde la ola alcanza su máxima altura y por fricción con el fondo marino rompe la onda.
4. Zona de *surf*, que corresponde a la porción de la costa en donde la ola posterior a la ruptura avanza hacia la costa, es en esta zona donde surgen las corrientes de retorno.
5. Zona de *swash* o batida del oleaje, en donde la ola asciende y desciende por la zona intermareal (*run-up/run-down*).

Dada la refracción de las olas por el movimiento *run-up* oblicuo y *run-down* recto, provoca el transporte en *zigzag* (Fig.6-B) en *Foreshore* de la playa, este desplazamiento se denomina como deriva litoral. Por otra parte, la rompiente de las olas, que se mueven paralelamente, acarrean más sedimentos que la deriva litoral, mientras que las corrientes de resaca son aquellas que se producen en la vertical de la zona costera y en dirección opuesta (Fig. 6-A) (Dabrio, 2010; Aguilar-Lynch, 2015). Por último, el movimiento mareal forma corrientes de flujo y reflujo asimétricas que suelen erosionar las barras arenosas de fondo, sin embargo, para que este desgaste sea significativo el rango mareal debe ser relativamente grande (Dabrio, 2010).

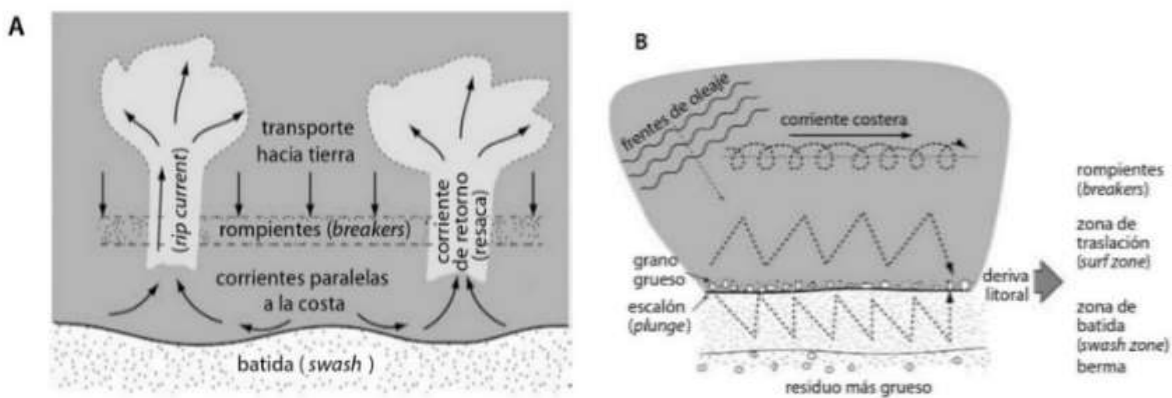


Fig. 6. Movimiento de refracción del oleaje, A. Corrientes de resaca con movimiento perpendicular a la dirección del oleaje: B. Movimiento zigzag y paralelo correspondiente a la deriva litoral. Tomado de Dabrio (2010)

1.3.2 Otros agentes geomorfológicos costeros

Dada la multiplicidad de procesos que tienen lugar en la zona costera existen, además de los hidrodinámicos, otros fenómenos de relevancia para la conformación morfológica del litoral. En este apartado, se mencionan cuatro agentes relevantes para comprender la morfodinámica de la zona de estudio:

1. El viento, que no solamente se encarga de generar el oleaje como se explica anteriormente, también funge como medio de transporte de sedimentos en la zona de trascosta y es el mecanismo principal para la formación de dunas costeras y microrelieve como los *ripples* (Davidson-Arnott, 2010).

2. Los procesos fluviales de arrastre sedimentario (desembocaduras), ponen a disposición de las corrientes marinas sedimentos terrestres que se distribuyen a lo largo de la costa, a través del oleaje y de las corrientes de deriva (Rodríguez y Arche, 2010).

3. Las comunidades vegetales, son auxiliares para la retención de sedimentos generalmente finos, de tal forma, que reducen el flujo del viento y estabilizan los depósitos de arena (García *et al.*, 2010).

4. Los procesos de intemperismo (físico, químico y biológico), que actúan sobre los planos de debilidad de la costa rocosa, dan pie a procesos de remoción en masa (Bird, 2008) y a otros procesos geomórficos del modelado de sus superficies.

1.3.3 Acreción y Erosión

La constante interacción de diversos factores en la zona costera, determina no solamente la morfología si no la dinámica de la misma, debido a procesos de transporte de sedimentos a lo largo de toda la costa ocurren procesos de transporte de sedimentos, existen dos procesos principales que modelan la costa:

- a) La erosión, que es un proceso clave en la mayoría de las costas, se entiende como el transporte o remoción de los materiales no consolidados producto del intemperismo.
- b) Abrasión en el caso de los acantilados y de plataformas poco profundas.
- c) Aporte y transporte fluvial en las desembocaduras.

En la remoción de los sedimentos actúan distintos agentes, como el viento, las olas o las corrientes (Davidson-Arnott, 2010), existen distintas morfologías como plataformas de abrasión, acantilados, socavaduras, grietas y cavernas, arcos marinos, torres e islas producto de la erosión; estas dependen, en gran medida del tipo de geología y de su estructura (Gómez *et al.*, 2014).

Por otra parte, la deposición, es la principal responsable de la conformación de costas acumulativas y, por tanto, del avance de las costas, que tiene su origen cuando la deposición del sedimento excede las tasas de erosión, es decir, este

proceso se entiende como la acumulación de sedimentos en una porción de la costa X consecuencia de la erosión en una región Y (Bird, 2008), el tamaño de los sedimentos varía de acuerdo a la fuente y la distancia de transporte de éstos, de esta manera, existen distintas morfologías deposicionales (Lugo-Hubp, 2015).

1.4 Factores forzantes de la morfodinámica costera

Además de los procesos hidrodinámicos como el oleaje, las corrientes y las mareas, existen otros elementos que alteran la morfodinámica de la costa, tales como los fenómenos hidrometeorológicos (huracanes o tormentas tropicales), la acción directa del viento de tormentas sobre la costa, los procesos fluviales extremos, cambios en la disposición de sedimentos, así como el movimiento horizontal del mar a causas del avance o retroceso de la costa (que tiene repercusiones en los niveles de marea), o las variaciones verticales en el nivel del mar, ya sea resultado de un proceso subsidente, emergente, o en respuesta al cambio climático. La acción de estos forzantes afecta directamente los ambientes costeros expresándose en la morfología, la acreción o regresión de la costa, Yáñez-Arancibia y Day (2010) consideran, desde un enfoque sistémico, que la zona costera es altamente vulnerable ante la perturbación de alguno de estos fenómenos, los elementos geomorfológicos y los ecosistemas presentes en las costas (campos de dunas, estuarios, manglares, etc.) tienen una determinada resistencia al dinamismo de la zona costera, sin embargo, la modificación a los flujos de materia y energía, consecuencia de dichos forzantes, es determinante para establecer la vulnerabilidad del sistema.

- **Actividades antrópicas e Infraestructura de protección costera**

Uno de los forzantes que tiene mayor impacto en las zonas costeras, son las actividades humanas que se desarrollan en torno a estas, y afectan directamente su configuración, al modificar la relación erosión-depositación. A su vez, las variaciones entre los sedimentos y la dinámica marina rompen el equilibrio costero, lo que provoca principalmente el fenómeno de erosión. Actividades como la agricultura, la industria, el turismo, los puertos, o la construcción de centros urbanos, así como la contaminación de residuos municipales o industriales, además del

ascenso del nivel medio del mar; alteran completamente la morfodinámica costera y, por ende, su ecología (Tassara y García, 2015). La vulnerabilidad de estas zonas, se extiende cuando se interrumpe la distribución de los sedimentos en la costa por la construcción de muelles y puertos; se extrae arena de las dunas; se incrementa el desarrollo urbano; cuando aumenta la capacidad de carga de las corrientes marinas cercanas al litoral; se retira la cubierta vegetal que fija el sustrato; y se represan las corrientes fluviales, que alteran la cantidad de sedimentos disponibles, etc. (Tristán *et al.*, 2006).

Para atenuar los impactos de todas las actividades que modifican la dinámica natural de la zona costera, existen medidas para evitar la pérdida de las costas, la infraestructura de protección (Cuadro.2), que son todas aquellas obras o construcciones de origen antrópico, que tienen como principal objetivo, estabilizar y proteger la zona costera ante eventos hidrometeorológicos extremos con el fin de evitar inundaciones, intrusiones marinas, salinización de los cuerpos de agua (incluso los subterráneos) y de proteger de la erosión Salles y Silva (2003) enlistan en algunos tipos de infraestructura y su finalidad.

Cuadro. 2: Tipos de infraestructura de protección costera. Fuente Salles y Silva (2003).

Tipo de Estructura	Objetivo	Función Principal
Dique	Prevenir o mitigar inundaciones de zonas costeras bajas	Separación entre la línea de costa y las zonas bajas en tierra a través de
Revestimiento	Proteger la línea de costa contra erosiones	Refuerzo de parte del perfil de playa
Malecón de retención	Retener suelo y evitar deslizamiento de tierra al mar	Refuerzo y relleno del banco de tierra costero
Espigón	Prevenir erosión playera	Reducción de transporte longitudinal a la playa
Rompeolas no ligado a la playa	Prevenir erosión playera	Reducción de la altura de ola en la sombra de la estructura
Muro de conducción	Prevenir azolve o erosión no deseados y proteger atraques contra corrientes	Direccionamiento de corrientes forzando el flujo a lo largo de las estructuras
Protección contra socavación	Proteger estructuras costeras contra inestabilidad producida por erosión de fondo marino adyacente	Aumento de la resistencia contra erosión causada por oleaje y corrientes
Dique sumergido	Prevenir erosión playera	Retardar el movimiento del sedimento mar adentro

1.5 Marco Metodológico

1.5.1 Metodología de análisis de procesos costeros

La morfodinámica de la costa depende de la interacción de diversos factores y procesos, existen distintas metodologías basadas en indicadores, como la posición de la línea de costa, procesos geomorfológicos, viento, oleaje y mareas, para definir el origen, comportamiento y evolución de la zona costera, a partir de herramientas cualitativas, como la descripción geomorfológica, y cuantitativas con la morfometría o el análisis estadístico. Estos métodos se emplearon en la presente investigación, con el fin de establecer los indicadores morfodinámicos necesarios para elaborar un índice de vulnerabilidad costera.

1.5.2 Medición de la variabilidad de la línea de costa

Los cambios en la línea de costa, son consecuencia de múltiples factores que afectan las tasas de erosión y acumulación (Martín-Prieto *et al.*, 2016). La variación en la línea de costa, entendida como la modificación en la posición de ésta en una determinada temporalidad, es evidencia de la evolución de la zona costera, así como de su respuesta ante fenómenos naturales o antrópicos; para determinar esta variación es necesario la obtención de líneas de costa de diferentes años, con el fin de encontrar patrones de comportamiento, características y otros elementos, que ayuden a comprender la dinámica litoral (Boak y Turner, 2005).

De manera general, existen dos metodologías principales para la definición de la línea de costa, una se basa en el trabajo de campo, con perfiles de playa para reconocer los patrones locales de comportamiento (Ford, 2013), y la segunda, consiste en la detección de líneas históricas, a partir de recursos de percepción remota, como las fotografías aéreas, ortofotos o imágenes satelitales, a través de los cuales, es posible abarcar amplios periodos de años para obtener la variación de la línea de costa, ya sea de forma automática o manual (Aiello *et al.*, 2013), sin embargo, la obtención de las múltiples líneas de costa no es suficiente para reconocer la evolución temporal.

1.5.2.1 Perfiles de playa y obtención de datos de campo

La forma del perfil de la playa depende de la interacción de múltiples elementos y los cambios morfológicos que se reflejan con variaciones en la pendiente, expresan el proceso dominante durante una determinada temporalidad (Sánchez-Arcilla y Jiménez, 1995), de tal forma, que un perfil se define como la representación gráfica en dos dimensiones de un corte transversal de la topografía, en este caso de una playa, donde se observan todas las morfologías presentes en ella.

De manera general, todos los perfiles de playa muestran un comportamiento similar, en donde la porción exterior tiene una pendiente mayor, que progresivamente disminuye hacia mar adentro (Bernabéu *et al.*, 2001). A partir de éstos es posible identificar las eventualidades, formas y zonas de interacción de los agentes que determinan la geomorfología de la costa. Esta modelación morfológica empírica está basada en la representación de datos experimentales de campo o laboratorio, enfocados en comprender la respuesta de las playas ante procesos de erosión o acreción (Azuz, 1999).

Existen distintas metodologías para el levantamiento de un perfil de playa, sin embargo, todas parten desde un punto fijo en la parte superior o inferior de la playa y se traza en forma perpendicular a la línea de costa. Una vez que se reconoce el área en dónde se harán los perfiles mediante la observación morfológica, se determinan marcadores de referencia e intervalos a lo largo de la costa. Posteriormente, se procede al trazo del perfil que toma el criterio de que 0.0 es el nivel medio de las bajamares (Posada y Buitrago, 2009).

En la presente investigación, se adapta el método de Emery o de Horizonte (1961), que consiste en localizar las coordenadas iniciales de cada perfil (mediciones con GPS) y trazar una línea perpendicular a la dirección de la línea de costa y nivelada al horizonte, con ayuda de un distanciómetro, estadal y clinómetro. Posteriormente, se procede a medir, se intercala la posición de las mediciones, una vez se haya establecido el desnivel entre las mismas (1,2; 2,3; 3,4...) a partir del 0.0 hasta el interior de la playa o de las cadenas de dunas próximas a la línea de costa. Se mide cada ruptura de pendiente, como los marcadores del cambio en la morfología de la

playa, tal como se muestra en la Fig.7 Para cada uno de los perfiles se genera una ficha litoral con información espacial de referencia, datos hidrodinámicos y geomorfológicos básicos (Posada y Buitrago, 2009).

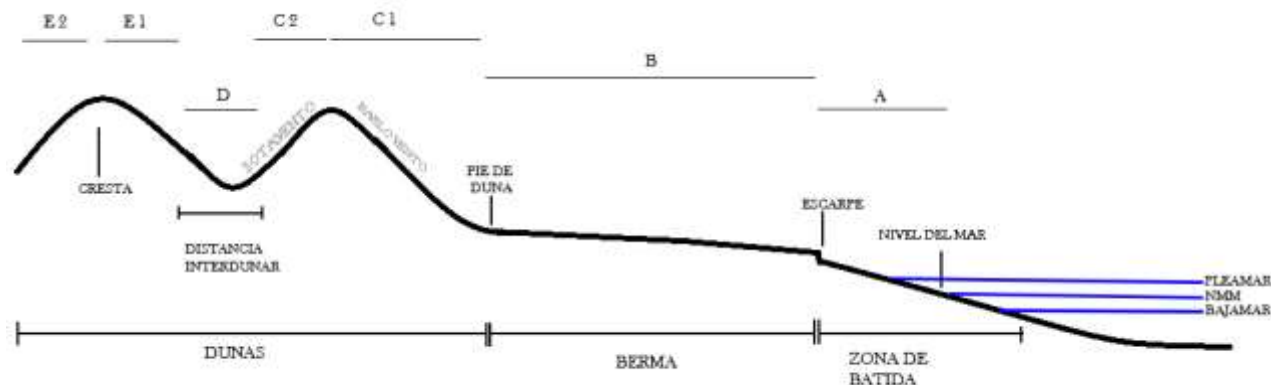


Fig. 7. Diagrama de obtención de un perfil de playa, a través del Método de Emery modificado, donde la medición empieza en el nivel del mar o 0.0 y se realizan en cada ruptura de pendiente, donde se calcula la pendiente y la diferencia vertical o altura, mientras que la Distancia (Líneas horizontales: A, B, C1, C2, D, E1 Y E2) determinan la distancia de cada porción de la playa, desde el Backshore o (zona de playa) hasta el campo de dunas. Elaboración propia.

1.5.3 Métodos de análisis estadísticos

1.5.3.1 Tasas de cambio de la línea de costa

El papel de la estadística es fundamental para comprender la dinámica de la zona costera, y ha sido ampliamente ocupada en los estudios de geomorfología, así pues, la aplicación de determinadas operaciones estadísticas, como las tasas de cambio, que son una medida de frecuencia, reflejan el cambio métrico de un elemento en un periodo de tiempo, de tal forma, que se evidencia el comportamiento multitemporal y las alteraciones de los procesos y elementos geomorfológicos, así como la medición de la posición de la línea de costa.

En este sentido, Thieler y Danforth (1994) han propuesto una serie de metodologías cuantitativas para el análisis de la variación de la línea de costa, con el software DSAS (*Digital Shoreline Analysis System*) para la plataforma ArcGis, a través de métodos de estadística, es una herramienta útil para la obtención de tasas de cambio de la línea de costa, se obtienen estadísticos como:

El movimiento neto de la línea de costa (NSM): Este estadístico no corresponde a una tasa de cambio, únicamente expresa la diferencia en la distancia entre la línea de costa más reciente y la más antigua para cada transecto, es decir el desplazamiento total de la línea de costa en un periodo determinado (Thieler *et al.*, 2009)

Tasa de punto final (EPR): indica el movimiento anual de la línea costera, es el producto de la división del desplazamiento total de la línea de costa por un tiempo determinado entre la línea más antigua y la más reciente (Thieler *et al.*, 2009).

También es posible generar regresiones lineales simples y ponderadas, que permiten cuantificar los principales procesos morfológicos predominantes de progradación y erosión (Thieler *et al.*, 2009). Los datos estadísticos resultantes dependerán de distintos factores, como son la precisión en las mediciones, la temporalidad del estudio, la posición de las líneas, la relación de las observaciones en campo, la calidad de los datos, el periodo de tiempo entre las líneas y el parámetro que se seleccione. Por otro lado, también es posible estimar los valores de error del modelo de posición en la línea de costa y su posición real (Dolan *et al.*, 1991).

1.5.3.2 Incertidumbre en la medición de la línea de costa

En todo estudio científico existe un cierto rango de inexactitud, que se deriva de la forma en la que se representa un fenómeno. El error y la incertidumbre, aunque es posible encontrarlos ocasionalmente como sinónimos, tienen significados diferentes, el primero se refiere a la diferencia entre el valor de una medida y el valor real del objeto, mientras que el segundo se emplea para cuantificar la precisión de una metodología o un instrumento de medición (Ruíz-Barradas *et al.*, 2010). En los análisis de morfodinámica costera, la incertidumbre representa una aproximación o nivel de dispersión del valor medido con el verdadero, evidencia la fiabilidad de una medición, a través de la evaluación de los posibles errores, por lo cual, otorga una estimación dentro de la cual se encuentra el valor verdadero (Maroto *et al.*, 2001).

Existen múltiples metodologías para la determinación de la incertidumbre, que se enfocan en el nivel de error, como resultado del análisis y los materiales empleados. En la presente investigación, el cálculo de la incertidumbre (UT) toma como base dos metodologías, la metodología (Ut) de Fletcher *et al.* (2003), que considera cinco variables: el error de las cartas topográficas (T), variación estacional (S), variación en la marea (t), el error cuadrático medio (RMS) y el error de la digitalización (O).

$$Ut = \pm\sqrt{T^2 + S^2 + t^2 + RMS^2 + O^2}$$

Y la metodología (U) de Martín-Prieto *et al.* (2016), que considera únicamente tres elementos: el tamaño de pixel (EP), el error cuadrático medio (Eg), y el error en la digitalización (Ed).

$$U = \pm\sqrt{Eg^2 + Ep^2 + Ed^2}$$

De acuerdo con las características de cada estudio y a los insumos que se emplean, es posible adaptar ambas metodologías al presente trabajo, ya que, dada la homologación de las variables no existe gran relevancia ante la presencia o ausencia de alguna de éstas, sin embargo, a mayor número de variables empleadas, mayor precisión se tendrá en el cálculo de la incertidumbre. En la presente investigación se empleó la incertidumbre estandarizada *UT* (Castro-Galván y Mercader-Trejo, 2000) para la posición en la línea de costa y el cálculo de las tasas de cambio se determinó por cinco variables *Up*, cuatro de la metodología de Fletcher *et al.* (2003) S, t, O y RMS, y una de Martín-Prieto *et al.* (2016) Ep, con la siguiente fórmula:

$$Up = \pm\sqrt{S^2 + t^2 + RMS^2 + O^2 + EP^2}$$

$$UT = \pm\sqrt{\sum U^2}$$

1.5.3.3 Análisis multivariante

Los métodos de análisis multivariante, se emplean para determinar las principales variables que explican mejor la morfodinámica costera. Este análisis es una

herramienta analítica desarrollada desde principios del siglo XX por Pearson, con los estudios sobre las matrices de correlación y el ajuste ortogonal de mínimos cuadrados en 1901, y los trabajos de Pearson (1921) y Hotelling (1933), acerca de los planos de mejor ajuste para un conjunto de observaciones y la generalización del concepto de componentes principales, así como, de las relaciones canónicas que definen el análisis simultáneo de dos o más variables (Peña, 2002), de tal forma, que las variables aleatorias deben estar interrelacionadas, con el objetivo de que ninguno de sus efectos se llegue a interpretar de forma independiente.

El análisis multivariante es un método empleado en los procesos de reducción de dimensionalidad, que son un conjunto de técnicas estadísticas, a través de las cuales, es posible reducir el número de dimensiones en las que está explicado un conjunto de datos con la menor pérdida de información, con el fin de obtener una representación adecuada de los datos (Arroyo-Hernández, 2016). Mediante este análisis, se pretende encontrar las relaciones en un conjunto de variables, de tal manera que sea posible resumir dicho conjunto a través de la construcción de otras variables con la menor pérdida de información (Hair *et al.*, 1999; Peña, 2002).

Existen diferentes métodos de análisis multivariante y de reducción de dimensionalidad, de los cuales, en la presente investigación se ha determinado emplear el método de análisis de redundancia (RDA), por su aplicabilidad para datos en matrices mixtas.

La principal utilidad de un método de reducción de la dimensionalidad para el estudio de la vulnerabilidad costera, recae en la simplificación de la realidad, mediante la construcción y selección de indicadores a partir un conjunto de variables homogéneas, correlacionadas y no jerarquizadas, tomando como base su grado de relación y varianza explicada (Peña, 2002; Cuadras, 2018), por lo que resulta de gran utilidad para la construcción de un índice de vulnerabilidad costera.

1.5.3.3.1 Análisis de redundancia

El análisis de redundancia (RDA), tal como se explica en Legendere y Legendere, (1998), se desprende de los métodos de correlación canónica que presentan grados

de dependencia entre un conjunto de variables, desarrollado en 1977, por Wollemborg, el análisis de redundancia parte de la correlación lineales entre un conjunto de variables con el objetivo de encontrar combinaciones lineales no correlacionadas de las variables predictoras y permite reconocer la máxima correlación que existe entre las variables, de tal manera, que es posible interpretar cuales tienen un mayor peso en la vulnerabilidad costera (Carmona, 1988).

En los análisis canónicos se comparan simultáneamente varias matrices, de tal manera, que las relaciones que guardan sean reproducibles sin perder generalidad, lo que implica la obtención de una matriz de respuesta X y una matriz explicativa Y, produciendo ejes ortogonales de los que se desprenden diagramas de dispersión. El RDA se encuentra altamente relacionado con los análisis de regresión múltiple a través de los cuales se modela un conjunto de variables, de lo que es posible obtener una ordenación de las variables en menos dimensiones de forma similar al análisis de componentes principales ACP (Legendere y Legendere, 1998).

El objetivo de emplear regresiones múltiples en RDA es encontrar la correspondencia entre las variables dentro de un plano de forma ordenada, como en el ACP, donde el eje canónico (símil a componente principal) estará dado por la “dirección en la dispersión multivariada de los objetos” producto de la relación lineal entre las variables explicativas mientras se conserva la distancia euclidiana (Carmona, 1988).

En este análisis, la redundancia deriva del porcentaje de la varianza explicada que se obtiene de las relaciones lineales en el plano, donde cada uno de los vectores explica la proyección de los datos en una sola dimensión, sin alterar la distribución de los objetos en el espacio, por lo tanto, es posible sintetizar, concentrar la información y “simplifican el análisis al permitir trabajar con un número menor de variables” (Peña, 2002), de tal manera que éstas sean aplicadas para la adaptación del índice de vulnerabilidad costera.

1.5.3.4 Índices y vulnerabilidad

Desde mediados del siglo XX, en las Ciencias Sociales y en la Geografía, se aborda el tema de la evaluación de riesgos desde una perspectiva sistemática, en donde un ambiente se considera como un sistema abierto, en constante intercambio de materia y energía, es así como la vulnerabilidad se convierte en un concepto necesario para dicha evaluación. La vulnerabilidad, desde un enfoque físico, está definida como el grado de exposición a una condición de peligro (Cardona-Arboleda, 2001), es un elemento interno de un sistema, producto de la predisposición del mismo ante amenazas, que perturben las condiciones normales del ambiente (Foschiatti, 2009). Si bien la vulnerabilidad forma parte de los atributos de un sistema, se hace necesaria su medición para la evaluación de riesgos y la planificación territorial, es a través de metodologías cuantitativas o cualitativas, que coadyuvan a establecer la sensibilidad de un sistema. En este sentido, la aplicación de indicadores o la creación de índices contribuyen, en gran medida, a la cuantificación del grado de vulnerabilidad.

1.5.3.4.1 Índice de Vulnerabilidad costera (IVC)

Un índice, es una metodología estadística aplicada a la recopilación de una variable, que refleja su evolución en un periodo de tiempo y en un espacio determinado, pueden ser de carácter cualitativo o cuantitativo y ampliamente vinculados a los fenómenos físicos, económicos, políticos y sociales, su principal aplicación está enfocada a la evaluación del fenómeno, seguir sus tendencias y generar modelos de comportamiento (Mondragón-Pérez, 2002). Se debe tener en consideración, que los índices no son reflejo exacto de la realidad, si no que tienen una aproximación únicamente empírica y, por lo tanto, arrojan resultados desde una perspectiva ideal, sin embargo, es una herramienta a través de la cual, es posible realizar comparaciones en la magnitud de algún fenómeno en un marco de referencia espacio-temporal.

Específicamente, el índice de vulnerabilidad costera es un método estadístico, que permite determinar mediante elementos cuantitativos, el grado de vulnerabilidad de la costa y de gran utilidad para hacer una comparación espacial de ésta (Boruff *et*

al., 2005). La presente investigación se basa en cinco índices, cada uno aborda la vulnerabilidad bajo una metodología similar, sin embargo, considera múltiples variables diferentes (Cuadro.3) sobre las cuales, a través del método de análisis multivariante, se seleccionarán aquellas que para la zona de estudio resulten mayormente relevantes.

Cuadro. 3: Variables empleadas por cada índice de vulnerabilidad costera. Modificado de Núñez et al., 2016)

Variables \ Índices		Gornitz <i>et al.</i> (1994)	McLaughlin y Cooper (2010)	Palmer <i>et al.</i> (2011)	Kumar y Kunte (2012)	Núñez <i>et al.</i> (2016)
Físicas	Altura de la ola significativa	✓			✓	✓
	Ancho de la duna			✓		
	Ancho de la playa			✓		
	Batimetría			✓	✓	
	Buffer al interior en m del MHW		✓			
	Cambio en el nivel del mar				✓	✓
	Distancia de la vegetación detrás de la playa			✓		
	Elevación	✓	✓		✓	✓
	Estado morfodinámico		✓			
	Geología	✓				✓
	Geomorfología	✓	✓		✓	✓
	Nivel de marea de tormenta				✓	
	Pendiente					✓
	Porcentaje de afloramiento rocoso			✓		
	Rango de marea	✓	✓		✓	✓
Ríos		✓				
Tasa de cambio	✓			✓	✓	
Hidro meteorológicas	Índice de frecuencia e intensidad de huracanes	✓				
	Media anual de ciclones extratropicales	✓				
	Probabilidad anual de huracán	✓				
	Probabilidad anual de tormenta tropical	✓				
	Probabilidad de tormenta		✓			
	Velocidad de avance promedio	✓				
Socioeconómicas	Carreteras		✓			
	Designación de conservación		✓			
	Patrimonio cultural		✓			
	Población		✓			
	Uso de suelo y vegetación		✓			
	Vías férreas		✓			

1.5.3.4.1.1 Índice de Gornitz *et al.* (1994)

Gornitz fue el pionero en implementar un índice de vulnerabilidad costera, que resulta de utilidad para generar proyecciones sobre la respuesta y evolución de las

condiciones físicas que alteren la estabilidad del sistema. Este índice, que se diseñó en 1994, se aplicó en la zona costera del Golfo de México de Estados Unidos de América y, dada la cercanía a la zona de estudio, se determinó emplearlo al contemplar características hidrometeorológicas e hidrodinámicas similares, es así, que resulta ideal para su adaptación a los fines de la presente investigación; contempla, además, parámetros físicos que se ajustan a los observados en el área de interés y son determinantes para la morfodinámica costera. Dicho índice de vulnerabilidad, se diseñó para que se aplique en distintos segmentos en la zona costera.

Cada una de las variables (Cuadro. 3) que componen el índice se ponderó en una relación 1-5, donde 5 es indicador de mayor vulnerabilidad y 1 baja vulnerabilidad (Véase Anexo 1), que clasifica las características físicas de la costa con respecto a la respuesta ante ciertos fenómenos perturbadores. Una vez aplicado el índice, en la zona de estudio, aquellas áreas de menor elevación, con las mayores tasas de cambio negativas, mayor rango de marea y que se encuentran más expuestas al embate de fenómenos hidrometeorológicos, evidencian mayor vulnerabilidad que aquellas en donde las mareas son de menor amplitud, se encuentran más elevadas, con tasas de cambio anual bajas y poco expuestas al embate de fenómenos hidrometeorológicos. La implementación de este índice da pie a la zonificación de la costa en razón de la vulnerabilidad; por otra parte, al no considerar elementos socioeconómicos, como las actividades turísticas, la construcción, el uso de suelo, etc., no cuantifica el impacto que tienen éstas en la región, por lo tanto, no se pueden incluir medidas para esas variables en los planes de un manejo costero sustentable.

1.5.3.4.1.2 Índice de McLaughlin y Cooper (2010)

En este índice, se considera la constante interacción entre cada componente de la naturaleza, es responsable de la dinámica costera y se encuentra directamente involucrado con la vulnerabilidad de ésta. Por otra parte, las actividades antrópicas también se suman a esta condición, ya que promueven cambios significativos en las costas. Esta propuesta, contempla los procesos naturales y las actividades humanas. Además de considerar las características físicas, económicas y sociales

del área de estudio (Cuadro. 3), adapta parámetros y valores (Véase anexo 1) según la escala de análisis, de tal forma que se divide en nacional, regional y local; por lo tanto, para llevar a cabo el análisis, se divide el área estudiada en celdas de distinto tamaño según la escala de análisis, para la asignación de los valores de cada una de los indicadores.

En esta metodología, la evaluación de la vulnerabilidad costera requiere de la valoración de todos los agentes, procesos y fenómenos con implicación directa o indirecta en la zona costera, con la aplicación del índice, aquellas áreas que se constituyen de playas sin dunas, con urbanización cercana a la línea de costa, con mayores tasas de cambio negativas tienen una mayor vulnerabilidad. Cabe destacar, que este índice resalta el papel significativo que tienen las actividades antrópicas dentro de la vulnerabilidad costera, permite la aplicación y orientación hacia políticas públicas de gestión y planeación del manejo de las mismas. En este sentido, con base en la escala de trabajo, se determinó emplear el índice local con valores ponderados para determinar la vulnerabilidad relativa (Véase anexo 1)

1.5.3.4.1.3 Índice de Palmer *et al.* (2011)

Este índice, al igual que el propuesto por Gornitz *et al.* (1994), enmarca la evaluación de la vulnerabilidad costera y toma en cuenta las características físicas de la costa (Cuadro. 3). La estimación se realiza a través del procesamiento de recursos de percepción remota y sistemas de información geográfica, por lo que se considera una metodología que se adapta mejor a una escala regional o local, gracias a que no está basada en datos de largo plazo (Bryan *et al.*, 2001). La metodología consiste en dividir la zona de interés en celdas y clasificarlas de acuerdo con sus características físicas y el grado de vulnerabilidad, a través parámetros que resultan útiles para la evaluación. En este se consideran cinco parámetros físicos (Véase anexo 1), con base en la disponibilidad de información y la viabilidad de evaluación el índice.

A partir de éstos, se proyecta un nivel de respuesta bajo diferentes magnitudes de impacto, según la ponderación con base en nivel de percepción de la amenaza, valiéndose de la comparación de datos de impacto en la erosión costera. La

estandarización de los datos corresponde del 1 extremadamente bajo y al 4 alto (Véase anexo 1).

Para Palmer *et al.* (2011), de los indicadores, los de anchura de la playa, anchura de la duna y la distancia a la isobata de 20 m son los que serán más determinantes para el cálculo del IVC, puesto que:

- 1) La anchura de la playa está directamente relacionada con la pendiente y con la capacidad de disipación de la energía de la ola, teniéndose así una relación directamente proporcional (a mayor anchura de la playa, mayor capacidad para disipar la energía de la ola).
- 2) La anchura de la duna refleja la protección de la costa ante la erosión, proporciona una idea del sedimento disponible para amortiguar el impacto de fenómenos que modifiquen la dinámica general de los materiales.
- 3) La distancia a la isobata tiene una estrecha relación con la energía de las olas y la marea, bajo una relación directamente proporcional con la distancia fuera de la costa a la isobata.

En este IVC, los factores socioeconómicos, no son considerados directamente, sino que se toman en cuenta, una vez que se evaluó la vulnerabilidad física y únicamente elementos como las actividades comerciales, infraestructura, recursos recreativos, áreas de subsistencia, áreas ecológicamente importantes y propiedades residenciales a una distancia no mayor a 100 m de la línea de máxima marea.

1.5.3.4.1.4 Índice de Kumar y Kunte (2012)

Esta propuesta de IVC analiza la vulnerabilidad física que se deriva de la presión por el aumento en la población de las ciudades costeras y por el incremento en el nivel del mar, expresa la vulnerabilidad relativa a través de ocho indicadores físicos (Cuadro. 3), cuya ponderación (Véase anexo 1) y evaluación se realiza con la aplicación de una fórmula algebraica, que permite el reconocimiento general de las condiciones costeras para la aplicación en proyectos de protección y manejo.

Las características propias de cada variable resaltan la dinámica altamente cambiante de la zona costera, por lo tanto, los valores de cada una de las variables

mencionadas anteriormente, se ponderaron con el objetivo de simplificar su aplicación en el índice. Los resultados obtenidos de la aplicación de este índice guardan una íntima relación con las tasas de cambio de la línea de costa donde la presencia de desembocaduras puede ser un elemento anómalo para la evaluación de la vulnerabilidad ya que arroja tendencias de cambio altamente dinámicas. Por otra parte de las variables empleadas, la variación en el nivel del mar no es significativa, sin embargo, si lo es la batimetría, ya que interfiere con la altura de la ola, si bien, este índice no considera dentro de su fórmula a la población como un agente de incremento en la vulnerabilidad costera, si expone que las actividades antrópicas se encuentran vinculadas con el aprovechamiento de la costa o de las áreas adyacentes a ésta y que pueden actuar como agentes de cambio, que se traducen en alteraciones en la dinámica natural de la zona costera.

1.5.3.4.1.5 Índice de Núñez *et al.* (2016)

Este índice de vulnerabilidad se basa en indicadores cuantitativos que representan características físicas de la zona costera (Cuadro. 3) y, por tanto, resulta de utilidad para determinar la vulnerabilidad relativa. Este índice fue seleccionado ya que al ser aplicado en el litoral del estado de Tabasco comparte características físicas con el área de estudio. Las variables empleadas están clasificadas en dos categorías, geólogo-geomorfológicas y físico-hidrodinámicas, cada una con su ponderación correspondiente (Véase anexo 1), en donde se considera la exposición a los fenómenos como la erosión y la inundación.

La metodología compara cada una de las variables, contra el resultado de modelos previamente implementados en otras zonas del mundo, se basa en seis parámetros, cada uno con valores ponderados, que van de 1 (muy baja vulnerabilidad) a 5 (muy alta vulnerabilidad), con el fin de homologar los valores e integrarlos a la ecuación del IVC. El cálculo de las variables se llevó a cabo a través de la segmentación del litoral en celdas y la rasterización de cada uno de los indicadores, a partir de la utilización de distintos softwares de análisis geográfico. De la aplicación del índice, los valores resultantes son reclasificados en cuatro clases, con base en percentiles para definir el grado de vulnerabilidad. De la aplicación del índice, aquellas áreas

con mayores tasas de cambio negativas, con mayor altura de ola y menor pendiente tienen una mayor vulnerabilidad, en esta región el cambio relativo en el nivel del mar es un elemento de relevancia para la medición de la vulnerabilidad.

1.5.4 Materiales y métodos: Cuadro general de la metodología

La metodología empleada en la presente investigación está dividida en tres etapas; como se muestra en el siguiente diagrama (Fig.8). La primera se divide en tres bloques, de los que se obtiene el marco teórico, la metodología y la caracterización de la zona de estudio, así como la selección y creación de los insumos cartográficos necesarios para el análisis de la morfodinámica costera, además del trabajo de campo que consistió en la realización de perfiles de playa, recorridos y descripciones geomorfológicas *in situ*.

De lo anterior, se desprende la segunda etapa, en donde se obtienen los elementos cuantitativos y cualitativos para la determinación de la vulnerabilidad, con la morfometría y la morfogénesis, esto a través de fotointerpretación, análisis morfodinámico con tasas de cambio, así como de perfiles de playa y las variaciones anuales de la línea de costa, elementos necesarios para el desarrollo del índice de la vulnerabilidad.

Durante la tercera etapa, a través del análisis multivariante (RDA), se realiza la selección de las variables necesarias para la adaptación del índice. Una vez seleccionadas, con álgebra de mapas se aplica el índice de vulnerabilidad costera adaptado, y, por tanto, se genera la zonificación de la vulnerabilidad de la zona costera norte del municipio de Actopan, Veracruz

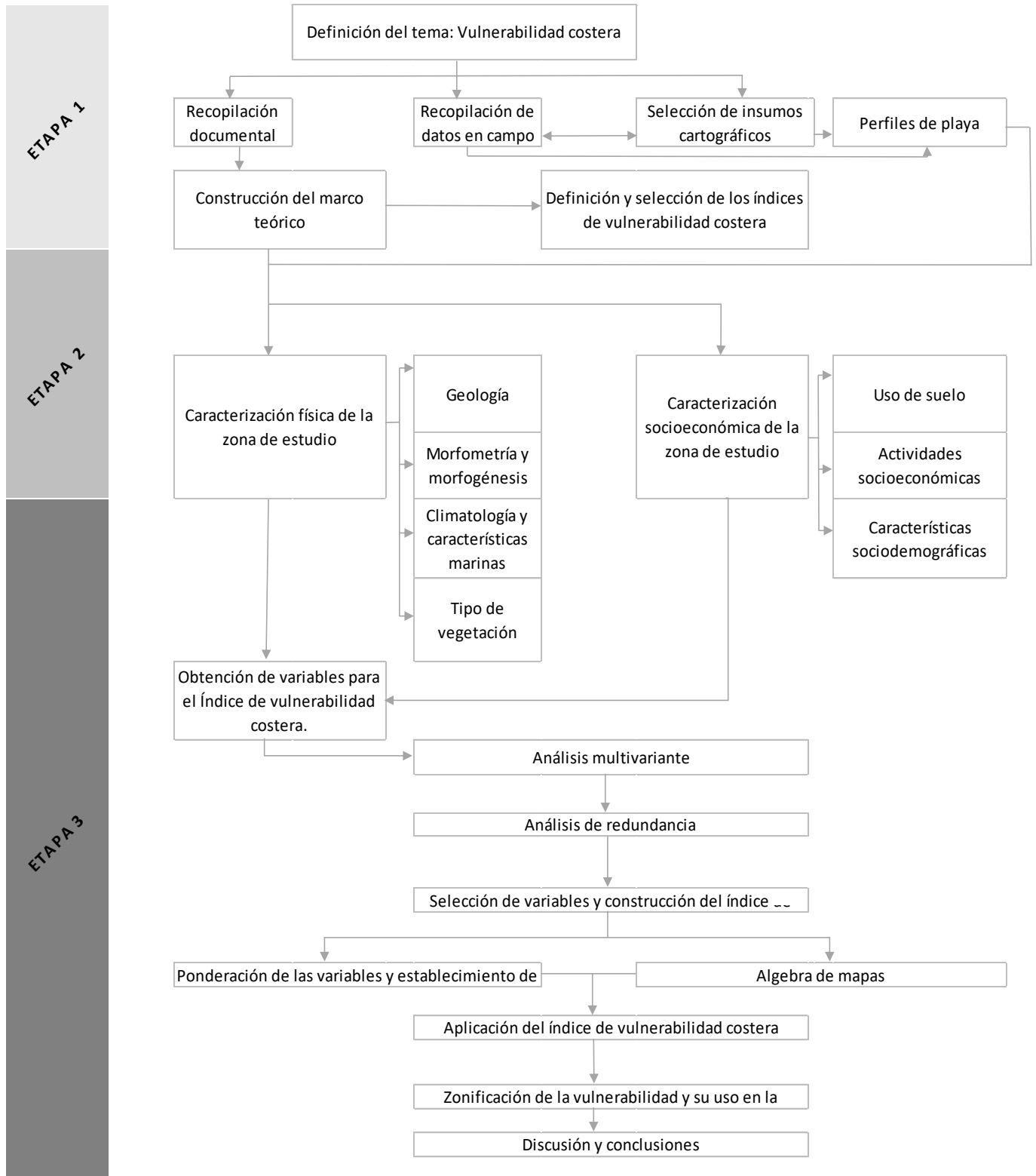


Fig. 8. Diagrama general de la metodología

Capítulo 2. Caracterización geográfica del área de estudio.

