



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Filosofía y Letras
Colegio de Geografía

“Vulnerabilidad física ante el ascenso del nivel del mar de la Isla Barrera de la Laguna Madre, Tamaulipas”

Tesis

Presentada por:
Evelyn Cuevas Cortes

Para obtener el título de:
Licenciada en Geografía

Asesor:
Mario Arturo Ortiz Pérez

Sinodales:
Mtra. Oralia Oropeza Orozco
Mtra. Mary Frances Teresa Rodríguez Van Gort
Geóg. Andrés Fernando Benítez Omaña
Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez

México, D.F., 2015.



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



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.

Con todo mi amor y gratitud: a mis padres y hermanos.

A mis amigos y familia.

A Carlos, Dante, Sofía, Natalia y Anette

Agradecimientos.

Al Dr. Mario Arturo Ortiz Pérez, del Instituto de Geografía de la UNAM, por los conocimientos aportados, por sus valiosas enseñanzas, por su dedicación y por el gran compromiso en la dirección de este trabajo.

A la Mtra. Oralia Oropeza Orozco, investigadora del Instituto de Geografía, por sus contribuciones para el mejoramiento de esta tesis, por su tiempo y valiosos comentarios.

Al Geog. Andrés Fernando Benitez Omaña del Colegio de Geografía por el interés y compromiso prestado en la revisión de esta tesis y por siempre impulsar el conocimiento de la Geografía.

A la Mtra Mary Frances Teresa Rodríguez VanGort del colegio de Geografía por sus comentarios que enriquecieron este trabajo.

Al Mtro. José Manuel Espinoza Rodríguez del colegio de Geografía por sus comentarios que mejoraron esta tesis.

A José Manuel Figueroa Mah-Eng por tus enseñanzas, por tu tiempo y por todo el conocimiento obsequiado.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por la grandes oportunidades que me brindo durante mis estudios, que contribuyeron en mi formación profesional y personal.

Por mi raza hablara mi espíritu.

Tabla de contenido

Introducción	VII
1. CAPÍTULO 1. GENERALIDADES TEÓRICAS	1
1.1 Planteamiento del Problema	1
1.2 Hipotesis	2
1.3 Objetivos	2
1.4 Metodología	3
1.4.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos	3
1.4.2 Dimensiones morfológicas y morfométricas de la barra	6
1.4.3 Composición y organización de las unidades naturales de la barrera	9
1.4.4 Transformación antopogénica	12
1.4.5 Susceptibilidad de inundación por efector del ascenso del nivel del mar	14
1.5 Marco Teórico	15
1.5.1 Vulnerabilidad de la costa	15
1.5.1.1 Parámetros para evaluar la vulnerabilidad	16
1.5.2 Nivel del Mar	17
1.5.3 Nivel del mar en el Golfo de México	29
1.5.4 Sistemas de Islas Barrera	20
1.5.4.1 Playa	22
1.5.4.2 Sistemas de dunas	23
1.5.4.3 Sistema estuarino dominado por mareas	24
1.5.4.4 Marismas	24
1.5.4.5 Planicie costera	25
CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	26
2.1 Descripción	26
2.2 Características climáticas	27
2.3 Oleaje y mareas	28
2.4 Sedimentos	33
2.5 Sistemas hidrológicos	35
2.6 Vegetación	36
2.7 Población e infraestructura	36
2.8 Antecedente histórico. La Laguna Madre	37

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DE LA VULNERABILIDAD DE LA ISLA BARRERA	39
3.1 Resultados	41
3.1.1 Primer sector. Barra de San José	41
3.1.1.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos	41
3.1.1.2 Dimensiones morfográficas y morfométricas de la barra	42
3.1.1.3 Composición y Organización de las unidades naturales de la barrera	43
3.1.1.4 Transformación antropogénica	43
3.1.1.5 Susceptibilidad de inundación por efecto del ascenso del nivel del mar	45
3.1.1.6 Jerarquía de los grupos de variables	46
3.1.2 Segundo sector. Barra Los Americanos	48
3.1.2.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos	48
3.1.2.2 Dimensiones morfográficas y morfométricas de la barra	49
3.1.2.3 Composición y Organización de las unidades naturales de la barrera	49
3.1.2.4 Transformación antropogénica	50
3.1.2.5 Susceptibilidad de inundación por efecto del ascenso del nivel del mar	50
3.1.2.6 Jerarquía de los grupos de variables	51
3.1.3 Tercer sector, Barra Jesús María	52
3.1.3.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos	52
3.1.3.2 Dimensiones morfográficas y morfométricas de la barra	53
3.1.3.3 Composición y Organización de las unidades naturales de la barrera	53
3.1.3.4 Transformación antropogénica	54
3.1.3.5 Susceptibilidad de inundación por efecto del ascenso del nivel del mar	54
3.1.3.6 Jerarquía de los grupos de variables	55
3.1.4 Cuarto sector. Barra Santa Isabel	56
3.1.4.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos	56
3.1.4.2 Dimensiones morfográficas y morfométricas de la barra	57
3.1.4.3 Composición y Organización de las unidades naturales de la barrera	57
3.1.4.4 Transformación antropogénica	58
3.1.4.5 Susceptibilidad de inundación por efecto del ascenso del nivel del mar	59
3.1.4.6 Jerarquía de los grupos de variables	60
3.1.5 Quinto sector, Barra Soto la Marina	61
3.1.5.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos	61
3.1.5.2 Dimensiones morfográficas y morfométricas de la barra	62
3.1.5.3 Composición y Organización de las unidades naturales de la barrera	62
3.1.5.4 Transformación antropogénica	63
3.1.5.5 Susceptibilidad de inundación por efecto del ascenso del nivel del mar	64
3.1.5.6 Jerarquía de los grupos de variables	65

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	66
4.1 El aumento del nivel marino y sus efectos en la costa de la isla barrera de la Laguna Madre	70
4.2 Implicaciones por el aumento del nivel del mar (naturales y antrópicas)	73
CONCLUSIONES	75
BIBLIOGRAFÍA	78
ANEXO 1. MAPAS DE LAS BARRAS	
Mapa 6. Barra San José	
Mapa 7. Barra Los americanos	
Mapa 8. Barra Jesús María	
Mapa. 9. Barra Santa Isabel	
Mapa 10. Barra Soto la Marina	

Introducción.

Las costas son las zonas con mayor dinamismo en el planeta, debido a que se lleva a cabo un constante flujo de energía, materia e información; ya que se ubican en áreas de transición océano-continente; lo que las coloca en una franja difusa (Cruz, 2010).

Las Islas Barrera son un tipo de costa que bordea a las tierras continentales, se encuentran separadas de estas a través de lagunas, esteros, bahías y humedales. Tiene como función proteger los ambientes que se encuentran en ellas de eventos meteorológicos, el viento y el oleaje (Feagin *et al.*, 2010).

Psuty (2004) menciona que en la geomorfología costera procesos como el viento, las olas y las corrientes marinas (energía); actúan sobre los sedimentos (materia) para producir un conjunto de formas causalmente relacionadas (información); él describe esta relación como un modelo de proceso-respuesta.

Sin embargo, estos flujos no siempre son balanceados. Cuando existe alguna alteración o variaciones en el continente o en los océanos, sus efectos se reflejan en cambios en los componentes físicos de las costas (Haslett, 2009), que por lo general desestabiliza su balance energético, lo que se traduce en fragilidad.

La vulnerabilidad en las islas barreras es extremadamente alta, ya que su costa está expuesta a muchas amenazas como ciclones, poco aporte de sedimentos, subsidencia y aumento del nivel marino (Ceia *et al.*, 2010).

El ascenso del nivel del mar es una de las mayores preocupaciones, ya que se atribuye al cambio climático su rápido aumento -comparado con los registros pasados -, ya que es probable que en los años siguientes continúe afectando las costas.

Para los sistemas de isla barrera la ausencia de sedimentos genera que su estructura se debilite; la longitud y la estrechez de las barras y de otras morfologías de las costas de barrera está relacionada con el rango de mareas, la energía de las olas, el abastecimiento de sedimentos y la tendencia en el nivel del mar (Tunell y Judd, 2002).

Las acciones humanas contribuyen a la afectación de todo el sistema; esto es, la construcción de estructuras como presas, diques y puertos (por mencionar algunos), son las principales causas de inestabilidad, que interfieren obstruyendo la continuidad de los flujos (Ceia *et al.*, 2010)

Algunas obras fueron construidas en el siglo pasado (XX): en el río Bravo la presa Falcón fue construida en el año de 1954, a 442 km aguas arriba del Golfo de México; en 1969 se construyó la presa La Amistad, se encuentra a 923 km aguas arriba del Golfo de México (CILA, 2014).