2.1 Localización geográfica

El área de estudio corresponde a la zona costera de la porción norte del municipio de Actopan, Veracruz, que colinda al Norte, con el municipio de Alto Lucero de Gutiérrez Barrios; al Sur, con los municipios de Úrsulo Galván, Puente Nacional y Emiliano Zapata; al Oeste, con Naolinco; y al Este, con el Golfo de México (INEGI, 2009). Comprende las coordenadas $19^{\circ}40'39.07''\text{N}$, $96^{\circ}23'41.86''\text{O}$ y $19^{\circ}35'52.35''\text{N}$, $96^{\circ}22'25.19''\text{O}$, desde la desembocadura del río El Limón hasta la boca de la Laguna La Mancha. Si bien la ley establece a la zona costera como “el conjunto donde mar y tierra ejercen una intensa influencia mutua, que se constituye por las aguas marinas hasta el límite de la plataforma continental y la franja de tierra adyacente hasta el límite municipal” (SEMARNAT, 2006), para los fines del presente trabajo, se marcó como zona costera, el área correspondiente al área de influencia marina directa (zona de humedales) (Fig.9) y la isobata de 20m como límite exterior (Fig. 20).

La zona costera del estado de Veracruz que se localiza en el centro del Golfo de México abarca una longitud aproximada de 750 km donde domina la provincia fisiográfica de la llanura costera del golfo, la zona de interés se encuentra en la provincia de la Faja Volcánica Transmexicana, en la subprovincia de la margen oriental de pie de monte, en el macizo ígneo de Palma Sola al sur de la sierra de Chiconquiaco, su morfología responde a la actividad volcánica del Mioceno medio y superior (Geissert-Keintz, 2006; Geissert-Keintz, y Enríquez-Fernández, 2011) que interrumpe la llanura costera del Golfo, caracterizada por la presencia de montañas bajas, premontañas, piedemontes intensamente diseccionados con rocas de origen volcánico y volcano-sedimentarios, lomeríos y llanuras de dominio fluvial, de tal forma, que el litoral se conforma de una sucesión de acantilados y plataformas características de la región centro de costa mixta del Golfo de México (Ortiz-Pérez, 2005; Bollo-Manent et al., 2015).

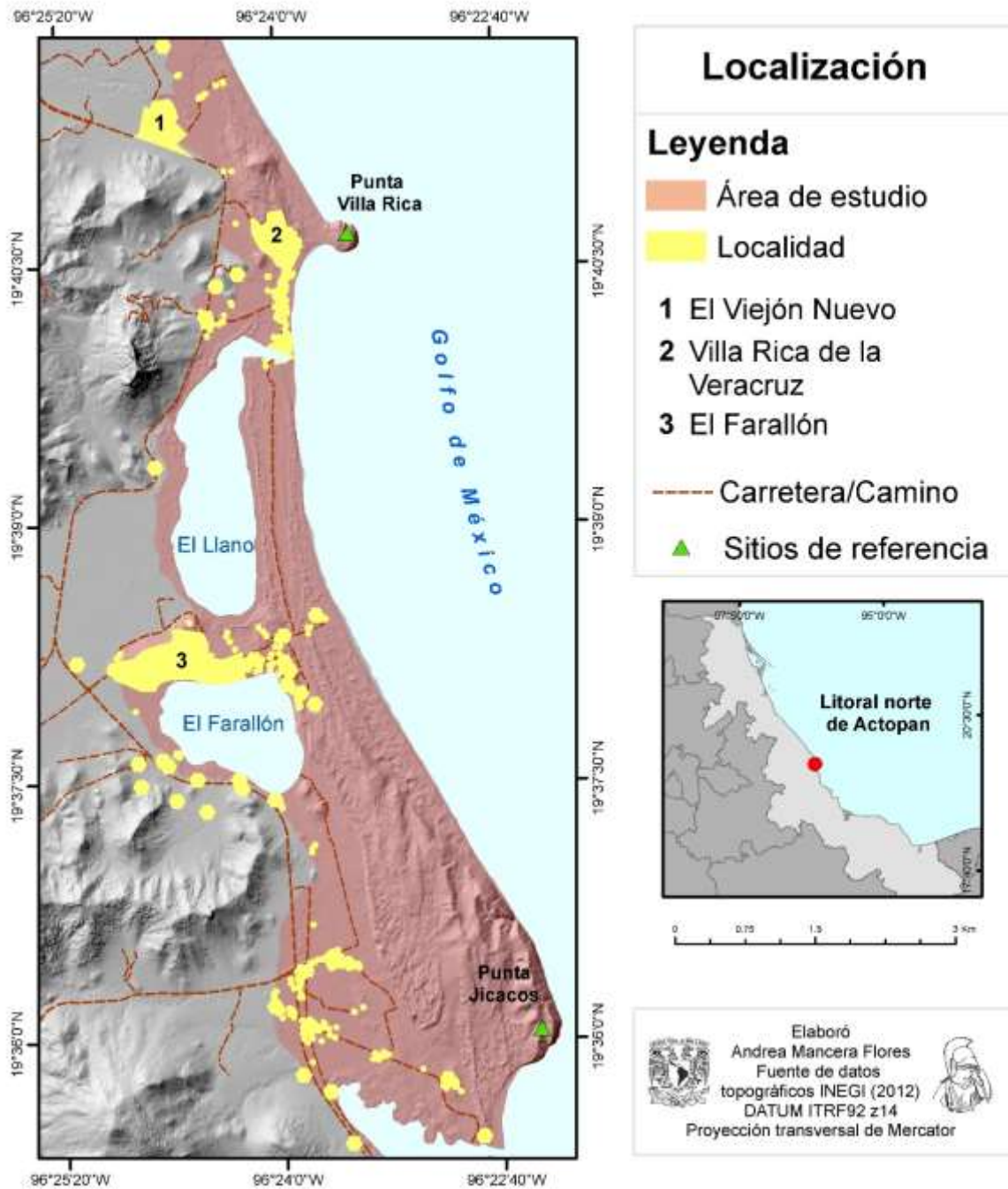


Fig. 9. Localización del área de estudio.

2.2 Características geográficas

2.2.1 Constitución y estructuras geológicas

La provincia fisiográfica de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM), se encuentra localizada en el centro de México, desde la costa del Pacífico (Bahía Banderas, Nayarit) hasta la costa del Golfo de México (Palma Sola, Veracruz), en una dirección transversal E-O. Esta provincia se encuentra constituida por 8,000 estructuras volcánicas de distintas composiciones aproximadamente. Dentro de los campos volcánicos, se destaca el macizo Ígneo de Palma Sola, estribación más oriental de la FVTM y cuya actividad volcánica estuvo presente durante el Mioceno medio y tardío ~7-3.5 Ma (Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

Cabe destacar, que, gracias a la constitución geológica de la región, algunos investigadores consideran la actividad volcánica de Palma Sola, como ajena a la FVTM y relacionada con la Provincia Alcalina Oriental Mexicana, dada la existencia de rocas con afinidad alcalina o calcicalino, según estudios de Robin *et al.* (1982, en Viera-Décida *et al.*, 2009). Sin embargo, trabajos como el de Negendank *et al.* (1985) evidencian la relación existente de las características petrológicas del macizo con la fusión parcial de la corteza derivada del proceso de subducción y relacionada a la génesis de la FVTM (Gómez-Tuena, 2002; Gómez-Tuena *et al.*, 2005).

El macizo de Palma Sola corresponde a una estructura volcánica compleja, constituida por distintos eventos volcánicos, de tal forma, que se asocia la actividad de esta región, como resultado de la “tectónica distintiva de transarco en el régimen de subducción de la Placa de Cocos” (Gómez-Tuena, 2002), donde la actividad magmática fue controlada por un sistema de fallas de orientación E-NE en el basamento. Las edades aproximadas de los diques y dacitas (Ej. Cerro Los Metates y Cerro Cantera) son de 6.2 ± 0.2 Ma. Según dataciones radiométricas de Cantagrel y Robin (1979, en Negendank, *et al.*, 1985), así como la presencia de rocas intrusivas principalmente gabro y diorita en el sur del tómbolo de Villa Rica. La edad aproximada de las rocas intrusivas para la región de Palma Sola oscila entre los 15.6 y 10.9Ma, lo que reafirma la relación y pertenencia de la actividad magmática de Palma Sola con la FVTM (Fig.10). Como resultado de dicha actividad volcánica del Mioceno medio-superior, se conformaron grandes estructuras en un área de

aproximadamente 25km alrededor de Villa Rica; en la actualidad 2/3 de éstas se encuentran bajo el nivel del mar a consecuencia del desplome y hundimiento de la estructura (Balcázar-Arias, 2009).

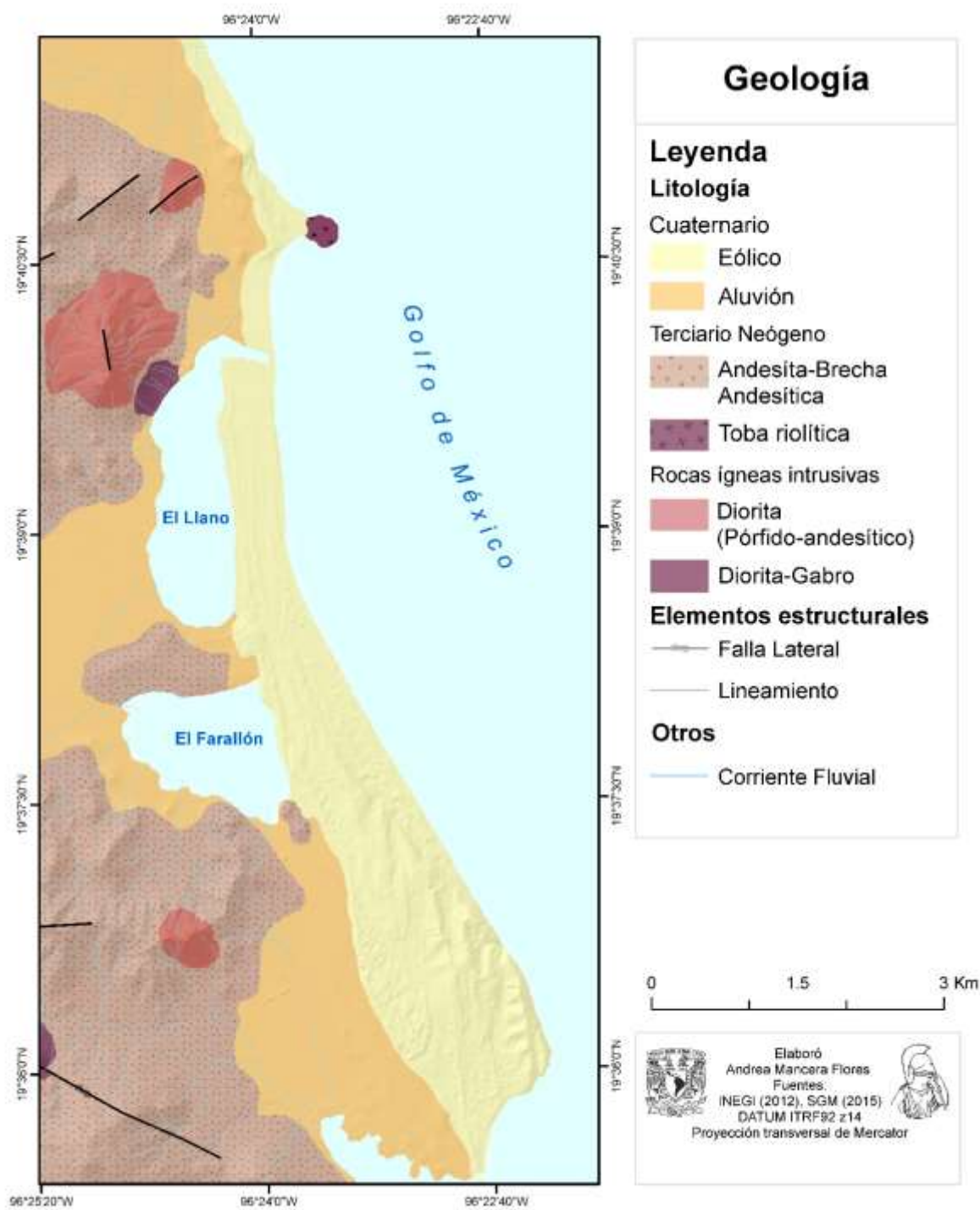


Fig. 10. Mapa geológico general.

- **Estratigrafía y sedimentología**

La estratigrafía de la región (Fig.10), detallada por Gómez-Tuena (2002) con base en estudios de López y Torres (1984) y López (1991), detalla la composición del basamento pre-mesozoico, que se constituye de esquistos de moscovita y rocas asociadas a complejos intrusivos, las edades determinadas, tanto en los esquistos como en los cuerpos intrusivos, van de 269 ± 20 Ma, a las que le sobreyacen rocas sedimentarias continentales con componentes volcánicos del Triásico tardío (Fm. Huizachal), seguidas de secuencias carbonatadas de plataforma y de cuenca (caliza dolomitizada, dolomía y secuencia sedimentaria carbonatada del Mesozoico tardío), del Jurásico Superior y el Cretácico (Fm. Orizaba y Guzmantla), que revelan una transición de un ambiente de plataforma externa a plataforma interna con presencia de lagunas dispersas (Pérez-Quezadas *et al.*, 2017), hasta el Cenozoico. Por otra parte, el evento de la Orogenia Laramide, que generó la Sierra Madre Oriental dio pie a la deposición hasta el Mioceno Temprano (Fm. Concepción) de sedimentos arenosos y formación de conglomerados, muestra de ambientes continentales y de transición.

El magmatismo presente en el Mioceno medio y tardío descrito anteriormente, se caracteriza por el emplazamiento de cuerpos intrusivos, principalmente gabro y diorita, seguidas de rocas ígneas extrusivas, como evidencia de la actividad magmática de la FVTM (SGM, 2015). En esta región existen distintos eventos volcánicos, que inician con rocas de características calco-acalina de andesitas básicas ricas en olivino, andesitas, dacitas e intrusiones de microdioritas del Mioceno medio, cubiertas concordantemente por densos depósitos piroclásticos. Además, se identifican hacia el Mioceno tardío derrames basálticos con espesores en hasta 1500m en la porción norte del macizo (Demant y Robin, 1975).

Hacia finales del Mioceno, es posible encontrar derrames basálticos en el macizo de Palma Sola que afloran en su porción norte y en la Sierra de Chiconquiaco, sin embargo, no existen afloramientos en el área de estudio. Durante el Plioceno medio la actividad volcánica se revela por la depositación de tobas andesíticas y brechas dacíticas a rio-dacíticas (Pérez-Quezadas *et al.*, 2017), Hacia el Cuaternario si bien

la actividad volcánica siguió hacia el centro del continente (ej. Campo volcánico monogenético de Xalapa), hacia la costa no hay presencia de actividad magmática durante este periodo.

Por otra parte, a partir del Pleistoceno, los depósitos volcánicos fueron intemperizados y erosionados, de tal forma, que estos procesos dieron lugar a la formación de cuellos volcánicos (Ej. Cerro los Metates) y a la deposición de sedimentos que tienen su origen en el intemperismo, erosión fluvial y abrasión marina de las formaciones volcánicas, así como el emplazamiento de cuerpos lagunares en la depresión tectónico-abrasiva, producto del colapso de las estructuras volcánicas del Mioceno.

La conformación actual de la costa se origina por las variaciones en el nivel del mar hace aproximadamente 6mil años y a la deposición de arena fina (<0.2mm) rica en sílice, feldespatos, biotita, cuarzo, microlitos, augita, ilmenita y clorita producto de la actividad fluvial, y el arrastre marino y eólico en planicies fluviales, formadas a inicios del Holoceno sobre las que se constituyeron cordones litorales consecuencia de la acción del oleaje y el viento (Moreno-Casasola, 2010; Arellano *et al.*, 2019).

2.2.2 Morfogénesis y morfometría del relieve costero

Morfogénesis

Dentro de los análisis geomorfológicos, los análisis morfogenéticos parten de la necesidad de explicar las relaciones entre los procesos endógenos, que controlan la estructura del relieve y los procesos exógenos que son los responsables de la modelación de la superficie terrestre. Para esta identificación genética, se analiza la acción de los agentes modeladores y el papel que cumplen en la configuración del relieve, a través de la descripción analítica y sintética de la dinámica que le dan origen.

De tal manera, que en los análisis morfogenéticos se presenta una aproximación actual e histórico-evolutiva, que explican el origen y los procesos involucrados en la configuración actual del relieve (Pedraza-Guilsanz, 1996). Las acciones de los agentes del modelado mantienen una marcada complejidad y dominio, adaptándose

de acuerdo con las características ambientales, de tal manera, que la morfología depende directamente de la conjugación de estos mecanismos externos (Muñoz, 1995).

De forma general, la geometría de la costa veracruzana es consecuencia de la evolución tectónica del Golfo de México en la región centro-norte, la zona costera está constituida por planicies compuestas de sedimentos aluviales y arenosos, producto del proceso de sedimentación costera en la depresión prelitoral durante el Cuaternario y que se mantiene en la actualidad, intercaladas con acantilados volcánicos del Terciario (Hernández-Santana *et al.*, 2007). La región central de la costa veracruzana que se caracteriza por la presencia de costas acumulativas en bahías abiertas, y salientes rocosos con un patrón escalonado, es donde se encuentran campos activos y estabilizados de dunas.

En este sentido, en el área de estudio se encuentran cuatro principales dominios morfogénéticos con respectivas morfologías (Fig.11).

- 1) Marino
- 2) Eólico
- 3) Fluvial
- 4) Lacustre.

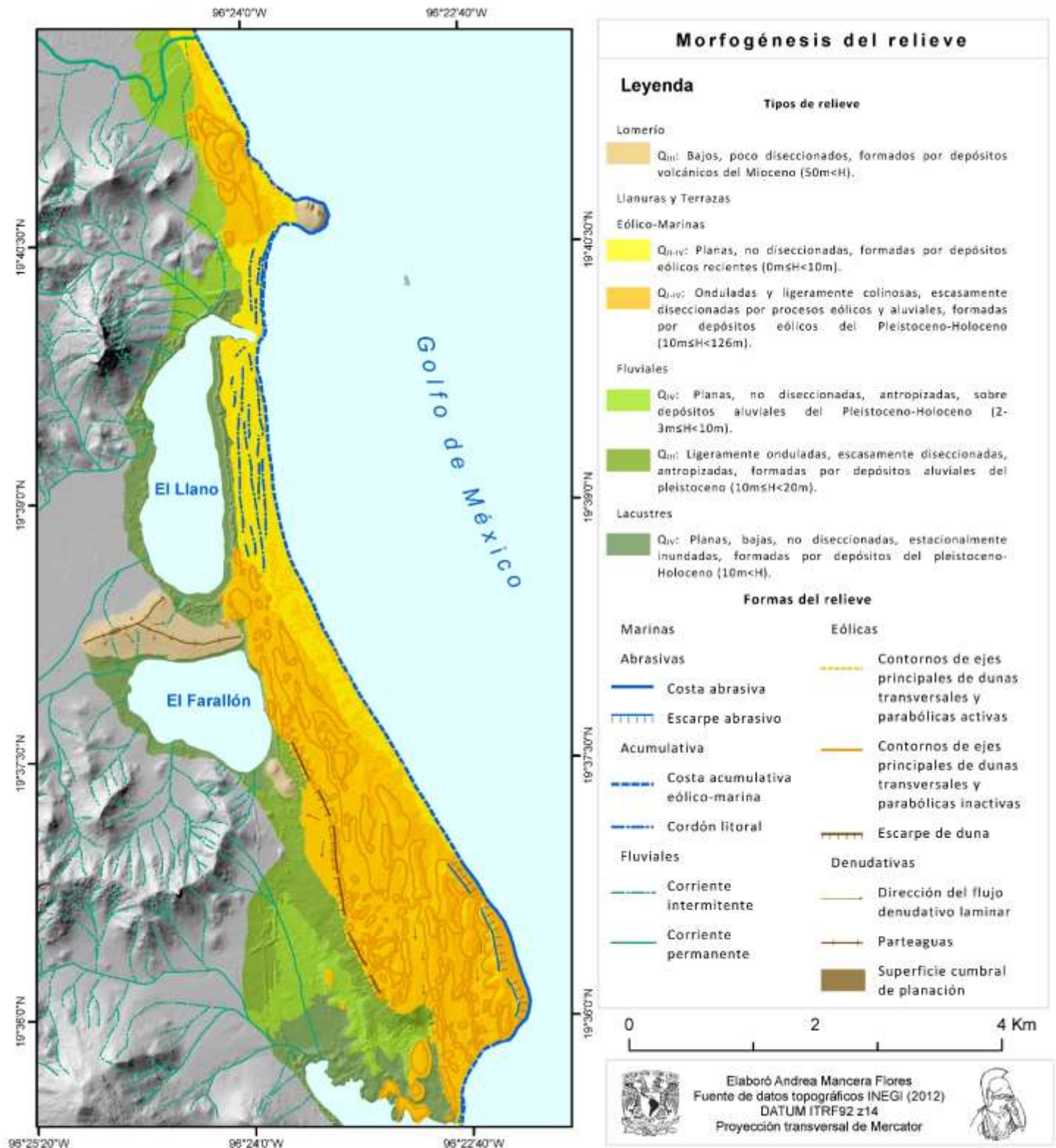


Fig. 11. Mapa morfogenético. Elaboración propia. Base de datos topográficos INEGI (2012).

- **Dominio marino**

Cordones litorales

Paralelos a la línea de costa, con orientación N-S (Fig. 11), que apenas superan los 5msnm y constituyen evidencias de antiguas líneas de costa, se vinculan a las variaciones del nivel del mar; estos cordones se formaron durante el Holoceno, cuando el nivel del mar se estabilizó a un nivel similar al actual hace aproximadamente 6 mil años (García-Gil, 2006), y se correlacionan según Hernández-Santana *et al.* (2007), con aquellos medidos en la costa del Pacífico mexicano por Curray *et al.* (1969), cuya edad fue estimada entre 3600-4750 años, así como a aquellos encontrados y datados por Sluyter (1997), en la Laguna Catalina, de una antigüedad de <2440 años. Los cordones litorales se encuentran sobre una llanura eólica baja (Geissert y Debroeucq, 1995), en la porción central del área.

Costa acumulativa

Formada por la acumulación arenosa, constituidas de sedimentos de origen volcánico, que forma playas anchas de pendientes suaves, producto de los procesos de transporte fluvial y deposición marina (Fig.12 a). En la porción septentrional del área, la presencia de un promontorio rocoso semicircular, de composición riolítica, favoreció la formación de una barra de arena y la consecuente formación de un tómbolo (Fig.11), que sobreyace depósitos fluviales del Holoceno temprano. En la porción acumulativa de este tómbolo, se desarrollaron cadenas de dunas parabólicas y transversales, en dirección preferencial del viento NE-SW (Fig.14), mientras que también es posible reconocer áreas de deflación y abrasión marina (Fig.13), producto de la acción eólica y marina respectivamente (Geissert-Keintz, 2006).

Como consecuencia de la presencia de la laguna El Llano, la continuidad de la costa se interrumpe por la presencia de una barra en la boca de la laguna (Fig.12b), que se reduce durante la temporada de tormenta, lo que permite el intercambio hídrico entre la laguna y el mar. Este tipo de costa es dominante en el área de estudio, únicamente se interrumpe por los acantilados de Punta Villa Rica, al norte, y Punta La Mancha, al sur.



Fig.12. Morfologías acumulativas: a) Playa farallón; b) Barra de arena en la boca de la laguna El Llano. Trabajo de campo mayo-junio 2018



Fig. 13. Plataforma de abrasión expuesta al norte del Tómbolo de Villa Rica, evidencia de la mayor exposición a la dinámica marina y eólica. Trabajo de campo mayo-junio 2018



Fig.14. Barra de arena que forma el Tómbolo de Villa Rica, a la izquierda se observa la acumulación de arena producto de la actividad marina y eólica y a la derecha Punta Villa Rica. Trabajo de campo mayo-junio 2018

Costa abrasiva

Formada por acantilados modelados por la abrasión marina, como consecuencia de la acción del oleaje sobre el afloramiento rocoso, al norte de Punta Villa Rica (Fig.15). Está conformada por un acantilado rocoso semicircular, de composición riolítica, que corresponde a la actividad volcánica del Mioceno, con dos fracturas paralelas en dirección NE-SW, sobre las que la abrasión marina favorece la acción procesos de remoción en masa, como derrumbes y caída de bloques, presentes en la base del acantilado. Hacia el sur, en Punta Jicacos, modelada sobre un bloque levantado y basculado hacia el SW, se extiende un acantilado que se conforma de dunas consolidadas, cuyo material erosionado se encuentra depositado en su base (Geissert-Keintz, 2006).



Fig. 15. Acantilado de Punta Villa Rica, costa abrasiva. Trabajo de campo mayo-junio 2018

- **Dominio eólico**

Llanura eólica

Se conforma de depósitos eólicos y del reciente, consecuencia de la estabilización en el nivel del mar, hace aproximadamente 6 mil años, sobre la que se desarrollaron campos de dunas y cordones litorales (García-Gil, 2006).

Dunas parabólicas y transversales

Formadas como consecuencia de la acción del viento durante el Holoceno, tras la estabilización del nivel del mar y la progradación de línea de costa. Estas acumulaciones eólicas sobreyacen cordones litorales antiguos, y tienen una orientación N-S, en las dunas activas desprovistas de vegetación arbórea, que se encuentran más cercanas a la costa (Fig.16b). El viento forma microrelieves o *ripple marks* (Fig.16a). Es posible encontrar depresiones producto de la deflación eólica (Geissert y Debroeucq, 1995). Las dunas se componen principalmente de arenas muy finas <0.125mm, ya que el viento remueve con mayor facilidad las partículas menores a 0.250mm de diámetro (Geissert-Keintz, 2006). Estas acumulaciones de arena mantienen una alineación asimétrica de hasta 70 m de altura. En el campo de dunas que se localiza en playa Farallón (Fig. 17) de aproximadamente 5km de longitud, las dunas superan los 100msnm (Geissert-Keintz, 2006), mismo que se encuentra estabilizado por la vegetación arbórea y está afectado por procesos de erosión fluvial.



Fig. 16. Dunas como evidencia de la acumulación de sedimentos por la actividad eólica: a) Duna activa con microrelieve (*ripple Mark*) y colonización de vegetación pionera; b) Dunas inactivas (al fondo) cubiertas con vegetación de matorral y dunas activas al frente con vegetación pionera de dunas. Trabajo de campo mayo-junio

2018



Fig.17. Dunas fósiles de Punta Jicacos al sur del área de estudio, sobre las que continua el depósito de arena y el desarrollo de dunas activas que cubre la vegetación. Tomado de Moreno-Casasola (2010).

- **Domino fluvial**

Llanuras fluviales

Emplazadas en la depresión prelitoral (Fig.11), constituidas por depósitos aluviales del Pleistoceno-Holoceno; se componen de llanuras escalonadas y terrazas producto de la deposición fluvial, actualmente cubiertas por pastizales y cultivos. En el escurrimiento del río El Limón, así como en otros ríos secundarios que alimentan las lagunas El Llano y Farallón, la llanura fluvial presenta un desarrollo típico de planicie con amplios meandros y lecho divagante (García-Gil, 2006).

- **Dominio lacustre**

Llanuras de inundación

Formadas por cuerpos lagunares (Fig.18) situados en una depresión prelitoral, que es una zona plana o levemente deprimida, que abarca desde el cordón litoral más antiguo hasta el pie de la sierra volcánica (Fig.11). Estas llanuras, en las áreas cercanas a las lagunas emplazadas posiblemente sobre el cauce abandonado de un río, conforman planos de inundación menores a 10msnm, sobre los que se

desarrollan comunidades de manglar dadas las condiciones de saturación hídrica (Geissert y Debroeucq, 1995).



Fig. 18. Fotografía panorámica de la boca de la laguna El Llano, al fondo el Cuello volcánico (*neck*) “Cerro de Los Metates”. También se observan comunidades de manglar que bordean la laguna. Trabajo de campo mayo-junio 2018

Morfometría

La morfometría, definida como el área cuantitativa de la geomorfología, desarrollada desde mediados del siglo XX, refiere a los elementos geométricos de las formas del terreno en conjunto con los procesos matemáticos, a través de los cuales es posible determinar la sucesión de procesos determinantes para la configuración del terreno (Pedraza-Guilsanz, 1996; Pike *et al.*, 2009). La morfometría del relieve se sustenta en el aprovechamiento de los recursos matemáticos y computacionales para la generación de modelos abstractos de carácter cuantitativo, que se aproximan a la realidad, con los cuales se lleva a cabo la medición de procesos que actúan sobre la superficie y cuya interacción determina la constitución del relieve.

La utilización de estos modelos “permite una elevada precisión en la descripción de los procesos” (Felicísimo-Pérez, 1994). En la presente investigación, se tomó como base el modelo digital de elevación (MDE), que consiste en un elemento cuantitativo, que expresa la superficie con datos continuos ráster; consiste en una matriz de rectángulos regulares o píxeles, cada una de estas celdas tiene un valor asociado a la elevación (Hengl y Evans, 2009), a partir de éste, es posible obtener

modelos que representan elementos geomorfológicos, tales como la pendiente y su orientación, la energía del relieve, etc. (Felicísimo-Pérez, 1994).

Para la evaluación de la vulnerabilidad física costera, con base en las variables que se emplearon en los índices, sobre los que se basa la presente investigación, se consideró necesaria la obtención de dos parámetros morfométricos, la elevación y la inclinación del terreno, para cuyo cálculo se emplearon los modelos digitales de elevación (MDE) de INEGI (2012), con resolución espacial a 5 m.

- **Altimetría**

La altimetría es un parámetro morfométrico, que se basa en la diferencia de altura entre un punto dado y el nivel medio del mar (valor 0 de elevación). Este parámetro puede extraerse a partir de las curvas de nivel de las cartas topográficas, con sensores satelitales o bien producto de la interpolación de una nube de puntos de datos LIDAR, que forman una representación gráfica del relieve (Ramírez-Guerrero, 2016). En este caso, la altimetría fue calculada, a partir de los modelos digitales de elevación a 5 m, de INEGI (2012), que se compone de un modelo ráster de matrices regulares.

El método de clasificación de datos, que se empleó para el análisis cartográfico de la elevación, fue *Natural breaks*, mediante el cual se identifican las rupturas en la continuidad de los datos a partir de las cuales se definen patrones en el relieve, con el objetivo de generar grupos de datos con valores similares, minimizando las diferencias entre cada clase y estableciendo límites donde hay diferencias mayores (Osaragi, 2014). En este sentido, en la (Fig.19) se pueden observar los principales cambios en la superficie, el área que se ha definido como zona costera se ubica principalmente por debajo de los 20msnm (altitud en donde se encuentra el segundo salto en la continuidad de los datos). Además, se distingue claramente la depresión prelitoral sobre la cual se emplazan los cuerpos lagunares.

Por otra parte, la porción montañosa ajena a los objetivos de esta investigación, manifiesta los mayores valores altimétricos de la zona, al superar los 400msnm; si bien, en la zona costera dominan los valores de altitud menores a 20msnm, es posible apreciar que en el norte por la presencia de las dunas y el acantilado de punta Villa Rica, los valores de altitud superan los 50msnm, mientras que al sur, la

presencia del campos de dunas estabilizadas por la vegetación y el bloque basculado que conforma un porción acantilada de la costa, los valores llegan hasta los 126msnm.

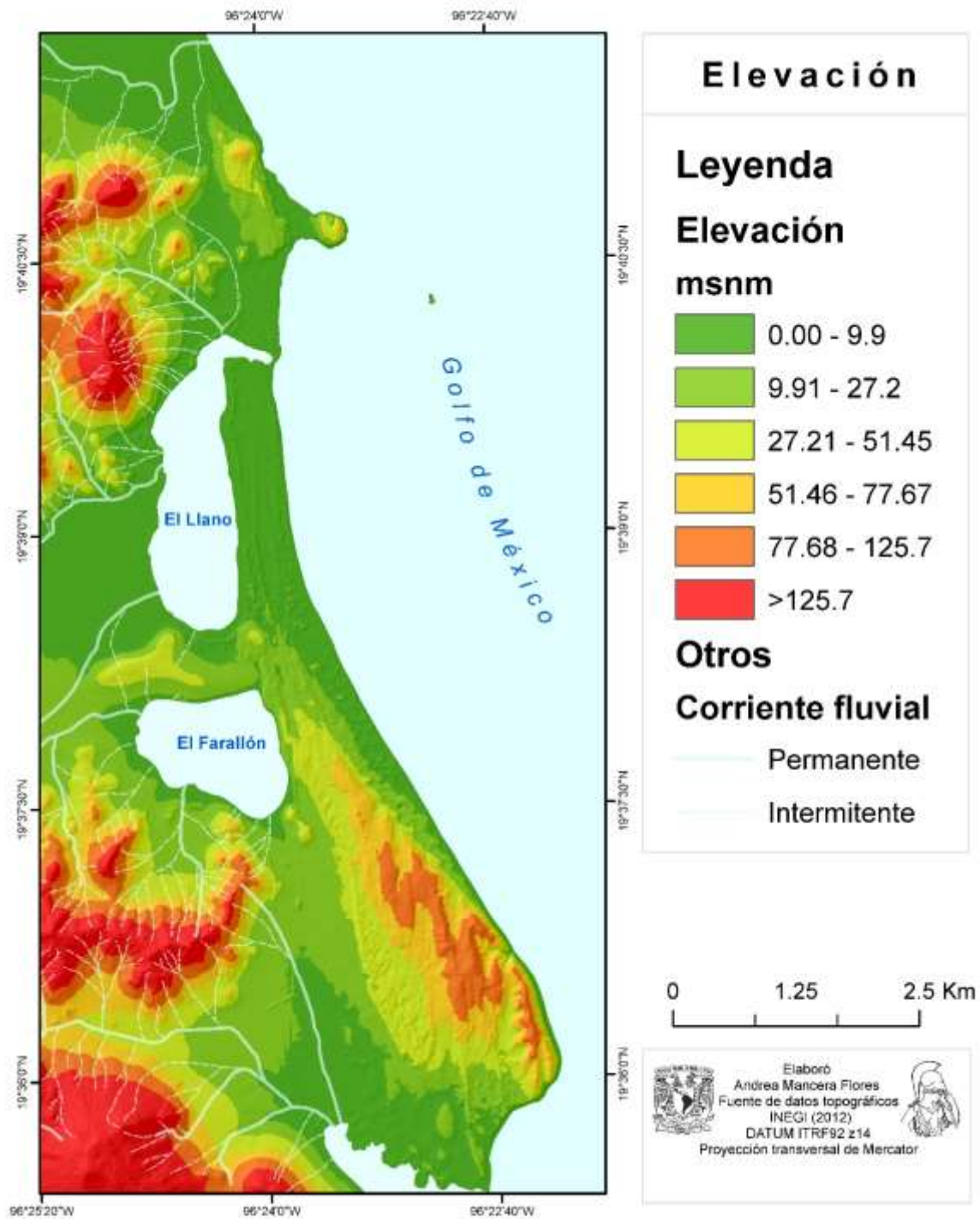


Fig. 19. Mapa altimétrico. Elaboración propia.

- Batimetría

La batimetría es un elemento de relevancia para la configuración de las playas, pues son consecuencia de la circulación de los fluidos y el transporte sedimentario. El oleaje y las corrientes son los responsables principales del movimiento del sedimento en la costa, proceso en el cual son evidentes los efectos de la batimetría, por ejemplo, al determinar el punto de ruptura del oleaje (Ibarra y Belmonte, 2017). Para la presente investigación, las isóbatas fueron tomados de la carta batimétrica internacional del Mar Caribe y Golfo de México (IBCCA) de INEGI (2015), que son resultado de un compilado de cartas a escala 1:250000, con equidistancia entre las isóbatas de 10m a partir de los 20 m de profundidad (Fig. 20).

La costa norte del municipio de Actopan se encuentra en la porción central del Golfo de México, en Veracruz la plataforma continental es la más estrecha del Golfo de México con una anchura promedio de 33 km llegando hasta los 200 m de profundidad (Gráfico 1), que incrementa su profundidad, de forma gradual con una pendiente menor de 3.5° (Aldaco y Sánchez, 2002).

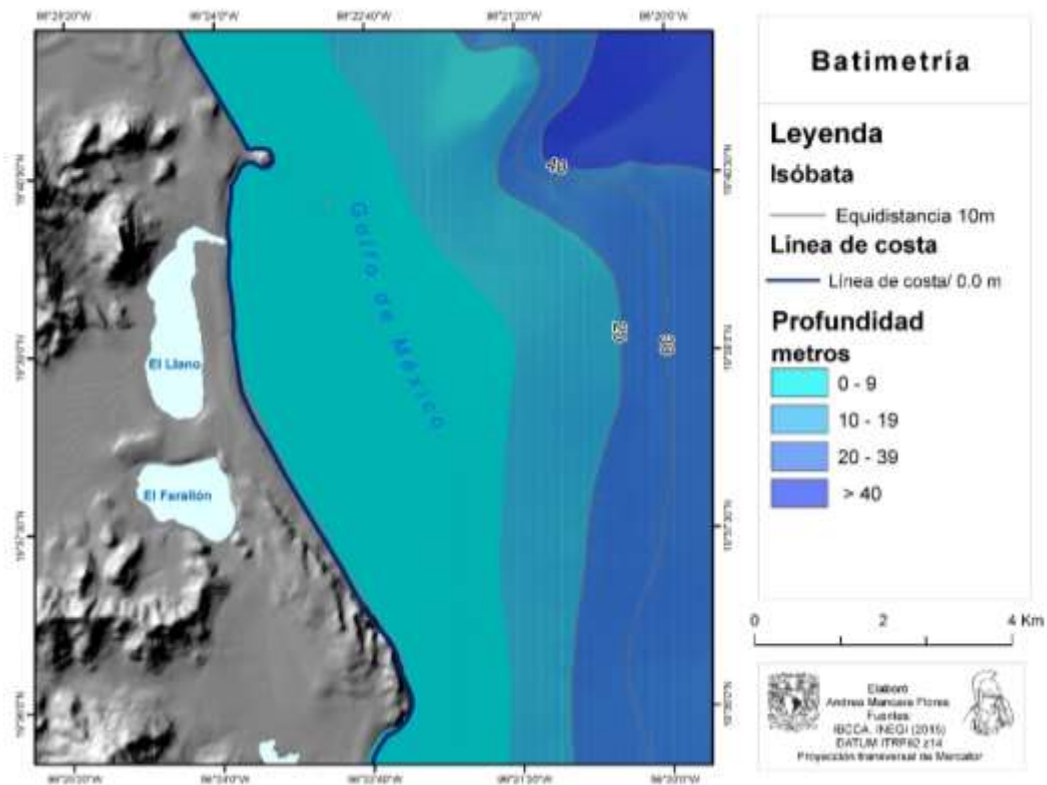


Fig.20. Mapa batimétrico. Elaboración propia.

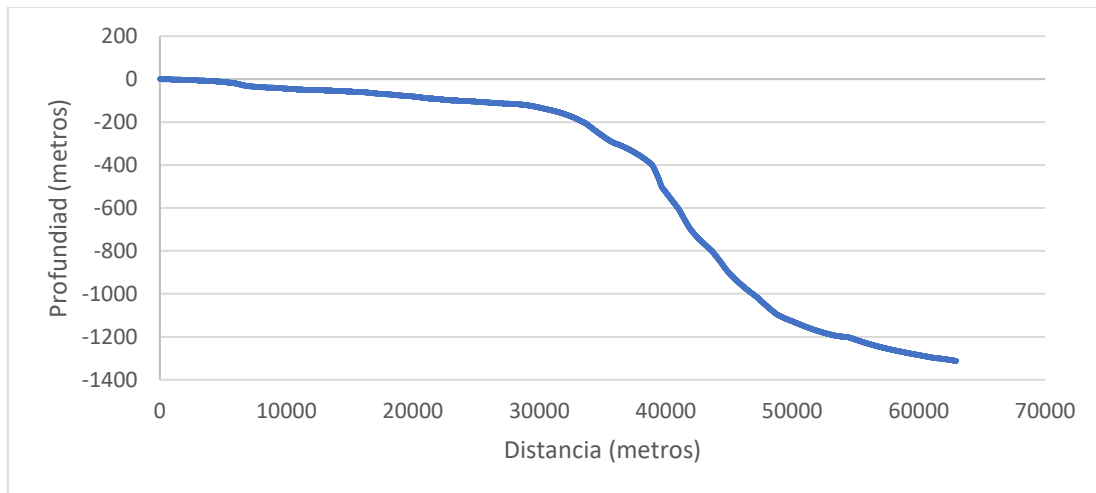


Gráfico. 1. Perfil batimétrico de la costa norte del municipio de Actopan, Veracruz. Elaboración propia. Fuente INEGI (2015)

- **Inclinación del terreno**

La inclinación del terreno refiere al ángulo máximo, que forma la relación entre la altura y la distancia en el terreno, generalmente se expresa en porcentaje o en grados. Este elemento es útil para analizar contrastes morfométricos, como pueden ser cambios o rupturas en el relieve, así como la identificación de estructuras planas, cóncavas y convexas; también es un elemento básico para identificar la susceptibilidad de procesos de remoción en masa (Pedraza-Guilsanz, 1996). Este parámetro se obtuvo, a partir del tratamiento en un sistema de información geográfica (ArcGis 10.1), con la herramienta de análisis espacial SLOPE, que identifica la pendiente o tasa de cambio en la vertical de cada pixel, en matrices de 3x3, en un MDE. (Georgiadou *et al.*, 2001). Se determinó continuar con el método de clasificación de *Natural Breaks*, que toma como base los cortes en los valores de los datos, agrupándolos de tal forma, que se denoten claramente las diferencias entre los mismos. En este sentido, en la (Fig.21) se observa, que los valores dominantes para la zona costera se encuentran claramente definidos, de acuerdo con la tipología de costa; los máximos valores se observan en las porciones abrasivas de la costa, en la punta rocosa de Villa Rica, con valores superiores a 30° de inclinación en el área expuesta al mar abierto (69.55° máxima). Al sur, en punta La Mancha, la porción abrasiva de la costa presenta un rango de valores entre 30° y 50°, a pesar de que en la porción acumulativa dominen los valores inferiores a

17°. Allí resalta la estructura de las dunas, con valores de hasta 35° a sotavento, y la llanura fluvial y la depresión prelitoral mantienen valores inferiores a 9°, lo que da lugar a la deposición del material erosionado de las sierras vecinas y el emplazamiento de cuerpos lagunares.

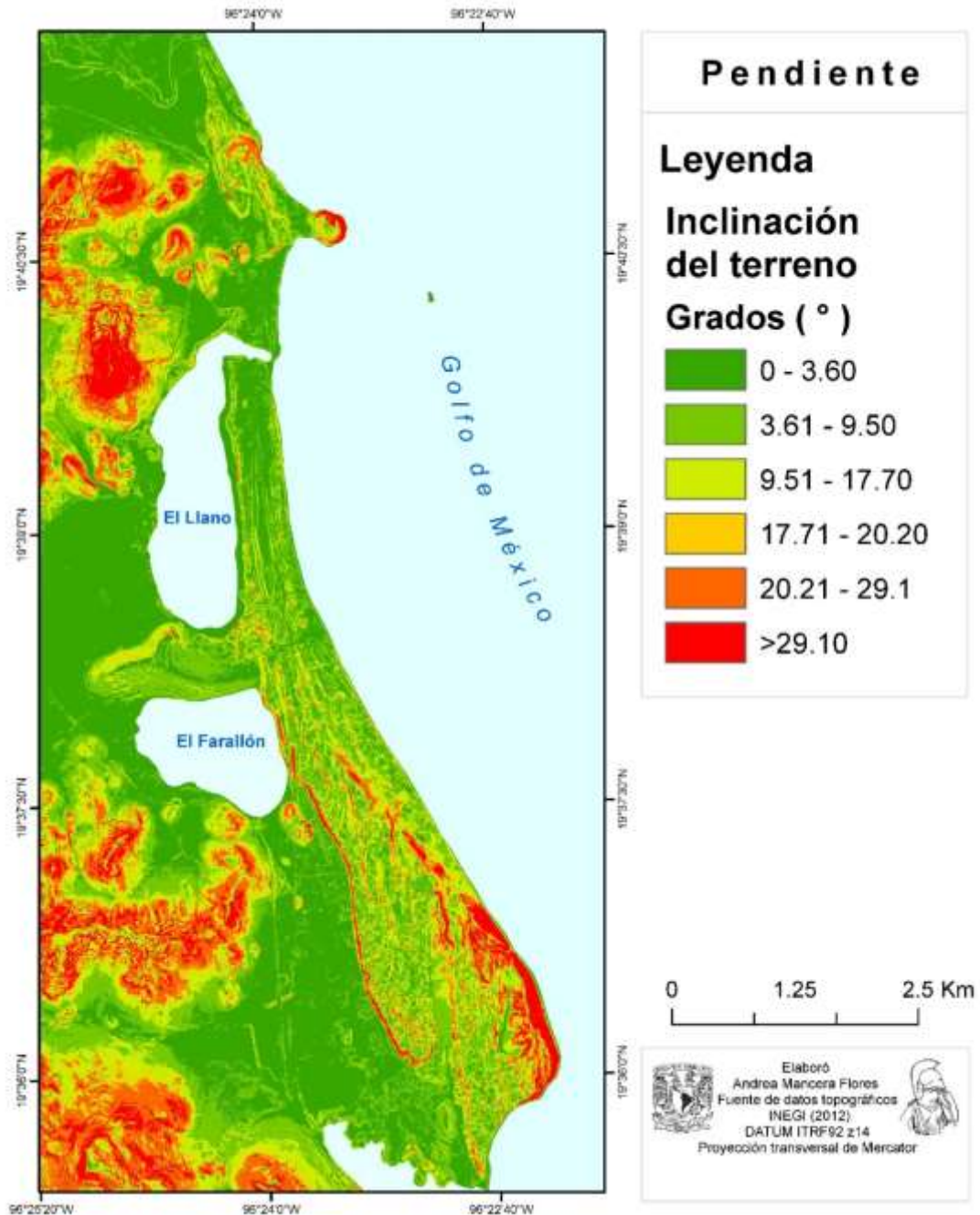


Fig. 21. Mapa de inclinación del terreno. Elaboración propia.

2.2.3 Características climáticas, régimen de vientos y eventos hidrometeorológicos extremos

El clima en la región costera del norte del municipio de Actopan es el Aw2 (w) (i) g w", según la modificación al sistema climático de Köppen (1936) por Enriqueta García (1998), es decir, clima cálido subhúmedo con lluvias en verano, con por lo menos diez veces mayor cantidad de lluvia en el mes más húmedo y lluvia invernal mayor al 5% anual; presenta una temperatura media anual de $\geq 22^{\circ}\text{C}$, oscilación anual de las temperaturas medias mensuales menor a 5°C con un cociente P/T mayor a 53.3 según los datos de 1951 a 2010 de la estación 30261 del SMN (2018).

De tal forma que el clima en el área de estudio corresponde a la clasificación más húmeda de los Aw (García, 2004), acorde a la dinámica climática de la región central del Golfo de México, donde, durante los meses de verano, masas tropicales cálidas cargadas de humedad son impulsadas por los vientos alisios hacia el continente, lo que provoca la formación y el embate de tormentas tropicales, depresiones y huracanes, lo que determina que durante los meses de mayo a octubre, se alcance el mayor acumulado de la precipitación total anual. Sin embargo, la intrusión de masas polares durante los meses de invierno, producto de la dominancia del anticiclón de las Bermudas, durante los meses de noviembre a febrero propicia la ocurrencia de "Nortes" que aportan humedad y generan precipitación $>5\%$ del total anual (Travieso-Bello y Campos, 2006).

Precipitación y Temperatura

Para la determinación del clima, se tomaron los valores promedios de precipitación y temperatura de la estación 30353, Tlacolula, Veracruz, del Servicio Meteorológico Nacional (SMN, 2018), de los años 1951 a 2010. En el gráfico 2, es posible apreciar la variabilidad de la precipitación, que presenta los máximos valores ($>100\text{mm}$) durante los meses de verano (Gráfico 2.)

A lo largo del año, es evidente la variación en los niveles de precipitaciones, lo que corresponde al régimen de lluvias de la región central del estado de Veracruz. Por otra parte, la temperatura presenta importantes oscilaciones entre los meses de invierno <18°C y primavera >18°C, manteniéndose homogénea para los meses de verano y otoño, de tal manera, que se presenta un comportamiento similar con la precipitación

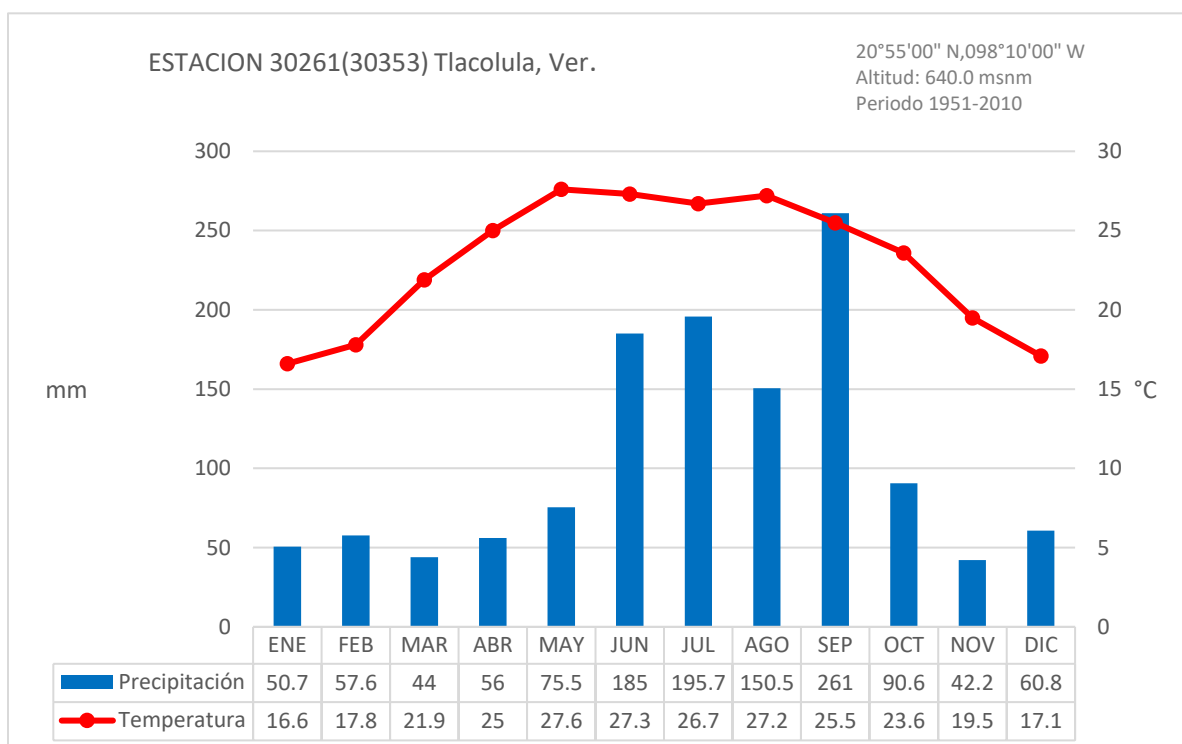


Gráfico. 2. Climograma correspondiente a la estación del SMN Tecolutla Ver. 2018. Cercana al área de estudio con datos acumulados de 1951 al 2010. Elaboración propia.

Régimen de vientos

En la región predominan los vientos del Este, por la influencia del Anticiclón del Atlántico Norte, que alcanzan velocidades promedio de 10 km/h, incrementándose a 40 km/h durante la temporada de “Nortes” (Geissert y Dubroeuq, 1995; Moreno-Casasola, 2003). Esta región se encuentra influenciada por celdas de circulación claramente delimitadas por su temporalidad, con las intrusiones de aire polar durante los meses de invierno y la llegada de masas cálidas del trópico durante el verano. En primavera la velocidad del viento disminuye y adquiere una dirección preferente S-SW (Tejeda *et al.*, 1997), en verano-otoño predominan los vientos

Alisios, las ondas tropicales u “ondas del este” y los huracanes. En este período, la velocidad se incrementa al Oeste, con dirección al continente, lo que provoca las lluvias orográficas. Como se mencionó anteriormente, ocasionalmente se forman las llamadas “ondas del este”, cuyo flujo proveniente del NE es perpendicular al de los vientos Alisios, lo que favorece la inestabilidad atmosférica y, por tanto, el embate de tormentas o depresiones tropicales (Ruíz-Barradas *et al.*, 2010).

- **Eventos meteorológicos**

Huracanes, tormentas y depresiones tropicales

El Golfo de México, dada su latitud y la dirección predominante de los vientos, así como la temperatura oceánica, está sujeto a la influencia de fenómenos hidrometeorológicos, principalmente en la región centro y centro-sur, durante la temporada de verano-otoño (Ortiz-Pérez y De la Lanza-Espino, 2006). Estas perturbaciones atmosféricas (huracanes, tormentas tropicales, depresiones tropicales, etc.), cuyas diferencias radican en la velocidad de sus vientos y su baja presión (Rosengaus-Moshinsky *et al.*, 2014), se presentan cada año en la costa veracruzana, al confluir con el cinturón de los vientos Alisios, que transportan humedad hacia el continente y provocan lluvias, alteran los procesos de sedimentación y morfología de las zonas costeras (Anaya-Ávila *et al.*, 2012).

En el cuadro 4, se presentan los huracanes, tormentas y depresiones tropicales desde 1950 hasta el año 2016, que afectaron a un radio de 65 millas náuticas del centro de la zona de estudio. Esta relación de eventos se elaboró con base en los datos del Centro Nacional de Huracanes (NHC) de la NOAA.

Cuadro. 4: Principales fenómenos meteorológicos en la zona de estudio de 1950 a 2016. Fuente NHC, 2019. Elaboración

Tipo		Año	Nombre
Tormenta tropical		1951, 1951, 1954, 1954, 1955, 1955, 1956, 1956, 1958, 1959, 1961, 1961, 1966, 1966, 1968, 1969, 1970, 1971, 1974, 1974, 1978, 1979, 1979, 1980, 1988, 1989, 1989, 1990, 1993, 1993, 1995, 1996, 1996, 1998, 1999, 2000, 2005, 2005, 2008, 2010, 2011, 2012, 2013, 2013, 2013, 2013, 2013, 2014.	Charlie, George, Florence, Gilda, Gladys, Hilda, Anna, Dora, Aalma, Beulah, Simone, Inga, Hallie, Inez, Candy, Laurie, Greta, Edith, Dolores, Fifi, Bess, Bob, Henry, Hemine, Debby, Cosme, Jerry, Diana, Beatriz, Gert, Gabrielle, Dolly, Josephine, Earl, Breth, Keith, Gert, Jose, Marco, Eleven, Harvey, Ernesto, Bárbara, Barry, Fernand, Eight, Ingrid, Trudy.
Depresión tropical		1960, 1984, 1995.	Abby, Roxanne
Disturbio o Tormenta Extratropical		1961, 1998, 2003, 2007, 2010, 2011, 2011, 2012, 2014, 2016.	Iva, Mitch, Larry, Felix, Richard, Arlene, Nate, Helene, Hanna, Danielle.
Huracán	C1	1967, 2005, 2007, 2007.	Fern, Stan, Dean, Lorenz.
	C2	1950.	Item
	C3	1955, 2010.	Janet. Karl

Resaltan tres fenómenos hidrometeorológicos, por su intensidad y cercanía entre la zona de impacto y el área de estudio.

- El huracán Dean (2007), categoría 1-2, con vientos sostenidos de 155 km/h, con origen en las costas africanas, arribó al Golfo de México, atravesó la Península de Yucatán e impactó, por segunda vez, a las costas veracruzanas al suroeste de Barra de Tecolutla (Hernández-Unzón, 2007), aproximadamente a 100 km de la zona de estudio. A su paso afectó con lluvias intensas de hasta 212 mm (Gómez-Ramírez, 2009).
- El Huracán Karl (2010) fue el huracán más intenso de la temporada, formado al Noroeste del Mar Caribe, atravesó la Península de Yucatán como tormenta tropical y alcanzó al Golfo de México, impactando las costas de Veracruz como huracán categoría 3, por la población de Playa Chachalacas, aproximadamente a 26 km de la zona de estudio, con vientos máximos sostenidos de 185 km/h (Hernández-Unzón *et al.*, 2010).
- La tormenta tropical Barry (2013), originada en el noroeste del Mar Caribe, como onda tropical, tuvo una dirección O-NO sobre el territorio de Belice y el sur de Campeche, llegando al Golfo de México, donde se transformó en

tormenta tropical e impactó las costas de Veracruz, con vientos máximos sostenidos de 75 km/h, en Playa La Mancha, que se encuentra en la porción sur de la zona de estudio, cerca de la desembocadura de la laguna La Mancha (Bravo-Lujano, 2013).

Nortes

Los “Nortes” son un fenómeno meteorológico, caracterizado por vientos intensos y bajas temperaturas, provenientes del N-NE, muy frecuentes en las costas veracruzanas durante los meses de marzo a octubre de cada año (Ortiz-Pérez y De la Lanza-Espino, 2006). Este fenómeno estacional provoca un descenso en la temperatura, con fuertes a débiles precipitaciones, que representan, en general, el 10% anual. Bajo condiciones normales, los vientos pueden exceder los 40 km/h; los más intensos se presentan entre la zona de Laguna Verde y el norte del Puerto de Veracruz, donde por la presencia de la Sierra de Teziutlán, ocurre el “represamiento” del flujo del viento e intensifica su velocidad, pudiendo alcanzar los 120km/h (Ruiz-Barradas *et al.*, 2010).

El impacto de estos meteoros altera la estructura de la zona costera, al generar marejadas de tormenta, como consecuencia del embate del “Nortes”. Por otra parte, la intensidad de los vientos altera la morfología de las playas y las dunas costeras, y puede provocar también transgresión eólica, intrusiones salinas, erosión por la intensificación de las corrientes marinas y la marejada de tormenta (Moreno-Casasola y Vázquez, 2006).

2.2.4 Hidrología y sistemas costeros

El área de estudio se encuentra en la vertiente occidental del Golfo de México, entre la desembocadura del Río El Limón, en la porción baja de la subcuenca del Río Actopan, dentro de la cuenca del Río Jampa, en la región del Papaloapan (Maderey y Torres-Ruata, 1990; CNA, 1998), hasta la boca de la Laguna La Mancha. En esta región costera se encuentra el sitio RAMSAR La Mancha-EL Llano, que constituye un área de humedales, rica en biodiversidad, donde es posible encontrar dos cuerpos de agua costeros: (a) El Llano, con una extensión de 2 360 ha, es una

laguna interdunar, hipersalina de aguas someras (menor de 3 m), comunicada con el mar, a través de un canal angosto o boca, que se cierra temporalmente de diciembre a mayo, periodo en el cual no existe intercambio mareal y no presenta un afluente permanente, por lo que se abastece de los escurrimientos temporales de los cerros adyacentes entre agosto y octubre (Chávez-López, 2017); y (b) El Farallón, de 164 ha, es un lago de origen tectónico emplazado en una cuenca endorreica pequeña < 8 km², de agua dulce alimentada por la escorrentía fluvial intermitente. Ambos cuerpos de agua de origen fluvial o lacuno-palustre, se encuentran emplazadas en una depresión tectónica-abrasiva, muy cercana a campos de dunas activos, por lo que es constante el acarreo de sedimentos hacia costa adentro por la intervención del viento y el oleaje (Moreno *et al.*, 2000; Moreno-Casasola, 2003).

Las lagunas costeras cumplen la función de nichos ecológicos para organismos acuáticos que, al mismo tiempo, dependen de la dinámica en la boca de la laguna para el intercambio y transporte de sedimentos, y también de los cambios en el volumen de agua, ya sea por la acción de las mareas, las corrientes, el viento, el oleaje o la descarga fluvial (Contreras-Espinosa, 2006). De tal forma, que, a mayor disponibilidad de arena, la boca de la laguna puede cerrarse al formar una barrera entre ésta y el mar; ocurre lo contrario, si los aportes sedimentarios disminuyen, pues la boca puede permanecer abierta y promover el intercambio acuático (Martínez *et al.*, 2012)

Es necesario exponer, que las lagunas costeras son elementos efímeros del paisaje, generalmente asociados con la progradación de la costa. Un elemento a destacar son las problemáticas ambientales existentes, ya que las dos lagunas presentan azolvamiento y colmatación por el impacto de las actividades antrópicas, como la colocación del oleoducto de PEMEX sobre la línea de costa, en 1985, para la laguna El Llano (Paradowska, 2006) y la pérdida del volumen de agua, pues el incremento en la extracción y la disminución en las tasas de recarga para El Farallón, son procesos que modifican la dinámica natural de las lagunas y de la zona costera.

2.2.5 Oleaje, corriente y mareas

Oleaje

La dirección de los vientos dominantes del NE-SO, provoca que el oleaje presente un movimiento periódico hacia la costa en un ángulo de aproximadamente 27° a 30°, produciendo una corriente litoral con dirección sur. En la porción norte, la presencia del macizo rocoso de Punta de Villa Rica y el arrecife El Tarrón, forman una barrera natural, por lo que la energía del oleaje disminuye, mientras en la región sur, el ángulo de incidencia del oleaje es paralelo a la línea de costa, lo que propicia la formación de corrientes de retorno (Geissert-Keintz, 2006). La dinámica del oleaje presenta una incidencia de los trenes de olas del E-NE, de entre cinco y siete segundos, con una altura promedio de 1.5 m; sin embargo, durante el embate de fenómenos hidrometeorológicos extremos o la llegada de los “Nortes”, la mecánica se ve alterada y llega a alcanzar una altura de 4.5 m (Ortiz-Pérez y De la Lanza-Espino, 2006; Geissert-Keintz, 2006).

Corrientes

Las corrientes litorales, que corren paralelo a la costa en esta región, presentan un movimiento norte-sur (Martínez *et al.*, 2012) y el desplazamiento de las masas de agua favorece el transporte y la deposición de los sedimentos a lo largo de la costa, como consecuencia de los aportes fluviales, principalmente del Río Tecolutla (Moreno-Casasola, 2010). Por otra parte, la influencia del viento sobre la superficie marina propicia la generación de corrientes divergentes y corrientes de retorno o de resaca, provocadas por la difracción de olas y corrientes al llegar a la costa, que siguen paralelas a la costa hasta chocar con otra en sentido opuesto, acarreado material desde la costa hacia el mar. El movimiento de la corriente litoral, medido a la altura de La Mancha, es de 18 m/s (Ortiz-Lozano *et al.*, 2010; Hidalgo, 2017).

Mareas

Las mareas en el Golfo de México son consecuencia directa de la atracción lunar e indirecta del movimiento del Océano Atlántico; su amplitud en el margen continental es de entre 7 a 9 cm, con fases uniformes en toda la cuenca. En este sentido, en la

zona costera, las mareas mantienen un régimen predominantemente diurno, con un ciclo de una pleamar y una bajamar, aproximadamente cada doce horas en el transcurso de un día lunar, con rangos de 30 a 40 cm (Martínez y Parés, 1998; SEMAR, 2018; SMN, 2018). En la región centro de Veracruz y, en específico, en la región Laguna Verde-La Mancha, el régimen de mareas es semidiurno y micromareal, la amplitud de la marea es menor a un metro, lo que resulta favorable para el emplazamiento de cuerpos lagunares (Geissert-Keintz, 2006). Según datos del Servicio Mareográfico Nacional, en Veracruz, en el año 2018, el nivel de pleamar media fue de 0.427 m y el de bajamar media de 0.107 m, con una amplitud media de 0.320 m (Cuadro 5).

Por otra parte, durante los meses de verano y debido a la acción de fenómenos meteorológicos y en invierno por la presencia de “Nortes”, la amplitud de la marea puede variar según la fuerza del fenómeno, la denominada marea de tormenta que refiere al aumento anormal del nivel del agua por el embate de algún fenómeno hidrometeorológico, llega a ser mayor a 4 m, (≥ 5.5 m para huracán categoría 5 según la escala Saffir-Simpson) con una duración que va desde de 1-2h hasta 3 días (Fuentes-Mariles *et al.*, 2006), lo que propicia la inundación de tierras bajas, de tal manera, que puede favorecer la erosión de las playas y el transporte multidireccional de los sedimentos (Ortiz-Pérez y De la Lanza-Espino, 2006).

Cuadro. 5: Planos de mareas de referencia para la estación de Veracruz con datos de 2002-2015. Fuente SMN

VERACRUZ, VER.

LAT. 19° 12' 03" N

LONG. 96° 07' 51" W

Enero del 2002 a Diciembre de 2015.

PLANOS DE MAREAS REFERIDOS AL NIVEL DE BAJAMAR MEDIA INFERIOR.

PLEAMAR MÁXIMA REGISTRADA	1.100	m
NIVEL DE PLEAMAR MEDIA SUPERIOR	0.460	m
NIVEL DE PLEAMAR MEDIA	0.427	m
NIVEL MEDIO DEL MAR	0.273	m
NIVEL DE BAJAMAR MEDIA	0.107	m
NIVEL DE BAJAMAR MEDIA INFERIOR	0.000	m
BAJAMAR MÍNIMA REGISTRADA	-0.500	m

2.2.6 Variaciones en el nivel del mar

Las variaciones en el nivel del mar impactan otros elementos morfodinámicos, como las mareas, e implica también cambios en la línea de costa, debido a ello, la preocupación por el incremento en el nivel del mar, se aborda desde la década de los 80's. Según registros realizados por Hanson y Maul, para 1985, el nivel del mar, en general, aumentó ± 0.36 cm/año (Ortiz-Pérez y Méndez-Linares, 1999). Para el 2007, se plantearon distintos escenarios, que van desde los 0.6 m hasta los 2 m en el Golfo de México (IPCC, 2007). Para la región centro del estado de Veracruz, con base en los datos históricos recabados por el Servicio Mareográfico Nacional (UNAM), la tendencia del incremento en el nivel del mar es de 1.9 ± 0.6 mm/año (Gráfico 2), esto a una escala regional. Bojorquez-Sánchez (2017) determinó, a través de tasas de acumulación sedimentarias extraídas de núcleos de sedimento y calculadas en la laguna Salada y El Llano, el incremento en el nivel del mar, en un periodo superior a 100 años, con valores de 1.4 ± 0.2 mm/año a 3.1 ± 1.1 mm/año. Dichas estimaciones apegadas a los reportes del IPCC (2007) para el nivel del mar mundial, resulta indicativo de la posible ausencia de movimientos verticales en la corteza de esta región y marca un punto de referencia para las variaciones en el Golfo de México (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2010).

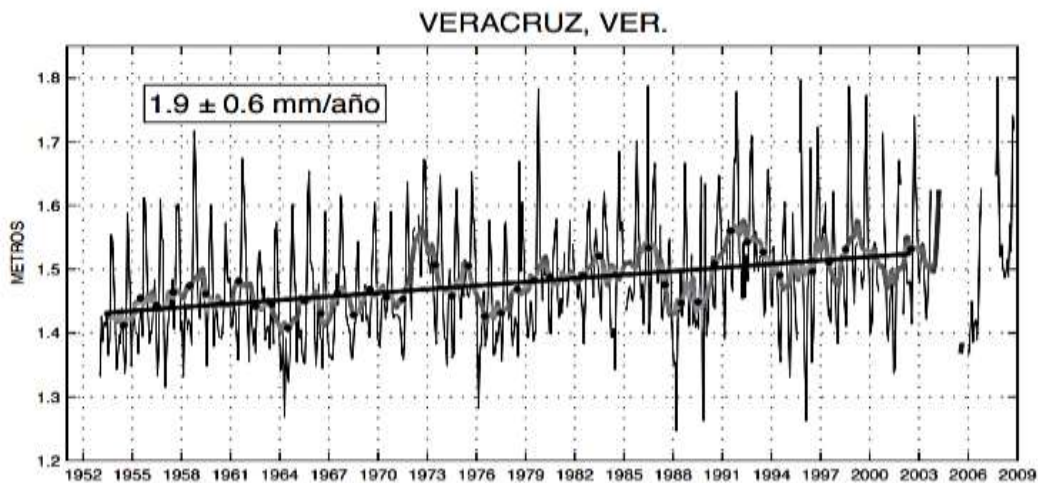


Gráfico. 3.. Tendencia del nivel del mar para la estación de Veracruz (19°11.50'N, -96°7.40' W) según datos de la estación del Servicio Mareográfico nacional 1952-2009, Tomado de Zavala-Hidalgo *et al.*, (2010).

2.2.7 Tipo de suelo

Los suelos de la zona costera septentrional de Actopan expresan la dinámica litoral, que domina en esta región. Se caracterizan por el desarrollo sobre dunas, la juventud relativa que presentan y el patrón de distribución asociada a la geología, el clima, la vegetación y a los procesos geomorfológicos, que a lo largo del tiempo promueve el desarrollo de determinados tipos de suelo (Geissert y Dubroeuq, 1995). En el Sitio RAMSAR La Mancha-El Llano, Moreno-Casasola (2003) expone que se encuentran siete principales tipos de suelo, a la vez que se destacan sus características, según la base referencial mundial del recurso suelo (FAO, 2015).

1. Arenosoles: De textura gruesa areno-franca, profundos, ya que se incluyen las arenas residuales. Este suelo se origina de la acumulación de sedimentos no consolidados, localizados en las colinas, las dunas parabólicas, las llanuras marino-eólicas y la depresión tectónico-abrasiva.
2. Fluviosoles: Suelo joven que se forma sobre depósitos fluviales o lacustres, predominan en los valles fluviales y en la depresión lacustre.
3. Gleysoles: Se caracteriza por la presencia de materia orgánica y la saturación de agua, que favorece las condiciones reductoras; predomina en la zona de marea, así como en las lagunas, principalmente en El Llano, por su poca profundidad y abarca la mayor parte de la depresión prelitoral.
4. Histosoles: Suelo constituido por la acumulación de material orgánico en las marismas; se localiza en un área reducida de la zona de manglar de la depresión tectónico-abrasiva.
5. Pheozems: Suelo rico en materia orgánica, que se forma sobre depósitos eólicos u otros materiales no consolidados; se presentan en la depresión y los valles tectónicos.
6. Solonchak: Característico de la zona costera, donde se desarrolla sobre material no consolidado generalmente rico en sales solubles; se distribuye aislada y restringidamente en la depresión sublitoral.
7. Vertisoles: Suelos caracterizados por su alto contenido de arcillas; predominan en los valles y en las zonas de inundación periódica, como las llanuras fluviales.

Es evidente la influencia morfodinámica en los suelos de la región, no solo por el acomodo según la morfología, ya sean depresiones, valles o colinas, si no en la influencia de los agentes físico-geográficos, como el viento y la dinámica marina, que, en conjunto con la vegetación, promueven el emplazamiento y el desarrollo de distintos tipos de suelo.

2.2.8 Uso de suelo y vegetación.

La zona costera norte del municipio de Actopan cuenta con una amplia diversidad vegetal, dada la heterogeneidad de morfologías, tipos de suelo y al desarrollo de actividades económicas en la región, mismas que modifican y sustituyen la cobertura vegetal original de mangle, que bordea los cuerpos de agua, la selva baja caducifolia y los bosques de encino en la sierra adyacente a la laguna El Llano, así como por pastizales cultivados, cañaverales o potreros y establos para la actividad ganadera (Guevara *et al.*, 2008). Del mismo modo, la alteración de la cobertura vegetal se beneficia del incipiente incremento en el desarrollo de la ganadería de bovinos, actividad predominante en Veracruz (Peresbarbosa *et al.*, 2007). El uso de suelo principal en la región para el año 2017, es el pecuario (Fig.20), seguido del agrícola y el natural o no modificado; el uso habitacional en la zona no sobrepasa el 5 % de la superficie, con localidades rurales, como El Viejón Nuevo, Villa Rica y El Farallón, que dependen principalmente de la actividad ganadera, la agricultura, la pesca y el turismo local.

La vegetación de dunas costeras halófitas (CONABIO, 2019), es un elemento de la vegetación a destacar, ya que funge como estabilizador del sedimento y contribuye a la formación de dunas, lo que fomenta la acreción costera (Travieso-Bello y Campos, 2006). Por otra parte, la presencia de los dos cuerpos lagunares y la morfodinámica costera contribuye al desarrollo de comunidades de manglar que, al igual que la vegetación de dunas costeras, cumple la función de estabilizar la línea de costa al retener el sedimento y, al mismo tiempo, actúa como barrera natural al impedir el paso del material acarreado por el viento o el oleaje, de tal forma, que el desmonte de estas comunidades altera la morfodinámica natural del área (Moreno-Casasola *et al.*, 2002).

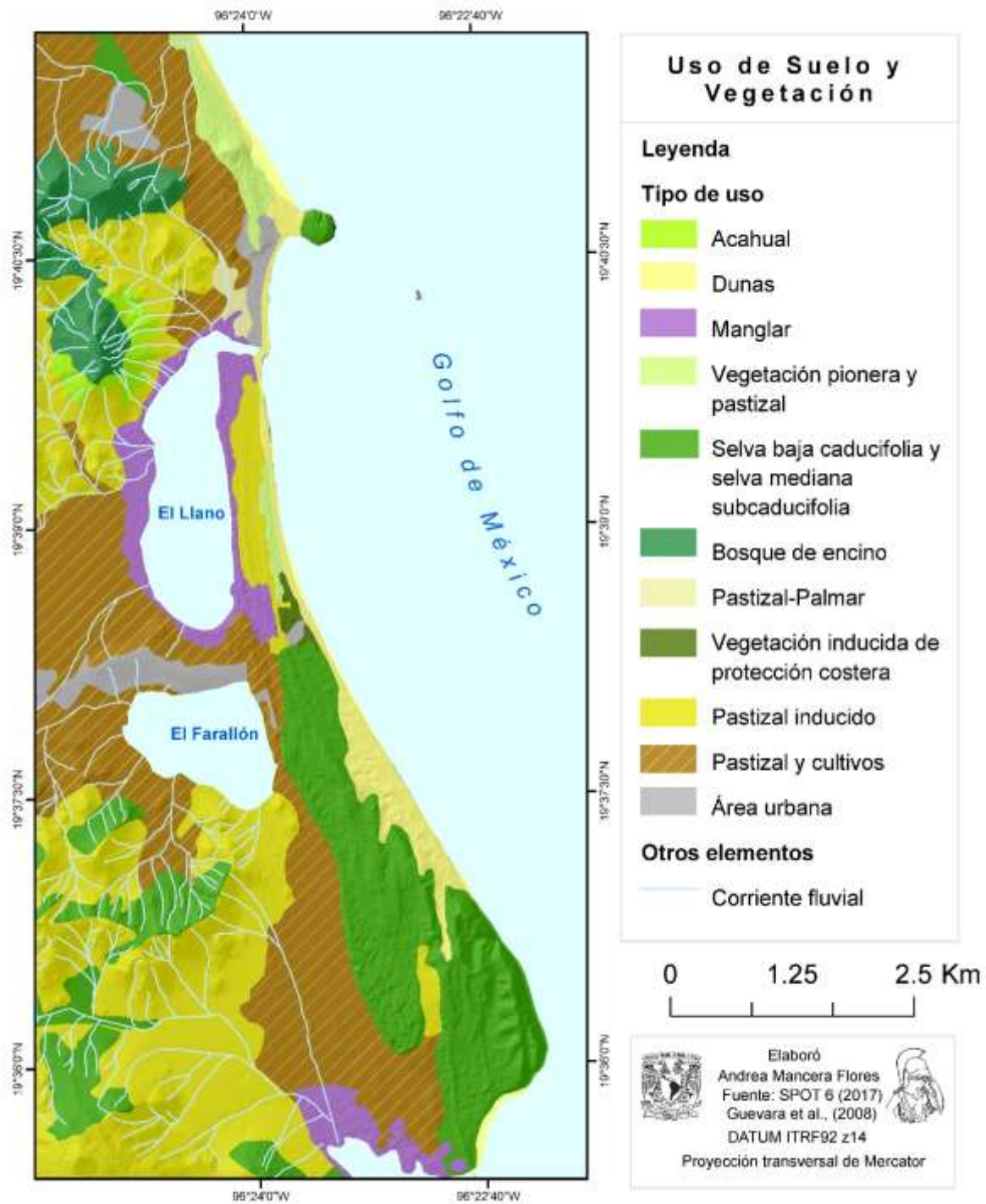


Fig. 22. Mapa de uso de suelo y vegetación 2017. Elaboración propia.

2.3 Características sociodemográficas, actividades socioeconómicas e infraestructura costera

La presencia del ser humano implica el aprovechamiento de los recursos naturales, en este sentido, contemplar el desarrollo de actividades socioeconómicas en estudios de morfodinámica costera es necesario y útil, debido a los impactos y modificaciones que éstas producen en el territorio.

La zona costera norte del municipio de Actopan, pertenece a la región económica del centro de Veracruz; las actividades predominantes en el municipio son aquellas inherentes al sector primario, como el cultivo de caña de azúcar y la ganadería de bovinos. Dentro del área de interés, se encuentran tres localidades rurales, El Viejón Nuevo, con 610 hab., en las orillas del Río El Limón; Villa Rica de la Veracruz, con 152 hab., localizada al norte de El Llano y El Farallón con 763 hab. (INEGI, 2010). Al norte del lago homónimo, la dinámica poblacional presenta un decremento importante desde la década de los 90 (Gráfico 4), como consecuencia de la migración de la población en búsqueda de trabajo, motivada por la pérdida de los recursos naturales de la región, la expropiación y el azolve de la laguna El Llano, por la traza del oleoducto de PEMEX (Paradowska, 2006).

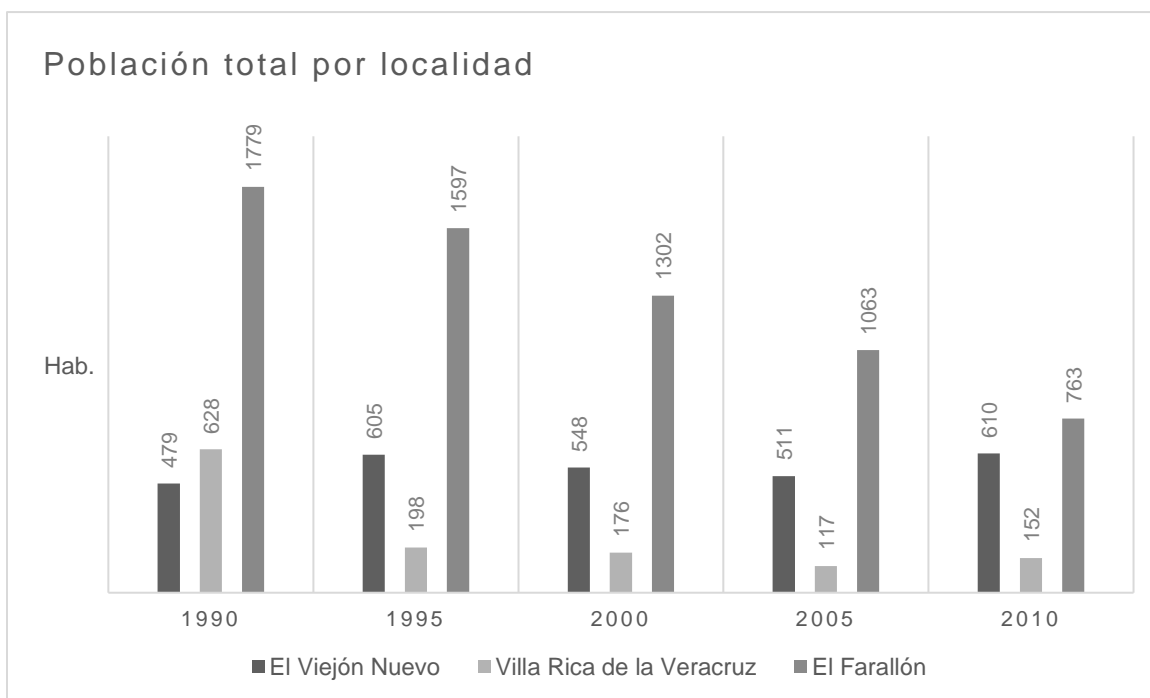


Gráfico 4. Población total por localidad en la zona de estudio 1990-2010. Elaboración propia. Fuente INEGI.

Según datos del INEGI (2010), cerca del 40 % de la población residente en estas localidades, pertenece a la población económicamente activa (PEA) ocupada en actividades primarias, con el 34.2% de la PEA, como la agricultura, principalmente de caña de azúcar, frijol, maíz, naranja y mango; la pesca a microescala y la ganadería, actividad económica predominante en todo el estado de Veracruz. Las actividades secundarias se encuentran dominadas por el sector eléctrico, dada la presencia de la estación nucleoelectrica en Laguna Verde (al norte de la zona de estudio). En las actividades terciarias prima el comercio local y la actividad turística, orientada al consumo local o regional.

El aprovechamiento de los recursos costeros para el turismo, se ha desarrollado a pequeña escala y las actividades principales se orientan al cultivo y ampliación de zonas de pastoreo, por lo que no existe infraestructura encaminada a la protección costera, sin embargo, en playa Farallón se han colocado barreras naturales de Casuarina, dada su cualidad de adaptabilidad a suelos arenosos, ésta funge como cortina rompevientos y auxilia a la fijación de sedimento, no obstante, tiene implicaciones ambientales, ya que desplaza a las comunidades vegetales nativas y la fauna asociada a ellas (CONABIO, 2014), además de contaminar la arena de las playas con sus residuos orgánicos. Por otra parte, existen construcciones habitacionales de carácter rural y palapas en playa Villa Rica enfocadas a satisfacer al turismo local.

Todas estas actividades tienen su impacto al sustituir la cobertura vegetal original por pasto cultivado o forraje para el ganado y la colocación de potreros, así como el aplanamiento de la playa y daños a la cobertura con concreto en la zona habitacional, actividades que favorecen la erosión y se reflejan en la modificación de los ambientes costeros, como los manglares, dunas y cuerpos lagunares e intervienen indirectamente en la morfodinámica natural de la región (Ruelas-Monjardín, 2006).

Capítulo 3. Índice de vulnerabilidad costera (IVC): variables y análisis estadístico para cálculo

3.1. Obtención de indicadores para el desarrollo del IVC

El desarrollo del índice de vulnerabilidad costera adaptado a las condiciones del área de estudio, se llevó a cabo en cinco etapas, la primera consistió en la recopilación de las variables que se desprenden de las cinco propuestas de índices mencionados en el capítulo 1, de los cuales derivan 29 variables, de estas 13 fueron descartadas por ser consideradas homogéneas para toda la zona y una se descartó por no considerarse como característica física del sistema (Gornitz *et al.*, 1994; Kumar y Kunte, 2012) (Cuadro 6).