Dichas obras, tienen impacto en la configuración de la Isla Barrera de la Laguna Madre, ya que retienen sedimentos, impidiendo que estos puedan ser depositados en las islas barrera, contribuyendo a un déficit en el incremento de su estructura.

CAPÍTULO 1. GENERALIDADES TEÓRICAS

1.1 Planteamiento del problema

Como se ha mencionado, la dinámica de las costas, las convierte en áreas en la que se lleva a cabo un gran intercambio de materia y energía que origina formas acumulativas como son las playas que requieren de un determinado equilibrio para asegurar las condiciones para su existencia, estabilidad y funcionalidad.

Las islas barreras tienen como función ecológica proteger los ecosistemas y la morfología de las costas interiores, de fenómenos cotidianos como el viento, corrientes de marea y el oleaje así como ofrecer resistencia ante algunos fenómenos extraordinarios que se llegan a presentar como tormentas tropicales, nortes, huracanes y el aumento del nivel del mar por mareas de viento. En algunas ocasiones ocurre que la frecuencia, pero sobre todo la intensidad, de estos fenómenos alteran o generan un desequilibrio en las islas barrera.

Algunos autores atribuyen a la acción del ser humano el cambio climático, que se traduce en un desorden en el comportamiento e intensidad de los fenómenos meteorológicos (huracanes, nortes, tormentas tropicales) y en el aumento del nivel del mar (Raper, Wigley y Warrick, 1966).

La tectónica también es un punto importante ya que muchas de las barras se desarrollan en cuencas geológicas marginales en las cuales, como cualquier otra, tiene una columna de sedimentos muy potente que induce al hundimiento y esto tiene como consecuencia un aparente aumento del nivel del mar.

Respecto a la injerencia del hombre con respecto al impacto en el ambiente de barrera y en los paisajes circundantes, resulta interesante conocer los efectos de la intervención humana, por ejemplo la consecuencias que tiene la construcción de presas en los ríos que reconocen a el mar y que afectan su aporte de sedimentos, o cómo impactan las obras de canalización para la irrigación, que contrarrestan cantidad de agua y sedimentos que llegan al mar. Otro problema es el caso de la instalación y operación de las granjas acuícolas, la presencia de salinas y de suelos salinos de los humedales secos, que generan contaminación por erosión eólica a los campos agrícolas adyacentes.

Esta tesis pretende contribuir al conocimiento de las condiciones en las que se encuentra la Isla Barrera de la Laguna Madre, el grado de impacto de los fenómenos (nortes, huracanes, tormentas tropicales, y muy importante, la vulnerabilidad que se deriva. Por ello hay que plantear una serie de interrogantes que nos ayuden a estructurar de una mejor manera el estudio y encontrar respuestas:

- ¿Qué tan estable se encuentra la isla barrera?
- ¿Cuáles son las evidencias de su transformación?
- ¿Cuál es la disponibilidad de sedimentos?, ¿cómo intervienen las presas en la aportación de sedimentos?
- ¿Con qué frecuencia e intensidad se presentan los nortes, tormentas tropicales y huracanes como agentes que inestabilizan las islas barrera?

- ¿Cuál es la capacidad de resiliencia que tiene el sistema de barreras ante los fenómenos hidrometeorológicos?
- ¿Qué papel juegan las estructuras antrópicas en la inestabilidad y/o transformación de la barra?
- ¿Qué papel juegan las bocas en la inestabilidad de la barrera?
- ¿Los campos de dunas del sistema de barreras reciben suficiente abastecimiento de sedimentos para continuar con un proceso de expansión o en sentido inverso, están disminuyendo su aporte de sedimentos y con ello la “retracción de la isla barrera”?

1.2 Hipótesis.

Para esta investigación se ha planteado como hipótesis que, por las características de la barra, como son los materiales que la conforman, su morfometría y morfografía; en combinación con fenómenos que influyen en ella como huracanes, nortes, oleaje y mareas; han propiciado que la vulnerabilidad aumente; aunado a la subsidencia de la costa y al impacto de las poblaciones que se han establecido. El análisis de estas relaciones permitirá establecer cómo es que se han determinado éstas entre el sistema costero y la población.

1.3 Objetivos

El objetivo general de este trabajo es jerarquizar el grado de vulnerabilidad de la barrera de la Laguna Madre. De acuerdo con las características físicas, los fenómenos extraordinarios que la afectan (naturales y antrópicos) y aquellos que establecen su funcionalidad.

Objetivos particulares.

- Hacer un análisis de las características físicas de la barra, y, de los procesos y fenómenos influyentes (temporalidad e intensidad).
- Analizar los cambios en la configuración espacial y el funcionamiento de la Isla Barrera.
- Analizar la influencia humana en la Isla Barrera
- Evaluar el grado de vulnerabilidad.
- Elaborar la cartografía temática de la vulnerabilidad de la Isla Barrera.

1.4 Metodología.

La metodología que se utiliza en esta investigación es la propuesta por Ortiz, Sommer y Oropez (2010) y Gama (2011) en la cual se sugiere la consideración de los procesos marinos e hidrometeorológicos y la evaluación de los procesos que estarán en constante relación. A lo anterior, se integran los factores indirectos como geológicos y geomorfológicos.

Los criterios y variables que describen y caracterizan al sistema, se agrupan en cinco categorías; posteriormente se establecen las ligas entre clases, mediante una red jerárquica que pondera la importancia de cada clase en función de su contribución a la vulnerabilidad del sistema.

Enseguida se explican los criterios para evaluar la vulnerabilidad.

1.4.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos

1.4.1.1 Distancia media a los depocentros

Los depocentros son propiamente las desembocaduras de los ríos y esteros próximos a la barrera, representan las fuentes más cercanas de aporte de sedimentos para surtir la materia prima y preservar la existencia de las barreras.

A mayor distancia de las barras y los depocentros, la vulnerabilidad será más alta, ya que es menos probable que los sedimentos se depositen en las barras.

Para obtener el valor de este criterio, se miden las distancias de la desembocadura de cada río al punto medio de la barra; se obtiene el promedio de éstas distancias y de acuerdo al resultado se otorga un valor de vulnerabilidad (Figura 1).



Figura 1. Procedimiento para obtener la distancia promedio a los depocentros.

Fuente: Imagen de Google Earth

1.4.1.2 Altura promedio de las dunas internas parcialmente activas

En este apartado se considera que la altura de las dunas internas, que es la franja más retirada de la línea de costa y usualmente una cobertura de vegetación escasa; en su conjunto constituirán un

obstáculo al flujo eólico. Formando una barrera física que amortigua y filtra la acción del flujo eólico y de los hidrometeoros.

Su valor se obtiene del promedio de la altura de las cimas de cordones de dunas internas que se encuentran parcialmente activas en la porción media de la barrera.

De esta manera, se diferencian las dunas por sus dimensiones en altura, así las dunas bajas o embrionarias se establecen en la categoría menor de los diez metros y las más altas cuando superan este valor. Se deduce que entre menos altura serán más vulnerables, al no ser eficaces para retener, amortiguar y filtrar los flujos.

La altura promedio de las dunas se obtiene marcando una serie de líneas transversales en las dunas, con una equidistancia de 1500 m. Con la herramienta de Google Earth que muestra el perfil de elevación, se obtiene la máxima y la mínima altura, a partir de estos datos, se calcula el promedio de cada línea marcada. Por último se calcula el promedio final de la barra completa (Figura 2).

Ejemplo:

Altura máxima: 8 m

Altura mínima: 1 m

Promedio $\rightarrow 1+8=9 \rightarrow 9/2=4.5\text{m}$ de altura promedio

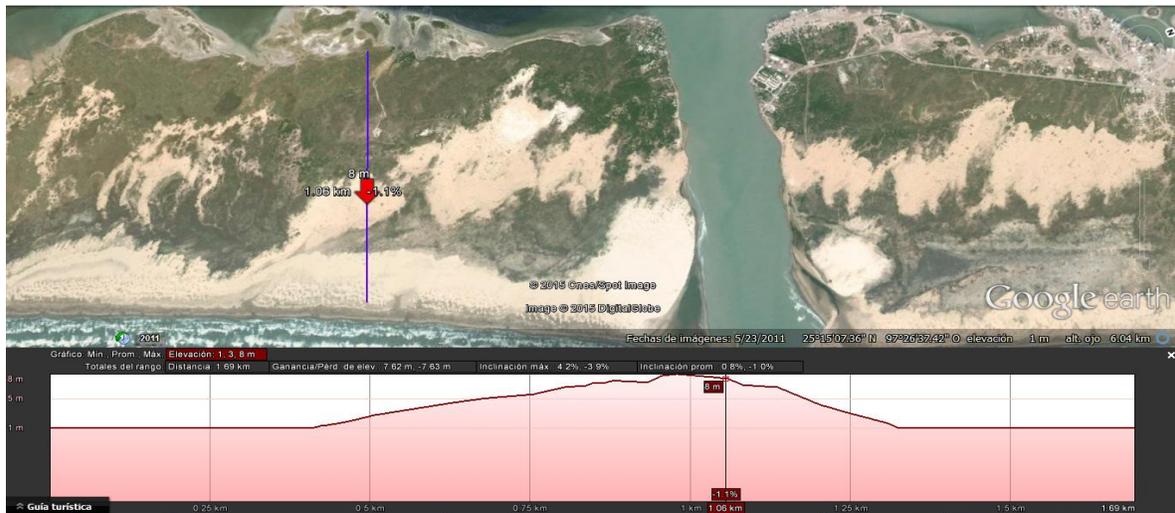


Figura 2. Método para obtener la altura promedio de las dunas.