Es claro que la mayoría de los indicadores se concentran en elementos naturales e inherentes a las características físicas de la zona costera, sin embargo, no se puede omitir la presencia de las actividades antrópicas. La selección de índices, tal como se explica en el apartado 5.3.4.1 del primer capítulo, parte de la replicabilidad de los mismos para distintas áreas, ya sea bajo condiciones tropicales como es el caso de los índices de Gornitz *et al.* (1994), Kumar y Kunte (2012), Palmer *et al.* (2011) y Núñez *et al.* (2016), así como en áreas templadas y a distintas escalas como exponen McLaughlin y Cooper (2010).

Cuadro. 6: Variables seleccionadas

Tipo	Variable
Físicas	Tasa de cambio de la línea de costa
	Ancho de playa
	Ancho de duna
	Estado morfodinámico
	Distancia de la isobata de 20m
	Geología
	Geomorfología (morfogénesis)
	Elevación
	Pendiente
	Porcentaje de afloramiento rocoso

	Marea de tormenta
	Ríos y desembocaduras
	Distancia de la vegetación detrás de la playa
Socioeconómicas	Vías de comunicación
	Uso de suelo y vegetación

La segunda fase del desarrollo metodológico consistió en la definición y clasificación de cada uno de los quince indicadores a considerar para la adaptación del IVC.

3.1.1. Variables físicas

1. Tasas de cambio de la línea de costa

Para esta variable se consideraron tres insumos diferentes con el objetivo de realizar la extracción manual de las líneas de costa, a una escala media de digitalización 1:7000, fotografías aéreas de los años 1973 (1: 70000) y 1986 (1:75000), ortofoto del año 2000 (1:20000) e imágenes satelitales, una Rapid Eye con resolución a 5m de INEGI (2011), y una SPOT 6 (2017) con resolución espacial de 1.5m. Para el proceso de digitalización se consideraron dos parámetros, debido a las características generales del litoral, para costas abrasivas se empleó el límite inferior del acantilado, mientras que en costas acumulativas se optó por el límite húmedo-seco (Fig. 5).

El cálculo de la incertidumbre para determinar la variación temporal de la línea de costa resulta un punto elemental ya que está relacionado con la precisión de las mediciones como se mencionó en el apartado 1.5.3.2, la incertidumbre total estandarizada de la línea de costa es de ± 7.821 m para el periodo comprendido entre los años 1973 al 2017 (Véase anexo 2).

Para el cálculo de las tasas de cambio se empleó el software DSAS 4.3 (USGS, 2012) extensión para ArcGIS 10.2 (ESRI, 2013) que a través de la generación de transectos perpendiculares a una línea base dentro del continente realiza la

comparación de movimiento de las líneas históricas de costa, con lo que se obtuvieron dos estadísticos.

Tasa de cambio en la línea de costa: Desplazamiento neto de la línea de costa en m (NSM, *Net Shoreline movement*) y Tasa de punto final en m/año (EPR, *End Point Rate*)

El NSM no corresponde a una tasa de cambio, únicamente expresa la diferencia en la distancia entre la línea de costa más reciente y la más antigua, con un total de 501 transectos, existe un desplazamiento promedio de ± 0.90 metros en 44 años, con un rango de desplazamiento que va de -191.62m a 99.53m, sin embargo, la tasa de cambio (EPR, Fig. 24) promedio no supera el 0.10m/año para toda la costa. Si bien es evidente que hay datos extremos que superan los -100m, éstos corresponden a los transectos al sur de la boca de la laguna El Llano, donde el retroceso de la línea de costa es consecuencia de la desaparición de la barra de arena en la boca de la laguna.

En la Fig. 23, se aprecia la evolución de esta, para el año 1973, la presencia de la barra propició la formación de un canal hacia el sur de forma casi paralela a la línea de costa, pero para el 2000, es clara la disminución del volumen de arena en la barra, sin embargo, aún se conservan resquicios del canal con una clara dirección hacia el sur, ya para el 2017 la barra tiene una menor extensión y el canal ha desaparecido incluso ha sido colonizado por manglar. Dos de las principales hipótesis sobre la disminución de la barra en la boca de la laguna, y la erosión costera se encuentran relacionadas con la colocación de un ducto de PEMEX en la boca lagunar en 1974, el cual retuvo el sedimento en la laguna lo que propició el azolve del canal hasta 1976. Por otra parte, el embate del huracán, tormentas tropicales y Nortes remueven una importante cantidad de arena y han contribuido al cierre de la desembocadura, mostrando que el intercambio acuático y sedimentario es limitado en esta porción de la costa (Plata, 2006).

Los 72 transectos que se encuentran al sur de la boca de la laguna que presentan datos atípicos son los que proporcionan una variabilidad anual promedio de -3.33 m, y un retroceso de la costa máximo de -4.50 m/año, así como una progradación máxima de +2.26 m/año, por lo que hay que considerar la desaparición de la barra en la boca de la laguna cuando se analicen las tasas de cambio.

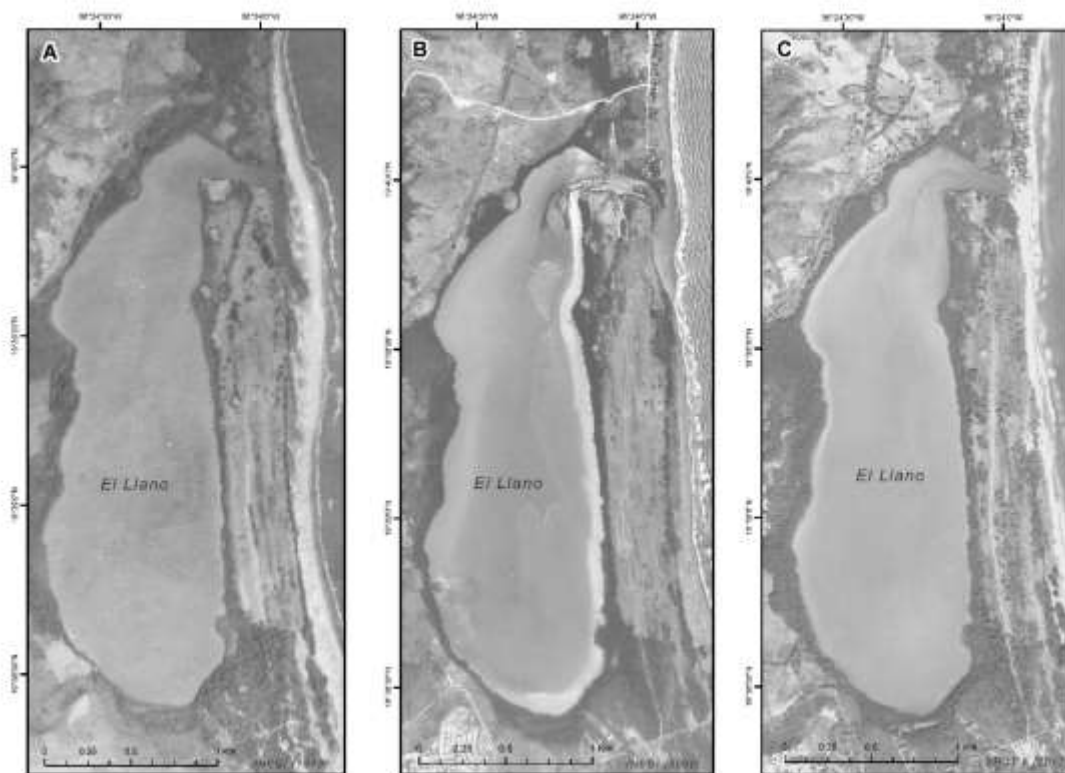


Fig. 23. Evolución de la barra de arena en boca de la laguna El Llano. A) INEGI (1973), B) INEGI (2000) y C) SPOT (2017).

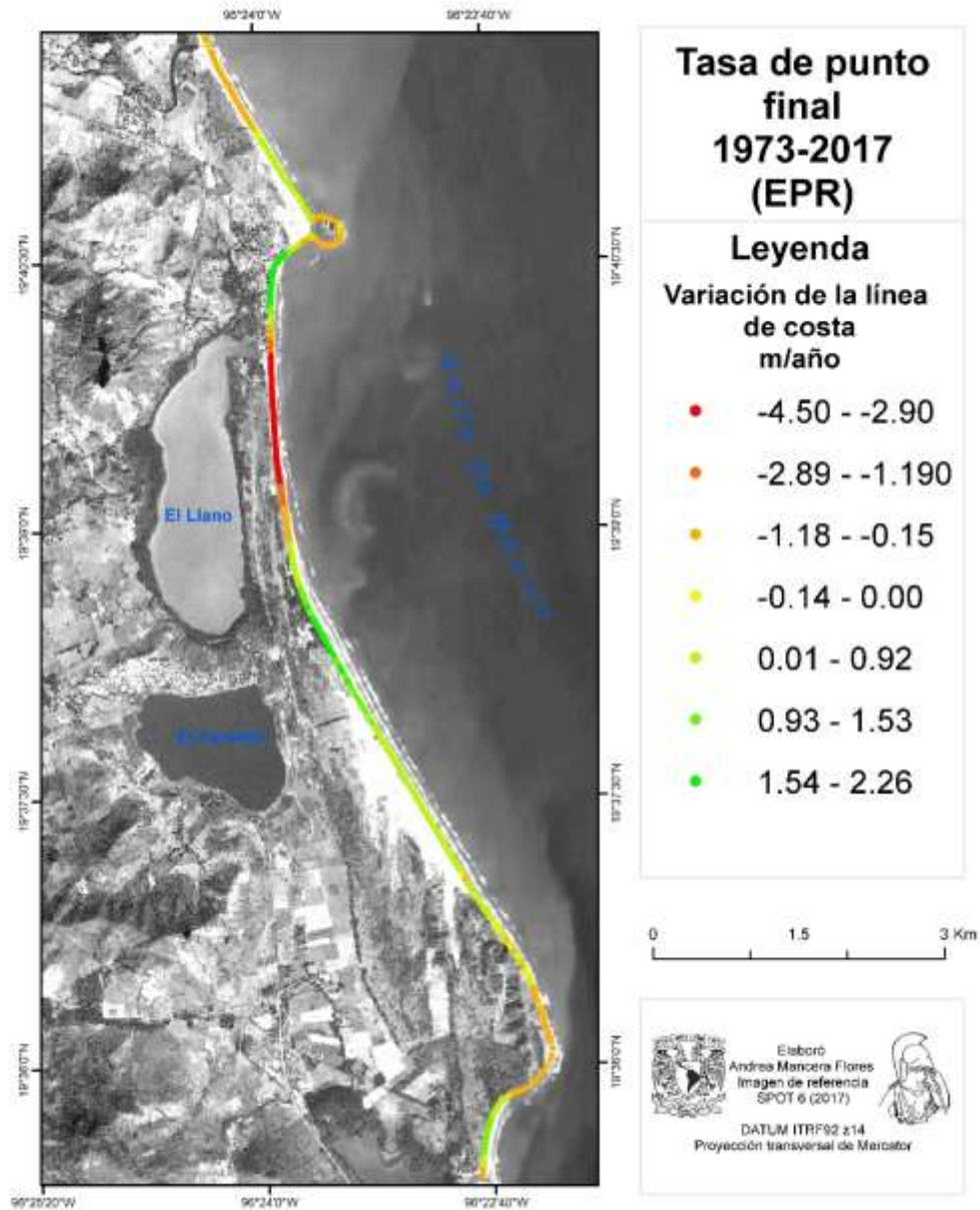


Fig. 24. Mapa de la tasa de cambio de la línea de costa (EPR). Elaboración propia

2. Batimetría

La batimetría refiere la profundidad en relación con la línea de costa hacia el mar abierto, es decir, la superficie submarina, de ella depende todas las formas de modelado hidrodinámico, como el oleaje o la inundación. Esta variable se consideró según la propuesta de Palmer *et al.* (2011) con base en la distancia de la isobata de 20m (resolución mínima de las cartas batimétricas) (INEGI, 2015) a la línea de costa. La consideración de esta variable recae en la premisa de que

a menor distancia a la isobata el impacto del oleaje en la costa es mayor por la menor disipación del mismo. En la Fig. 25, la configuración de la costa ofrece protección de la zona central al oleaje al estar más alejado de la isobata de 20m, por otro lado, hacia el norte en la zona del tómbolo y hacia el sur en punta jicacos, la distancia a la isóbata es considerablemente reducido lo que implica una mayor intensidad del oleaje en esta región que da pie a la configuración de nichos abrasivos como plataformas y escarpes (Fig. 13).

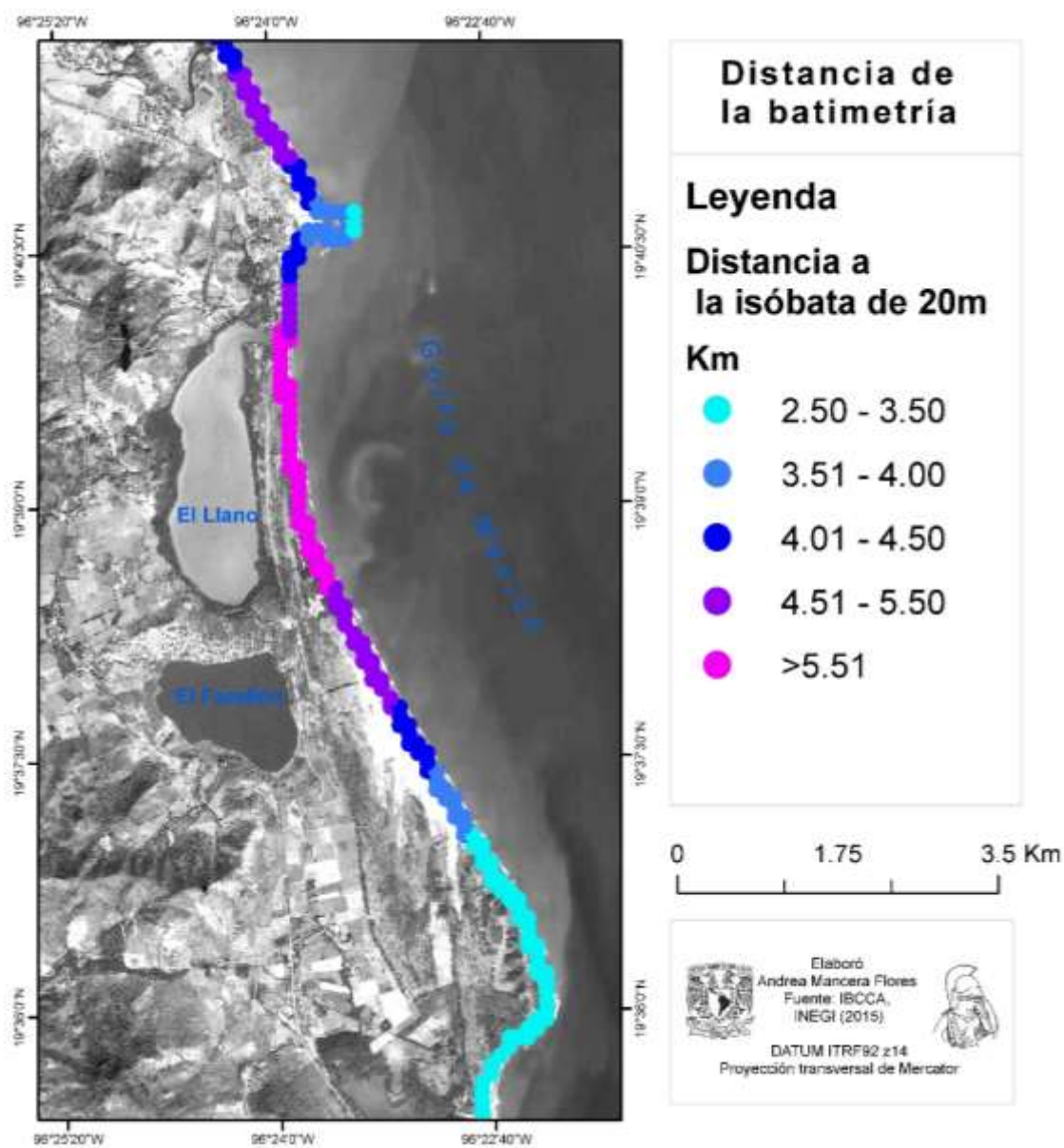


Fig. 25. Mapa de distancia de la línea de costa a la isóbata de 20m. Elaboración propia.

3. Geología

La geología, como indicador de la vulnerabilidad costera, está asociada con el proceso morfológico de erosión y la disponibilidad de sedimento para ser removido por el oleaje y las corrientes litorales. En este sentido, bajo criterio del investigador, será considerada la resistencia que ofrece la litología ante los procesos costeros, tomando como base la clasificación de Gornitz *et al.* (1994). Como puede observarse en la Fig. 11, en la línea de costa domina la presencia de depósitos eólicos, compuestos principalmente de arena de grano fino, seguida de depósitos aluviales en la depresión prelitoral producto del arrastre fluvial. Por último, la presencia de rocas ígneas tal como se menciona en el apartado 2.2.1, es la principal fuente de sedimentos y, a su vez, se presentan como las áreas de mayor resistencia a la abrasión marina.

4. Geomorfología

Esta variable, conjuntamente con la geología, se relacionan con la resistencia física de la costa ante los procesos de erosión e inundación (Núñez *et al.*, 2017) por marea, tsunami o marejada ciclónica o incremento en el nivel del mar, etc. En este parámetro (Fig.11) se engloba la base principal de la vulnerabilidad costera, tal como lo explican Kumar y Kunte (2012), se refiere a la “vulnerabilidad geomórfica”. A partir de la caracterización geomorfológica, es posible definir aquellas áreas susceptibles a la alteración y pérdida de condiciones originales (McLaughlin y Cooper, 2010), de tal manera, que será considerada la caracterización geomorfológica tomando como base la clasificación de Núñez *et al.* (2016) (Véase Anexo1).

5. Elevación

Este parámetro se refiere a la elevación (en msnm) de la región costera. Este parámetro guarda relación con la vulnerabilidad costera al considerar aquellas áreas susceptibles de inundación (Gornitz *et al.*, 1994), ya sea por mareas, tormentas, tsunamis o el ascenso en el nivel del mar, en este sentido, se tiene una relación indirecta entre la elevación y la vulnerabilidad, tal como exponen Kumar y Kunte

(2012), las áreas con menor vulnerabilidad serán aquellas con una mayor elevación. Esta variable se extrajo del modelo digital de elevación LIDAR 5m de INEGI (2012) clasificado en 5 rangos mediante el método de natural breaks (Fig.26)

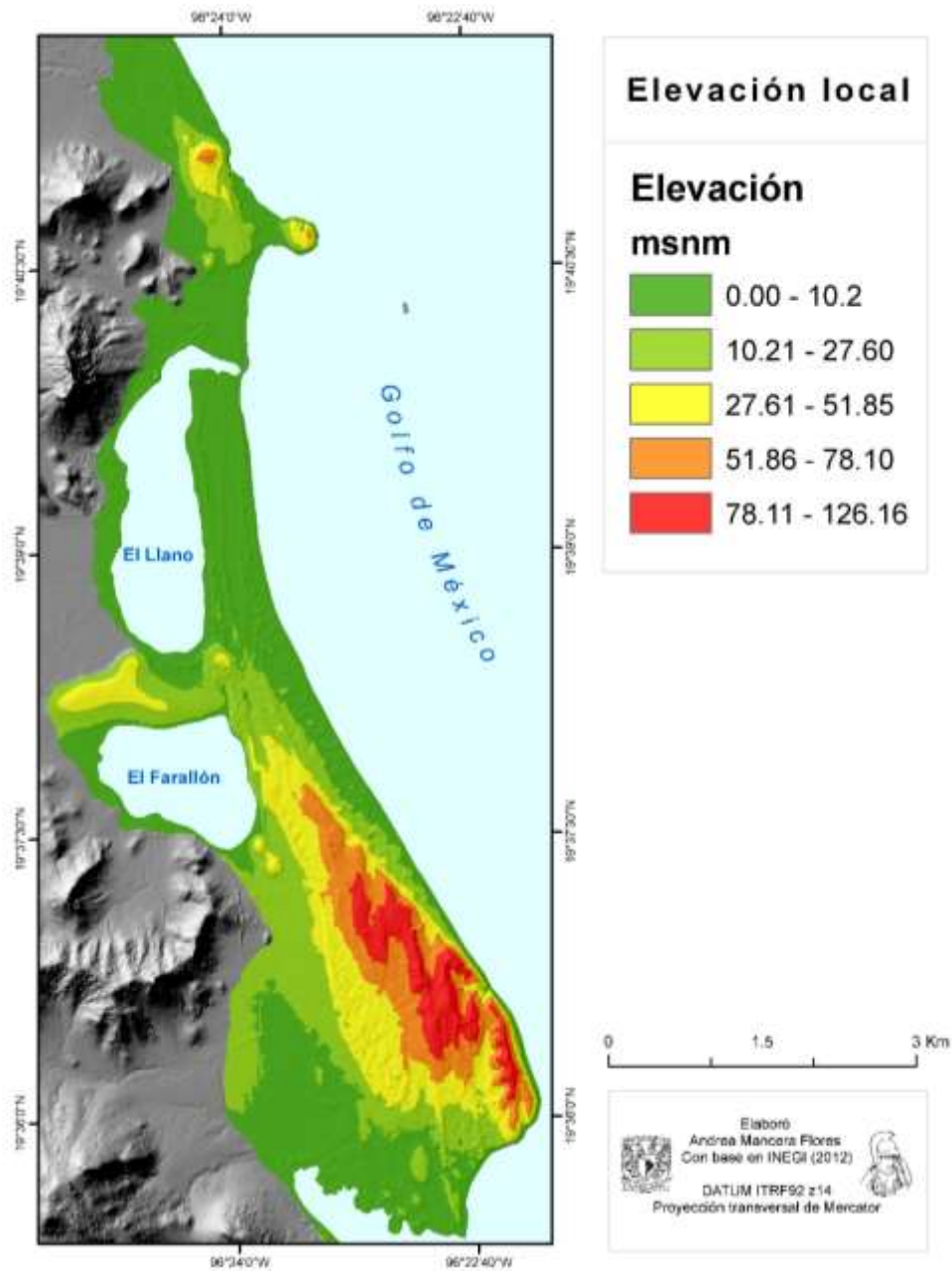


Fig.26. Mapa de elevación para la zona costera. Elaboración propia.

6. Pendiente

Dentro de los parámetros físicos, la pendiente, al igual que la elevación, guarda relación con la susceptibilidad de inundación de la zona costera, por lo que este indicador determina que las áreas con mayor vulnerabilidad implican menores pendientes (Núñez *et al.*, 2017). De igual manera que la elevación, el cálculo de la pendiente se derivó del modelo digital de elevación de INEGI (2012) y la herramienta SLOPE del software ArcGis 10.1 (Fig.27).

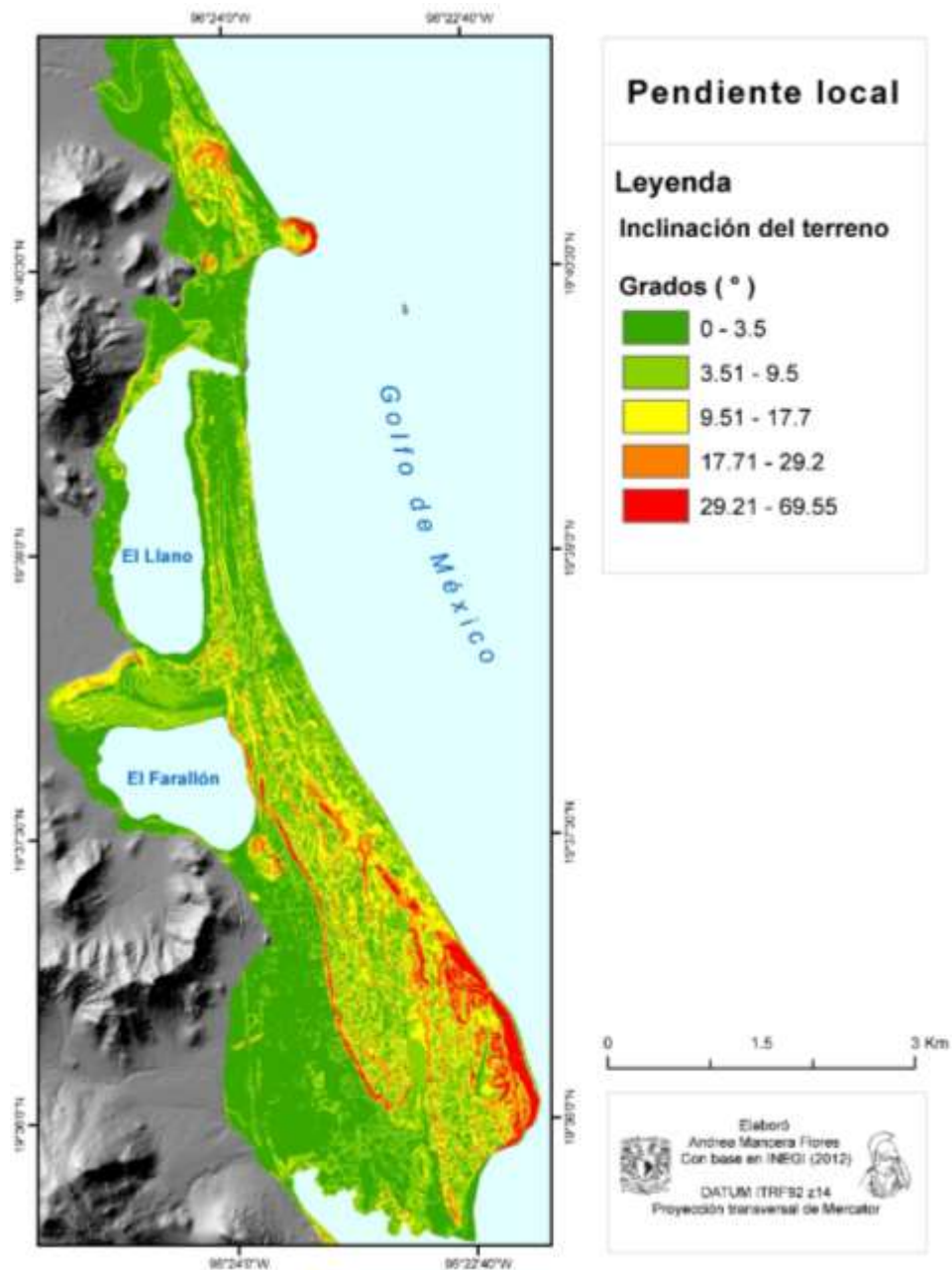


Fig. 27. Mapa de Pendiente local. Elaboración propia.

7. Porcentaje de afloramiento rocoso

De acuerdo con la tipología de costa mencionada en el apartado 1.2, bajo la misma temporalidad, tanto las costas abrasivas como las acumulativas, tiene una respuesta diferente a los procesos costeros, en este sentido, las costas rocosas mantendrán una mayor resistencia a los cambios que las costas arenosas. Este indicador refiere al porcentaje de costa acantilada por cada segmento de 100m de costa.

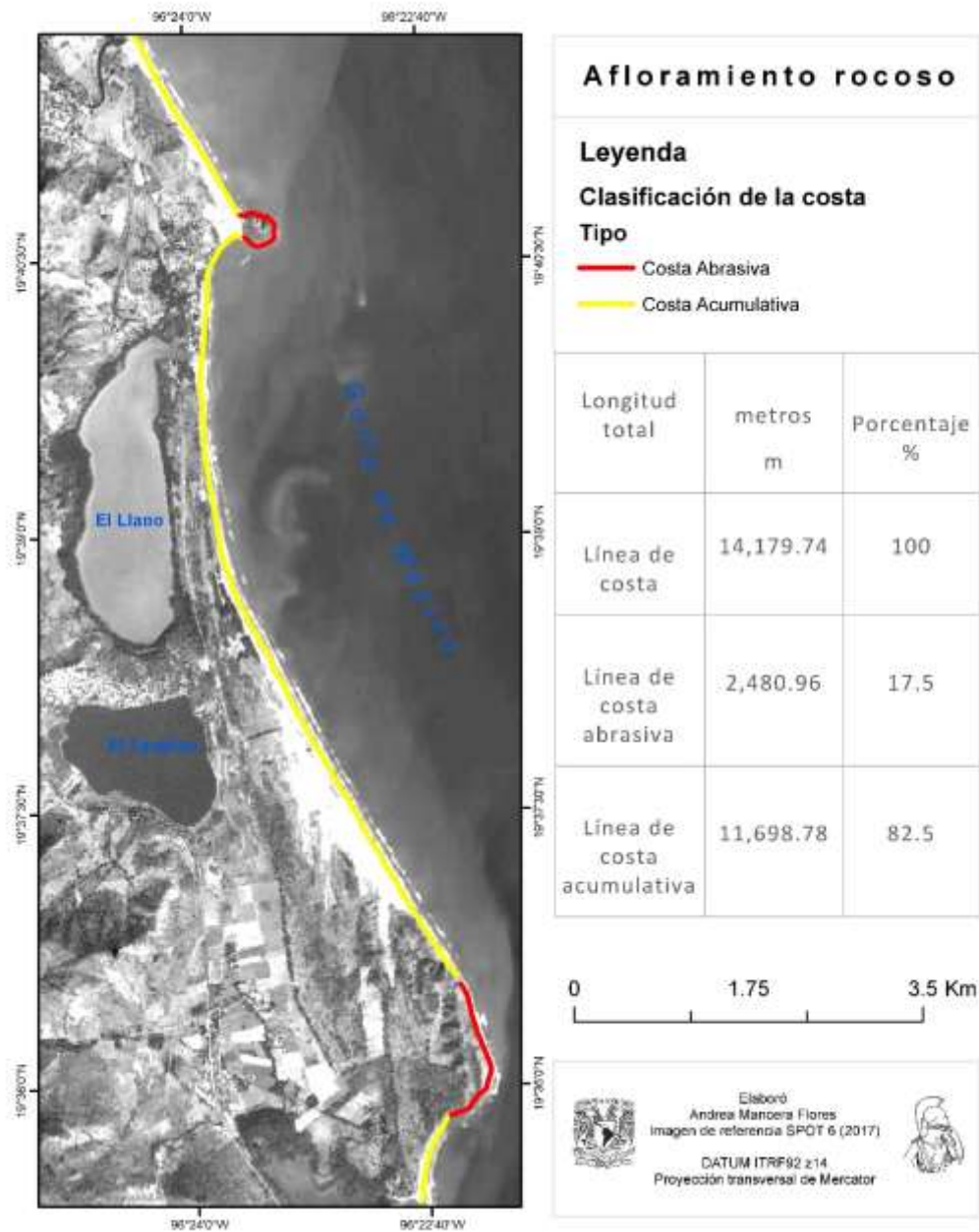


Fig.28. Tipología de la costa con base en la clasificación de Shepard (1963) para costas secundarias. Elaboración propia.

En la zona de estudio, aunque domina la presencia de costa acumulativa 82.5%, se tienen dos segmentos de línea de costa abrasiva, una en la porción norte que corresponde al tómbolo de Villa Rica un acantilado rocoso semicircular, de composición riolítica de 78m de altura, y otra en la porción sur-este del campo de dunas Farallón, en lo que se denomina Punta Jicacos donde la consolidación de sedimentos eólicos ha dado pie a la formación de una costa abrasiva de altura aproximada de 80m.

8. Ríos

La presencia o ausencia de ríos está referida a que son las áreas con mayor dinamismo dentro de la zona costera y con menor elevación, por lo tanto, potencialmente más vulnerables (McLaughlin y Cooper, 2010). En este sentido, dadas las condiciones del área se agregaron también los bocas lagunares que cumplen condiciones similares a las desembocaduras de los ríos.

Esta variable se obtuvo mediante la presencia o ausencia de corrientes fluviales en cada una de las celdas de análisis, convirtiéndose en una variable binaria. en la zona de estudio se encuentran además de corrientes intermitentes, la desembocadura del río El Limón en el límite norte, la boca de la laguna El Llano al sur de la localidad de Villa Rica que disminuye su volumen durante la temporada de lluvias y al sur la boca de la laguna la Mancha marcando el límite sur.

9. Marea de tormenta

Esta variable se refiere al incremento en el nivel medio del mar como consecuencia del embate de los ciclones tropicales, que implica la inundación de zonas bajas adyacentes a la costa, así como la remoción del sedimento. Este parámetro se basa en la escala de medición Saffir–Simpson que clasifica los ciclones tropicales y plantea un nivel mínimo de marea para cada categoría de intensidad en relación con la elevación. En la Fig. 29, las áreas inundables corresponden a las zonas acumulativas adyacentes a los cuerpos lagunares de El Llano incluyendo el tómbolo, la laguna de la Mancha y la zona de la desembocadura del río El Limón.

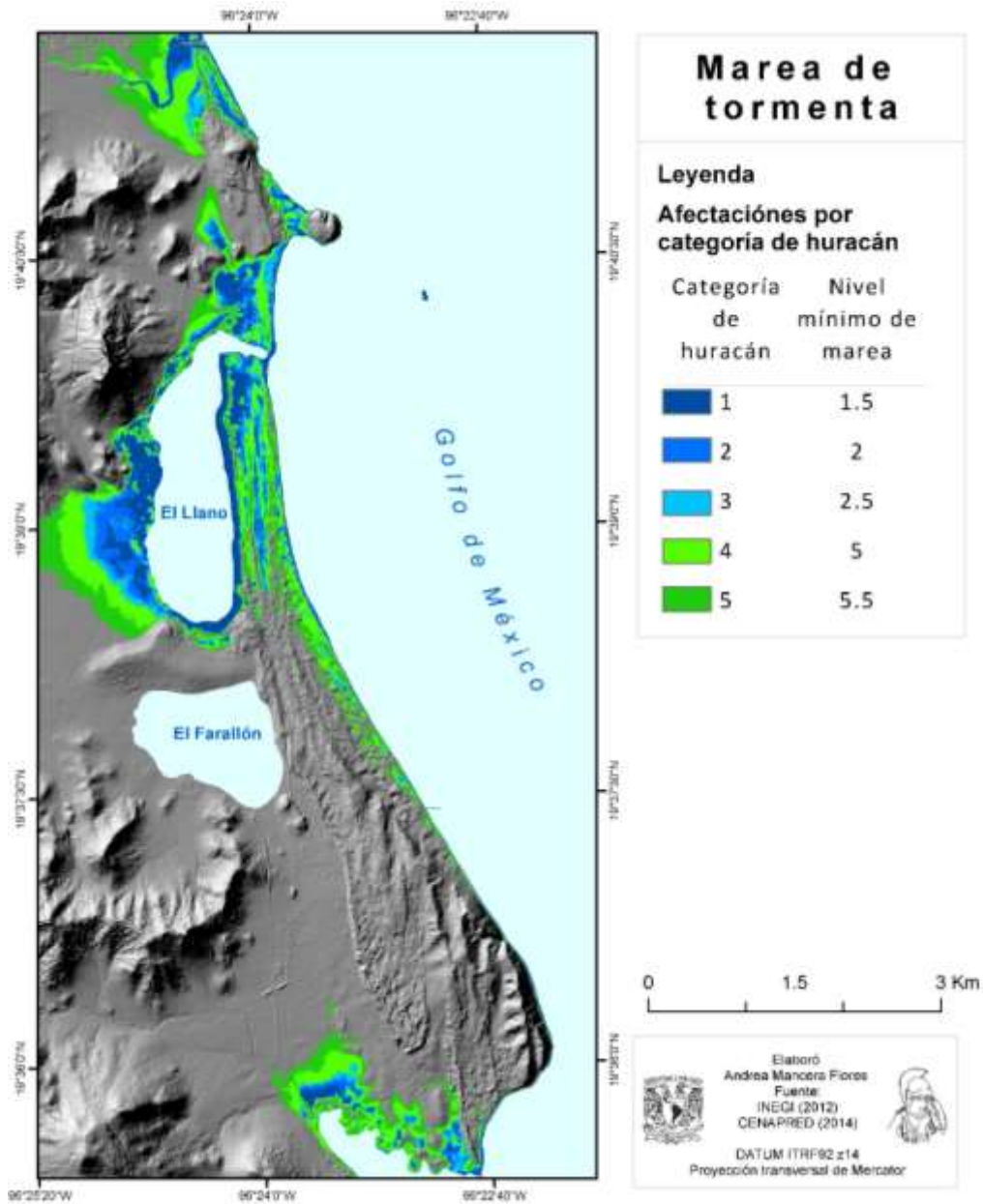


Fig.29. Mapa de la marea de tormenta. Elaboración propia.

10. Distancia de la vegetación detrás de la playa

Dentro de los estudios de morfodinámica costera, no es posible obviar la relevancia de la vegetación como una condición favorable a la morfología, la vegetación

contribuye a la estabilidad y fijación de sedimento en las zonas costeras y, además, forma una barrera natural que impide el arrastre de sedimento. La distancia de la vegetación se considera la distancia en metros en línea recta entre la línea de costa y la línea de vegetación estable siguiendo el parámetro de Boak y Turner (2008) (Fig. 5).

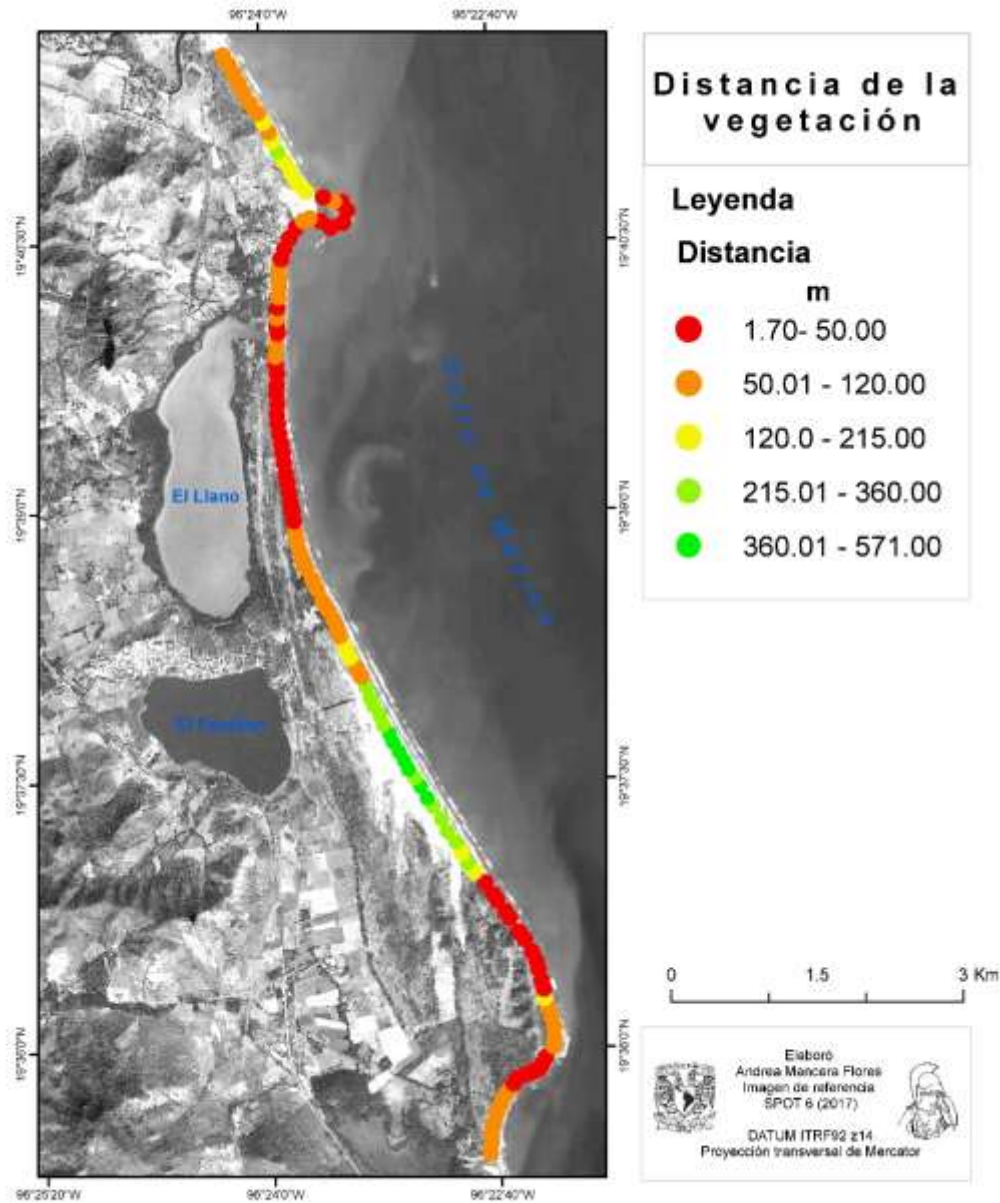


Fig. 30. Mapa de distancia de la vegetación de trasplaza a la línea de costa. Elaboración propia.

En toda el área la vegetación tiene una distancia en promedio de 109 m a excepción del área del campo de dunas de Farallón, donde el constante aporte eólico evita la colonización de comunidades vegetales de matorral y la distancia promedio es de 291 m, por otra parte, a la altura de la laguna El Llano la distancia de la vegetación es menor a 38 m, esto se debe principalmente al alto dinamismo de esta región y las tasas de erosión que presenta.

En las regiones acantiladas la vegetación tiene una limitante vertical por lo tanto en un plano la distancia de la vegetación es menor, en contraste con el área habitacional al sur del tómbolo, donde la presencia de la vegetación está limitada por las actividades antrópicas y la construcción de edificios, que sustituyen la cobertura vegetal.

El resto de las variables físicas se obtuvieron del procesamiento de los datos recabados en campo durante mayo-junio del 2018. Los perfiles de playa fueron trazados desde la línea de costa y marcando el límite interior por la franja vegetación desarrollada, mismo que define el límite de las dunas bajas activas. En este sentido, hacia la porción sur de la zona de estudio (Playa Farallón) se consideró pertinente elaborar perfiles de forma digital en el software ArcGis, tomando como base el MDE de LIDAR a 5m de INEGI (2012) a causa de la presencia del campo de dunas Farallón que presenta una mayor longitud de dunas activas tal como proponen Dean et al. (2013). Se obtuvieron un total de 15 perfiles (11 en campo y 4 por medios digitales), de los cuales se calcularon el ancho de la berma, el ancho de duna y el estado morfodinámico (parámetro de Dean).

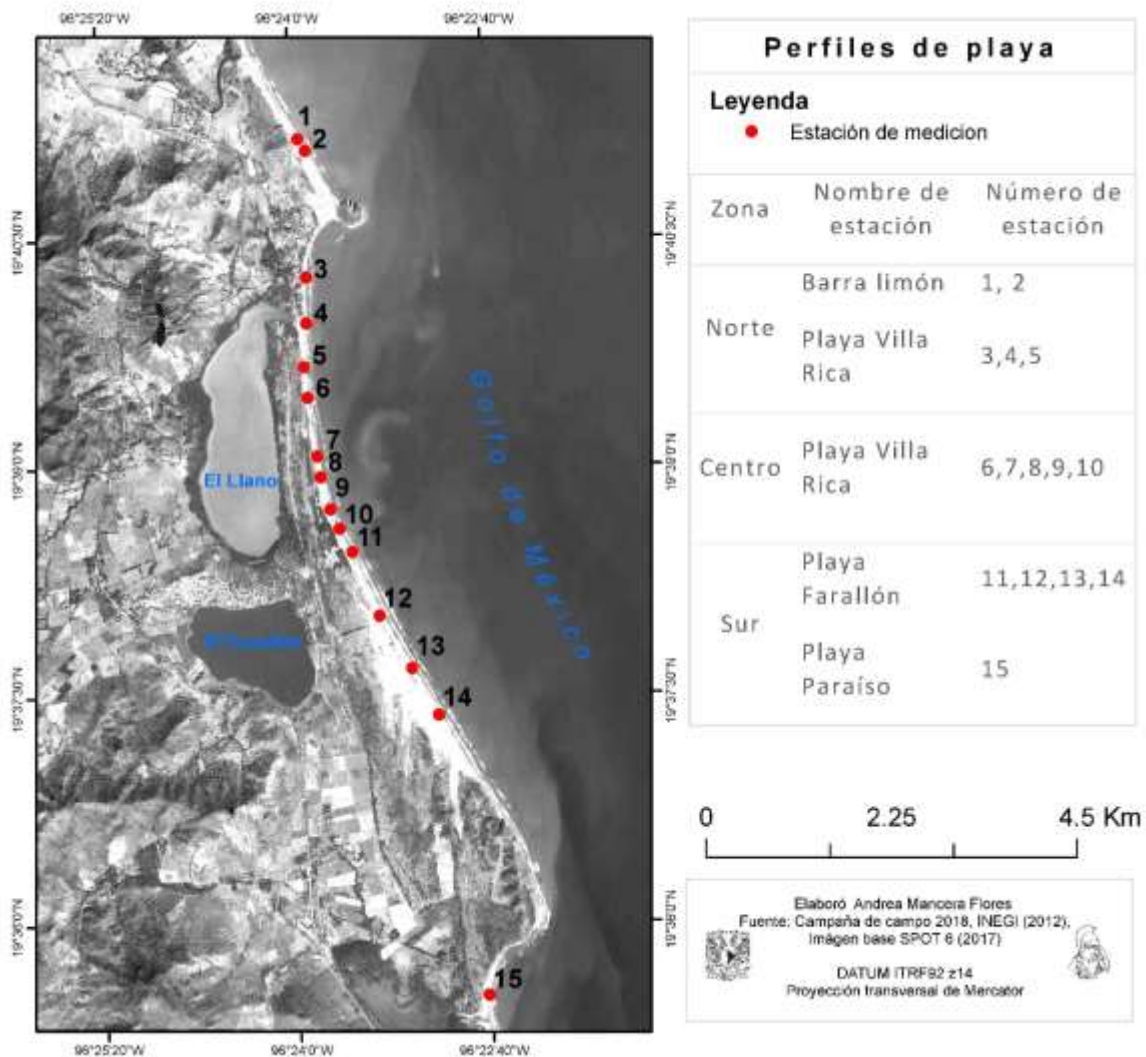


Fig. 31. Estaciones de playa

11. Ancho de la playa.

En las costas acumulativas, la acumulación de sedimentos finos del tamaño de las arenas, en general, se denomina como playa, y su forma es reflejo del control de los agentes marinos y eólicos sobre el transporte y depositación de los sedimentos. En este sentido, el ancho de la playa que corresponde a la zona de *backshore*, determina la tendencia morfodinámica dominante, playas anchas serán reflejo de una tendencia positiva, es decir, mayor aporte sedimentario.

Esta variable se calcula mediante perfiles de playa, donde se determina la longitud de cada transecto, desde el límite inferior 0,0, hasta la base de la primera duna (Gráfico 5.)

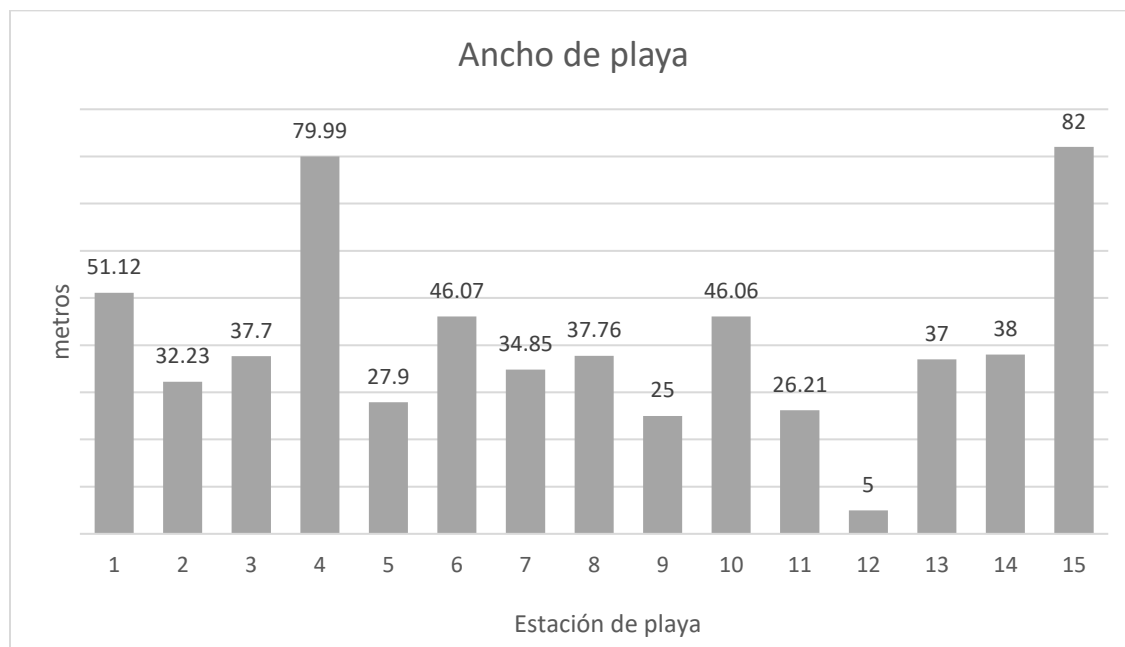


Gráfico 5. Ancho de playa. Elaboración propia. Trabajo de campo mayo-junio 2018, INEGI (2012).

Como puede observarse, la longitud de la berma en promedio supera los 25 m, son playas anchas con poca pendiente (Véase anexo 3), tanto en el área del frente de playa como en la berma.

12. Ancho de la duna

Al igual que el parámetro anterior, el ancho de la duna es reflejo de la dinámica y del agente dominante en la zona costera. Para estudios de morfodinámica se considera el ancho de las dunas detrás de la playa; este parámetro se estima y calcula a partir de perfiles de playa, la medición comienza desde la base de la primera duna hasta el límite de asentamiento de la vegetación (Fig. 7).

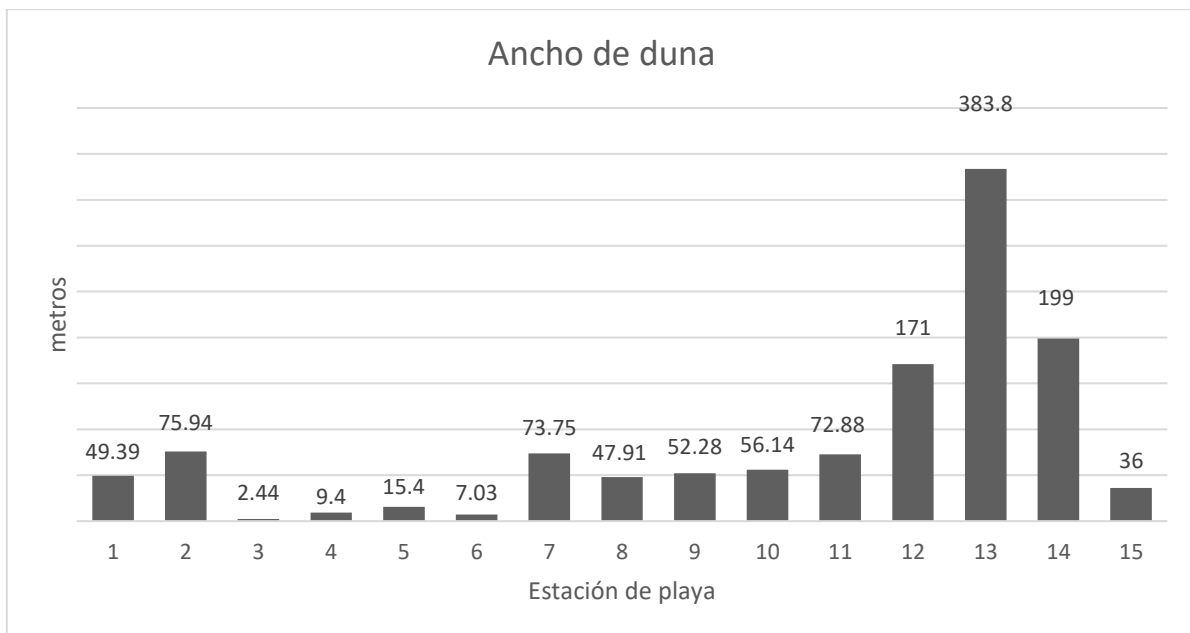


Gráfico 6. Ancho de la berma. Elaboración propia. Trabajo de campo mayo-junio 2018, INEGI (2012).

Como puede verse en la Gráfico 6, la longitud de las dunas en los perfiles 3 al 6, se reduce por la presencia de la zona habitada (Villa Rica), mientras que en la zona de la laguna El Llano presentan una longitud homogénea, tanto en los primeros perfiles (1 y 2) como en los últimos (7 al 14) resulta evidente la presencia del campo de dunas al norte del tómbolo, y al sur en playa Farallón, que se mantienen activos gracias al arrastre eólico y la deriva litoral. En el perfil 15 la longitud de las dunas es reducido, esto se debe principalmente a la “sombra” producida por la presencia de Punta Jicacos que retiene el sedimento en su porción norte.

13. Estado morfodinámico

El estado morfodinámico de la playa, se determina por medio de modelos numéricos de la evolución de playas a largo plazo, que se basan en las relaciones existentes entre la hidrodinámica, la morfología y las características del sedimento; con estos modelos es posible clasificar los tipos de playa con el fin de simplificar el análisis costero (Vidal *et al.*, 1995). No obstante, la existencia de distintos modelos de evolución de playa, se decidió tomar como base el modelo de Wright y Short (1984), calculando el parámetro de Dean, como lo aplican McLaughlin y Cooper (2010), que resulta ideal para determinar el estado morfodinámico en condiciones

micromareales, donde la morfología de la playa muestra un estado “modal” y cuya respuesta estará influenciada principalmente por el oleaje (Vidal *et al.*, 1995)

Con fines de simplificar la explicación y como consecuencia de la escases de datos de marea locales, se realizó la comparación de dos índices (Parámetro de Dean e índice de playa BI) para explicar el estado morfodinámico de las playas de Villa Rica norte (Barra Limón), Villa Rica, playa Farallón y playa Paraíso (Cuadros 7 y 8). En general, en las playas de la zona investigada, las características hidrodinámicas son homogéneas y se asocian a playas de tipo disipativas micromareales, donde en general, la pendiente de la berma es suave, oscila entre los 0.8° y los 6.5°, con más de tres olas en la zona de barrido, esto se confirma con la aplicación del Parámetro de Dean Ω (Cuadro 7) y el índice de playa BI (Cuadro 8) (McLachlan y Dorvolo, .2005: Celentano y Defeo, 2006).

$$\text{Dean: } \Omega = \frac{A \cdot 100}{TG \cdot PO}$$

Cuadro. 7: Datos de perfiles para determinar el parámetro de Dean.

Perfil	(A) Altura de ola (m)	(PO) periodo de ola (s)	(TG) velocidad de caída (cm/s) *	(Ω) Dean
1	0.5	5	0.62	16.1290323
2	0.5	5	0.62	16.1290323
3	0.5	5	0.62	16.1290323
4	0.5	5	0.62	16.1290323
5	0.5	5	0.62	16.1290323
6	0.8	5	0.62	25.8064516
7	0.8	5	0.62	25.8064516
8	1.4	5	0.62	45.1612903
9	1.4	5	0.62	45.1612903
10	1.4	5	0.62	45.1612903
11	1.4	5	0.62	45.1612903
12	1.5	5	0.62	48.3870968
13	1.5	5	0.62	48.3870968
14	1.5	5	0.62	48.3870968
15	1.5	5	0.62	48.3870968

$$BI = \log^{10} \left(\frac{T \cdot RM}{P} \right)$$

Cuadro. 8: Datos de perfiles para determinar el Índice de playa (BI).

Perfil	T tamaño de grano (unidades ϕ) **	P pendiente (%)	RM rango de marea (m)	Beach Index <i>BI</i>
1	4	11.3936	0.32	-0.949451
2	4	9.6289	0.32	-0.8763667
3	4	6.1163	0.32	-0.6792788
4	4	4.8033	0.32	-0.5743297
5	4	8.7489	0.32	-0.8347435
6	4	3.4921	0.32	-0.4358767
7	4	7.8702	0.32	-0.7887758
8	4	7.8702	0.32	-0.7887758
9	4	5.2408	0.32	-0.6121876
10	4	6.9927	0.32	-0.7374349
11	4	3.7717	0.32	-0.4693272
12	4	3.1776	0.32	-0.3948893
13	4	14.1075	0.32	-1.0422401
14	4	10.7752	0.32	-0.9252154
15	4	1.3964	0.32	-0.0377999

En la gráfica 7 se puede observar un patrón de comportamiento de las playas, donde los perfiles del 1 al 5, correspondientes a playa El Limón y al norte de playa Villa Rica (Fig. 31; Gráfico 7), donde alcanzan los menores valores de Dean, mientras que los perfiles del 8 al 15, mantienen los valores mayores. Ambos grupos se encuentran dentro de la clasificación de playas disipativas, sin embargo, el patrón de comportamiento implica una mayor dinámica en las playas de la porción norte, que puede deberse a la influencia del oleaje por la direccionalidad del viento, por otra parte, para el índice de playa (BI) los valores superiores a -0.85 se presentan en las estaciones 1,2 y 13 y 14 (norte y sur respectivamente) que corresponden a las áreas con los campos de dunas más desarrollados.

** (Román- Sierra *et al.*, 2013); * (Salinas-Tapia *et al.*, 2007).

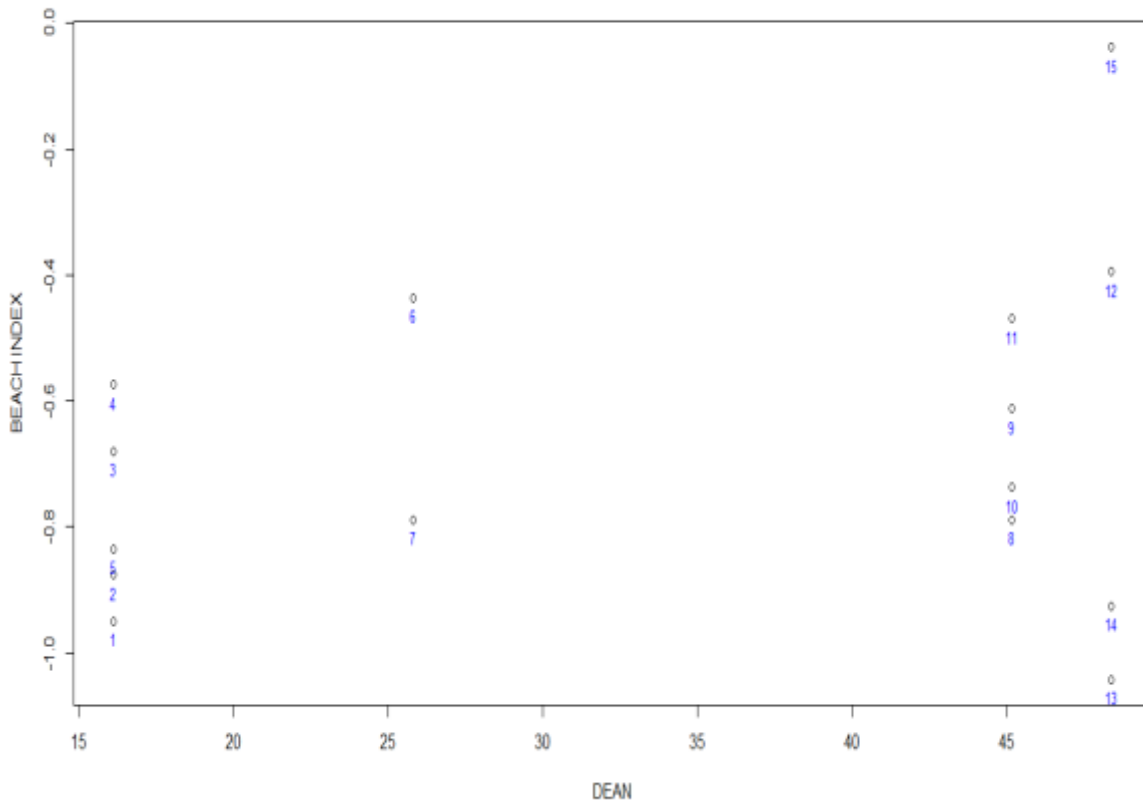


Gráfico. 7. Comparativa de índices de estado morfodinámico Beach Index y parámetro de Dean: Beach Index con tamaño de grano $3\phi+1$, y Dean periodo de oleaje 5s. Elaboración Propia.

3.1.2. Variables socioeconómicas

En los análisis de vulnerabilidad costera no es posible obviar las actividades humanas, que se basan en el aprovechamiento de los sistemas costeros. Ante esta realidad, cada actividad implica modificación de la morfodinámica y alteración del sistema ambiental, en sí mismas “las actividades económicas no cuantifican la vulnerabilidad” en sí, estas variables se consideran de acuerdo al valor social y económico que representan, es decir, se consideran los elementos donde los procesos de erosión tienen un impacto negativo, desde un enfoque cualitativo. En este trabajo y, de acuerdo con el índice local de McLaughlin y Cooper (2010), se emplearon dos variables socioeconómicas.

14. Carreteras.

Desde una perspectiva socioeconómica, la presencia de carreteras es consideradas como puntos clave para la comunicación, pero tanto la construcción como el mantenimiento y la reparación de éstas, implican un fuerte costo gubernamental, tal como lo explican McLaughlin y Cooper (2010). Por otra parte, si la construcción implica la modificación del terreno, se consideró no solo la presencia de carreteras si no también la clase de la misma para considerar el rango de ponderación necesario para determinar la vulnerabilidad costera (Fig. 32). De esta manera que las vías de comunicación de clase A, o en este caso, carreteras de cuatro carriles implican una mayor vulnerabilidad en comparación a los caminos de terracería.

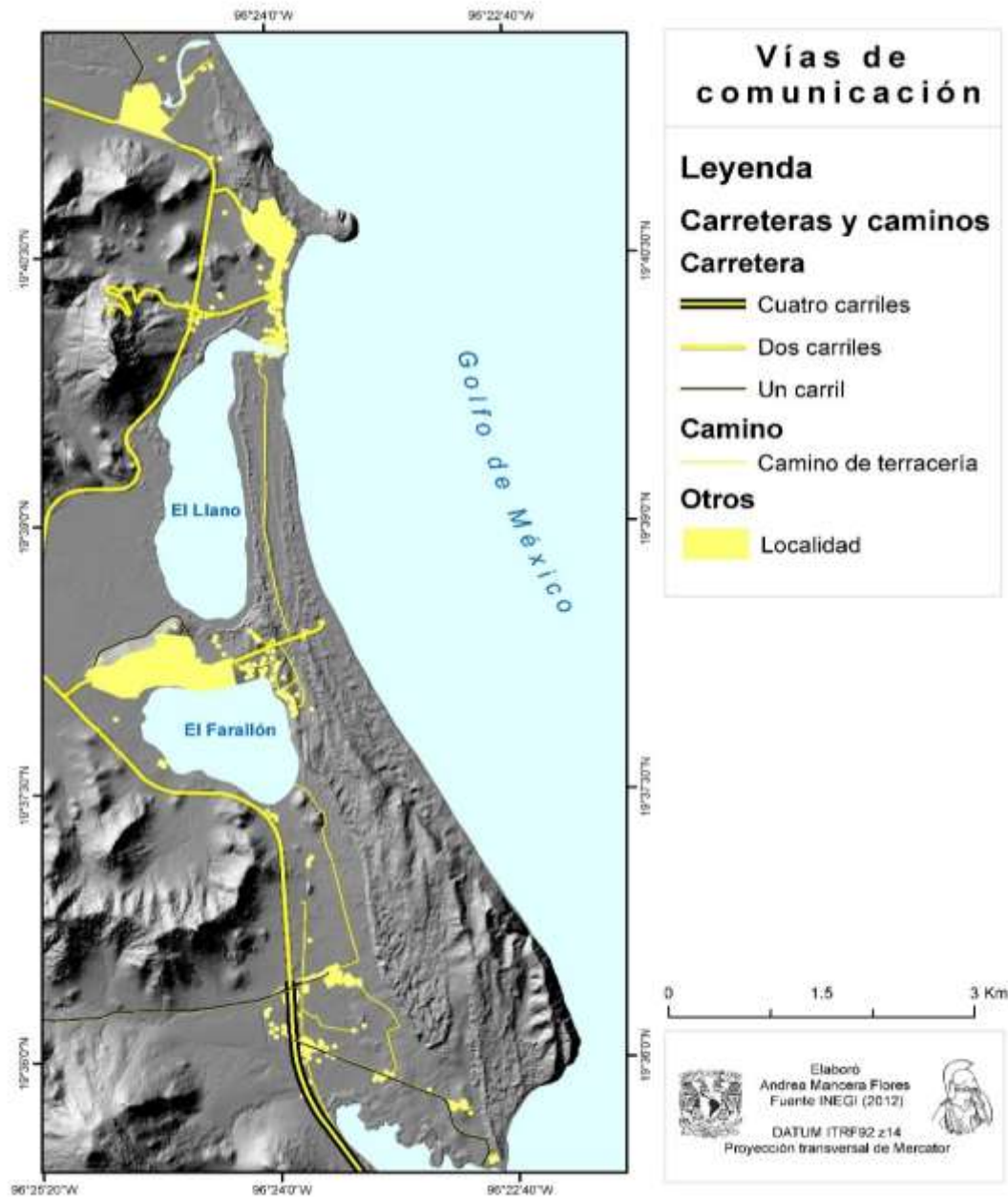


Fig.32. Carreteras y caminos. Elaboración propia.

15. Uso de suelo

El uso de suelo se encuentra relacionado íntimamente con la creación de planes de manejo costero, en este caso, aquellas áreas desprovistas de vegetación o con vegetación sustituida fueron consideradas con mayor vulnerabilidad, dado que serán las principales zonas afectadas por inundaciones marinas en comparación a

las zonas que aún conservan vegetación natural, (Fig. 22). Por otra parte, es necesario mencionar que las áreas con vegetación costera natural (manglar principalmente), actualmente cuentan con una categoría de protección al corresponder a un sitio RAMSAR, lo que debería ayudar a disminuir la vulnerabilidad de estos ecosistemas.

3.2 Desarrollo metodológico para determinar el IVC

En una tercera etapa, para la adaptación del índice de vulnerabilidad costera, se determinó emplear análisis de redundancia para la selección de las variables explicativas al modelo de vulnerabilidad costera, para lo cual fue necesaria la segmentación del litoral en celdas de 1ha, distinguiendo aquellas celdas que corresponden al área de influencia indirecta de los procesos costeros y aquellas de influencia directa, que corresponden aproximadamente 200m del conjunto de líneas de costa.

3.2.1. Preprocesamiento de los datos para el análisis de redundancia

- Variables dummy

El análisis de redundancia tiene como base metodológica, la implementación de regresiones lineales multivariada, que asumen la existencia de linealidad en los datos, sin embargo, cuando se tienen variables cualitativas es necesario transformarlas en variables numéricas lógicas, que puedan aplicarse en modelos de análisis estadístico, en este caso, las variables cualitativas que corresponden a la Litología, Morfología, Uso de suelo y vegetación y Vías de comunicación, fueron transformadas en variables dicotómicas (dummy) dado que el número de categorías es mayor a dos, de tal manera que se redefinen los valores para cada variable tomando valor de 1 en una categoría y 0 en el resto (Alonso y Muñoz, 2014) creando tantas variables como categorías -1 para evitar la multicolinealidad perfecta (Stock y Watson, 2012).

- Estandarización de los datos

Ahora bien, dada la multiplicidad de variables éstas no son dimensionalmente homogéneas, por lo tanto, cada una fue estandarizada con el objetivo de permitir la

comparación entre ellas, mediante con los coeficientes de regresión, obteniendo variables con media 0 y desviación estándar 1 (Legendre y Legendre 1998).

$$Z = \frac{X_i - \bar{X}}{S}$$

3.2.2. Análisis estadístico de los datos

- Análisis de redundancia

El análisis de redundancia se efectuó, de forma separada para la zona de influencia directa de los procesos marinos y para la zona costera general, esto como consecuencia de la ausencia de variables, que no tienen implicación para las zonas que no corresponden a la línea de costa, tales como la batimetría, la tasa de cambio, el ancho de playa, el ancho de duna, el estado morfodinámico, la distancia de la isobata de 20m, porcentaje de afloramiento rocoso y distancia de la vegetación detrás de la playa.

Como el análisis de redundancia es un símil al análisis de componentes principales, es posible obtener N cantidad de componentes principales o ejes canónicos, cuya direccionalidad está definida por la dispersión de los datos, por lo que cada una de las componentes retiene un porcentaje de varianza explicada (Carmona, 1988).

El análisis de redundancia se realizó empleando el *software* R con la librería *Vegan*, en la tabla derivada de la creación de variables *dummy*, tal como se explica en la sección 3.2.1.

Para determinar la cantidad de componentes principales necesarias para obtener un modelo explicativo, se empleó el criterio de *Broken Stick* o de Palo Roto, que sugiere que la varianza en las componentes es un elemento incrustado en una unidad. En este sentido, si las componentes principales dividieran la varianza de forma aleatoria entre los ejes principales, las fracciones de variación explicada por cada eje serían las mismas que las longitudes de las piezas al dividir una unidad en tantas fracciones como sea posible; bajo este criterio se hace una comparativa con un modelo nulo de palo roto, calculando el porcentaje de varianza explicada. Si la

varianza explicada por la componente es menor a la expuesta por el modelo nulo, entonces se descarta esa componente, reduciendo el número de componentes que resultan explicativas al modelo real (Legendere y Legendere, 1998)

Para determinar qué variables resultan más explicativas para el índice de vulnerabilidad costera se seleccionaron aquellas variables que concentran mayor varianza explicada, considerando el valor umbral superior a ± 1 por cada componente, ya sea de forma negativa o positiva, al mismo tiempo que son descartadas aquellas variables que a pesar de ser explicadas por ambas componentes, resultan redundantes.

- **Zona costera de influencia directa de los procesos marinos.**

Cuadro. 9.: Valores propios y porcentaje de varianza para cada componente principal en el análisis de redundancia para la zona de influencia directa de los procesos marinos.

Componente principal	1	2	3	4	5	6	7	8
Valor propio	<u>5.62</u>	<u>3.95</u>	2.88	2.49	1.86	1.72	1.36	1.30
Porcentaje de varianza	<u>17.56</u>	<u>12.34</u>	8.99	7.78	5.81	5.39	4.24	4.06
Porcentaje de varianza explicada	<u>17.56</u>	<u>29.89</u>	38.88	46.66	52.47	57.85	62.10	66.15
Porcentaje de broken-stick	<u>14.82</u>	<u>10.98</u>	9.06	7.77	6.81	6.04	5.40	4.85
porcentaje acumulado broken-stick	<u>14.82</u>	<u>25.80</u>	34.86	42.63	49.44	55.49	60.89	65.74

En el cuadro 9, se puede observar que el 66.15% de la varianza explicada, se concentra en ocho componentes principales, pero únicamente dos concentran el 29.89% del total de la varianza explicada que supera la definida por el modelo nulo, que se muestra el criterio *Broken Stick* con un porcentaje de varianza acumulada para las dos primeras componentes del 25.08%. Por lo tanto, para la selección de las variables únicamente se consideraron la CP1 y la CP2, ya que la primera componente principal explica el 17.56% de la varianza, mientras que la segunda componente captura poco más del 12%. Aunque, la componente principal 4 explica

una mayor varianza en comparación al modelo nulo (Gráfico. 8), es una diferencia de 0.01%, que es baja en comparación a la diferencia marcada por las primeras dos componentes, por lo tanto, también fue descartada.

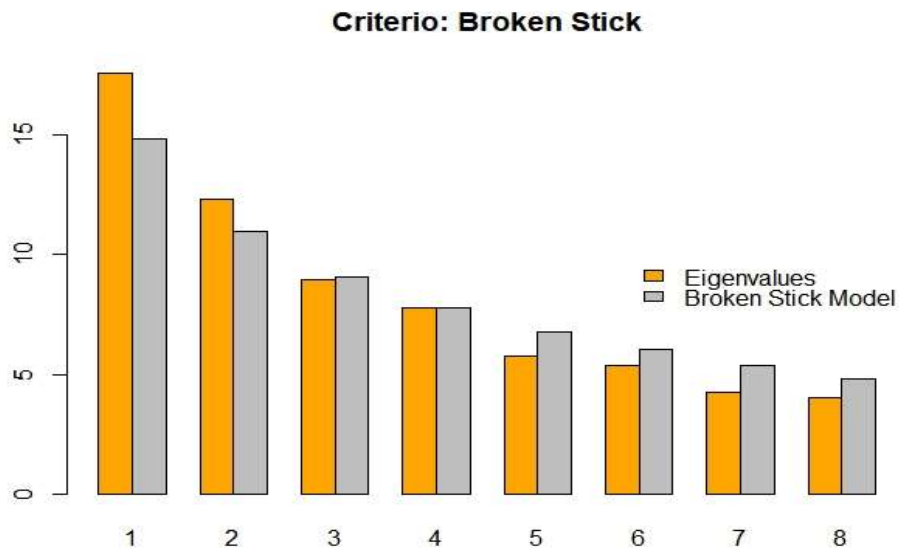


Gráfico. 8. Criterio de *Broken stick* para la selección de variables de la zona de influencia directa de los procesos costeros.

En el cuadro 10, es posible ver cuáles son las variables con mayores puntajes en el análisis de redundancia, para el caso del primer componente principal, el uso de suelo y vegetación, la morfología, el porcentaje de afloramiento rocoso, la elevación y la pendiente, así como la anchura de la berma, mientras que, para la segunda componente, las variables con mayor valor son la litología, la anchura de la duna, la distancia de la vegetación y el parámetro de Dean. Por otra parte, de estas variables, aquellas que presentan un eje canónico mayor (Gráfico 9) y, por tanto, son explicativas para la vulnerabilidad costera son uso de suelo y vegetación, la morfología, el porcentaje de afloramiento rocoso, la elevación, la litología, la marea de tormenta, el ancho de berma y el parámetro de Dean, a pesar de que tanto la anchura de la duna, como distancia de la vegetación son variables con un eje canónico de mayor longitud, resultan redundantes con la variable de litología, por lo

tanto son descartadas. Del mismo modo ocurre con la pendiente, de esta manera se reducen las variables de 15 a 8 para la adaptación del índice de vulnerabilidad.

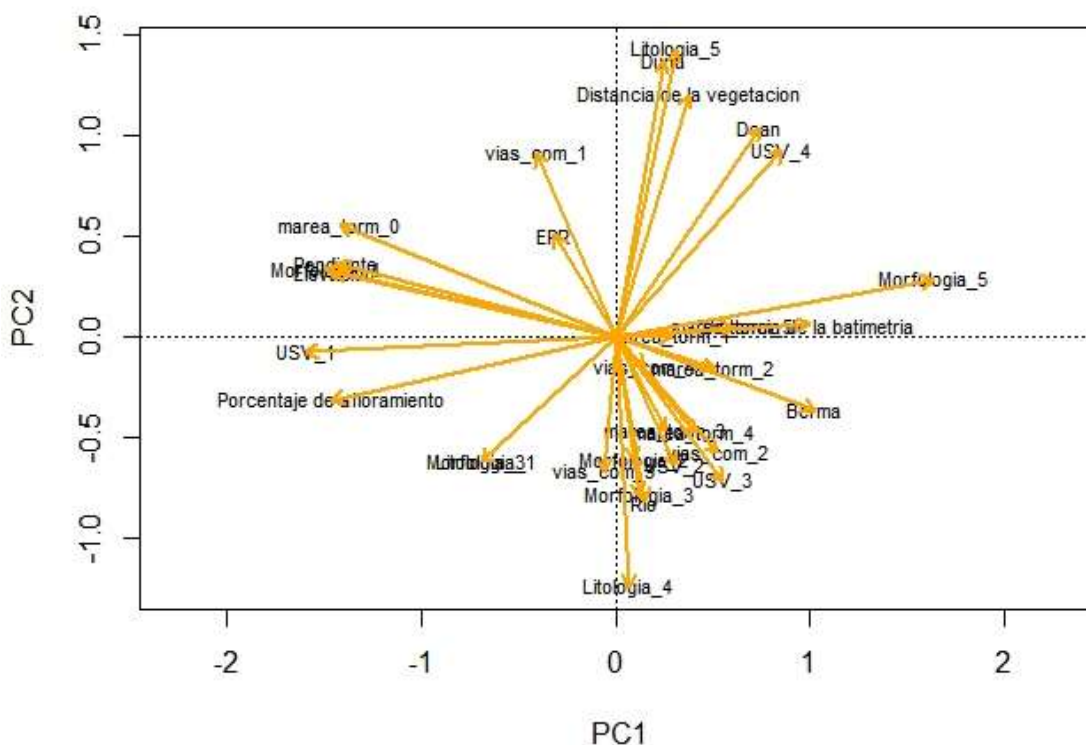


Gráfico 9. Análisis de redundancia canónica, para la zona costera general. eigenvalues y ejes canónicos para PC1 y PC2.

Cuadro. 10: Puntajes de variables o coordenadas de variables de la zona de influencia directa de los procesos marinos en PC1 y PC2.

Variable	PC1	PC2
USV_1	-1.591	-0.075
Morfologia_4	-1.489	0.331
Porcentaje de afloramiento	-1.46	-0.316
Elevación	-1.448	0.322
Litologia_4	0.07	-1.248
Dean	0.738	1.041
marea_torm_0	-1.418	0.55
Berma	1.024	-0.362

Zona costera general

Cuadro. 11: Valores propios y porcentaje de varianza para cada componente principal en el análisis de redundancia para la zona costera general.

Componente principal	1	2	3	4	5	6	7	8
Valor propio	<u>5.47</u>	<u>3.48</u>	2.46	1.80	1.51	1.30	1.21	1.11
Porcentaje de varianza	<u>19.54</u>	<u>12.44</u>	8.79	6.43	5.41	4.65	4.31	3.97
Porcentaje de varianza explicada	<u>19.54</u>	<u>31.97</u>	40.76	47.19	52.60	57.25	61.56	65.53
Porcentaje de broken-stick	<u>16.24</u>	<u>11.89</u>	9.71	8.27	7.18	6.31	5.58	4.96
porcentaje acumulado broken-stick	<u>16.24</u>	<u>28.12</u>	37.84	46.10	53.28	59.59	65.17	70.14

En el cuadro 11 para la zona costera general, el 65.53% del total de la varianza se explica por ocho componentes principales, sin embargo, al igual que en primer análisis, únicamente el 31.97% de esa varianza se explica por las dos primeras componentes principales. La comprobación de la significancia estadística de las componentes fue probada mediante el criterio de *Broken Stick* (Gráfico 10), donde ambas componentes superan el porcentaje de varianza explicada por el modelo nulo (cuadro 8), la primera componente principal explica el 19.55% de la varianza mientras que la segunda el 12.44%.

Criterio: Broken Stick

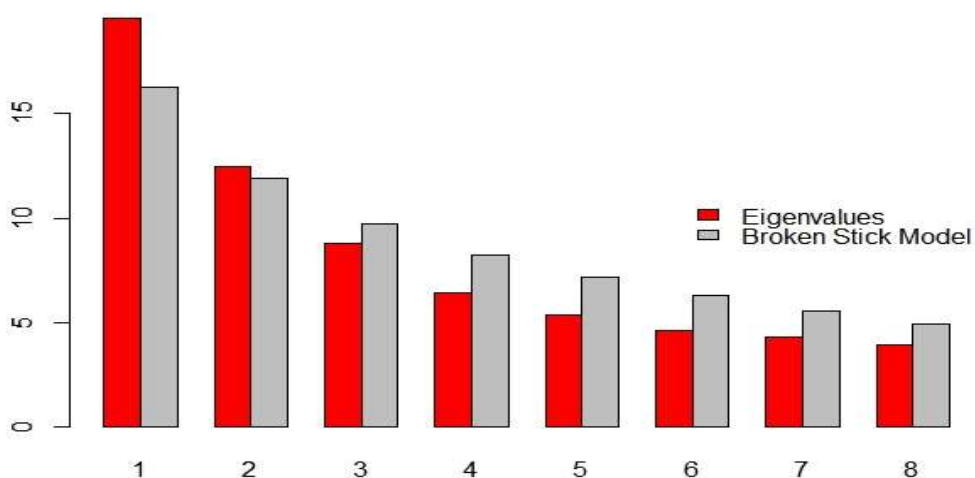


Gráfico. 10. Criterio de *Broken stick* para la selección de variables de la zona de estudio general.

Es necesario mencionar, que para el análisis de la zona costera general no fueron consideradas las 15 variables seleccionadas en el apartado 3.1, por lo que únicamente fueron contempladas ocho variables.

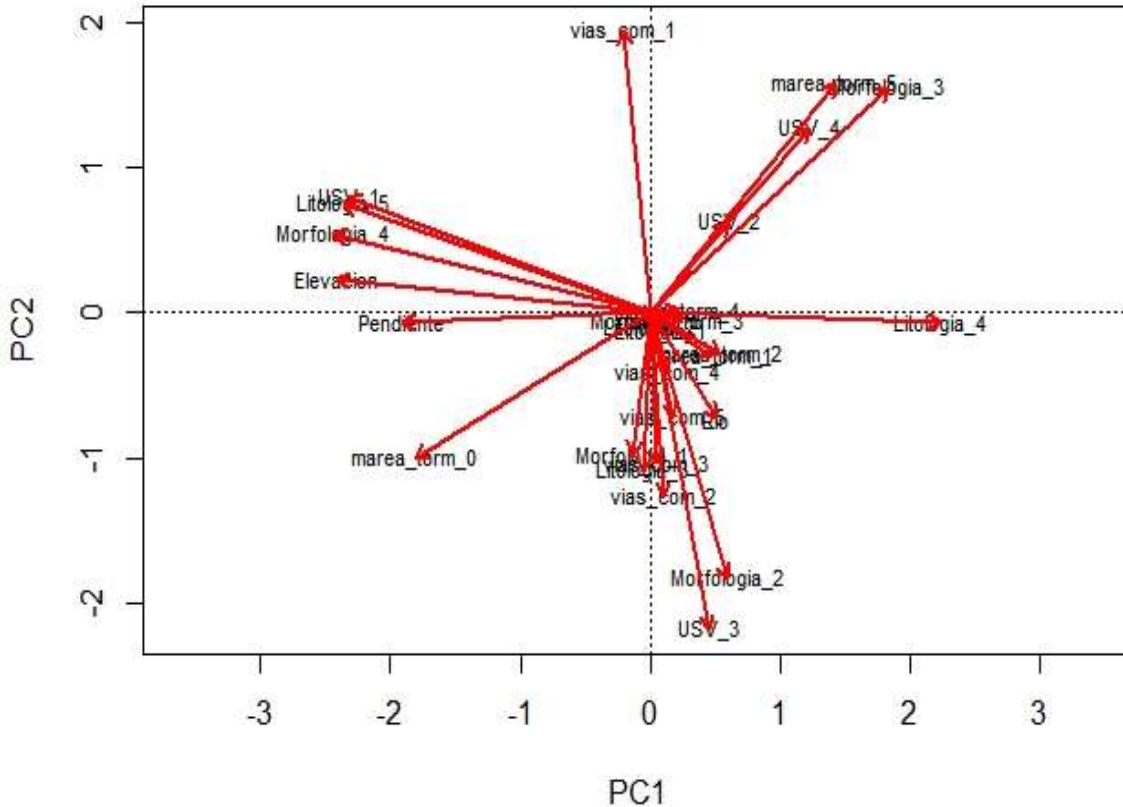


Gráfico 11. Análisis de redundancia canónica, para la zona costera general. eigenvalues y ejes canónicos para PC1 y PC2.