Fuente: Imagen de Google Earth

1.4.1.3 Superficie sin cobertura vegetal del campo de las dunas frontales

Se identifican las dunas frontales sin cobertura vegetal, consideradas dunas en desarrollo, es decir donde existe una alta energía física en tránsito, por lo que están sujetas a un trabajo continuo de remoción y acumulación de materiales. En la medida que la superficie sea mayor, mayor será el área donde tienen ocurrencia los procesos dinámicos de carácter geomorfológico, dominando sobre los procesos de formación de suelo (edafogénesis) y como factores limitantes para el crecimiento de la vegetación. Esta relación, también puede ser vista como una variable que nos indique que el campo de dunas está siendo abastecido de sedimentos, siempre que se ligue al estado de desarrollo de la estructura espacial de la barrera y desde luego con sus dimensiones morfográficas.

A mayor porcentaje de superficie del campo de dunas sin cobertura vegetal, mayor será la vulnerabilidad (Tabla 1).

1.4.1.4 Anchura media de la franja frontal de dunas modeladas por proceso eólico

La franja frontal de las dunas modeladas por el viento, representan un parámetro que indica lo contrario a una estabilidad, por lo que están sujetas a un trabajo continuo de remoción y acumulación de materiales. El campo originalmente de dunas se expresa con formas acumulativas aerodinámicas, producto de la remoción, siguiendo de manera longitudinal la dirección del viento. Se mide la extensión del alcance frontal de la franja de mayor actividad eólica.

Los parámetros a medir son la anchura media de la franja frontal, con respecto a la anchura total del campo de dunas, a mayor extensión de la franja frontal, mayor inestabilidad, posibilitando la presencia de brechas o cercenaduras que usualmente son aprovechadas en las tormentas para que se verifiquen los fenómenos de remoción (erosión y la acumulación de abanicos de displayamiento), colocando a la barrera en una posición de vulnerabilidad.

1.4.1.5 Longitud de la franja de dunas frontal con respecto a la longitud de la barrera.

La extensión longitudinal de la franja de dunas frontales representa el área de re-movilización actual, por lo que, mientras mayor sea su longitud con respecto a la longitud de la barrera, mayor será la vulnerabilidad.

Para obtener el dato, se obtiene el porcentaje de la longitud de la franja frontal de dunas con respecto a la longitud de la barrera.

Tabla 1 Criterios para evaluar la vulnerabilidad del suministro y almacenamiento de sedimentos de las barras.

Grados de vulnerabilidad	Muy baja 1	Baja 2	Moderada 3	Alta 4	Muy alta 5
Variables	Criterios o intervalos de valores				
1.1 Distancia media a los depocentros (km).	<1	1-5	5-10	10-20	>20
1.2 Altura promedio de las dunas internas parcialmente activas (m)	>10	5-10	3-5	1-3	<1
1.3 Superficie sin cobertura vegetal del total de la duna frontal (%).	< 10	10-20	20-40	40-75	> 75
1.4 Anchura media de la franja frontal de dunas modeladas por la erosión eólica (km).	< 0.1	0.1-0.5	0.5-1	1-2	> 2
1.5 Franja de la duna frontal con respecto a la amplitud total del sistema de dunas (%).	Nulo	< 5	5-25	25-50	> 50

1.4.2 Dimensiones morfográficas y morfométricas de la barrera

El objetivo de este apartado es el de establecer el orden de magnitud dimensional y la distribución de la estructura espacial, permitiendo conocer las propiedades de extensión y tamaño de las barreras.

En la medida en que la barra evoluciona a un estado de mayor madurez, se supone que se irá consolidando y extendiéndose de manera espacial con una organización espacial más compleja, es decir, con posibilidades de contar con una mayor diversidad de unidades naturales. Reiterando, podemos decir que sus dimensiones tienden a incrementarse poniendo en evidencia una sedimentación abundante, producto de procesos morfogenéticos de carácter acumulativo que nos indican persistencia en el tiempo y por ende, se vuelve menos vulnerable.

Los elementos morfográficos corresponden a las dimensiones geométricas y los morfométricos a los atributos de carácter numérico de las barreras, de manera que se pueden establecer propiedades de extensión y tamaño de las mismas.

Las propiedades geométricas son importantes a fin de averiguar la configuración de la barrera, como la relación de tamaño y su liga con tramos estrechos y bajos, y por tanto, de mayor fragilidad al embate de los eventos meteóricos; esto también se relaciona con la exposición debido a una determinada disposición del terreno, ya sea considerando su diseño espacial o el arreglo de su morfología.

Las mediciones de las variables morfométricas se lleva a cabo, mediante la aplicación directa del Sistema de Información Geográfica, recurriendo a los módulos de análisis espacial. Las variables consideradas en este apartado son:

1.4.2.1 Anchura media.

Indica que a menor anchura, la barrera tendrá una mayor fragilidad porque será más fácil de perforar o cercenar. Se obtiene marcando una serie de líneas transversales en la imagen o plano, con una distancia de 1500 m entre sí. Se calcula el promedio de las distancias y se obtiene la anchura media (Figura 3).

Ejemplo:

$$600+500+240+700=2040$$

$$2040/4=510 \text{ m de anchura media}$$

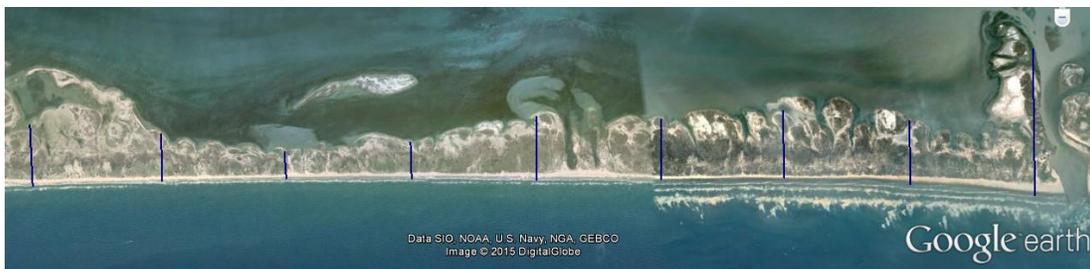


Figura 3. Procedimiento para obtener la anchura media de las barras. Fuente: Imagen de Google Earth.

1.4.2.2 *Altura media.*

Corresponde a la diferencia de altitud entre los puntos superiores e inferiores del perfil de barlovento, medido en metros a partir de la expresión morfológica y utilizando el módulo de Google Earth, que muestra automáticamente la localización del perfil con sus alturas absolutas aproximadas.

1.4.2.3 *Longitud total.*

Es la longitud de la barra de un extremo a otro. La acumulación de sedimentos se lleva a cabo a lo largo del contorno mayor, lo que va confiriendo a la barra mayores dimensiones, mayor anchura y más altura; por el contrario, en la medida que la longitud es más corta, los sedimentos se acumulan menos.

Se mide directamente en metros a partir de la imagen o en mapa considerando la longitud de la barrera (Figura 4).



Figura 4. Procedimiento para obtener la longitud de las barras. Fuente. Imagen de Google Earth.

1.4.2.4 *Superficie total.*

La superficie indica que, a mayor área existe una mayor concentración de sedimentos, ya que las barras son sitios de acumulación constante debido a la presencia de canales de baja energía del oleaje.

La medición del área es en metros cuadrados a partir de la información espacial del polígono o imagen, utilizando los módulos indicados para obtener la superficie en ArcGis 9.3.

3.2.5 *Pendiente media de los flancos.*

A fin de conocer la morfología de la superficie frontal para ligar la magnitud de las formas erosivas y acumulativas del relieve. La pendiente media se mide en el perfil del flanco de barlovento, usando el criterio de pendientes límites, inherentes a la morfología, sobre imágenes del Google Earth, fotos aéreas, imágenes satelitales uortofotos.