Cuadro. 12: Puntajes de variables o coordenadas de variables de la zona costera general en PC1 y PC2.

Variable	PC1	PC2
Morfología_4	-2.436	0.544
Elevación	-2.416	0.235
Litología_5	-2.356	0.753
USV_1	-2.318	0.795
marea_torm_5	1.429	1.583
vias_com_1	-0.205	1.947

En el cuadro 12, se observan los puntajes o valores de coordenadas para cada componente en cada una de las variables considerando el valor umbral de ± 1.5 mientras se cumpliera la misma, mientras que en la gráfico 11, los ejes canónicos de mayor longitud que guardan una relación estrecha con la vulnerabilidad costera, son la morfología, la elevación, litología, uso de suelo y vegetación, vías de comunicación, y marea de tormenta es decir, de ocho variables empleadas en el análisis seis resultan explicativas al modelo.

3.3 Determinación del Índice de Vulnerabilidad Costera

Un índice es, en todos los sentidos, una herramienta sintética para explicar un proceso complejo, por lo tanto, el índice de vulnerabilidad costera se compone de un número reducido de variables, que concentran la mayor cantidad de información y presenten una aproximación a la realidad. El principal objetivo de emplear el análisis de redundancia fue obtener las variables que al tener menor correlación resultan explicativas a la vulnerabilidad física costera.

Es necesario mencionar, que, dada la ambigüedad para delimitar la zona costera, presentar un modelo estadístico es complejo, pues es común que los procesos naturales no sean homogéneos para toda la costa, al ser la frontera entre dos ambientes muy diferentes los límites dentro son difusos y están mayormente definidos por la dominancia de los agentes geomorfológicos. Todo esto resulta en diferentes índices útiles para en diferentes escalas y objetivos.

A pesar de que, a consecuencia de las características de la zona costera se dividió la zona en dos regiones principales, el análisis de redundancia para ambas coincide en que de las 15 variables empleadas seis explican la vulnerabilidad de forma regional, dando como resultado un índice general (*IVCgeneral*).

La presencia o ausencia de variables exclusivas a la zona, con dominancia de procesos marinos tales como, la tasa de cambio de la línea de costa, o la distancia de la vegetación de trascosta tiene un claro efecto en la modelación estadística por lo que fue preciso llevar a cabo el análisis de redundancia por separado facilitando dos índices adaptados a las características físicas de cada área.

El índice general corresponde a la zona donde la influencia de los procesos marinos no es evidente, es decir, el área detrás de la línea de costa, donde los principales fenómenos presentes son la acumulación por agentes eólicos o fluviales y la influencia extraordinaria de fenómenos hidrometeorológicos, por lo que, es el resultado de la conjugación de la elevación, la morfología, la litología, los niveles mínimos de marea de tormenta, y el uso de suelo y vegetación.

$$IVC_{general} = \frac{\sqrt{a * b * c * d * e * f}}{6}$$

Cuando se toma en cuenta la acción directa del mar en el continente, la zona fue delimitada por la variación histórica de la línea de costa, que corresponde a un área de aproximadamente 200 m del conjunto de líneas de costa. Se consideran otras variables donde es evidente la influencia del oleaje sobre la costa, por lo que la vulnerabilidad costera para la zona de influencia directa de los procesos costeros es producto de la asociación de la elevación, la morfología, la litología, el uso de suelo y vegetación, el porcentaje de afloramiento rocoso, el estado morfodinámico de la playa y el ancho de la berma (*IVCzd*).

$$IVC_{zd} = \frac{\sqrt{a * b * c * d * e * g * h * i}}{8}$$

Donde:

a = Geología

b = Geomorfología

c = Uso de suelo y vegetación

d = Elevación

e = Marea de tormenta

f = Vías de comunicación

g = Porcentaje de afloramiento rocoso

h = Estado morfodinámico

i = Ancho de la playa

Cuadro. 13: Rangos de clasificación de vulnerabilidad para cada variable.

Variables	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
	1	2	3	4	5
Geología	Cuerpos intrusivos Diorita y Gabro.	Cuerpos ígneos intrusivos de Diorita (Pórfido-andesita)	Depósitos volcánicos de Andesita y Toba riolítica	Depósitos aluviales	Depósitos (de sedimentos) eólicos finos consolidados y no consolidados
Geomorfología	Lomerío bajo, acantilados medios, costas abrasivas.	Llanura y terrazas fluviales	Llanura lacustre/aluvial y cuerpos lagunares	Llanura eólica inactiva con dunas consolidadas y acantilado bajo.	Llanura eólica activa, playa, dunas embrionarias y costa acumulativa.
Uso de suelo y vegetación.	Vegetación natural de selva baja y media	Vegetación natural de humedales (manglar, tular, popal)	Zonas agrícolas	Vegetación sustituida por pastizal para actividades pecuarias	Áreas urbanas y desprovistas de vegetación
Elevación	>78.11	51.86 - 78.10	27.61 - 51.85	10.21 - 27.60	< 10.2
Marea de Tormenta (nivel mínimo de marea)	≤ 5.5 m. Huracán categoría 5 o sin presencia de marea de tormenta.	≤ 5 m. Huracán categoría 4	≤ 2.5 m. Huracán de categoría 3	≤ 2 m, huracán categoría 2.	≤ 1.5 m. huracán de categoría 1 o Tormenta tropical

Vías de comunicación	Sin vía de comunicación	Camino/Terracería	Carretera de un carril	Carretera de dos carriles	Vía de comunicación primaria, carretera de clase A, cuatro carriles o más.
Porcentaje de afloramiento rocoso	> 4.5 %	3 - 4.5 %	1 - 3 %	< 1%	Sin afloramiento rocoso
Estado morfodinámico	Acantilados y afloramiento rocoso.	>45.16	45.16-25.80	25.80-16.12	< 16.12
Anchura de la berma	Acantilados	>60m	30-60m	15-30m	<15m

Capítulo 4. Vulnerabilidad costera: zonificación y gestión

4.1 Aplicación del IVC

Para la aplicación del índice de vulnerabilidad costera fue necesario homogeneizar las variables relacionando las mediante la misma clasificación numérica que indica el grado de vulnerabilidad en 5 rangos, siendo 1 el valor correspondiente a la menor vulnerabilidad y el 5 a mayor grado de vulnerabilidad (Cuadro 12). Todas las variables son consideradas con la misma jerarquía en el índice de vulnerabilidad.

Una vez realizado esto con cada una de las variables en formato ráster con resolución de 25m x 25m y se procedió a la aplicación del índice empleando algebra de mapas en el *software ArcGis* 10.1. El resultado del índice es un valor numérico que no está directamente asociado con un cambio, si no que es la expresión de la vulnerabilidad de forma numérica, a través del cual, es posible determinar las áreas vulnerables que serán mayormente impactadas ante fenómenos como la erosión o inundaciones, los valores pueden variar de 0.166 a 20.833 y 0.125 a 78.125 para el

índice general y local respectivamente, por lo que los productos fueron agrupados en cinco rangos por medio de *natural breaks*.

4.1.1 Evaluación de la vulnerabilidad costera

El mapa del índice de vulnerabilidad costera general (Fig. 33) revela, que la zona frontal de la costa en la porción norte, así como el área adyacente a la laguna de El Llano es el área que tiene valores de vulnerabilidad más altos, del orden de > 4.42 que coincide con las áreas más bajas de la costa que se encuentran abiertas al mar, es una zona donde la cobertura vegetal ha sido sustituida o retirada por la presencia de la zona habitacional, a pesar de que en la laguna El Llano se encuentren restos de comunidades de manglar que podría funcionar como una barrera natural. A su vez, si este ha sido sustituido en parte por pastizales incrementa su vulnerabilidad al retirar la protección del manglar, por otro lado, los dos cuerpos lagunares a pesar de que marcan las áreas más bajas de la zona costera no poseen la misma vulnerabilidad siendo El Farallón menos vulnerable por encontrarse a mayor altura y por la protección que le ofrece el bloque levantado al que le sobreyace el campo dunas farallón porción de la costa donde se presenta la menor vulnerabilidad, con valores de < 1.61 al ser una porción elevada, donde el impacto de la marea de tormenta se ve reducido por las mismas características del terreno, y sin vías de comunicación, lo que permite conservar la cobertura natural.

En el IVCgeneral, el mapa (Fig. 33), muestra un comportamiento casi homogéneo para toda la porción frontal de la costa; en esa área se esperaría encontrar los máximos valores del índice pues corresponden a las áreas bajas, sin cobertura vegetal, donde la geología se constituye mayormente de sedimentos no consolidados. Sin embargo, en esta área costera es posible encontrar una mayor cantidad de indicadores, por lo que fue necesario realizar un análisis independiente (IVCzd) de este sector, contemplando un mayor número de variables.

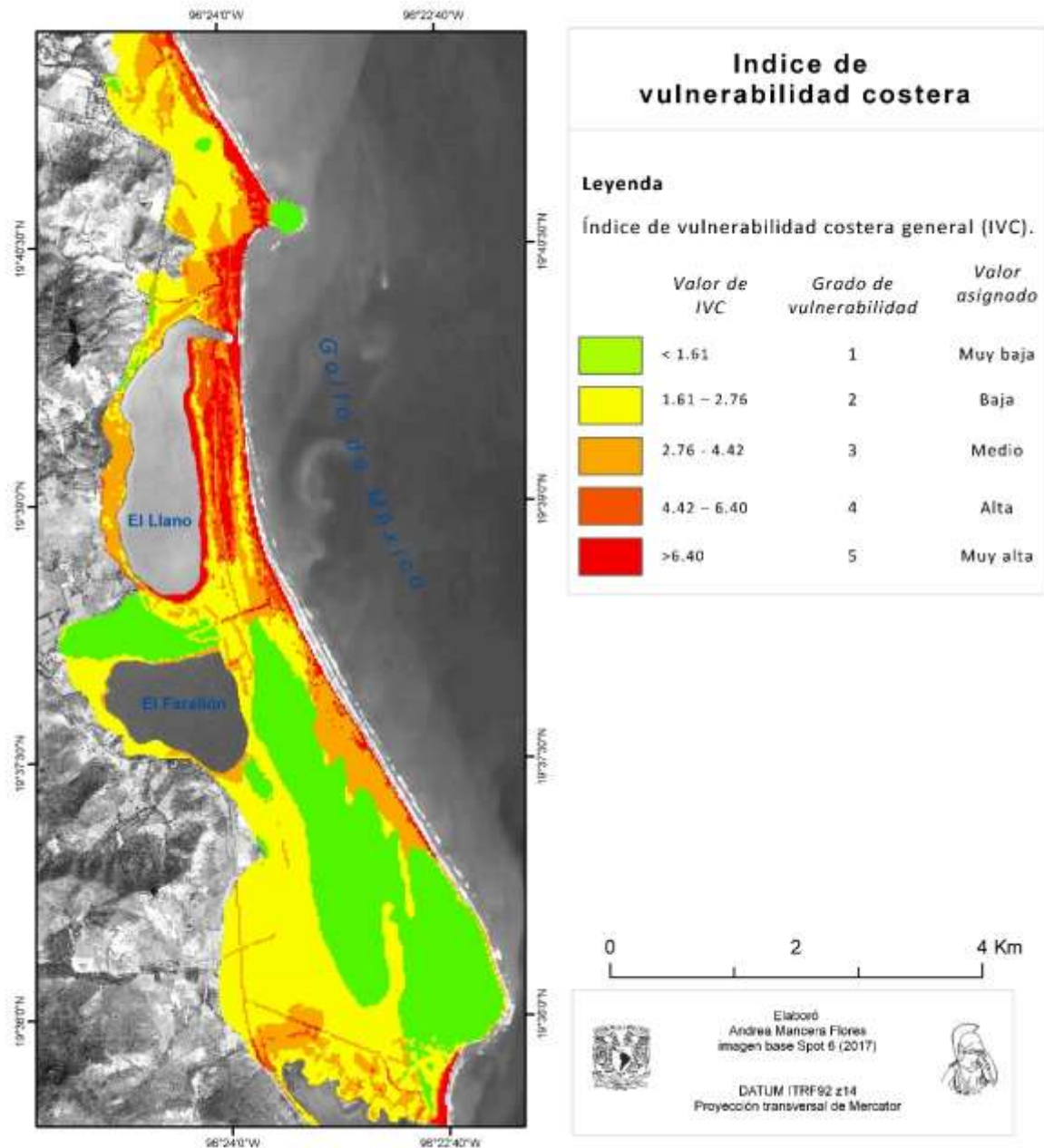


Fig.33. Mapa del índice de vulnerabilidad costera general para la costa norte del municipio de Actopan, Veracruz. Elaboración propia.

Tal como se muestra en la Fig. 34, tras la aplicación del IVCzd, se volvieron a generar los rangos por el mismo método de *natural breaks*, lo que incrementa las diferencias físicas existentes en esta región, aunque mantiene un comportamiento

similar al mostrado en el mapa anterior (Fig. 33) los valores del índice incrementan, al incrementar el número de variables.

Es posible visualizar, que los altos valores del índice de vulnerabilidad obedecen al alto dinamismo inherente a este sector, lo que marca la heterogeneidad dentro de este sistema marcando dos zonas principales, las áreas de menor vulnerabilidad que se presentan en las porciones acantiladas de la costa, al norte en el tómbolo de Villa Rica y al sur en Punta Jicacos, mientras que para la porción acumulativa la vulnerabilidad varía de muy alta a media en la zona de la llanura eólico-marina con dunas activas, donde la costa norte presenta los valores del índice más altos >36.04 , en esta área se presentan los menores valores del parámetro de Dean, que si bien son playas disipativas, se encuentran abiertas al mar, donde el sedimento fino no consolidado es removido constantemente por la actividad del oleaje, dejando al descubierto plataformas de abrasión como se muestra en la Fig.34, mientras que hacia el sur de la boca de la laguna El Llano, el grado de vulnerabilidad se mantiene de alto a muy alto >20.76 , que corresponde al área con mayor morfodinámica y donde se presentan las mayores tasas de cambio para esta región. La vulnerabilidad de esta área coincide con la zona de mayores retrocesos de la línea de costa.

Por otro lado, hacia el sur la presencia de las dunas en Farallón limita la máxima vulnerabilidad a la zona de playa que se reduce de forma gradual, hasta encontrarse con el nicho abrasivo de Punta Jicacos y se incrementa al llegar a Playa Paraíso adyacente a la boca de la laguna La Mancha.

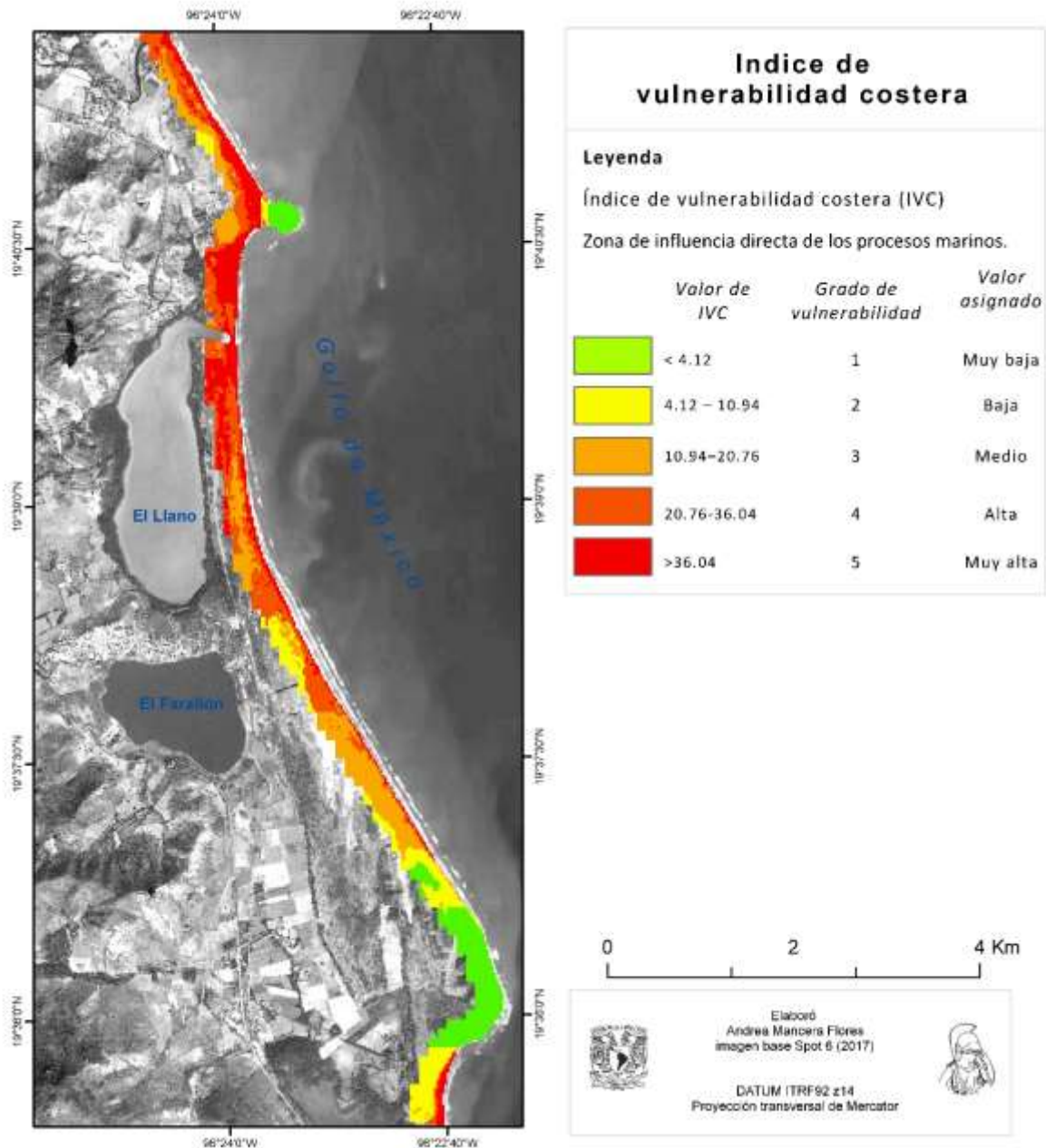


Fig.34. Mapa del índice de vulnerabilidad costera en la zona de influencia directa de los procesos marinos. Elaboración propia.

En la Fig.35, se observa en la vulnerabilidad general se pueden identificar tres zonas principales:

1. Vulnerabilidad alta: Constituye un 30.82% del área de estudio, que corresponde a la porción frontal de la costa, incluyendo la laguna El Llano y la llanura eólica activa, descartando el campo de dunas del Farallón.

2. Vulnerabilidad media: Abarca 43.19% de la costa, que corresponde a la zona de la depresión prelitoral en el norte donde es posible encontrar dunas estabilizadas por la vegetación en la zona de barra Limón hasta la laguna la Mancha al sur.
3. Vulnerabilidad baja: Con un 25.99% de la costa, corresponde al campo de dunas Farallón, donde las dunas están estabilizadas y colonizadas por vegetación mayor, el área al norte del lago Farallón donde los restos volcánicos forman un lomerío bajo y el acantilado que forma el tómbolo.

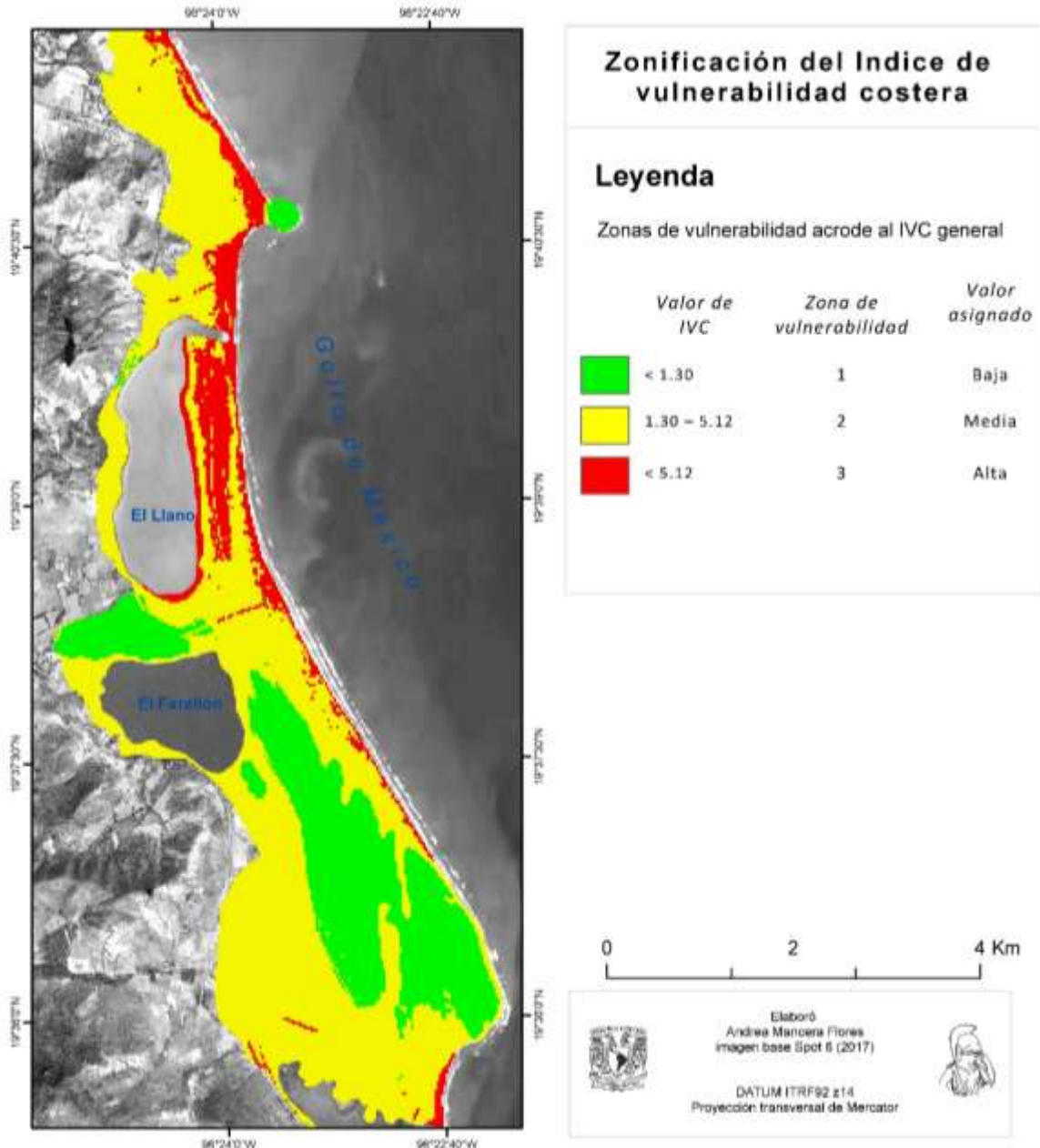


Fig.35. Zonificación de la vulnerabilidad costera. Elaboración propia

En general, es claro que el mayor grado de vulnerabilidad radica donde el índice supera en valor de 5.12, esto corresponde a las zonas bajas y subhorizontales formadas por depósitos de arena fina y sedimentos no consolidados, donde los procesos eólicos se encuentran activos, la vegetación es escasa o ha sido sustituida por zonas urbanas o pastizales principalmente para la actividad pecuaria. Esta porción costera es la principal zona inundables ante el embate de fenómenos hidrometeorológicos de poca magnitud, áreas costeras expuestas directamente a la influencia marina, sin presencia de afloramientos rocosos con playas disipativas y de anchura que no supera los 30m.

En contraste, las áreas con la vulnerabilidad más baja ($IVC > 1.30$), corresponden a las porciones costeras más elevadas, donde dominan los procesos erosivos en los lomeríos, y acumulativos con origen fluvial o eólico que propician la formación de llanuras y terrazas, así como campos de dunas donde los depósitos eólicos han sido estabilizados por la vegetación. Así mismo, la vulnerabilidad es menor en las zonas de frente costero, donde se encuentran acantilados o nichos abrasivos que ofrecen una mayor resistencia al oleaje y el arrastre marino que los sedimentos no consolidados que conforman las playas.

4.1.2 Índice de vulnerabilidad y gestión costera

Al hablar de vulnerabilidad costera, se plantean dos principales escenarios, la pérdida de tierras frente al mar producto de la erosión costera por acción de los procesos hidrodinámicos del oleaje y las corrientes litorales, y la inundación, ya sea permanente por cambios en la elevación o por la subsidencia local, o de forma episódica por la ocurrencia de fenómenos hidrometeorológicos, variaciones normales en la marea o el incremento en el nivel medio del mar. En cualquier caso, la aplicación del índice de vulnerabilidad costera encuentra su principal aplicación en los planes de manejo y gestión costera.

Más allá de que constituyan áreas altamente dinámicas, los forzantes naturales y antrópicos alteran la mecánica natural del sistema. Modificaciones como el cambio

en el uso de suelo, la erosión costera, la extracción de recursos naturales o como es en este caso, la colocación de un gasoducto, fungen como componentes de la alteración física de la costa, por lo tanto, tienen repercusiones en la vulnerabilidad.

La zona costera norte del municipio de Actopan, es una zona donde predominan las actividades pecuarias alrededor de cuerpos lagunares que corresponden a los sitios de humedales más importantes del estado de Veracruz. Éstos son ecosistemas de gran diversidad, que dependen en gran medida, de la dinámica costera y de los intercambios entre el continente y el mar.

A pesar de contar con la designación de sitio RAMSAR, desde el 2005, no ha existido una gestión adecuada, aunque si se ha implementado el manejo comunitario. Su aplicación ha sido complicada, lo que ha alterado la morfodinámica de la zona costera, que se refleja en la erosión de la playa Villa Rica, la modificación de los aportes hídricos a la laguna El Llano que ha causado azolvamiento, disminución del volumen de agua, deterioro de los campos de dunas por sustitución de la cobertura vegetal y deterioro generalizado del sistema litoral.

Uno de los principales problemas que se presentan en la región, es la erosión costera y el azolvamiento de la laguna El Llano desde la década de los años 70, cuando la colocación de un gasoducto de PEMEX interrumpió el intercambio acuático y sedimentario del cuerpo de agua con el mar, aunado a esto, el incremento en la disponibilidad de sedimentos, principalmente a causa de la sustitución de la cobertura vegetal por pastos principalmente para la actividad pecuaria, que ocupan desde las zonas bajas inundables hasta las laderas de los cerros cercanos, ha rellenado la depresión donde se encuentra la laguna, convirtiéndola en una zona lodosa que impide las actividades pesqueras (Fig.36).

Esta zona es la que presenta el mayor índice de vulnerabilidad, por lo que es pertinente la puesta en marcha de actividades de restauración ecológica en esta región; si a esto, se le suma la contaminación por agroquímicos, herbicidas, aguas

residuales, desechos orgánicos, y la sobrepesca de peces, moluscos y crustáceos, el deterioro ambiental es crítico (Martínez *et al.*, 2019), lo cual refleja claramente la situación adversa presente en la mayoría de las zonas costeras de México.



Fig. 36. Evolución del azolvamiento de la laguna El Llano: A) Imagen satelital RAPIDEYE 2011, la laguna ya evidencia la sedimentación, la coloración es oscura y la capa de agua es somera. B) Imagen satelital Google Earth 2019, la laguna ya se encuentra azolvada en su totalidad y en la porción de la boca se abrió un canal. Elaboración propia.

Estos problemas se han propiciado principalmente por una desorganizada gestión de la zona costera, a distintas escalas, y a la falta o ignorancia de alternativas sustentables para el aprovechamiento de los recursos. Por ello, es importante no olvidar que las actividades gubernamentales también han tenido importantes impactos en la zona costera, como son los desechos de la núcleo-eléctrica Laguna Verde, que tiene impactos directos en la pesca mar adentro, así como el ducto de

hidrocarburos, que fue el principal causante del azolvamiento de la laguna que fue el principal causante del azolvamiento de la laguna, con la consiguiente reducción del volumen hídrico para el aprovechamiento del ganado y de la agricultura (Moreno-Casasola *et al.*,2015)

En términos generales, la gestión costera tiene su principal interés en la conservación y el manejo sostenible de los ecosistemas costeros y atañe a todos los sectores poblacionales e institucionales que tengan intereses en la zona costera. Sin embargo, a causa de la ambigüedad en la delimitación de la zona costera, se hace complicada la elaboración y puesta en marcha de planes de manejo y gestión costera y, en general, se encuentran limitados por un marco político administrativo-institucional. Este panorama es general para el país, pues a pesar de que México cuenta con una gran extensión costas, pocos son los planes de manejo implementados con resultados satisfactorios.

Uno de estos proyectos de manejo y gestión costera, es el plan de manejo comunitario del sitio RAMSAR La Mancha-El Llano llevado a cabo por Moreno Casasola *et al.* (2015), que se orienta al manejo sostenible y el desarrollo de actividades primarias sostenibles, donde se establece la relevancia de la integración social en estos planes haciendo a la población un sujeto activo de las políticas de conservación y de manejo ambiental. A pesar de tener un enfoque más biológico-ecológico no deja de lado la caracterización física del sitio, sin embargo, siempre se encuentran limitaciones a la hora de poner en marcha estos planes, por la deficiencia de instrumentación de políticas públicas orientadas al desarrollo sostenible, la falta de apoyo gubernamental, el mal manejo ambiental, así como, la falta de alternativas de actividades económicas que tengan repercusiones sociales, lleva a la población siga buscando el sustento por medio de actividades primarias extensivas y el incremento en el uso de agroquímicos para incrementar la productividad.

La integración de un índice de vulnerabilidad en los planes de gestión costera es una herramienta eficaz para resaltar aquellas áreas que requieren atención y la aplicación de medidas proyectos de restauración o conservación, así como formar parte en los planes de ordenamiento territorial y desarrollo urbano del municipio de Actopan, Veracruz a través de la apropiada instrumentación de las políticas públicas como la Ley estatal de protección ambiental reformada en el 2010 para el estado de Veracruz publicada en la gaceta oficial, donde expone que es de carácter público en interés social “la preservación y la restauración del equilibrio ecológico, la protección al ambiente y la procuración del desarrollo sustentable, de conformidad con las facultades que se derivan de la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente y disposiciones que de ella emanen”, que si bien resalta la importancia del control de actividades, manejo de residuos y monitoreo de planes de restauración ecológica la escasez de infraestructura y alternativas de desarrollo sustentable dificulta su adecuada aplicación. Un punto importante que considerar es que estos planes, así como el índice de vulnerabilidad deben tener un monitoreo constante para dar lugar a la evaluación de la eficacia de los planes de manejo integrado, y en caso necesario la reestructuración de estos.

Discusión y conclusiones

Las zonas costeras son, en sí mismas, sistemas abiertos donde el intercambio de materia y energía tiene manifestaciones físicas en donde confluyen una gran cantidad de elementos y procesos que le dan características específicas a cada región costera. Un punto importante a considerar, es que las costas no son entidades homogéneas a pesar de presentar procesos similares.

La magnitud de éstos es diferentes, por lo que un índice de vulnerabilidad costera no deja de ser una herramienta sintética, donde en razón de un número limitado de variables, se resaltan las áreas de la costa que a causa de sus características físicas, los efectos de fenómenos tales como el incremento en el nivel medio del mar o la erosión costera son mayores, definir cuáles son las variables que determinan en mayor medida la vulnerabilidad costera sin perder demasiada información únicamente se puede lograr mediante la aplicación de métodos estadísticos de reducción de la dimensionalidad como lo es el análisis de redundancia.

Adaptar un índice de vulnerabilidad costera, tomando como bases índices ya aplicados distintos lugares y a distintas escalas, permite conocer las limitantes del mismo, por un lado, la reducida cantidad de recursos para conseguir información a nivel regional o local, y por otro, se reconoce la heterogeneidad de los ambientes costeros a distintos niveles lo que llevó a que múltiples indicadores fueran descartados por ser homogéneos a toda el área de estudio.

De forma general, en los análisis físicos, la gran cantidad de variables que influyen en el ambiente determinan múltiples relaciones que no son fácilmente observables por la variabilidad inherente de los datos ambientales. En este sentido, a mayor cantidad de relaciones se encuentren, será más simple descartar aquellas variables redundantes en un análisis de vulnerabilidad costera. Si bien, se ha mencionado que en los análisis costeros se busca comprender la mayor cantidad de interrelaciones, mediante los análisis estadísticos, es necesario reconocer el tipo de

variables disponibles, así como su comportamiento para seleccionar el método que mejor se adapte, pues éstos tienen limitaciones algebraicas.

El análisis de redundancia, a pesar de ser en esencia es una versión restringida del análisis de componentes principales (ACP) (donde se hace complicada la aplicación en variables cualitativas por la presencia de ceros) el análisis de redundancia respeta la distancia euclídea en la representación de las variables en cada componente principal, sin que las variables sufran una transformación espacial, pero no deja de ser el resultado de correlaciones lineales entre las variables.

Una de las principales ventajas al usar el análisis de redundancia para la selección de aquellas variables que mayormente explican la vulnerabilidad costera, es que se conserva la mayor cantidad de información posible, sin embargo, no se puede dejar de lado la pérdida de información que no es posible sintetizar, al concentrar únicamente una cantidad de toda la varianza presente en el estudio existe información perdida, por lo que se hace necesaria la contabilización de esta dentro de los estudios, por otra parte, el análisis no explica en su totalidad la variación de todos los datos, por lo que puede obtenerse una matriz de residuos a la que se puede aplicar un análisis de componentes principales que puede conducir a más vectores propios.

Una de las desventajas del índice de vulnerabilidad es que el que múltiples variables hayan sido descartadas en el análisis, no significa que no contribuyan, en alguna medida, a la vulnerabilidad costera, ejemplo de esto es la tasa de cambio de la línea de costa, si se compara el índice de vulnerabilidad con la mecánica de la línea de costa, no es posible obviar la relación existente entre las características morfológicas y la dinámica regional, dado que las áreas más vulnerables también corresponden a las zonas con los cambios máximos en la costa, que al mismo tiempo están ligadas a áreas con cambios en el paisaje, sustitución de la cobertura y zonas de urbanización.

Otra desventaja del índice de vulnerabilidad es la obtención de los datos de las variables, la zona costera no puede concebirse como un espacio homogéneo, donde todos los procesos ocurren al mismo tiempo y en el mismo espacio, esto de ver claramente en la necesidad de hacer el análisis de forma diferencial para la zona costera general y para la zona frontal.

La adaptación del índice de vulnerabilidad costera, mediante análisis de estadística multivariada, amplía el panorama dentro de los análisis de procesos costeros de evaluación multicriterio, y es una metodología apta para usarla a distintas escalas, mientras más información se tenga, será más acertada la evaluación de la vulnerabilidad costera.

El principal objetivo de esta tesis se cumple, pues a través de una metodología estadística se ha determinado el índice de vulnerabilidad costera que mejor se adapta a las características físicas y socioeconómicas de la zona costera norte de Actopan, Veracruz.

El índice de vulnerabilidad costera propuesto y aplicado posee ventajas y se ha considerado una herramienta sintética, de aplicación simple, dada la facilidad de ajuste de los parámetros, y alcances a distintas escalas. No obstante, no se debe ignorar que únicamente ofrece una perspectiva general y que constituye un modelo aproximado a la realidad, que concentra una cantidad limitada de todos los elementos que componen los ambientes costeros.

En conclusión, tres pautas son importantes para la aplicación de un índice de vulnerabilidad costera, la disponibilidad de recursos, la determinación de la escala de trabajo y la selección de las variables que se consideren explicativas de acuerdo con las características físicas de la costa.

Ahora bien, ¿es posible implementar la misma metodología o el índice de vulnerabilidad costera para todo el estado de Veracruz? Sí, es posible implementar el índice general, dado que en el litoral veracruzano se pueden encontrar características físicas similares, sin embargo, la disponibilidad de información a menor escala, como la batimetría, la altura del oleaje, así como el nivel en la marea

a nivel local, es una limitante para su adaptación a nivel estatal, por lo que, de ser aplicada sería de más eficiente y estudios a nivel local o regional.

Bibliografía

- Abuodha, P.A. y Woodroffe, C.D. 2006. International Assessments of the Vulnerability of the Coastal Zone to Climate Change, Including an Australian Perspective. Faculty of science, research online. 77p.
- Adger W.,1999. Social vulnerability to climate change and extremes in coastal Vietnam. *World Development*, 27(2):249-269.
- Aguilar-Lynch M.G., 2015. Propuesta de índice de vulnerabilidad costera aplicado a tres sectores de la región Lima. Tesis Lic. Facultad de letras y ciencias ambientales. PUCP. Perú.118p.
- Aiello, A., Canora, F., Pasquariello, G. y Spilotro, G., 2013. Shoreline Variations an coastal dynamics: A space-time data analysis of the Jonian litoral, Italy. *Esturaine, Coastal and Shelf Science*, 129:124-135.
- Aldaco, J. y Sánchez, A., 2002. Ambiente marino y estuarino. en Guzmán Amaya, P., C. Quiroga-Brahms, C. Díaz-Luna, D. FuentesCastellanos, C. M. Contreras y G. Silva-López (coords.) La pesca en Veracruz y sus perspectivas de desarrollo, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación, Instituto Nacional de la Pesca/Universidad Veracruzana, 2-11p.
- Alonso, J.C. y Muñoz, A.F. 2014., Interpretación de variables dummy en modelos log-lin. *Apuntes de Economía*, 40:3-11.
- Anaya-Ávila, M.P., Domínguez, J.J. y Domínguez, C.A., 2012. Hacia una cultura de prevención contra desastres naturales: Los medios de comunicación y su participación social ante el huracán Karl. *Academia española*.
- Andreeva , N., Valchev N., Prodanov B., Eftimova P., Kotsev I., y Dimitrov L., 2016. Assessment of coastal receptors' exposure vulnerability to flood hazard along Varna regional coast. *Coastal engineering*, 16p.
- Anfuso, G., Martínez, J.A. Sánchez, F., Benavente J., Andrés, J. y López-Aguayo, F. 2003. Morfodinámica de barras litorales en playas mesomareales expuestas del SO de España. *Ciencias Marinas*, 29(1):35-50.
- ANIDE, SECTUR, ESTUR. 2013. Estudio de la vulnerabilidad y programa de adaptación ante la variabilidad climática y el cambio climático en diez destinos turísticos estratégicos, así como propuesta de un sistema de alerta temprana a eventos hidrometeorológicos. CONACYT, SECTUR. México, D. F. 1-39p.
- Arellano, E., Correa, A., López, D., Escobar, J., Curtis, J.H., y Cordero, M.C. 2019. Mid to late Holocene hydrological and sea-level change reconstructions from La Mancha coastal lagoon, Veracruz, Mexico. *Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 520:150-162.
- Arroyo-Hernández, J. 2016. Métodos de reducción de dimensionalidad: Análisis comparativo de los métodos APC, ACP y ACPK. *UNICIENCIA* 30(1):115-122.

- Azueta-Bernal, L.F. y Vega-Ortega, R. 2018. Geógrafos, naturalistas e ingenieros en México, siglos XVIII al XX. UNAM, Instituto de Geografía. Colección Geografía para el siglo XXI, serie de textos universitarios, 21:182p.
- Azuz, A.I., 1999. La predicción de la respuesta temporal del perfil de playa como elemento fundamental en la gestión costera. Centro de Enseñanza Técnica y Superior, Mexicali, Baja California, México. *Ciencia del mar* 3(9):3-16
- Azuz, I. E., Apuche, L. y Villalobos, G., (eds.), 2010. Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino. Universidad Autónoma de Campeche CETyS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944p.
- Azuz, I. y Rivera, E., 2009. Descripción de la dinámica poblacional en la zona costera mexicana durante el periodo 2000-2005. Universidad de Campeche CETC. *Papeles de Población*, 62:75-107.
- Balcázar-Arias, A., 2009. Resumen de Sitio. Costa central del estado de Veracruz. National Audubon Society, ProNatura, RARE, 22p.
- Barros, M. y Bonetti J., 2017. Vulnerabilidade das praias do Estado de Santa Catarina a eventos de erosão e inundação costeira: proposta metodológica baseada em um índice multicriterio. *Quaternary and Environmental Geosciences*, 8(2):36-54.
- Bernabéu, A. M., Medina, R., Vidal, C. y Muñoz, J.J. 2001. Estudio morfológico del perfil de playa: modelo de perfil de equilibrio en dos tramos. *Revista de la sociedad geológica de España*, 14(3-4):227-236.
- Bernard, P.L., Short, A.D., Harley, M.D., Kristen, D.S., Vitousek S., Turner, I.L., Allan, J., Banno, M., Bryan, K.R., Doria, A., Hansen, J.E., Kato, S., Kuriyama, Y., Evan Randall-Goodwin, E.R., Ruggiero, P., Walker, I.J. y Heathfield, D.K. 2015. Coastal vulnerability across the Pacific dominated by El Niño/Southern Oscillation. *Nature geoscience*. Published online 8p.
- Bijlsma, L., Ehler, C.N., Klein, R.J., Kulshrestha, S.M., McLean, R.F., Mimura, N., Nicholls, R.J., Nurse, L.A., Pérez-Nieto H., Stakhiv, E.Z., Turner, R.K. y Warrick, R.A., 1996. Coastal zones and small islands. *Climate Change 1996: impacts, adaptations, and mitigation of climate change: scientific-technical analyses. Contribution of working group II to the second assessment report of the IPCC*. Suiza, 289-324p.
- Bird, E. 2008. *Coastal Geomorphology: an Introduction*. 2ª edición, ed. Wiley. University of Melbourne, Australia. 436p.
- Bishnupriya, S. y Bhaskaran, P.K., 2018. Multi-Hazards Risk assessment of coastal vulnerability from tropical Cyclones- A GIS bases approach for tyhe Odisha coast. *Journal of Environmental management* 206:1166-1178.
- Boak E., Turner I., 2005. Shoreline definition and detection: Areview. *Jorunal or coastal Research*, 21(4):688-703.
- Bojorquez-Sánchez, S., 2017. Evaluación de tasas de cambio en el nivel del mar y tendencias en flujos de elementos traza en Veracruz. Tesis de Doctorado. Instituto Politécnico Nacional, Centro interdisciplinario de Ciencias Marinas, La Paz, BCS. 124p.

- Bollo-Manent, M., Hernandez-Santana, J.R., Priego-Santander, A., Zaragoza-Álvarez, R.A., Ortiz-Rivera, A., Espinoza-Maya, A. y Ruiz-López, R., 2015. Una propuesta de regionalización físico-geográfica de México. UNAM: CIGA, Morelia, México, 59p.
- Boruff, B.J., Emrich C. y Cutter S.L., 2005. Erosion Hazard Vulnerability of US Coastal Countries. *Journal of Coastal Research*, 215:935-942.
- Botello, A.V., Villanueva-Fragoso, S., Gutiérrez, J. y Rojas Galaviz, J.L. (eds.), 2010. Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. SEMARNAT, INE. UNAM, ICMYL, Universidad Autónoma de Campeche. 514p.
- Bravo-Lujano, C., 2013. Reseña de la Tormenta tropical "Barry" del Océano Atlántico. SMN, CONAGUA, SEMAR. 7p.
- Bryan, B., Harvey, N., Belperio, T., y Bourman, B., 2001. Distributed process modeling for regional assessment of coastal vulnerability to sea level rise. *Environmental modeling and assessment*, 6:57-65.
- Bustamante-Fernández, J.E., Méndez- Linares, A.P. y Hernández-Santana, J.R., 2016. Variaciones morfodinámicas hiperanuales (1951-2007) de la línea costera entre Punta Diamante y Río Papagayo, Acapulco, México. *Boletín de la asociación de Geógrafos españoles*, 71:301-322.
- Carbajal-Domínguez J.A., 2010. Zonas costeras bajas en el Golfo de México ante el incremento del nivel del mar. pp359-380. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.), 2010 Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-ine, unam-icmyl, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- Carbajal-Domínguez, J.A., 2010. Zonas costeras bajas en el Golfo de México ante el incremento del nivel del mar. p. 359-380. En: Botello, A.V., Villanueva-Fragoso, S., Gutiérrez, J. y Rojas-Galaviz, J.L. (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. SEMARNAT, INE, UNAM, ICMM, Universidad Autónoma de Campeche. 514p.
- Cardona-Arboleda, O.D., 2001. Estimación holística del riesgo sísmico utilizando sistemas dinámicos complejos. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona.
- Carmona, F., 1988. Aplicaciones de los teoremas de separación para valores singulares de matrices al análisis de la redundancia. Universidad de Barcelona. *Qüestiió* 12(1):59-76.
- Castro-Galván, E. y Mercader-Trejo, F.E., 2000. Cuantificación de la incertidumbre en mediciones analíticas. Traducción libre. Centro nacional de metrología, CENAM, México. 99pp.
- Celentano, E. y Defeo, O., 2006. Habitat harshness and morphodynamics: life history traits of the mole crab *Emerita brasiliensis* in Uruguayan sandy beaches. *Marine biology* 149:1453-1461
- Centro Nacional de Huracanes. NHC. 2019. National Oceanic and Atmospheric Administration. NOAA. Disponible en <https://www.nhc.noaa.gov/data/#gis> consultado el 20 de abril del 2019.
- Charlier, R. y De Mayer, C.1998. Coastal zone management. Coastal erosion response and management. Springer Verlag Berlin Heidelberg:618p.
- Chávez López, R. 2017. Estuarios ciegos en la costa de Veracruz, México. *BIOCYT Biología, Ciencia y Tecnología*, 10(38):697-721.

- Ciccarelli, D., Pinna, M.S., Alguini, F., Cogoni, D., Roucco, M., Bacchetta, G., Sarti, G. y Fenu, G., 2017. Development of a coastal dune vulnerability index for Mediterranean ecosystems: A useful tool for coastal managers? *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 187:84-95.
- Clark, J., 1977 *Coastal Ecosystem Management*, John & Wiley, New York.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 1998. Cuencas Hidrológicas'. Escala 1:250000. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2014. Método de evaluación rápida de invasividad (MERI) para especies exóticas en México. *Casuarina equisetifolia L.*, 1759. CONABIO, México. 12p.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO). 2019. Biodiversidad mexicana, Ecosistemas: Dunas costeras. Disponible en línea <https://www.biodiversidad.gob.mx/ecosistemas/dunasCosteras.html> consultado el 20 de mayo del 2019.
- Contreras-Espinosa, F., 2006. Las lagunas costeras de Veracruz, en: Moreno-Casasola, P., Peresbarbosa, E. y Travieso, C. (eds.), 2006. *Estrategia para el Manejo Costero*. Instituto de Ecología, México, 1266p.
- Cuadras, C.M., 2018. *Nuevos métodos de análisis multivariante*. Editorial CMC. Barcelona, España. 307p.
- Dabrio, C.J., 2010. Playas. En Arche, A. (ed.) *Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria*, Madrid, España. CSIC. 1287p.
- Davidson-Arnott, R., 2010. *Introduction to coastal processes and Geomorphology*. Cambridge University, New York, 458p.
- Dean, R., Walton, T., Rosati, J. y Absalonsen, L. 2013. Chapter 13 Beach Erosion: Causes and Stabilization. En C. W. Finkl (Ed.), *Coastal Hazards* 6:319-365.
- Demant, A. y Robin, C. 1975. Las fases del vulcanismo en México; una síntesis en relación con la evolución geodinámica desde el cretácico. UNAM, *Revista del instituto de Geología* 75(1):70-82.
- Dolan, R. Fenster, M.S. y Holme, S.J. 1991. Temporal analysis of Shoreline recession and accretion. *Journal of Coastal Research*, 7(3):723-744.
- Doukakis, E., 2005 Coastal vulnerability and Risk parameters. *European water* 11(12):3-7.
- El Hattab, M.M., 2015. Improving Coastal Vulnerability index of the Nile delta coastal zone Egypt. *Earth science and Climatic change* 6:293.
- Escofet, A. Contreras, R y Monti, A., 2010. Análisis de vulnerabilidad orientado a la gestión litoral a partir del uso de hábitat. En Rivera, E. Azuz, I. Apuche L. y Villalobos, G. (eds.), 2010. *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Universidad Autónoma de Campeche CETyS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944p.
- ESRI., 2013. ArcGis version 10.2 .Environmental System Research Institute, Inc.

- Felicísimo-Pérez, A.M., 1994. Modelos digitales del terreno: principios y aplicaciones en las ciencias ambientales. Pentanfla Ed. 222p.
- Flaqués, A., Calvete D., Van den Berg N., Ribas F., Fernández A. y Caballeria M. SF. Self-organized morphological patterns in coastal dynamics. *Recerca i innovació a l'escola de camins*: 1-4.
- Fletcher , C. Rooney J. Berbee M. Lim S. y Richmond B., 2003. Mapping shoreline change using digital orthophotogrammetry on Maui, Hawaii. *Journal of Coastal Research* 38:106-124.
- Food and Agricultura Organization of the United Nations (FAO)., 2015. Base referencial mundial del recurso suelo 2014, Sistema internacional de clasificación de suelos para la nomenclatura de suelos y la creación de leyendas de mapas de suelos; Actualización 2015. FAO, Roma, It. 2018p.
- Ford, M., 2013. Shoreline changes interpreted from multi-temporal aerial photographs and high resolution satellite images: Wotje Atoll, Marshall Islands. *Remote Sensing of Environment*, 135:130-140.
- Foschiatti, A., 2009. Aportes conceptuales y empíricos de la vulnerabilidad global. Universidad nacional del Nordeste, Argentina, 1-40p.
- Fuentes-Mariles, O.A., Matías-Ramirez, L.G., Jiménez-Esínosa, M., Mentoza-Estrada, R. y Baeza-Ramírez, C., 2006. Capítulo II. Elaboración de mapas de riesgo por inundaciones costeras por marea de tormenta. En CENAPRED (ed.) *Guía Básica para la elaboración de Atlas estatales y municipales de peligros y Riesgos*. México. 221-293p.
- García, E., 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, UNAM. México, 97p.
- García, J.F., Temiño, J. y Segura, M., 2010. Ambientes eólicos. En Arche, A. (Ed.) *Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria*, Madrid, España. CSIC. 1287p.
- García-Gil, G., 2006. II. El entorno Físico: El ambiente geomorfológico. En Moreno-Casasola, P. (ed.) *Entornos Veracruzanos: La costa de la Mancha*. IINECOL. 576p.
- Geissert, D. y Debroeucq, D. 1995. Influencia de la geomorfología en la evolución de suelos de dunas costeras en Veracruz, México. *Investigaciones Geográficas Boletín especial* 3:37-51.
- Geissert-Keintz, D. 2006. II. El entorno Físico: Procesos y Cambios. En Moreno-Casasola, P. (ed.) *Entornos Veracruzanos: La costa de la Mancha*. IINECOL. 576p.
- Geissert-Keintz, D. y Enríquez-Fernández, E. 2011. Geomorfología. En Cruz-Aragón, A. (ed.) *La biodiversidad en Veracruz estudio de estado*. CONABIO, Gobierno del estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, INECOL. Vol1:70p
- Georgiadou, Y., Knippers, R.A., Sides, E.J. y van Westen, C.J., 2001. Capitulo 4. Data entry and preparati6n. En De- By, R.A. (ed.) *Principles of geographic information system, an introductory textbook*. Enschede, Países Bajos. ITC Educational Textbook Series 1. 490p.
- Gianluigi, D.P., Ciro-Aucelli, P., Benassai G. y Rodríguez G., 2017. Coastal vulnerability to wave storms of sele litoral plain (southern italy) *Nat Hazards*71:1795-1819.

- Gómez, C., Alberto, J. y Arce, G. 2014 Morfología litoral: Agentes, procesos y formas resultantes. Resúmenes. Facultad de humanidades. UNNE Revista geográfica digital 11(21):53.
- Gómez-Ramírez, M., 2009. El Huracán "Dean" fue un típico Cabo Verde, que impactó al estado de Veracruz en México en 2007. III Congreso internacional de ciencias, artes, tecnología y humanidades, Jun 3-9. Coatzacoalcos, Ver. México 658-668p.
- Gómez-Tuena, A., 2002. Control Temporal del Magmatismo de Subducción en la Porción Oriental de la Faja Volcánica Transmexicana: Caracterización del Manto, Componentes en Subducción y Contaminación Cortical. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra. Instituto de Geología, posgrado en ciencias de la Tierra, UNAM. 118p.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T. y Ferrari, L., 2005. Protogénesis ígnea de la faja volcánica Transmexicana, Boletín de la Sociedad Mexicana, Volumen conmemorativo del Centenario, temas selectos de la geología mexicana, 57(3):227-283.
- Gornitz, V., Daniels, R., White, T., Birdwell, K., 1994. The development of a coastal risk assessment database: Vulnerability to sea-level-rise in the U.S. Southeast. Journal of Coastal Research, 12:327-338.
- Gornitz, V., White T., y Cushman R. 1991. Vulnerability of the U.S. to future sea level rise. conf-910780-i de 91 007853.
- Green, C. y McFadden L., 2007. Coastal vulnerability as discourse about meanings and values. Journal of Risk Research, 10:1027-1045.
- Guevara, S.P., Moreno-Casasola, P., Castillo-Campos, G., Dorantes, C., González, F., Halfter, G., Isunza, E., Lot, H., Paradowska, K., Priego, A., Sánchez, V., Vázquez, G. 2008. 30 años en el paisaje costero veracruzano, Tomo I y II: Central nucleoeléctrica Laguna Verde. CFE, INECOL, Veracruz, 220p.
- Guillén, J. y Díaz, J.I., 1990. Elementos morfológicos de la zona litoral: Ejemplos en el delta del ebro. Scientia Marina, 54(4): 359-373.
- Hair, J.F., Anderson, R.E., Tatham, R.L. y Black, W.C., 1999. Análisis multivariante 5ª edición. España. Pritence Hall Iberia. 799p.
- Harvey, N. y Woodroffe, C.D., 2008. Australizan approaches to coastal vulnerability assesment. Sustain SCI. 3:67-87.
- Hengl, T. y Evans, I.S., 2009. Mathematical and digital models of the land Surface. En Hengl, T. y Reuter, H.T. (eds.) Geomorphometry concepts, software, applications. Amsterdam, Países Bajos. El Sevier, 765p.
- Hernández-Santana J.R., Ortiz-Pérez, M.A., Méndez-Linares, A.P. y Gama-Campillo L., 2008. Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: Tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. Investigaciones geográficas. Boletín del instituto de Geografía, 65:7-21.
- Hernández-Santana, J. R., Méndez-Linares, A. P. y Figueroa-Mah Eng, M., 2007. Caracterización del relieve plio-cuaternario del entono costero del estado de Veracruz, México. Revista C & 21(3-4):113-131.

- Hernández-Unzón, A. 2007. Reseña del Huracán "Dean" del Océano Atlántico. Temporada 2007 de Huracanes. SMN, CONAGUA, SEMAR. 12p.
- Hernández-Unzón, A., Bravo Lujano, C. y Díaz, J. 2010. Reseña del Huracán Karl del Océano Atlántico. Temporada 2010 de huracanes. SMN, CONAGUA, SEMAR. 14p.
- Hidalgo, G. 2017. Comunidades intermareales de la macrofauna en playas arenosas del litoral central de Veracruz, Golfo de México: Un enfoque de integridad ecológica. Tesis de Doctorado. Instituto de ciencias marinas y pesquerías. Universidad Veracruzana. México, 145p.
- Ibarra, M.D. y Belmonte, S.F. 2017. Comprendiendo el litoral: Dinámica y procesos. Universidad de Murcia, Edit.Um, España. 67p.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1973. Fotografías aéreas escala 1:7000
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1986. Fotografías aéreas escala 1:75000
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1990. Sitio web. Censos de población y vivienda, Principales resultados por localidad (ITER) Disponible en línea <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1990/default.html> consultado el 25 de abril del 2019.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1995. Sitio web. Censos de población y vivienda, Principales resultados por localidad (ITER) Disponible en línea <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/1995/default.html> consultado el 25 de abril del 2019.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. Sitio web. Censos de población y vivienda, Principales resultados por localidad (ITER) Disponible en línea <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2000/default.html> consultado el 25 de abril del 2019.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2000. Ortofoto Digital escala 1: 20,000.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2005. Sitio web. Censos de población y vivienda, Principales resultados por localidad (ITER) Disponible en línea <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2005/default.html> consultado el 25 de abril del 2019.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2010. Sitio web. Censos de población y vivienda, Principales resultados por localidad (ITER) Disponible en línea <https://www.inegi.org.mx/programas/ccpv/2010/default.html#Microdatos> consultado el 25 de abril del 2019.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2011. RapidEye Imagen de satélite resolución 5m
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2012. Modelos Digitales de Elevación de Alta Resolución LIDAR, con resolución de 5m. Terreno E14B28 (C1, C3, C4,

F1, F2). Disponible en línea <https://www.inegi.org.mx/app/mapas/> consultado el 04 de mayo del 2019.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), 2015. Conjunto de datos vectoriales de información topográfica. Serie III. Actopan, E14B28. Escala 1:50000. Disponible en línea <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825203955> consultado el 04 de mayo del 2019.

Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 2009. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos. Actopan, Veracruz de Ignacio de la Llave. INEGI, México. 9p.

IPCC 2007. IPCC Fourth Assessment Report: Climate Change 2007. Proyecciones de Futuros Cambios Climáticos. Disponible en línea https://ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/es/spmssp-6.html#table-spm-3 consultado el 11 de Junio del 2018.

Jiménez-Orocio O. A., 2010. Análisis espacio-temporal de la erosión y acreción de las costas del estado de Veracruz. Tesis de Maestría. Instituto de Ecología. 115p.

Kumar, A. y Kunte P., 2012. Coastal vulnerability assessment for Chennai, east coast of India using geospatial techniques. *Natural Hazards*, 64:854-872.

Lalbiakzuali, C., Suresh Gandhi M. y Ram Mohan V., 2013. Geomorphology and evolution of coastal landforms between Mimisal and Rajamadam, Palk Strait, east coast of India. *Current science*, 105(12):730-1735.

Legendere, P. y Legendere, L. 1998. *Númeral ecology*. 2nd ed. Amsterdam. Elsevier Sciece B.V.

Lugo-Hubp, J., 2001. Los conceptos geomorfológicos en la obra de Ezequiel Ordóñez (1867-1950). *Revista mexicana de ciencias geológicas*, 18(1):89-102.

Lugo-Hubp, J., 2015. *Diccionario geomorfológico*. Geografía para el siglo XXI, UNAM, Instituto de Geografía., Textos Universitarios, 7:479.

Maderey, R, L. y Torres-Ruata, C., 1990. Cuencas hidrológicas en Hidrogeografía e hidrometría. IV.6.1. Atlas Nacional de México. Vol. II. Escala 1: 4000000. Instituto de Geografía, UNAM. México.

Maroto A., Boqué R., Riu J. y Rius J. 2001. Incertidumbre y precisión Técnicas de Laboratorio, 266:834-837.

Martín Prieto, J, A., Roig Munar, F, X., Rodríguez Perea, A., Mir Gual, M., Pons Buades G, X., Gelabert Ferrer B., 2016. La erosión histórica de la playa de Sa Rápita (S. Mallorca). *Investigaciones Geográficas* 66:135-154

Martínes, B. y Parés, A. 1998. Circulación del golfo de México inducida por mareas, viento y la corriente de Yucatán. *Ciencias marinas* 24(1):65-93.

Martínez M.L., Vázquez G., López Portillo J., Psuty N.P., García Franco J.G., Silveria T.M. y Rodríguez Revelo N.A., 2012. Dinámica de un paisaje complejo en la costa de Veracruz. *Investigación ambiental* 4 (1):15-160.

- Martínez, M.L., Lithgow, D., Moreno-Casasola, P., Martínez-Martínez, R., Silva-Casarín, R., Vázquez, G., López-Portillo, J., Mendoza-Baldwin, E., Monroy-Ibarra, R., Ramírez-Hernández, A., Boy-Tamborrell, M. y Cáceres-Puig, J. 2019. La zona costera del municipio Actopan. Primera Edición, INECOL. Veracruz, 83.
- Martínez, M.L., Mendoza González, G., Silva Casarín, R. y Mendoza Baldwin, E., 2014. Land use changes and sea level rise may induce a “coastal squeeze” on the coasts of Veracruz, México. *Global Environmental Change*, 29:180-188.
- Masselink, G. y Ronald, G. 2014. *Coastan enviroments and global change*. American Geophysical Union, John Wiley & Sons Ltd.448p.
- Masselink, G., Hughes, M.G. y Knight, J.2011. *Introduction to Coastal processes and geomorphology*. 2°ed. Hodder Education. United Kingdom, London. 416p.
- Maul G.A., 1993. *Climatic Chance in the Intra-Americas Sea*. UNEP,389p.
- McLachlan, A. y Dorvolo, A.2005.*Global Patterns in Sandy Beach Macrobenthic Communities*. *Journal of Coastal Research* 21(4):674-687.
- McLaughlin, S. y Cooper, J.A., 2010. A multi-scale coastal vulnerability index: a tool for coastal managers? *Enviromental Hazards*, 3:233-248.
- Mondragón-Pérez, A.R., 2002. ¿Qué son los indicadores? *Cultura estadística y geográfica*. *Revistas de información y análisis* 9:52-58.
- Moreno Casasola, P., 2010. Veracruz, Mar de arena. VII Construcción y destrucción de un paisaje costero. INECOL, Veracruz, México, 216-259p.
- Moreno, P., Saavedra T., Zárate D., Amador, L., Infante, D. (2000). La Mancha-El Llano: un estudio de caso sobre posibles métodos regulatorios voluntarios para la conservación y uso sustentable de las zonas costeras de México. En Bañuelos, M.2000 (coord.). *Sociedad, derecho y medio ambiente*. Primer Informe del Programa de Investigación sobre Aplicación y Cumplimiento de la Legislación Ambiental en México.181-216p.
- Moreno-Casasola P., Ruelas L., Travieso Bello A.C., Salinas G., Cruz H. H., Amador L. y Juárez A. 2015. El Plan de Manejo Integral de la Mancha-El Llano. En Moreno Casasola, P. (Comp.). *Entorno Natural y Cultural de la Costa Veracruzana: La Mancha*. Instituto de Ecología A.C.-U.S. Fish and Wildlife Service 20p.
- Moreno-Casasola, P. 2003. Ficha informativa de los Humedales de Ramsar (FIR). Instituto de Ecología A.C. Xalapa, Ver. México. 11p.
- Moreno-Casasola, P. 2010. Capítulo II. Desde las alturas. A vuelo de pájaro. En Moreno-Casasola, P. Veracruz Mar de arena.
- Moreno-Casasola, P. y Vázquez, G. 2006. Las comunidades de las Dunas. En Moreno-Casasola, P. (ed.) *Entornos Veracruzanos: La costa de la Mancha*. INECOL. Xalapa, Ver. 287-310.
- Moreno-Casasola, P., 2010. Veracruz, Mar de arena. IV. Mar de olas, mar de arena. INECOL, Veracruz, México, 129-147p.

- Moreno-Casasola, P., Rojas-Galaviz, J.L., Zarate-Lomelí, D., Ortiz-Pérez, M.A., Lara-Domínguez, A.L. y Saavedra-Vázquez, T. 2002. Diagnóstico de los manglares de Veracruz: Distribución, vínculo con los recursos pesqueros y su problemática. En *Madera y Bosques*, Número especial:61-68.
- Moreno-Casasola, P., Ruelas L. Travieso A.C., Salinas G., Cruz H.H., Amador L. y Juárez A., 2015. Proyecto plan de manejo integral, La Mancha- El Llano: Un proyecto comunitario de conservación-producción. INECOL, 20p.
- Muñoz, J.J. 1995. Geomorfología general. Espacios y sociedades Sintesis Ed. 4ed. España. 175p.
- Negendank, J.F., Emmermann, R., Krawczyk, R., Mooser, F., Tobschall, H., y Werle, D. 1985. Geological an geochemical investigatiosn on the esastern trans mexican volcanic belt. *Geofísica internacional* 24(4):477-575.
- Nonn, H. 1987. Geografía de los litorales. Ed. Madrid, España: Akal. 195p.
- Núñez, J, C., Ramos Reyes R., Barba Macías E., Espinoza Tenorio A. y Gama Campillo L.M. 2016. Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del instituto de Geografía*, 91:70-85.
- Oldroyd, D.R. y Grapes, R.H. 2008. Contributions to the history of geomorphology and Quaternary geology: an Introduction. *The Geological Society, London, Special Publications*, 301: 1–17.
- Ortiz-Lozano, L. P. Arceo Briseño, A. Granados Barba, D. Salas Monreal-y L. Jiménez Badillo, 2010. Zona costera. En: Florescano, E. y Ortiz-Escamilla, J.(Coords). 2010., *Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz, Tomo I Patrimonio Natural. Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y la Revolución Mexicana*. 123-146p.
- Ortiz-Pérez M. A. y De la Lanza-Espino G. 2006. Diferenciación del espacio costero de México: un inventario regional. *Geografía para el siglo XXI. Serie Textos Universitarios, Instituto de Geografía*,138p.
- Ortiz-Pérez M.A. y Méndez-Linares A.P. 1999. Escenarios de Vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas*, 39:68-81.
- Ortiz-Pérez M.A., Sommer-Cervantes I. y Oropeza-Orozco O. 2010. Criterios para estimar la vulnerabilidad física de las costas de barrera ante los impactos hidrometeorológicos. En Rivera, E. Azuz, I. Apuche L. y Villalobos, G. (eds.), 2010. *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino. Universidad Autónoma de Campeche CETyS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche*.944p.
- Ortiz-Pérez, M.A. 2005. Características físicas de las costas: base para su regionalización. El caso de la costa veracruzana en Moreno P.(Ed).2005. *Manejo Costero Integral: el enfoque municipal Vol. II*:81-95p.
- Osaragi, T. 2014. Classification methods for spatial data representation. Centre for advanced spatial analysis, working paper series 40, 20p.

- Palmer, B.J., Van der Elst R., Mackay F., Mather A.A., Smith A.M., Brundy S.C., Theackeray Z., Leuci R. y Parack, O. 2011. Preliminary coastal vulnerability assessment for KwaZulu-Natal, South Africa. *Journal of Coastal Research*, 64:1390-1395.
- Paradowska, K. 2006. El Poblamiento y el territorio. En Moreno-Casasola, P. (ed.), 2006. Entornos Veracruzanos: La costa de la Mancha. IINECOL. 576p.
- Pedraza-Guilsanz, J. 1996. Geomorfología, principios, métodos y aplicaciones. Madrid, España: Editorial Rueda. 414p.
- Peña, D. 2002. Análisis de datos multivariante. Editorial McGraw Hill. Madrid, España. 400p.
- Peresbarbosa, R.E., Moreno-Casasola, P., Ruelas-Monjardin, L.C. 2006. La situación socioeconómica. En Moreno-Casasola, P. (ed.), 2006. Entornos Veracruzanos: La costa de la Mancha. IINECOL. 576p.
- Pérez-Quezadas, J., Cortés Silva, A., Salas Ortega, M.R., Araguás Araguás, L., Morales Puente, P. y Carrillo Chávez, A. 2017. Evidencias hidrogeoquímicas e isotópicas sobre el origen del agua subterránea en la cuenca hidrográfica Río Actopan, Estado de Veracruz. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 34(1):25-37.
- Pethick, J.S. y Crooks. S. 2000. Development of a coastal vulnerability index: a geomorphological perspective. *Environmental Conservation* 27(4):359-367.
- Phillips, J.D. 2006. Deterministic chaos an historical geomorphology: A review and look forward. *Geomorphology* 76:109-121.
- Pike, R.J., Evans, I.S. y Hengl, T. 2009. Chapter 1: Geomorphometry: A brief guide. En Hengl, T. y Reuter, H.T. (eds.) *Geomorphometry concepts, software, applications*. Amsterdam, Países Bajos. El Sevier, 765pp.
- Plata, J.C. 2006/06/19. Presenta UV plan integral para rescatar la laguna de El Llano. *UniVerso* (sección reportaje) Universidad Veracruzana 6(22). Disponible en <https://www.uv.mx/universo/227/reportaje/reportaje.htm> consultado el 15-01-2020.
- Posada, B.O. y Buitrago, N.R. 2009. Metodología para el levantamiento de perfiles de playa. En Alcántara Carrión, J., Correa, I.D., Alvarado, M., Klein, A.H., Cabrera, J.A., y Sandoval, R. (eds.), 2009. *Métodos de teledetección aplicada a la prevención de riesgos naturales en el litoral*. Programa iberoamericano de Ciencia y Tecnología del Mar. 291p.
- Rakib, M.A., Sasaki, J., Pal, S., Newaz, A., Doza, B., Bhuiyan, M. 2019. An investigation of coastal vulnerability and internal consistency of local perceptions under climate change risk in the southwest part of Bangladesh. *Journal of Environmental Management* 231(1):419-428.
- Ramírez-Guerrero, D. 2016. Estimación de parámetros físicos mediante la generación de modelos digitales de elevación LIDAR. Tesis de ingeniería. UNAM. Facultad de ingeniería. CDMX, México. 118p.
- Ramos-Reyes R., Gama-Campillo L.M., Núñez-Gómez J.C., Sánchez-Hernández R., Hernández Trejo H. y Ruíz-Álvarez O. 2016. Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 13:2551-2563.

- RAMSAR.2014.RAMSAR. Disponible en <https://www.ramsar.org/>. Consultado el 8 de agosto del 2020
- Rangel-Buitrago, N.G. y Posada-Posada, B.O. 2005. Geomorfología y procesos erosivos en la costa del norte del departamento de Córdoba, caribe colombiano (sector paso Nuevo-Cristo Rey). Contribución 895 del Instituto de Investigaciones marinas y costeras (INVEMAR). Boletín de investigaciones Marinas y Costeras 34:101-119.
- Rangel-Buitrago, N.G. y Posada-Posada, B.O. 2013. Determinación de la vulnerabilidad y el riesgo costero mediante la aplicación de herramientas SIG y métodos multicriterio. Revista intropica 8:29-42.
- Rivera-Arriaga, E. Azuz, I. Apuche L. y Villalobos, G. (eds.), 2010. Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino. Universidad Autónoma de Campeche CETyS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche.944p.
- Rodríguez. J.P. y Arche, A. 2010. Deltas. En Arche, A. (Ed.) Sedimentología del proceso físico a la cuenca sedimentaria (pp. 561-618) Madrid, España. CSIC. 1287p.
- Román-Sierra, J., Navarro-Pons, M., Gómez-Piña, G. y Muñoz-Pérez, J.J. 2013. Optimización del análisis del tamaño de grano de arenas costeras. Conferencia Jornadas españolas de costas y puertos, At, Cartagena España. 12p.
- Rosengaus-Moshinsky, M., Jiménez-Espinosa, M. y Vázquez Conde, M.T. 2014. Atlas climatológico de ciclones tropicales en México. CENAPRED. IMTA. México. 108p.
- Ruelas-Mondarjín, L.C.2006. La situación socioeconómica. En Moreno Casasola, P. (ed.) Entornos Veracruzanos: La costa de la Mancha. IINECOL. Xalapa, Ver. México 576p.
- Ruíz-Barradas, A., Tejeda Martínez, A., Miranda Alonso, S. y Flores Zamudio, R.H. 2010. Climatología. En Atlas del patrimonio natural, histórico y cultural de Veracruz. Tomo I. Patrimonio natural. G. Benítez Badillo y C. Welsh (coords.). Comisión del Estado de Veracruz para la Conmemoración de la Independencia Nacional y de la Revolución Mexicana. Xalapa. 65-84p.
- Salinas-Tapia, H., García-Aragón, J.A. y Díaz-Delgado, C. 2007., Verificación experimental de fórmulas para velocidad de caída de sedimentos en suspensión. Ingeniería hidráulica en México, 22(2);33-42.
- Salles, P. y Silva, R. 2003. Capítulo 13: Infraestructura de protección costera, 179-189 en Rivera, E., Villalobos, G., Rosado, F. y Azuz, I. (eds.) 2003. El Manejo Costero en México, EPOMEX, México.
- Sánchez-Arcilla, A. y Jiménez, J.A.1995. Evolución en planta/perfil de una playa. Métodos predictivos. Ingeniería del Agua 2 (Número extraordinario):119-132p.
- Secretaría de Marina Armada de México (SEMAR). 2018. Calendario gráfico de Mareas 2009-2018. Disponible en línea https://oceanografia.semar.gob.mx/Templates/grafnum_veracruz.html consultado el 20 de septiembre del 2018.
- SEMARNAT, 2006. Política ambiental nacional para el desarrollo sustentable de océanos y costas de México- estrategias para su conservación y uso sustentable.

- Servicio geológico mexicano (SGM) 2015. Carta geológico-minera. Actopan, Veracruz. E14-B28. Escala 1:50000. Disponible en línea http://mapserver.sgm.gob.mx/Cartas_Online/geologia/1955_E14-B28_GM.pdf consultado el 03 de mayo del 2019.
- Servicio Mareográfico Nacional (SMN). 2018. Las mareas en México. UNAM, Instituto de Geofísica. Disponible en línea <http://www.mareografico.unam.mx/portal/index.php?page=tiposMarea> consultado el 20 de septiembre del 2018.
- Servicio Meteorológico Nacional (SMN) 2018. Normales climatológicas 1951-2010, Estación 30353 Tlacolula, Ver. Disponible en línea <https://smn.cna.gob.mx/es/observando-el-tiempo/estaciones-meteorologicas-automaticas-ema-s> consultado el 26 de noviembre del 2018.
- Silva-Casarín R., Villatoro-Lacoutre M.M., Ramo-Durón F.J., Pedroza-Paez D., Ortíz-Pérez M.A, Mendoza-Baldwin E.G., Delgadillo-Calzadilla M.A., Escudero-Castillo M.C., Félix-Delgado A. y Cid. 2014. Caracterización de la zona costera y plantamiento de elementos técnicos para la elaboración de criterios de regulación y manejo sustentable. Instituto de Ingeniería, UNAM, 125p.
- SPOT 7, 2017. Imagen de satélite, resolución 1.5m
- Steers, J.A. 1971. Applied coastal geomorphology. Palgrave Macmillan. London. 232p.
- Stephenson, W.J. y Brander, R.W. 2003. Coastal Geomorphology into the twenty-first century. Progress in physical geography 27(4):607-623.
- Stock, J.H. y Watson, M.W. 2012. Introducción a la econometría. 3ra ed. Pearson Educación S.A. Madrid, España. 599p.
- Suárez, J. 1999. Delimitación y definición del espacio litoral. En Actas de las Jornadas sobre el litoral de Almería: caracterización, ordenación y gestión de un espacio geográfico celebradas en Almería, 20 a 24 de mayo de 1997. Instituto de Estudios Almerienses, 13-23p.
- Tassara, D.A. y García, M.C. 2015. Erosión marina, vulnerabilidad e impactos antrópicos en el sudeste Bonaerense (Municipio de Mar Chiquita, Provincia de Buenos Aires, Argentina). Universidad Nacional de Mar de Plata, Rev. Tiempo Espac. Univ. Bio. Bio. Chile 12(5).
- Tejeda, A., Álvarez, O. y Contreras, A.D. 1977. Análisis estadístico del flujo de viento en la zona de Laguna Verde, Veracruz (México). Universidad Veracruzana. Xalapa Ver. México. Boletín de Investigaciones Geográficas 34:33-49p.
- Thieler, E. R., Danforth, W. W., 1994. Historical Shoreline mapping (II): Application of the Digital Shoreline mapping an Analysis System (DSMS/DSAS) to Shoreline change mapping in Puerto Rico. Journal of Coastal Research, 10(3):600-620.
- Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., Ergul, A., 2009. Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 current version 4.3. An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- Thieler, E.R.; Hammer-Klose, E.S. 2000. National Assessment of Coastal Vulnerability to Sea-Level Rise: Preliminary Results for the US Pacific Coast; United States Geological Survey (USGS):

Woods Hole, MA, USA, Disponible en línea <https://www2.usgs.gov/science/cite-view.php?cite=1442> consultado el 12 de mayo del 2018.

- Travieso-Bello, A.C. y Campos, A. 2006. Los componentes del paisaje. En Moreno Casasola, P. (ed.), 2006. Entornos Veracruzanos: La costa de la Mancha. INECOL. Xalapa, Ver. 139-150.
- Tristán, P.M., Wainschenker, R.S. y Doorn, J.H. 2006. Impacto de factores antrópicos en la erosión costera de Necochea. VIII Workshop de Investigadores en Ciencias de la Computación, 4p.
- UNESCO 2003. The Integrated Strategic Design Plan for the ocean observations module of the Global Ocean Observing System. GOOS REPORT N° 125. IOC Information Documents Series No. 1183, 56-59.
- United States Geological Survey (USGS). 2012. DSAS 4.3 for ArcGIS 10-10.3. Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change (ver. 4.3, April 2012): U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- Vázquez-Botello A. 2008. Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos. INECOL-SEMARNAT, 5-10.
- Vidal, C., Losada, M.A., Medina, R. y Losada, I. 1995. Modelos de morfodinámica de playas. Proyectos y construcción de playas artificiales y regeneración de playas. II. Fundamentos. Ingeniería del agua 2:55-74.
- Viera-Décida, F., Ramírez Fernández, J.A., Velasco Tapia, F. y Orozco Esquivel M.T. 2009. Relaciones petrogenéticas del magmatismo en la Provincia Alcalina Oriental Mexicana. CIENCIA UANL 12(1):42-49.
- Vittal-Hegde A. y Radhakrishnan-Reju V. 2007. Developmet of coastal vulnerability Index for Mangalore coast, India. Journal of coastal Research 23(5):1106-1111.
- Yáñez-Arancibia A. y Day J.W. 2010. La zona costera frente al cambio climático: Vulnerabilidad de un sistema biocomplejo e implicaciones en el manejo costero. En Rivera, En Azuz, I. Apuche L. y Villalobos, G. (eds.), 2010. Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino. Universidad Autónoma de Campeche CETyS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944p.
- Zavala-Hidalgo J., De Buen-Kalman R., Romero-Centeno R. y Hernández Maguey F. 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. En Rivera, E. Azuz, I. Apuche L. y Villalobos, G. (eds.), 2010. Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino. Universidad Autónoma de Campeche CETyS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944p.

Anexos

1. Variables ponderadas de los índices de vulnerabilidad costera bases.

Índice de Gornitz *et al.* (1994)

Variable	1	2	3	4	5
	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto
Elevación	>30	20.1-30	1.01-20	5.1-10	0-5
Geología	Intrusivos, metamorfismo de grado medio o alto	bajo grado de metamorfismo, arenisca y conglomerado	Rocas sedimentarias	Sedimentos no consolidados gruesos mal clasificados	Sedimentos finos no consolidados, depósitos de ceniza volcánica
Geomorfología	Rocas, acantilados, fiordos	Acantilados medios y costas melladas	Acantilados bajos, Salinas y arrecifes, manglares	Playas de guijarros, estuarios, lagunas y llanuras aluviales	Barreras, playas de arena, marismas y deltas
RSL (Tasa de cambio de la línea de costa)	<-1	-1 a -0.99	1 -2	2.1-4	>4
	Acreción	Dentro del rango de aumento eustático		Erosión o inundación	
Acreción o erosión de la línea de costa (m/año)	>2	1-2	-1 a +1	-1.1 a -2	< -2
	Acreción	Estable			Erosión
Rango medio de marea (m)	<1	1-2	-1 a +1	4.1-6	>6
	Micromarea	Mesomarea			Macromarea
Altura máxima de ola	0-2.9	3-4.9	5-5.9	6-6.9	>6.9
Probabilidad anual de tormenta tropical (%)	0-8	8.1-12	12.1-16	16.1-20	>20.1
Probabilidad anual de huracán (%)	0-4	4.1-8	8.1-12	12-16	16-20
Índice de frecuencia e intensidad de huracanes	0-20	21-40	41-80	80-120	>120

Velocidad de avance promedio (m/seg.)	>15	15-12	12.1-9	9.1-6	<6
Media anual de ciclones extratropicales	0-10	10.1-20	20.1-30	30.1-40	>40.1
Aumento promedio de huracanes	0-2	2.1-4	4.1-6	6.1-7	>7

Índice de McLaughlin y Cooper (2010)

Variables locales	1	2	3	4	5
	Muy bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Geomorfología	Acantilado de alta resistencia y rompeolas	Acantilado de baja resistencia	Múltiples crestas de arena	Crestas de dunas individuales, crestas de grava y cantos rodados	Pisos de barro, salinas o pantanos y playas sin dunas
Elevación (m)	> 30	20 a < 30	10 a < 20	5 a < 10	< 5
Ríos	Ausente	-----	-----	-----	Presente
Buffer interior (m del MHWM)	300 a > 1000	-----	50 a <300	-----	0 a < 50
Probabilidad de tormenta	NE	N/E	NW/SW	S/SW	W
Estado morfodinámico (Parámetro de Dean)	Tierras continentales y acantilados rocosos	Disipativo o reflexivo	Intermedio	Reflectivo intermedio y disipativo	Disipativo reflectivo
Patrimonio cultural	Ausente	-----	-----	-----	Presente
Uso de suelo	Acantilado rocoso	Matorral	Playa, dunas de arena, forestal	Agricultura	áreas urbanas, residenciales, estacionamientos y áreas verdes
Población	Ausente	-----	-----	-----	Presente

Carreteras	Ausente	senderos	Carreteras de acceso menores	Carretera clase B	Carreteras clase A
------------	---------	----------	------------------------------	-------------------	--------------------

Tipo	Regional	Local
	Variable	
A: Característica física	Geomorfología	Geomorfología
	Elevación (m)	Elevación (m)
	Ríos	Ríos
	Buffer interior (m del MHWM)	Buffer interior (m del MHWM)
B: Forzantes	Rango de marea	-----
	Probabilidad de tormenta	Probabilidad de tormenta
	Estado morfodinámico (Parámetro de Dean)	Estado morfodinámico (Parámetro de Dean)
C: Socio-económico	Patrimonio cultural	Patrimonio cultural
	Uso de suelo	Uso de suelo
	Población	Población
	Carreteras	Carreteras
	Vías férreas	-----
	designación de conservación	-----

Índice de Palmer *et al.* (2011)

Parámetros físicos	1	2	3	4
	extremadamente bajo	bajo	medio	alto
Anchura de la playa	>150m	100-150m	50-100m	<50m
Anchura de la duna	>150m	50-150m	25-50m	<25m
Distancia de la isóbata de 20m	>4km	2-4km	1-2km	<1km

distancia de la vegetación	>600m	200-600m	100-200m	<100m
porcentaje de afloramiento rocoso	>50%	20-50%	10-20%	<1

Índice de Kumar y Kunte (2012)

Parámetro	1	2	3
	Bajo	Medio	Alto
Cambio de línea de costa (m)	Acreción	0.1–1.0	1.0–2.0
Batimetría (m)	>1	0.5-1.0	< 0.5
Tasas de cambio en el nivel del mar (cm)	----	> 1.0 y < 2.0	----
Altura de la ola significativa(m)	----	0.39–1.66	----
Rango medio de marea (m)	----	1.2	----
Elevación Regional (m)	> 6	>3 y <6	> 0 y < 3
Geomorfología	Acantilados rocosos	Playas, dunas, crestas, vegetación de playa, protección de playa, etc.	Planicies de inundación, bocas de estuarios, salinas o pisos de lodo, etc.
Marea de tormenta	----	2.31m	----

Índice de Núñez et al. (2016)

Parámetros físicos	1	2	3	4	5
	Muy Bajo	Bajo	Medio	Alto	Muy Alto

a Geomorfología/ geología	Planicie estructural baja, terraza estructural baja y dolina incipiente	Llan. aluv. alta, transic. de llan. alta-baja y plan. resid. inund., terr. monocl. baja, valle acumul., plan. conf.	Planicie marginal a la costa, llanura aluvial baja, cauce inactivo y cubeta de decantación.	Cordones de playa bajos, duna costera, depresión de turba y depresión de resurgencia.	Cordones de playa bajos con turba, llanura fluviomarina, Depresión de turba salina y delta de marea.
b Cambio de la línea de costa (m)	0.12 - 12.39	-1.44 - 0.12	-2.32 - 1.44	-3.31 - 2.32	-17.98 -3.31
c Pendiente costera (°)	> 9	4-8	2 - 4	1 - 2	0 - 1
d Cambio en el nivel del mar (cm)	----	----	----	----	> 6.65
e Altura de la ola significativa (m)	0 - 0.38	0.38 - 0.74	0.74 - 0.83	0.83 - 0.89	0.89 - 0.94
f Rango mareal medio (m)	< 0.33	----	----	----	----

2. Metodología para el cálculo de la incertidumbre en la línea costera.

Fórmula modificada de Fletcher *et al.* (2003) y Martín *et al.* (2016)

$$U = \sqrt{S^2 + t^2 + RMS^2 + O^2 + EP^2}$$

S = representa la variación estacional (en m), de la marea registrada en los planos de la estación mareográfica Veracruz, Ver. México con datos de 2002-2015 del SMN (2018).

$$S = (Pm - Bm) \quad S = (0.427 - 0.107)$$

$$S = 0.320m$$

t = es la variación (en m) de la marea registrada en un día, con datos de pleamar y bajamar tomados de la estación mateográfica Veracruz, Ver. México con datos de 2002-2015 del SMN (2018).

$$t = \frac{P1 + P2}{2} + \frac{B1 + B2}{2}$$

$$t = \frac{1.594 + 1.645}{2} + \frac{1.30 + 1.616}{2}$$

$$t = 0.1615m$$

O = Es la desviación estándar de las digitalizaciones para cada insumo cartográfico.

$$o = \sqrt{\frac{\sum(Xi - \bar{X})^2}{n - 1}} \text{ donde } Xi = \frac{TP}{E}$$

Año	Xi
1970	0.0000261481
1980	0.0000242338
2000	0.000075
2011	5
2017	1.5

$$O = 2.167929543m$$

Ep = es el tamaño de celda de los insumos empleados.