Fórmula:

$$\text{Tan}^{-1}\alpha = DV/DH$$

Dónde:

DV= distancia vertical

DH= distancia horizontal

3.2.6 Índice de istmicidad.

Las barras no tienen una configuración homogénea, presentan sitios exentos de acumulación sedimentaria importante, en donde se forman estrechos que constituyen corredores de abrasión por viento u oleaje de marea, con una morfología de brechas dispuestas entre los arenales y que conectan el flanco de barlovento al de sotavento. El viento remueve las arenas y las deposita en el cuerpo lagunar reduciendo su profundidad (acreción).

Se asume que a menor valor de este índice, más cortos serán los istmos en función de la anchura de la barra y por tanto mayor vulnerabilidad. Cuando la barra no presenta istmos se considera una baja vulnerabilidad. Se miden las partes que se aprecian más angostas de la barra y se obtiene el promedio de éstas (Figura 5).

Formula del índice de istmicidad:

PLE / PAB

Dónde:

PLE=promedio de longitud media de estrechos (m)

PAB= promedio de la anchura de la barra (m)

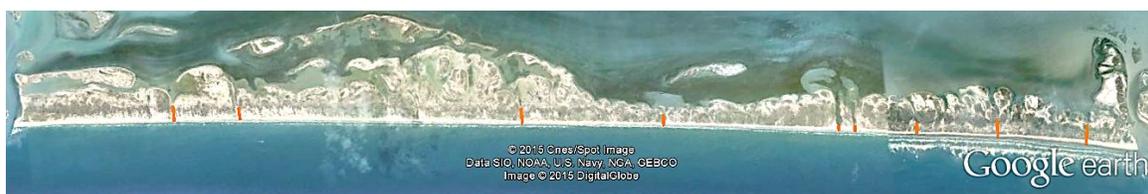


Figura5. Longitud de las partes más estrechas de la barra, para determinar el índice de istmicidad. Fuente: Imagen de Google Earth.

Tabla 2. Criterios para evaluar la vulnerabilidad de las dimensiones morfológicas y morfométricas de las barras.

Grados de vulnerabilidad	Muy baja 1	Baja 2	Moderada 3	Alta 4	Muy alta 5
VARIABLES	Criterios o intervalos de valores				
2.1 Anchura media (m)	>2,000	2,000-1,000	1,000-500	500-100	<100
2.2 Altura media (m)	>30	30-10	10-5	5-2	>2
2.3 Longitud total (m)	>20,000	20,000-10,000	10,000-5,000	5,000-1,000	<1,000
2.4 Superficie total (m ²)	>20,000	20,000-15,000	15,000-10,000	10,000-5,000	5,000-2,500
2.5 Pendiente media de los flancos	Rampa inclinada 18-12°	Rampa tendida 12-6°	Planicie ligeramente inclinada	Planicie subhorizontal 2-0°	Superficie plana, sin pendiente
2.6 Índice de istmicidad	> 0.8	0.8-0.6	0.6-0.4	0.4-0.2	< 0.2

1.4.3. Composición y organización espacial de las unidades naturales de la barrera

En este apartado se trata de evaluar la madurez en términos de desarrollo evolutivo indicada por la diversidad de la composición del paisaje que propicia las condiciones que llevan hacia la estabilidad y conservación de la barrera; en tanto que la simplicidad o unicidad del paisaje puede ser indicadora de escaso desarrollo evolutivo y de formación reciente, fragilidad o simplemente que se encuentra en vías de deterioro por remoción o, por el contrario, hacia el acrecentamiento súbito de arena que sepulta la barra.

La diferenciación de la composición se hace seleccionando las franjas por la expresión fisonómica análoga de homogeneidad relativa, con referencia a un paisaje geomorfológico modelado por regularidad de condiciones y procesos semejantes sin diferencias contrastantes.

Las variables ligadas a la vulnerabilidad en términos de la composición y organización espacial de una barrera son:

1.4.3.1. *Tipo de barrera*

Se selecciona entre los siguientes tipos reconocidos de menor a mayor vulnerabilidad:

Barra anclada de bahía de costa rocosa

Barra anclada de costas bajas arenosas

Barra que se desprende de puntas o salientes y península

Barra de desembocadura de río

Barra libre o isla barrera

1.4.3.2 *Materiales Conformadores de la barra.*

Se selecciona entre los siguientes tipos reconocidos, de menor a mayor vulnerabilidad:

Arrecife de coral

Arrecife de coquina

Cascajo conchífero consolidado o compacto

Cantos y gravas gruesas

Arenas

1.4.3.3. *Número de unidades naturales*

Entre menos unidades diferentes conformen el paisaje de la barrera, más vulnerable será ante las fuerzas físicas que la impacten. De acuerdo con su número de elementos, tenemos las siguientes categorías:

1.- playa

2.- playa más cordón frontal de dunas

3. playa, cordón frontal de dunas, más campo de dunas altas semi-móviles o planicies de cordones

4.-playa, cordón frontal de dunas, campo de dunas semi-móviles o planicies de cordones, más campos de dunas bajas dispuestas en el flanco de sotavento o cordones estabilizados por vegetación

5.-playa, cordón frontal de dunas, campos de dunas semi-móviles o planicies de cordones, campos de dunas bajas dispuestas en el flanco de sotavento o corredores estabilizados de vegetación, más humedales dispuestos en las orillas interiores de la barrera

Tabla 3. Criterios para evaluar la vulnerabilidad de la composición y organización espacial de las unidades naturales de las barras.

Grados de vulnerabilidad	Muy baja 1	Baja 2	Moderada 3	Alta 4	Muy alta 5
Variables	Criterios o intervalos de valores				
3.1 Tipo de barra.	Barra anclada de bahía de costa rocosa	Barra anclada de costas bajas arenosas	Barra que se desprende de puntas o salientes y península	Barra de desemboca dura de río	Barra libre o isla barrera
3.2 Materiales conformadores de la barra.	Arrecife de coral	Arrecife de coquina	Cascajo conchífero consolidado o compacto	Cantos y gravas gruesa	Arenas
3.3 Número de unidades naturales.	Playa, cordón frontal de dunas, campos de dunas semi-móviles o planicies de cordones, campos de dunas bajas dispuestas en el flanco de sotavento o corredores estabilizados de vegetación, más humedales dispuestos en las orillas interiores de la barrera	Playa, cordón frontal de dunas, campo de dunas semi-móviles o planicies de cordones, más campos de dunas bajas dispuestas en el flanco de sotavento o cordones estabilizados por vegetación	Playa, cordón frontal de dunas, más campo de dunas altas semi-móviles o planicies de cordones	Playa más cordón frontal de dunas	Playa

1.4.4 Transformación Antropogénica.

Se incluyen variables que representan el grado de perturbación impuesta por las actividades socio-económicas a través de los remanentes de vegetación natural, los bancos de materiales y de la modificación del terreno debido a la construcción de infraestructura y equipamiento, esto se traduce en cambios en la estructura espacial, en la geomorfología y en el funcionamiento de las comunidades bióticas, esto es, en el desarrollo natural del sistema de costas de barrera, contribuyendo a su vulnerabilidad.

1.4.4.1 Superficie de la cobertura natural

Esta variable da una idea del grado de perturbación en la isla barrera causada por actividades económicas. Se obtiene el porcentaje de la superficie con la cobertura natural respecto a la superficie total.

Una barra que presenta un bajo porcentaje de cobertura natural presenta alta vulnerabilidad.

1.4.4.2 Ubicación del nivel de los caminos que tienen dirección longitudinal de la isla barrera.

La posición de los caminos en la parte baja, media o alta del flanco de barlovento o sotavento determina una mayor o menor vulnerabilidad en la barrera.

Hay menor vulnerabilidad cuando los caminos se ubican en la porción media y alta del flanco de sotavento. En sentido opuesto, existe una mayor vulnerabilidad cuando los caminos se ubican en el flanco de barlovento, principalmente en la parte baja, porque se oponen a la sucesión primaria tanto de la formación de dunas como de vegetación (Figura 6).



Figura 6. En la imagen se observa la distribución de los caminos longitudinales (paralelos) a la costa. En color rojo está el camino de la porción baja del flanco de sotavento y en naranja se muestra el camino en la parte media y alta del mismo flanco. En color azul está el camino en la porción media y alta del flanco de barlovento y en verde el camino en la porción baja de este flanco.

1.4.4.3 Longitudes del camino paralelos a la línea de costa con respecto a la longitud total de la barrera.

Este índice expone la fragilidad de la barra considerando el sentido de la longitud total que recorren los caminos con respecto a la longitud de la barra.