Año	Insumo	EP m
-----	--------	---------

1973	Fotografía aérea	1.830366667
1986	Fotografía aérea	1.8175315
2000	Ortofoto	1.5
2011	Imagen satelital	5
2017	Imagen satelital	1.5

RMS = es el error de georreferenciación de los insumos base para la digitalización de la línea de costa, en caso de no tener, el valor será igual a 0.

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum (d_i - p_i)^2}$$

Año	Insumo	RMS
1973	Fotografía aérea	0
1986	Fotografía aérea	0.0256
2000	Ortofoto	0
2011	Imagen satelital	0
2017	Imagen satelital	0

AÑO	RMS²	O²	t²	EP²	S²	U
1973	0	4.699918503	0.02608225	3.350242134	0.272484	2.889416358
1986	0.0256	4.699918503	0.02608225	3.303420753	0.272484	2.88574176
2000	0	4.699918503	0.02608225	2.25	0.272484	2.692301015
2011	0	4.699918503	0.02608225	25	0.272484	5.477087251
2017	0	4.699918503	0.02608225	2.25	0.272484	2.692301015

$$Up = \pm\sqrt{S^2 + t^2 + RMS^2 + O^2 + EP^2}$$

$$UT = \pm\sqrt{\Sigma U^2}$$

$$UT = \pm 7.821m$$

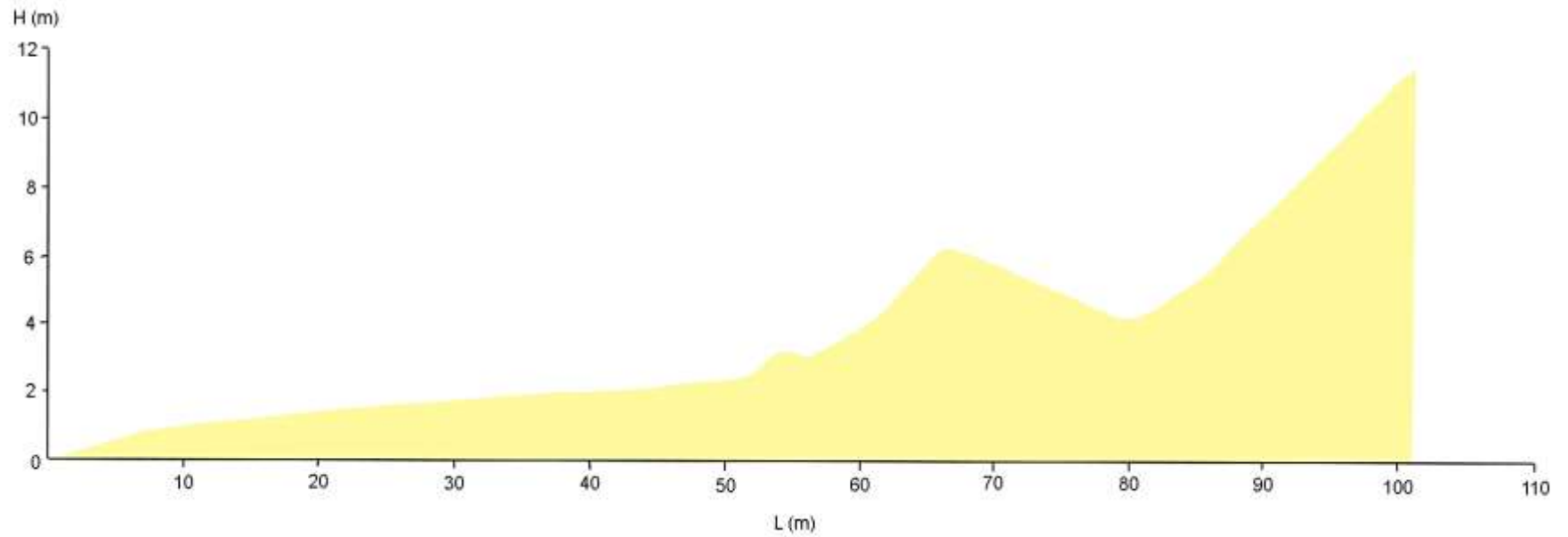
Incertidumbre estandarizada UT					
AÑO	UT ² m	Periodo	UT por periodo m	Años	UT anual m/año
1973	±8.34872689	1973-1986	±4.08365429	13	±4.08365429
1986	±8.32750551	1986-2000	±3.94664291	14	±3.94664291
2000	±7.24848475	2000-2011	±6.10302954	11	±6.10302954
2011	±29.9984848				
2017	±7.24848475	2011-2017	±6.10302954	6	±6.10302954

3. Fichas litorales: Perfiles de playa, campaña de campo 2018.

Estación 1 Referencia: Barra
Limón

Coordenada inicial:
19°41'4.8"N,96°23'53.4"W

Fecha 05/06/2018



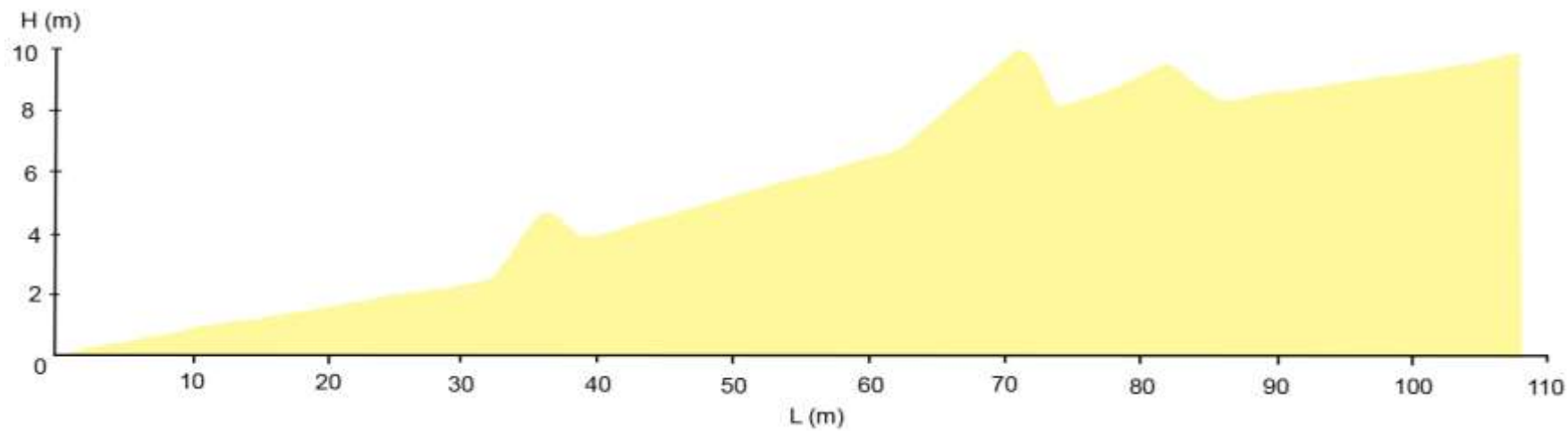
Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	6.5°
Altitud final	10.88msnm	Ancho de dunas	49.39m
Ancho de perfil	100.51m	Altura máx. de dunas	6.42m
Ancho de Berma	51.12m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	-----		
Tipo de asentamientos	-----		
Tipo de vegetación	Vegetación pionera natural de duna		
Estado de vegetación	Sin perturbación aparente		



Estación 2
 Referencia Barra Limón

Coordenada inicial: 19°41'4.8"N, 96°23'53.4"W

Fecha 05/06/2018



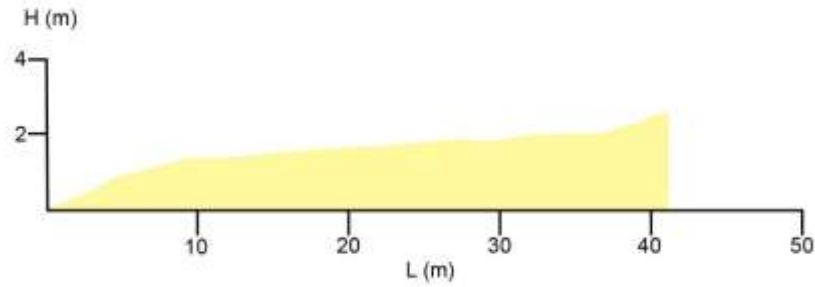
Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	5.5°
Altitud final	9.83msnm	Ancho de dunas	75.94m
Ancho de perfil	108.17m	Altura máx. de dunas	3.67m
Ancho de Berma	32.23m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	-----		
Tipo de asentamientos	-----		
Tipo de vegetación	Vegetación pionera natural de duna		
Estado de vegetación	Sin perturbación aparente		



Estación 3
Referencia Playa Villa Rica,
Actopan

Coordenada inicial: 19°40'14.674" N, 96°23'54.045" W

Fecha 06/06/2018

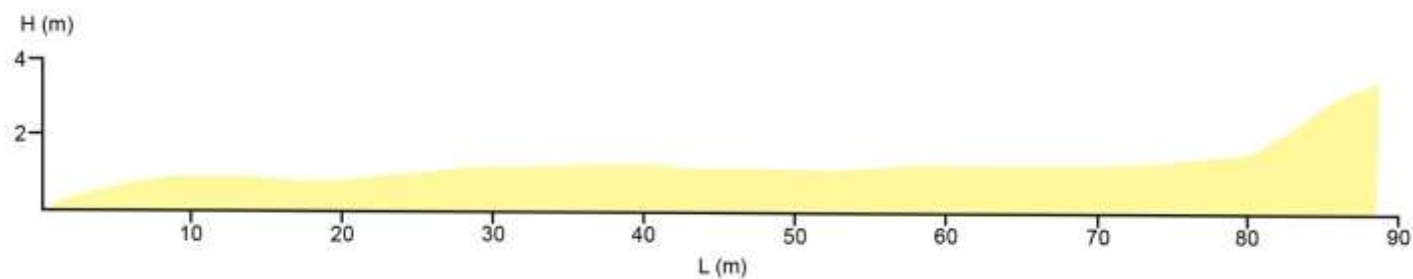


Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	3.5°
Altitud final	2.44msnm	Ancho de dunas	2.44m
Ancho de perfil	40.97m	Altura máx. de dunas	2.44m
Ancho de Berma	37.7m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	Actividad turística rústica		
Tipo de asentamientos	Uso habitacional, localidad rural		
Tipo de vegetación	Vegetación inducida pastos y cocoteros		
Estado de vegetación	Vegetación natural sustituida		

Estación 4
Referencia Playa Villa Rica,
Actopan

Coordenada inicial: 19°39'56.8"N,96°23'53.8"

Fecha 06/06/2018



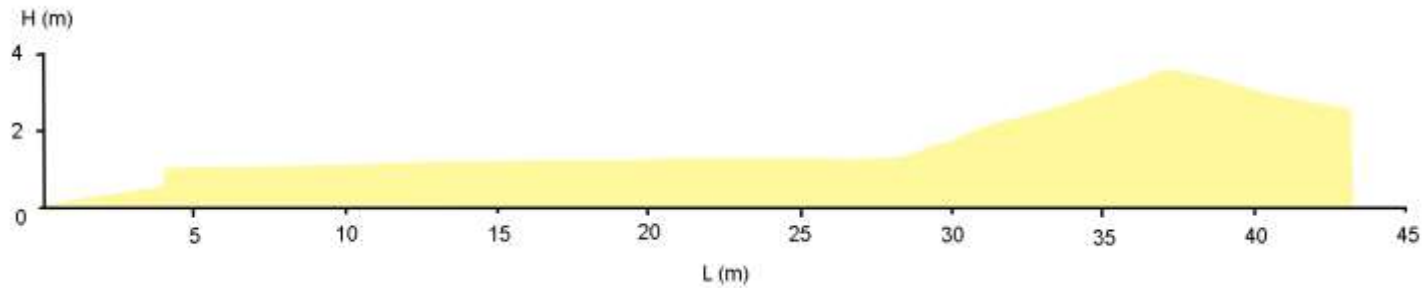
Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	2.75
Altitud final	3.21msnm	Ancho de dunas	9.4
Ancho de perfil	89.39m	Altura máx. de dunas	3.21
Ancho de Berma	79.99m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	Actividad turística rústica		
Tipo de asentamientos	Uso habitacional, localidad rural		
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna y pastizal		
Estado de vegetación	Vegetación altamente modificada por la presencia de la localidad de Villa Rica		



Estación 5
 Referencia Playa Villa Rica, Actopan

Coordenada inicial: 19°39'39.6"N,96°23'55"W

Fecha 06/06/2018

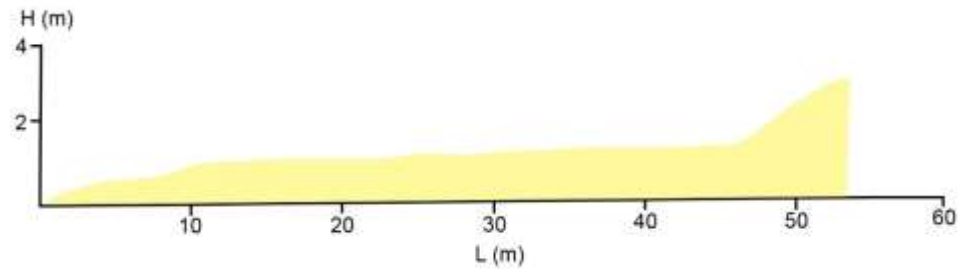


Altitud inicial	0,0msnm	Pendiente de Berma	5°
Altitud final	2.57msnm	Ancho de dunas	15.4m
Ancho de perfil	43.3m	Altura máx. de dunas	3.49m
Ancho de Berma	27.9m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	Paso de vehículos		
Tipo de asentamientos	-----		
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna		
Estado de vegetación	Sin perturbación aparente		

Estación 6
Referencia Playa Villa Rica,
Actopan

Coordenada inicial: 19°39'27.4"N,96°23'53.6"W

Fecha 06/06/2018



Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	2°
Altitud final	3.45msnm	Ancho de dunas	7.03m
Ancho de perfil	53.1m	Altura máx. de dunas	3.45m
Ancho de Berma	46.07m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	Paso de vehículos		
Tipo de asentamientos	-----		
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna		
Estado de vegetación	Sin perturbación aparente		

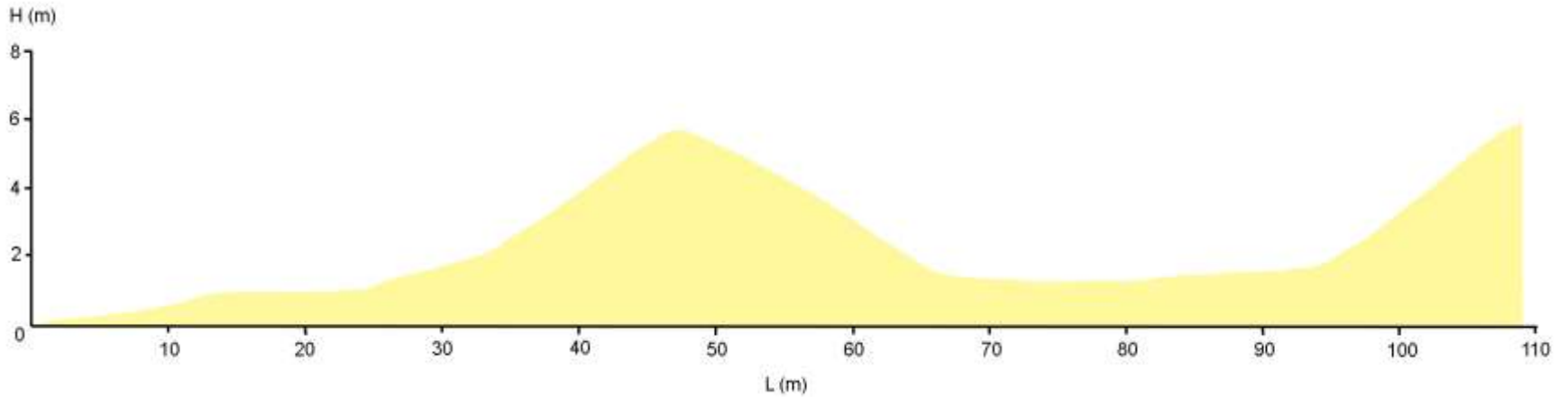


Estación 7

Coordenada inicial: 19°39'4.2"N,96°23'50.1"W

Fecha 06/06/2018

Referencia Playa Villa Rica,
Actopan



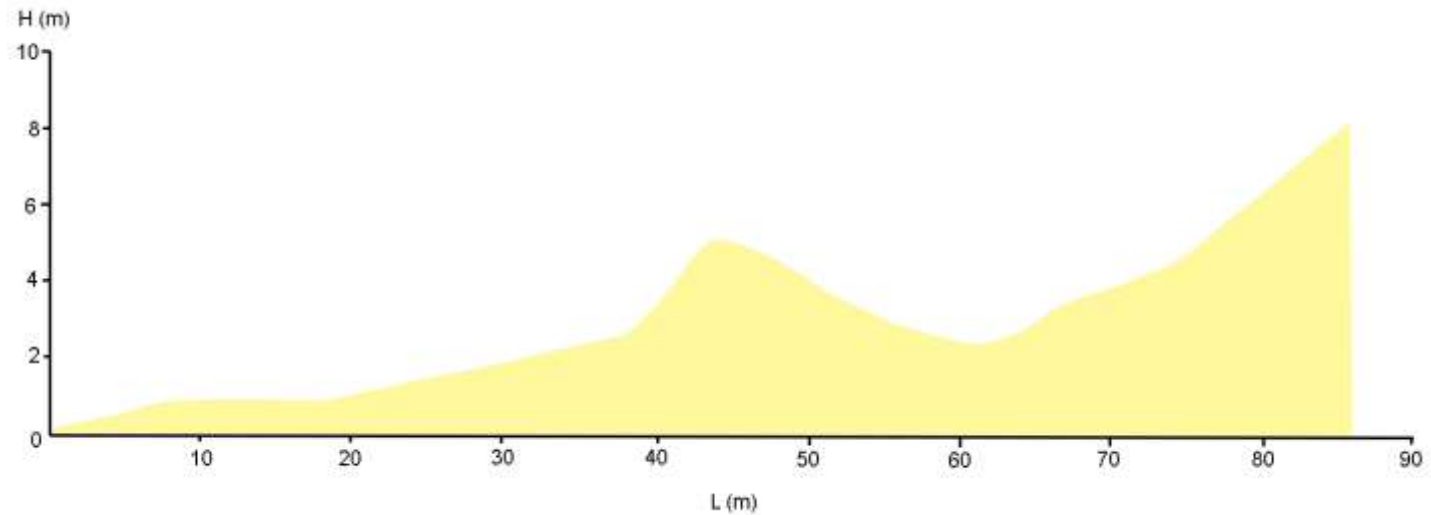
Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	4.5°
Altitud final	6msnm	Ancho de dunas	73.65m
Ancho de perfil	108.06m	Altura máx. de dunas	6 m
Ancho de Berma	34.85m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	Paso de vehículos		
Tipo de asentamientos	-----		
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna		
Estado de vegetación	Sin perturbación aparente		

estación 8

Coordenada inicial: 19°38'56"N,96°23'48.8"W

Fecha 06/06/2018

Referencia Playa Villa Rica, Actopan



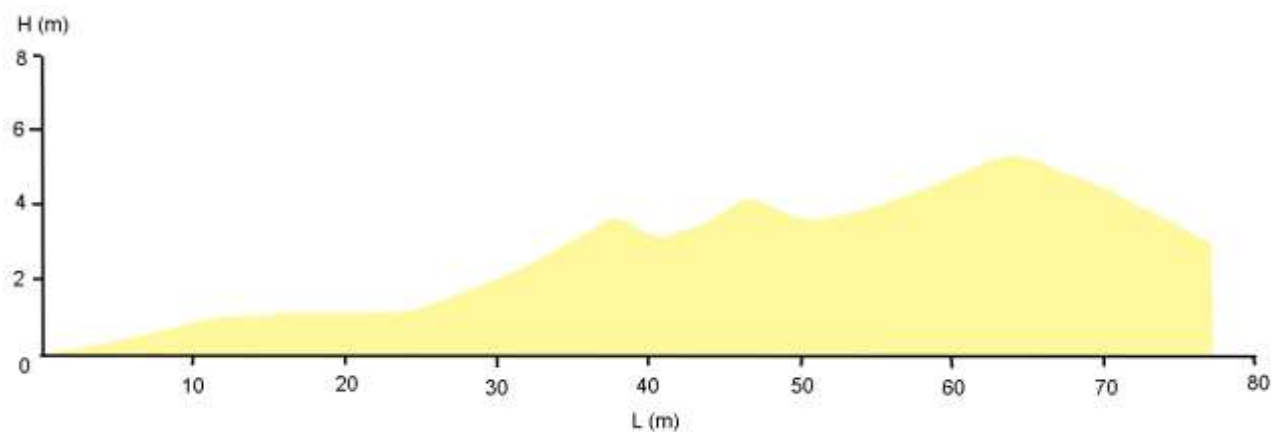
Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	4.5°
Altitud final	8.2msnm	Ancho de dunas	47.91m
Ancho de perfil	85.57m	Altura máx. de dunas	8.2m
Ancho de Berma	37.76m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	Paso de vehículos		
Tipo de asentamientos	-----		
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna y Manglar		
Estado de vegetación	Sin perturbación aparente y desarrollo de comunidades de Manglar en el límite interior de la playa por la presencia de la laguna El Llano.		



Estación 9
Referencia Playa Villa Rica, Actopan

Coordenada inicial: 19°38'43.3"N,96°23'45"W

Fecha 06/06/2018

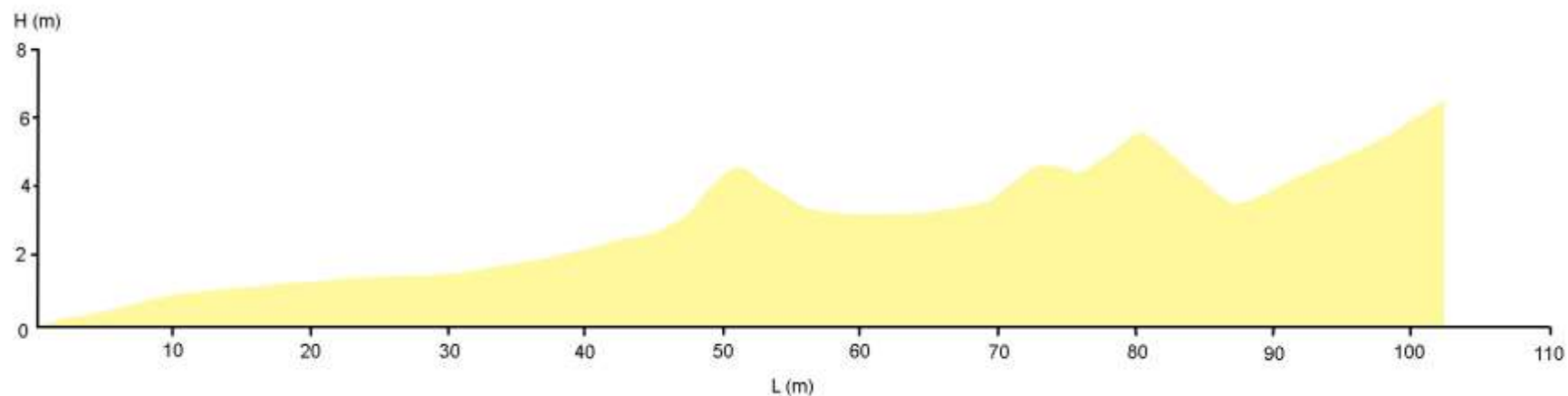


Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	3°
Altitud final	2.97msnm	Ancho de dunas	52.28m
Ancho de perfil	77.28m	Altura máx. de dunas	4.02 m
Ancho de Berma	25m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	Paso de vehículos		
Tipo de asentamientos	-----		
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna y Casuarina		
Estado de vegetación	La vegetación de duna esta perturbada por la presencia de una cerca de Casuarina en el límite interior de la playa		

Estación 10
 Referencia Playa Villa Rica,
 Actopan

Coordenada inicial: 19°38'35.7"N,96°23'41.2"W

Fecha 06/06/2018



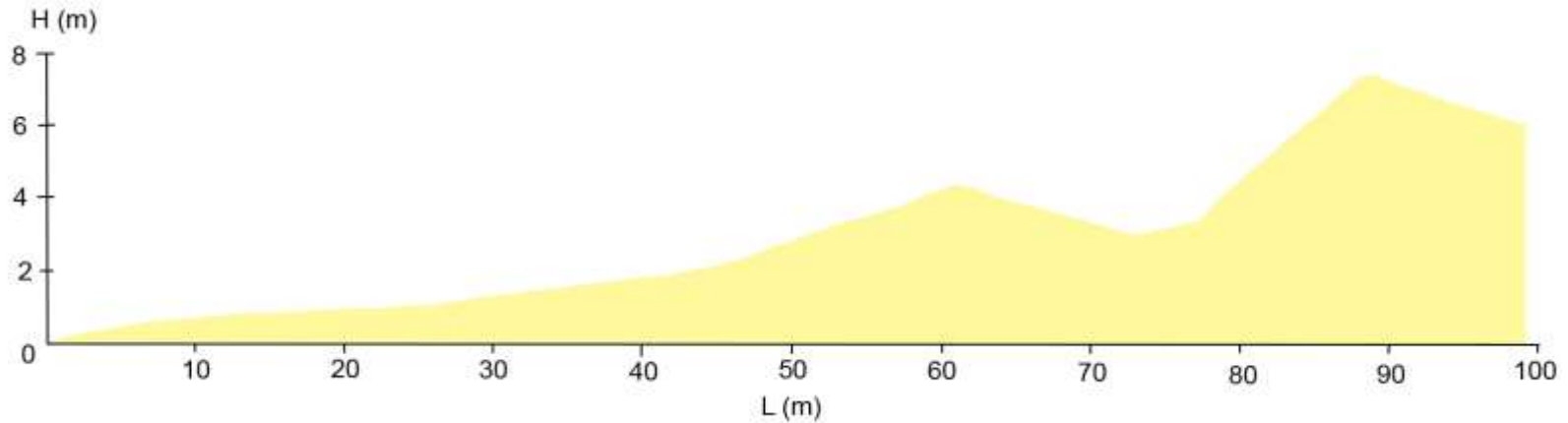
Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	4°
Altitud final	6.45msnm	Ancho de dunas	56.14m
Ancho de perfil	102.2m	Altura máx. de dunas	6.45m
Ancho de Berma	46.06m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	Paso de vehículos		
Tipo de asentamientos	-----		
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna y Casuarina		
Estado de vegetación	La vegetación natural se encuentra perturbada por la presencia de Casuarina en el límite interior de la playa.		



Estación 11
 Referencia Playa Farallón,

Coordenada inicial: 19°38'26.5"N,96°23'36.1"W

Fecha 06/06/2018

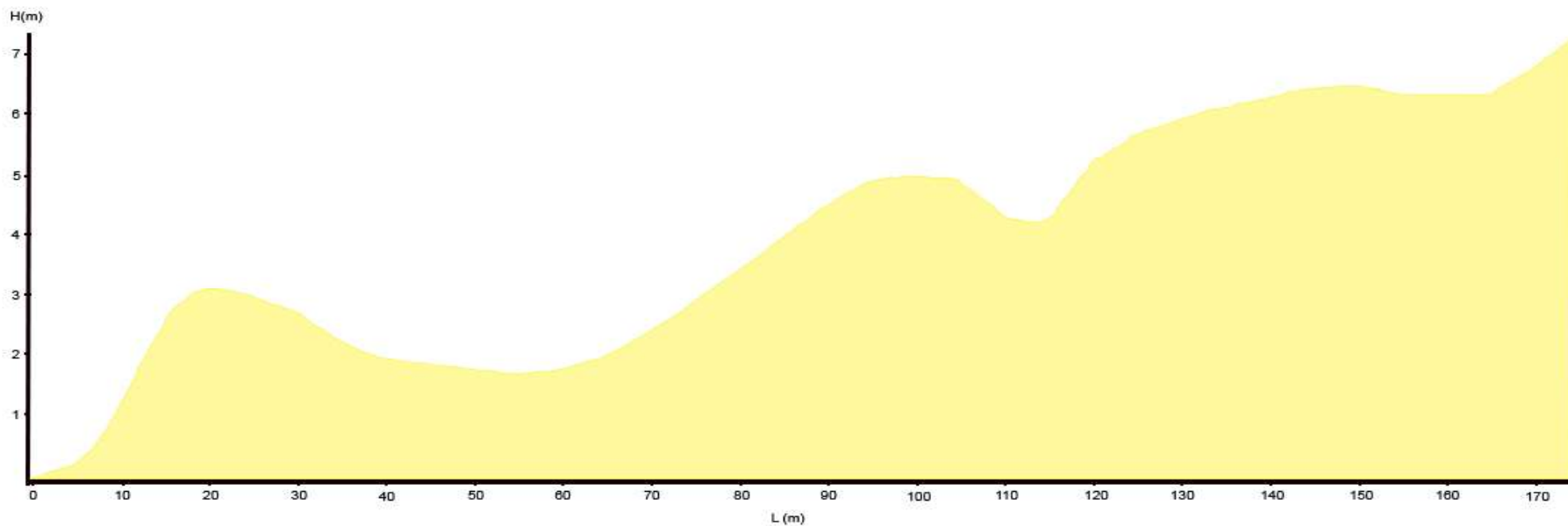


Altitud inicial	0.0msn	Pendiente de Berma	2.16°
Altitud final	6.04msnm	Ancho de dunas	72.88m
Ancho de perfil	99.06m	Altura máx. de dunas	7.12m
Ancho de Berma	26.21m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	-----		
Tipo de asentamientos	-----		
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna y Casuarina (<i>Casuarina equisetifolia</i>)		
Estado de vegetación	La vegetación natural esta perturbada por la presencia de la cerca de Casuarina en el límite interno de la playa.		



Estación 12 Coordenada inicial: 19°38'1.174"N ,96°23'25.099"W
 Referencia Paya Farallón

Fecha 19/08/2019 Fuente INEGI 2012

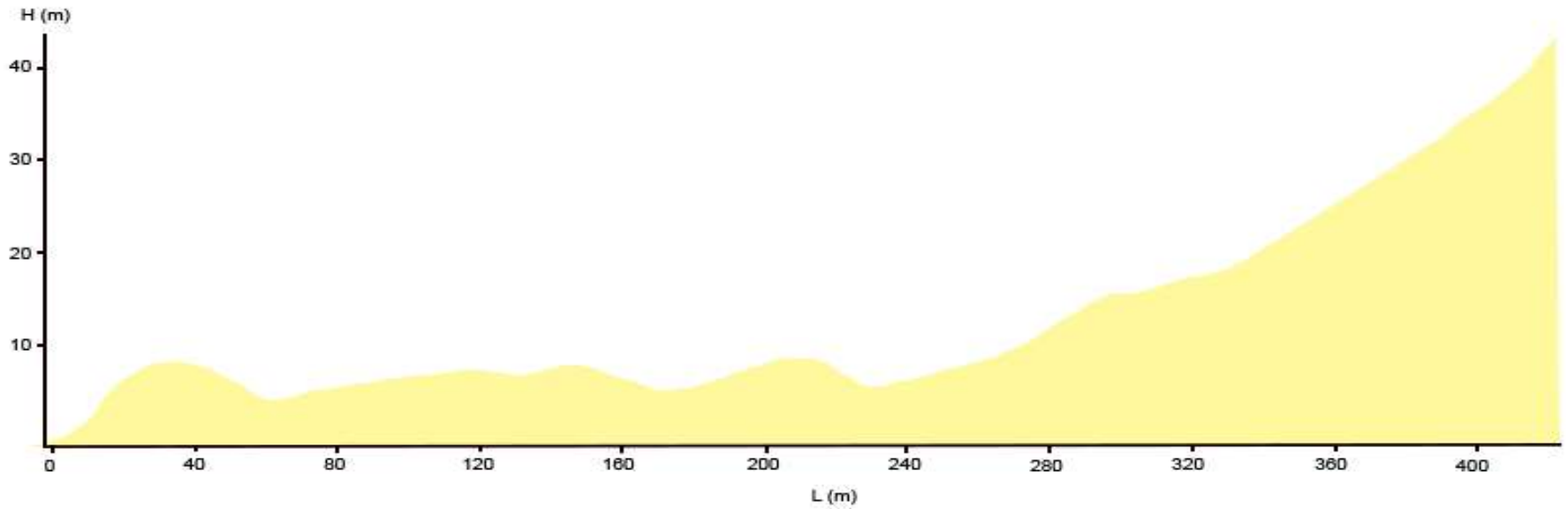


Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	1.82°
Altitud final	7.3msnm	Ancho de dunas	171m
Ancho de perfil	176m	Altura máx. de dunas	7.3m
Ancho de Berma	5m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	-----	Tipo de asentamientos	-----
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna		
Estado de vegetación	Sin perturbación aparente		

Estación 13
 Referencia Playa Farallón

Coordenada inicial :19°37'40.357"N ,96°23'11.872"W

Fecha 19/08/2019
 Fuente INEGI 2012



Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	8.03°
Altitud final	44msnm	Ancho de dunas	383.8m
Ancho de perfil	420.8m	Altura máx. de dunas	44m
Ancho de Berma	37m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	-----	Tipo de asentamientos	-----
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna		
Estado de vegetación	Sin perturbación aparente		

Estación 14

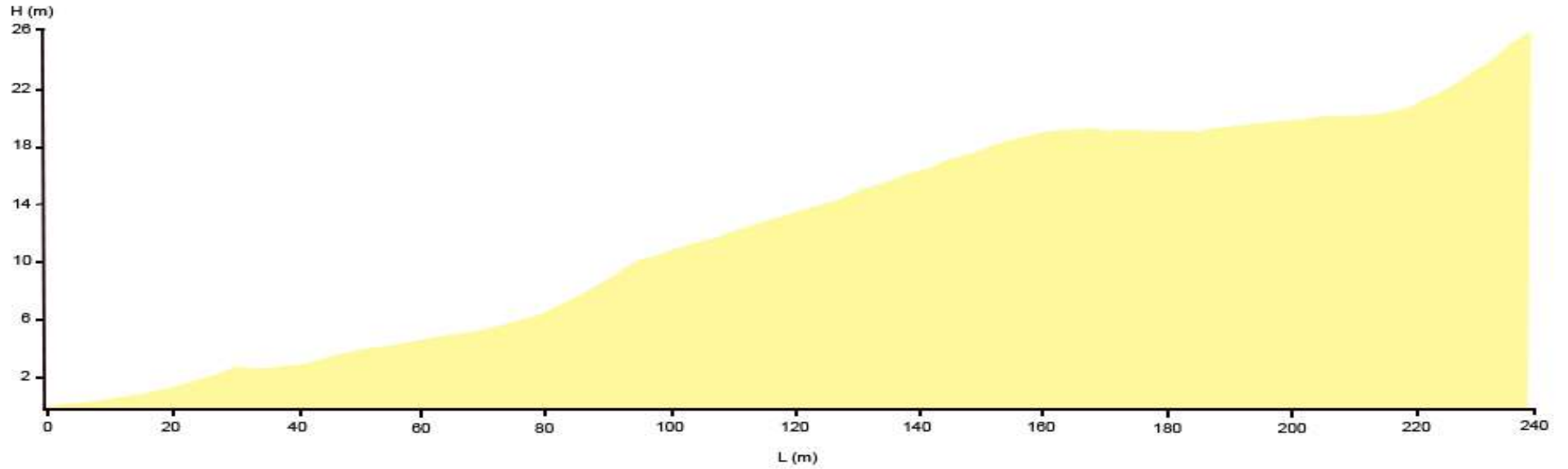
Coordenada inicial: 19°37'21.649"N ,96°23'1.031"W

Fecha

19/08/2019

Fuente INEGI
2012

Referencia Playa Farallón

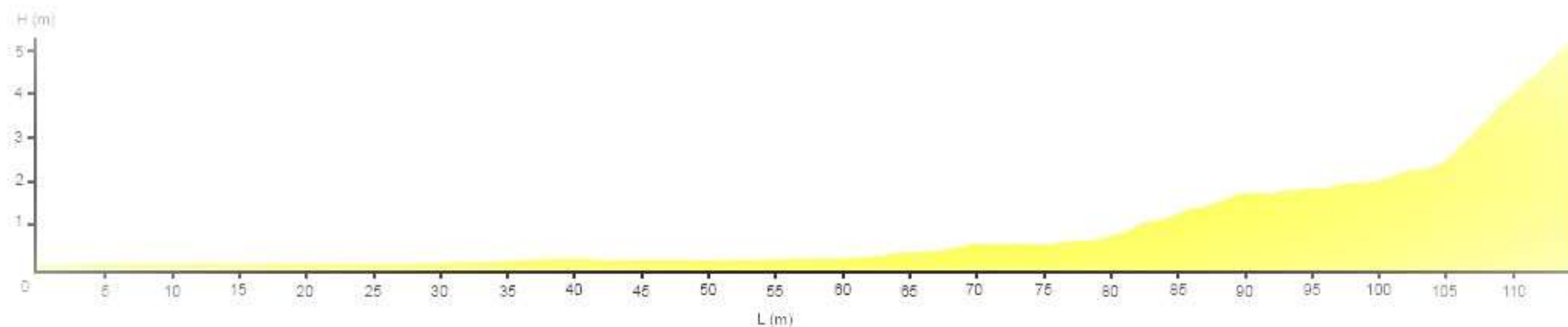


Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	6.15°
Altitud final	26msnm	Ancho de dunas	199m
Ancho de perfil	237m	Altura máx. de dunas	26m
Ancho de Berma	38m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	-----	Tipo de asentamientos	-----
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna		
Estado de vegetación	Sin perturbación aparente		

Estación 15
 Referencia Playa Paraíso

Coordenada inicial: 19°35'30.71" N 96°22'41.60" w

Fecha 19/08/2019
 Fuente INEGI 2012



Altitud inicial	0.0msnm	Pendiente de Berma	0.8
Altitud final	5.17msnm	Ancho de dunas	36m
Ancho de perfil	118m	Altura máx. de dunas	4.5m
Ancho de Berma	82m	Características del sedimento (tamaño mm)	Arena fina <0.150
Actividades antrópicas	-----		
Tipo de asentamientos	-----		
Tipo de vegetación	Vegetación natural de duna		
Estado de vegetación	Sin perturbación aparente		