1.4.4.4 Disposición de caminos transversales.

Los flancos de barlovento y sotavento en la barra son un gradiente para determinar el índice de vulnerabilidad que es expresado en los elementos de asimilación económica como caminos transversales, estos se refieren a caminos que son perpendiculares a la línea de costa tanto externa como interna, es decir, que se alinean en función del flujo de mayor energía (Figura 7).



Figura 7. En la imagen se muestra la disposición de los caminos transversales en las barras. En color rojo se encuentra el camino perpendicular al flanco de barlovento y en verde el camino en la porción media y alta de éste flanco. En color naranja está el camino de la porción baja de sotavento y en morado el camino en la porción media y alta.

1.4.4.5 Longitud de caminos transversales con respecto a la anchura media de la barrera.

La presencia de caminos transversales expresada en porcentajes con respecto de la amplitud de la anchura de la barra, que revela el grado de vulnerabilidad. A medida que el valor se acerca o rebasa el valor de la anchura media aumenta su vulnerabilidad.

1.4.4.6 Localización de asentamientos humanos.

La superficie y disposición de los asentamientos humanos en el arreglo espacial de la barra es una variable a considerar; de esta manera, los asentamientos humanos dispuestos en sentido longitudinal de la barra en el flanco de barlovento, están asociados con altos valores de vulnerabilidad; contrariamente, en el flanco de sotavento los asentamientos ofrecen una menor perturbación.

1.4.4.7 Superficie ocupada por asentamientos humanos respecto a la superficie total de la barra.

A mayor porcentaje de superficie ocupada por la población mayor vulnerabilidad.

1.4.4.8 Presencia de infraestructura portuaria.

La dimensión, disposición y emplazamiento de las distintas obras de construcción portuarias alteran los procesos de transporte y depositación de los sedimentos; los espigones y escolleras son obras que se construyen en la línea de costa, los cuales constituyen un obstáculo al flujo de las corrientes y de los sedimentos, reduciendo espacios y quitando elasticidad y plasticidad a las costas.

De esta manera, cuando no existan obras no habrá vulnerabilidad y cuando existan obras de equipamiento portuario adyacentes a la línea de costa habrá baja o moderada vulnerabilidad. Todas las obras portuarias que salen de la traza general de la costa, es decir, perpendiculares, subperpendiculares u oblicuas alterarán la deriva costera y el tren de olas se deformará provocando erosión en ciertos sitios y sedimentación acelerada en otros.

Tabla 4. Criterios para evaluar la vulnerabilidad por las transformaciones antropogénicas.

Grados de vulnerabilidad	Muy baja 1	Baja 2	Moderada 3	Alta 4	Muy alta -5
Variables	Criterios o intervalos de valores				
4.1 Superficie de la Cobertura natural (%).	> 60	60-40	40-20	20-10	< 10
4.2 Caminos en dirección longitudinal de la isla barrera.	Ausente *	Porción media y alta de sotavento	Porción baja del flanco de sotavento	Porción media y alta del flanco de barlovento	Porción baja del flanco de barlovento
4.3 Longitudes del camino paralelos a la línea de costa con respecto a la longitud total de la barrera (%).	Ausente*	< 25 %	25-50%	50-75%	> 75%
4.4 Disposición de los caminos transversales.	Ausente*	Porción media y alta de sotavento	En la base del flanco de sotavento	Porción media y alta del flanco de barlovento	Perpendicular al flanco de barlovento
4.5 Longitud de caminos transversales respecto a la anchura de la barra.	Ausente*	< 25 %	25-50%	50-75%	> 75%
4.6 Localización de asentamientos humanos.	Ausente*	Sotavento	Barlovento puntual	Flanco de barlovento (franja estrecha)	Flanco de barlovento (franja)
4.7 Superficie ocupada por asentamientos humanos respecto a la superficie de la barra.	Ausente*				
4.8 Presencia de infraestructura portuaria.	Ausente*	Muelles	Diques y/o rompeolas	Espigones	Escolleras

*En estos apartados **no hay vulnerabilidad**, ya que no existe elemento que la genere.

1.4.5 Susceptibilidad de inundación por efectos del ascenso del nivel del mar

Una forma en que se manifiestan los impactos del ascenso del nivel del mar es, indiscutiblemente, el avance de la inundación, particularmente en áreas bajas en donde las inundaciones perduran por mayor tiempo. Quizá la forma más directa de éste proceso se refleja en la pérdida de tierras en la zona costera como producto de la erosión. Otra manifestación es el reconocimiento del ascenso del nivel del mar sobre las vías acuáticas de la zona costera entre las que se pueden mencionar, a las lagunas, las bocas, los estuarios, los esteros; se trata de cuerpos de agua por donde se reconoce el flujo de este avance marino hacia el continente. Para ello se han considerado las siguientes variables de análisis:

1.4.5.1 Perímetro en contacto con cuerpos de agua

En la medida que las barreras o las llanuras deltaicas estén circundadas por cuerpos de agua, sea el mar, la laguna, el estero o estuario estarán en contacto con un medio acuático, esta condición permite un fenómeno de adyacencia entre dos medios diferentes en donde es muy susceptible que el medio fluido desborde sobre el terreno.

1.4.5.2 Superficie de la vegetación inundable (mangle, popal-tular y halófitos)

Otra variable que expresa el grado de inundación de la costa de barrera es la vegetación de marismas (mangle, popal-tular y halófitos), que se registra a través de la superficie ocupada por el porcentaje de la superficie sujeta a inundación con respecto a la superficie todavía emergida.

1.4.5.3 Retroceso de la línea de costa (metros/año)

Como efecto del ascenso del nivel del mar el oleaje se encargará de provocar destrucción de tierras en el frente de litoral por erosión. El retroceso de la costa puede ser medido directamente en campo mediante procedimientos topográficos y en gabinete mediante sensores remotos, comparando dos o más imágenes de distintas fechas a modo de observar los cambios en la línea de costa.

Tabla 5. Criterios para evaluar la vulnerabilidad de las barras, causada por el ascenso del nivel del mar.

Grados de vulnerabilidad	Muy baja 1	Baja 2	Moderada 3	Alta 4	Muy alta 5
Variables	Criterios o intervalos de valores				
5.1 Perímetro en contacto con cuerpos de agua (%).	0-20	20-40	40-60	60-80	> 80
5.2 Porcentaje de superficie con vegetación inundada.	Ausente	0-25	25-50	50-75	> 75
5.3 Retroceso de la línea de costa en metros/año	< 0.50	< 1	1- 1.5	1.5-3	> 3

1.5 Marco Teórico.

Desde los orígenes de la humanidad una de las interrogantes del hombre ha sido entender los fenómenos y hechos que ocurren en el planeta y su funcionamiento. En la actualidad, algunas interrogantes fueron resueltas pero varias más se originaron según los particulares puntos de vista de las ramas de la ciencia. La geografía ha adoptado diversos enfoques para entender y encontrar respuestas a los hechos y a las relaciones e interacciones sociedad-naturaleza (Cruz, 2012).

1.5.1. Vulnerabilidad de la costa.

La evolución y el cambio son características intrínsecas del planeta y de todo aquello que forma parte de él. Es así que muchos de los elementos del planeta aparentemente permanecen estables (en función de una escala de tiempo humana), siempre y cuando existan las condiciones necesarias para la estabilidad de cada sistema y que consecuentemente garantice su funcionalidad.

Para que un paisaje conserve su estabilidad es necesaria una relación balanceada entre ingreso y salida de *energía, materia e información*; éstos tres permitirán el funcionamiento del sistema, que garantizará la conservación de un estado del paisaje, característico para un plazo dado de tiempo (régimen de funcionamiento determinado) (Mateo y Ortiz 2001).

Como resultado de la evolución, la estabilidad de algunos sistemas se ve afectada y éstos se enfrentan a factores que condicionan su equilibrio (balance en el ingreso y salida de *energía, materia e información*), estructura y que los exponen a condiciones que los modifican; dependiendo de las características de cada sistema (mecanismos de autorregulación y de regeneración) para absorber un fenómeno dado (natural o antrópico) y de las características del mismo fenómeno.

La estabilidad del paisaje es un concepto relativo, ya que al respecto se adoptan dos variantes. La primera es la *estabilidad potencial* (genética o solidez), que refiere a la capacidad del sistema de conservar su estructura en condiciones cambiantes del medio. Depende de las propiedades intrínsecas y de las relaciones sinérgicas en el paisaje y de la coherencia interna de los componentes. La segunda es la *estabilidad tecnogénica* (capacidad de autorregeneración del paisaje) se entiende como la capacidad que tiene un paisaje para regresar al estado de partida después de una intensa perturbación (resiliencia) (Mateo y Ortiz, 2001).

Los *mecanismos de autorregulación y de regeneración* son explicados a partir de la *homeostasis* (*autorregulación*) y la *resiliencia* del paisaje. La *homeostasis o elasticidad* es la propiedad de autorregulación, que permiten al paisaje recobrar gradualmente su estado original, después de haber experimentado una perturbación o impacto. La *resiliencia* es la capacidad del paisaje de pasar de un estado estable a otro, conservando las relaciones estructurales internas bajo la acción de cierta perturbación (Mateo y Ortiz 2001).

Para algunos autores el concepto de vulnerabilidad se entiende como el grado de impacto o daño que tendrá un sistema por la presencia de un fenómeno natural o humano (amenaza) que interferirá con su equilibrio, lo que dependerá de la capacidad que tenga para asimilar y recuperarse del daño producido, es decir, de su estabilidad potencial o tecnogénica (Cardona, 2001; Gama, 2010; Mateo y Ortiz, 2001). Para Cardona (2001), la vulnerabilidad y la amenaza dependen mutuamente, ya que

considera que no se puede ser vulnerable si no existe una amenaza y por el contrario, no existe una amenaza si no existe un elemento, sistema o sujeto que resulte vulnerable ante éste.

Sin embargo, es necesario replantear el concepto de vulnerabilidad, en el que no sólo se tomen en cuenta la flexibilidad del sistema para adaptarse, sino que además se tomen en cuenta la exposición física y los fenómenos que influyen; de manera que se logra un estudio integral (Lampis, 2012).

Entonces, si la vulnerabilidad no recae en un solo elemento o característica, se da por hecho que hay una tipología de vulnerabilidad. Gama (2011) explica esto al subdividir la vulnerabilidad como *intrínseca* y *extrínseca*. Por otro lado, Lampis (2012) refiere dos formas de abordar la vulnerabilidad, como *vulnerabilidad inherente* y *vulnerabilidad resultante*.

A continuación se explica cada una.

- *vulnerabilidad intrínseca* se refiere a la fragilidad que tiene un sistema por sí mismo.
- *vulnerabilidad extrínseca* expresa la intensidad de las causas externas que provocan el daño.
- *vulnerabilidad inherente* se refiere a las características de la unidad de análisis que la hacen susceptible a un acontecimiento perturbador.
- *vulnerabilidad resultante* que se focaliza en el resultado final en términos de impacto, daños y pérdidas como resultado de una amenaza.

Respecto a cada una de las definiciones, se denota que la *vulnerabilidad inherente e intrínseca* se refieren a lo mismo, por lo que entonces se puede decir que existen tres perspectivas dadas para abordar la vulnerabilidad, *intrínseca (inherente)*, *extrínseca* y *resultante*.

Particularmente la vulnerabilidad en las islas barreras se refiere a algunas expresiones del proceso evolutivo o de la dinámica natural e inestable que las caracteriza, además de las inferencias antrópicas que la influyen (Ortiz, Sommer y Oropeza 2010).

1.5.1.1 Parámetros para evaluar la vulnerabilidad

Como antes ya se mencionó, Ortiz, Sommer y Oropeza (2010) y Gama (2011), han hecho una propuesta con la cual se puede evaluar la vulnerabilidad de la costa a partir de una serie de parámetros que permitan un análisis integral, en la que se evalúan la barra, los fenómenos naturales y antrópicos que la influyen o afectan.

Proponen las siguientes cinco categorías de variables:

1. Suministro y almacenamiento de sedimentos
2. Dimensiones morfológicas y morfométricas de la barrera
3. Composición y organización espacial de las unidades naturales de las barreras
4. Transformación antropogénica
5. Susceptibilidad de inundación por efectos del ascenso del nivel del mar

1.5.2 Nivel del mar.

El nivel del mar no es constante. Las variaciones son una particularidad de los océanos, es un proceso que ocurre a diario a causa de las mareas y el oleaje. Sin embargo, éstas son una característica y no un acontecimiento extraordinario, como los cambios en el nivel relacionados con cambios en el clima o movimientos tectónicos.

En el pasado, las modificaciones en el clima tuvieron como consecuencia periodos glaciares, lo que generó disminución del nivel de las aguas oceánicas. El nivel del mar es conducido por una combinación del clima, de fuerzas tectónicas y movimientos geostroficados, y, los registros geológicos muestran la escala de tiempo en que han ocurrido (Lambeck *et al.*, 2010).

El último periodo glacial inició hace 80 000 años, cuando la temperatura del planeta descendió considerablemente y provocó que los glaciares de las zonas polares avanzaran hacia latitudes bajas. Se estima que el nivel del mar descendió entre 100 y 140 m respecto del nivel actual, aunque en algunos lugares pudo ser más, debido a la correlación de movimientos tectónicos (Lambeck *et al.*, 2010).

Actualmente, la tectónica y el clima siguen siendo temas de interés (sobre todo el clima) para el estudio de cambios en nivel de los océanos, pero esta vez por el calentamiento global debido a los gases de efecto invernadero, los que según Raper, Wigley y Warrick (1996) continuarán induciendo el calentamiento global, al que se le atribuye el aumento en el nivel del mar.

En el Cuarto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos en Cambio Climático (IPCC), se estimó que en los milenios anteriores al siglo XX el nivel del mar aumentó unas decenas de milímetros, durante ese mismo siglo el aumento fue de 1.7 mm/año y desde 1993 la tasa de aumento ha sido superior a 3 mm/año (UNESCO, 2010).

Entender los cambios del pasado tiene un papel importante, ya que determinan las causas adyacentes y permiten la extrapolación con los niveles anteriores de lugares y épocas de los cuales no hay datos. Además, se debe decir que el planeta tiene memoria de los eventos ocurridos, por lo que cualquier cambio en el nivel marino actual y en el futuro responderá a los eventos pasados. Esto ocurre por diferentes razones, incluyendo la respuesta ante el retroceso y avance de los glaciares (glaciostasia), la subsidencia de las costas por la depositación de sedimentos, cambios en la configuración de las cuencas oceánicas por depósitos de sedimentos, procesos actuales de levantamiento o hundimiento tectónico adyacentes que tienen sus orígenes en el pasado, el retraso en el ajuste de los océanos para cambiar sus regímenes térmicos o de salinidad, circulación oceánica y modificaciones en el clima. En realidad son varios los factores globales, regionales y locales que influyen en el registro del nivel del mar y por los cuales resulta o aparenta modificarse (Lambeck *et al.*, 2010)

Los movimientos tectónicos pueden clasificarse como movimientos epirogénicos, orogénicos e isostáticos.

Los movimientos *epirogénicos* suceden cuando existe un levantamiento o hundimiento de los continentes, con algunos episodios de estabilidad. Por ejemplo, en algunos casos estos movimientos modifican la forma de las cuencas oceánicas, lo que puede incrementar su capacidad y provocar que el nivel del mar disminuya (Bird, 2008). Los movimientos *orogénicos* son aquéllos en los que la corteza terrestre se deforma y origina la formación de las montañas a través de la convergencia de

las placas tectónicas, estas regiones también se caracterizan por actividad sísmica y volcánica. Los cambios en el nivel del mar en las costas por actividad tectónica han sido en parte, debido, a levantamientos y hundimientos de los márgenes de los continentes, gradualmente o como resultado de un terremoto repentino.

Los movimientos *isostáticos* son ajustes en la corteza resultante de la carga y descarga de sedimentos en la superficie. Por ejemplo, áreas donde hay depositación de lava o de sedimentos la corteza muestra hundimiento, como en las proximidades de los deltas (Bird, 2008).

Los movimientos *eustáticos* se refieren al aumento o disminución del volumen del agua en los océanos (Suess, 1888 en Lambeck *et al.*, 2010; y, Raper, Wigle y Warrick 1996). A través del tiempo geológico el volumen del agua en los océanos ha ido incrementando por el suministro de pequeñas cantidades de agua proveniente del interior del planeta (Bird, 2008), aunque es un proceso que ocurre en pequeñas cantidades cada 10 millones de años, otro ejemplo es el intercambio entre los continentes y los océanos a través del aumento o disminución de las capas de hielo, que influye en el nivel del mar entre 100-150 m en intervalos de tiempo de 10 000 años en promedio (Lambeck *et al.*, 2010), y la dilatación térmica del océano superior, con aportaciones menores pero apreciables vinculadas a la dilatación térmica del océano profundo (UNESCO, 2010)

Como resultado de la disminución en el nivel del mar durante la última glaciación, las plataformas continentales emergieron como amplias llanuras costeras y la línea de costa avanzó hacia sus bordes exteriores. Los ríos extendieron su curso a las costas bajas, se formaron valles a través de las plataformas continentales y se disectaron las terrazas anteriores. Cuando el clima volvió a elevar su temperatura y la cubierta de hielo del planeta empezó a derretirse y el agua regresó a los océanos (transgresión marina del Holoceno) los paisajes que se había formado en las plataformas continentales fueron inundados (Lambeck *et al.*, 2010, Bird, 2008).

Al finalizar el periodo glacial se considera que el nivel del mar aumentó en promedio poco más de un metro por siglo (UNESCO, 2010). Algunos estudios consideran que el aumento fue variado ya que en algunos momentos hubo pausas y en algunos otros momentos hubo pequeñas regresiones, particularmente donde hay secuencias estratigráficas de turba y sedimentos marinos del Holoceno. Sin embargo, algunos estudios han indicado un ligero y constante aumento acompañado de calentamiento global y han juzgado las supuestas oscilaciones como una aberración estadística (Bird, 2008).

Son escasas las evidencias de formaciones que existieron en la disminución del nivel del mar durante la última glaciación en lo que ahora es el suelo marino, porque la mayoría de estos fue destruida por la acción del oleaje con el aumento del nivel marino durante la siguiente transgresión marina. Relictos de acantilados sumergidos, playas y dunas han sido encontradas en el piso oceánico, con esos depósitos que quedaron más tarde y por el intermitente aumento en el nivel del mar, con menores avances y regresiones, con lo que se habrían arrastrado sedimentos del piso marino desplazados hacia la costa para formar playas y barras (Lambeck *et al.*, 2010; Bird, 2008).

1.5.3 Nivel del mar en el Golfo de México.

Las costas del Golfo de México (GM), al igual que otras, se han visto modificadas por las variaciones del nivel marino (aumento o disminución) y por procesos de subsidencia originados por varios factores que más adelante serán mencionados.

Cuando la última glaciación se encontraba en su máximo auge (hace 20,000 años), la costa avanzó en algunos lugares del GM cerca de 100 km y se piensa que las olas rompían cerca del actual borde de la plataforma continental (Donoghue, 2011).

Desde el máximo de la última era glacial, el nivel del mar ha aumentado 120 m o un promedio de 6 mm/año en los últimos 20 mil años. Hace 8,000 años los glaciares habían desaparecido y el nivel del GM se especula estaba 8 m por debajo del nivel actual; y hace 6,000 años el promedio de ascenso fue disminuyendo y el cambio completo fue ya insignificante (el nivel marino ya era muy parecido al actual, sólo con algunas variaciones). Desde entonces, las tasas de variación del nivel han sido <1 mm/año y nunca ha excedido 9 mm/año (Donoghue, 2011).

Sin embargo hubo tres periodos en los cuales el aumento del nivel marino fue extraordinario (en Donoghue, 2011):

- El primero fue hace 17 mil años, con aumento de 12 m en los siguientes 750 años (16 mm/año).
- El segundo sucedió hace 14.3 mil años, el nivel marino aumentó más de 24 m en los siguientes 500 años, se piensa que ocurrió cuando el agua del deshielo glacial fluyó a través del río Mississippi y entró al Golfo de México.
- Un tercer episodio inicio hace 12.9 mil años, aumentando 27 m en 600 años (45 mm/año).

Además de los efectos por el último periodo glacial existen otros factores, como el hundimiento por subsidencia. El basamento del Golfo de México es una amplia cuenca geológica formada por la fosa de Sigsbeeque, a su vez, está rodeada por la plataforma continental rodeada por su lado occidental por una serie de cuencas marginales deltaicas (Ortiz y Méndez, 1999); una de éstas es la cuenca de Burgos, exactamente en el delta del río Bravo, en la que al igual que las demás hay hundimientos originados por la acumulación de sedimentos, que se considera tienen un espesor de 10 mil metros (Yañez y Schlaepfer, 1968). Según Paine (1993; en Simms *et al.*, 2007) a partir los registros mareográficos se denotó una subsidencia de 4 a 8 mm/año en la bahía de Galveston y según Rona (1974) el orden de hundimiento es de 5 mm en el ápice del delta del río Bravo y de 1 mm en las inmediaciones de la desembocadura del río Soto la Marina, demostrando así que el hundimiento en las cuencas deltaicas es diferencial.

Algunos autores (Raper, Wigley y Warrick, 1996) también atribuyen la subsidencia a la extracción de agua, gas natural y petróleo.

1.5.4 Sistemas de Isla Barrera.

Las costas de isla barrera son la formación más común en el Golfo de México; en el mundo representan el 15 % de los litorales (Ortiz, 2010).

Las islas barreras son formas de relieve alargadas que se desarrollan paralelas a las costas y están separadas de éstas por una laguna costera o una bahía. Las corrientes litorales, la marea baja y la energía del oleaje trabajan juntas para formar y mantener los sistemas de Isla Barrera. Su principal función es proveer protección a los hábitats que se encuentran en la porción colindante a la porción continental (Tunelly Judd, 2002).

La formación de los sistemas de islas barreras es aún incierta, al respecto existen varias teorías que han formulado su posible origen en las cuales la tectónica y el cambio climático ocurrido en el Pleistoceno y Holoceno son fenómenos importantes en su origen.

Las diferentes explicaciones sobre el origen pueden ser agrupadas en tres grandes teorías(en Davis, 2003):

- Teoría de altamar
- Teoría de acreción de spits
- Teoría de sumersión

Teoría de barrera de altamar, de Beaumont, E. Esta teoría hecha en el año de 1845 fue uno de los primeros trabajos en torno al tema, el autor sugería que las olas removían arenas en aguas poco profundas, la cual se depositaba en forma de barra submarina cuando las olas rompían y perdían mucha de su energía. La acreción era vertical, y posteriormente crecieron por encima del nivel del mar, formando islas barrera.

En 1885 G.K. Gilbert propuso la **teoría de acreción de spits**, en la cual los sedimentos se movían en la zona de rompiente a través de la agitación de las olas que podrían construir spits, que se extendían desde los cabos, puntas salientes (head-lands) paralelos a las costas. La subsecuente ruptura de los spits por olas de tormenta pudo formar islas barreras.

W.D. McGee en 1890 publica su **teoría de sumersión**, a partir de observaciones a las costas del Este de los Estados Unidos y del Golfo de México, se dio cuenta que éstas habían estado sometidas a hundimientos; tomaba como evidencia los valles inundados que se localizaban a lo largo de las costas de las bahías de Raritan, Delaware y Chesapeake. McGee creía que durante el hundimiento de las crestas costeras, éstas se separaron del continente, formando lagunas detrás de ellas. Las barras de Dolphin, Petit-Bois, Massacre, Horn, Dog, Ship y Cat fueron la clave y utilizó las islas como ejemplo donde las costas se habían sumergido y habían formado islas barrera.

La propuesta de Tunell y Judd(2002), considera que los procesos que han dado origen a las Lagunas Madre de Tamaulipas y Texas, y a sus respectivas líneas de costa son producto de la geología histórica (del Pleistoceno y el Holoceno). Son derivadas de las complejas glaciaciones y los periodos interglaciares que existieron durante varios miles de años y que tienen relación con las fluctuaciones del nivel del mar.

De acuerdo al modelo de LeBlanc y Hodgson de 1959 (en Tunell y Judd, 2002), hace aproximadamente 18,000 años antes de nuestro tiempo, cerca del final del periodo glacial y al término del Pleistoceno, el nivel del mar se encontraba entre 91 y 137 m por debajo del nivel actual, y, la línea de costa se encontraba 80 km al este de la posición actual. Al finalizar la Edad del Hielo, los glaciares comenzaron a derretirse y retroceder, por lo que el nivel del mar incrementó y llegó a inundar hasta la zona posterior a los cordones de dunas existentes en ese momento. Con el aumento de nivel del mar fueron acarreados sedimentos de los cordones que habían sido inundados y fueron depositados en las zonas bajas de las nuevas líneas de costa.

Las olas y corrientes litorales continuaron trayendo sedimentos que fueron construyendo las islas barrera; del mismo modo, los ríos han sido parte fundamental de la construcción de las Barras debido al acarreo de sedimentos proveniente de los continentes y que han sido depositados en la parte posterior de las playas (Moreno-Cassasola, 2009). Al igual que los agentes mencionados anteriormente, los vientos han sido parte de la configuración de las barras a través de la constante redistribución de arenas, que contribuyen a la construcción o erosión de la barra. Esto puede ser observado con la migración de dunas a lo largo de las islas barrera (Tunell, *et al.*, 2002) (Figura 8).

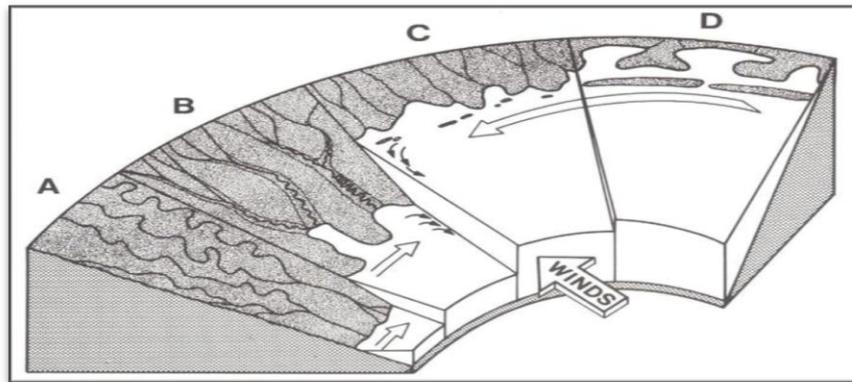


Figura 8. Se muestra la interacción de tres elementos: la inundación costera, el transporte de sedimentos y la formación de islas de barrera. A. Durante la glaciación de Wisconsin, el nivel del mar descendió hasta 120 m y los ríos cortaron pasos profundos en los sedimentos. B. Conforme el hielo de los glaciares se derritió los valles riparios disectados fueron inundados con el agua de mar. C. Las corrientes de deriva acarrear arena formando una serie de pequeños montículos, precursores de las actuales islas de barrera. Este fenómeno se dio a lo largo de toda la costa de Texas, y posiblemente Tamaulipas. D. El nivel del mar alcanza su nivel actual y la costa adquiere su configuración actual. Fuente: Britton y Morton, 1989, en Moreno-Cassasola, 2009.

Las Islas Barrera se han formado por la depositación de arenas a través de corrientes litorales. La constante redistribución de arenas, conducidas principalmente por los vientos del noreste, que contribuyen a la formación de distintas características topográficas a través de la isla. La dinámica de las fuerzas eólicas continúa erosionando algunas áreas y construyendo otras; esto se puede observar con la migración de las dunas a lo largo de las islas. El cambio abrupto en la topografía es el resultado de huracanes y tormentas de marea (Tunell y Judd, 2002).

Para Moreno-Cassasola(2009) una típica isla de barrera consiste de un cordón de dunas que del mar hacia el continente presenta: *playa, dunas, zona protegida plana* y *marismas*(figura 9); por otro lado, Gama (2011), propone que las islas barreras están conformadas por un sistema dominado por el oleaje, sistema de dunas dominadas por el viento, sistema estuarino dominado por las mareas y un sistema de planicie costera (Figura 10).

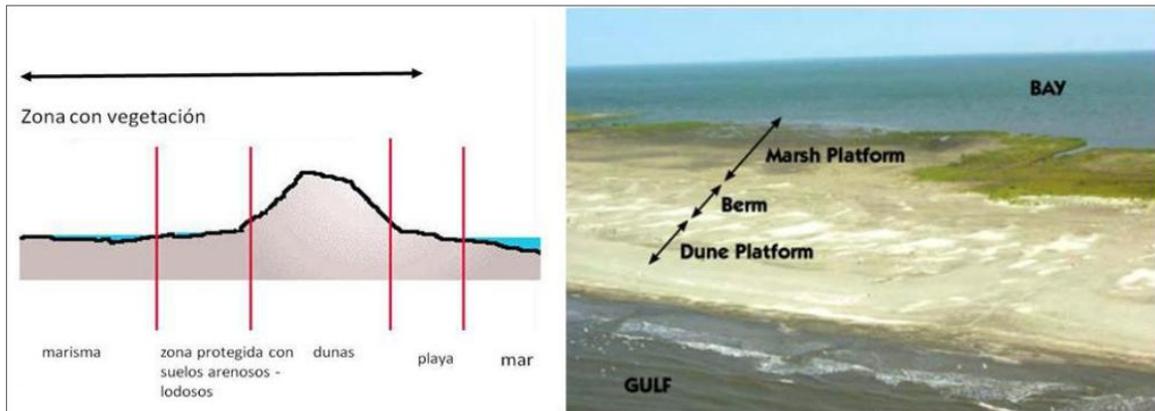


Figura 9. Isla barrera de acuerdo con las consideraciones de Moreno-Cassasola. Fuente (Moreno-Cassasola, 2009).

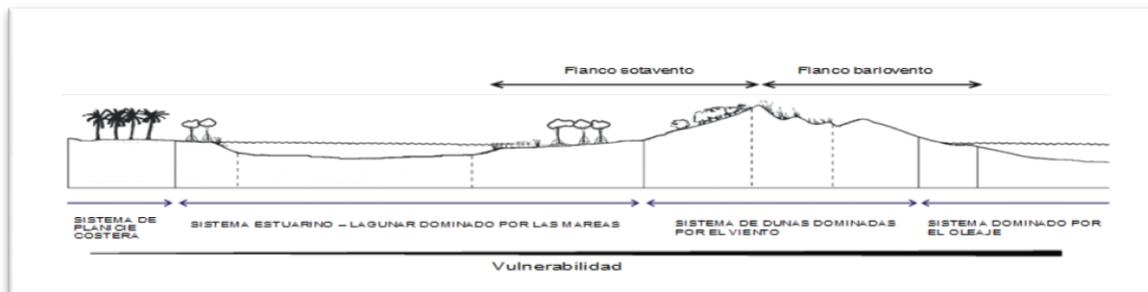


Figura 10. Conformación de las Islas Barrera.Fuente: Gama. 2011.

A continuación, se explican los elementos que conforman las Islas Barrera.

1.5.4.1 Playa.

Las playas son una acumulación de sedimentos no consolidados, los cuales tienen variaciones en su tamaño, desde partículas finas como la arena hasta los más gruesos como gravas y cantos rodados y otros como residuos de conchas, caracoles o coral (*shelly*) (Bird, 2008); sin embargo, existen sedimentos como las arcillas y limos que por su tamaño y por el constante movimiento de las olas y las corrientes es complicada su depositación. En las islas barrera, las gravas compuestas por restos de conchas junto con otros pequeños sedimentos son los componentes más comunes; en latitudes altas es más común encontrar playas rocosas como resultado de procesos glaciares (Davies y Fitzgerald, 2004).

Las playas son las zonas de mayor dinamismo en las costas esto se debe a que se encuentran en la zona de transición océano-continente. La constante interacción entre los materiales conformantes y los fenómenos que se llevan a cabo como las olas, mareas, corrientes y vientos propician una constante modificación en la disposición de los sedimentos y en su configuración.

Son estas características las que complican una delimitación espacial y es por eso que varios autores han intentado delimitar las playas. Según el modelo de Cruz (2012), la playa se extiende desde la línea baja de marea Anteplaya en la “zona de rompiente”, después existe una zona de transición “zona de vaivén”, posteriormente continúa la zona de Interplaya donde se encuentra la “zona de deslizamiento” y finalmente continúa hasta la Posplaya, que se extiende hasta el flanco de sotavento de las dunas.

Ante el constante intercambio de energía es natural que algunas playas ganen o pierdan sedimentos, en otros casos los sedimentos transitarán a lo largo de la costa o podrán permanecer en la misma posición y pueden ser relictos sin ningún suministro de material.

Algunas playas pueden ser progresivas (avance de la costa hacia el mar), o transgresivas (avance del mar hacia el continente). Algunos cambios son cíclicos en las playas, los perfiles de playa retoman su configuración después de varios periodos. Como un proceso de acumulación o de regresión de sedimentos en algunas playas se llegan a formar cordones o barras que funcionan como resguardo que por depositación a través de calas o ensenadas que encierran lagunas y pantanos (Davies y Fitzgerald, 2004).

1.5.4.2 Sistemas de Dunas

Las dunas son formas que pueden desarrollarse en varias partes del mundo; las condiciones de clima, viento y los sedimentos que se encuentren disponibles, otorgarán a éstas, características particulares de forma, tamaño y vegetación.

Debido a su origen eólico se desarrollan en lugares donde se encuentra arena disponible para ser transportada y depositada, como en los desiertos y en las zonas costeras de algunos cuerpos de agua (deltas, planicies acumulativas de cordones arenosos y planicies de inundación de lagunas costeras).

Las dunas costeras son ecosistemas que se desarrollan en la interfaz océano-continente. Son parte de un sistema de intercambio de arenas en el que agentes como las olas, las corrientes litorales y principalmente el viento que deriva en el transporte eólico de la arena dispuesta de las playas interactúan con éstas y con la vegetación para crear formas (relieves) y hábitats (paisajes) en los ambientes marino-terrestres (Martínez y Psuty, 2004).

Las partículas de arena más grandes y pesadas serán depositadas y en la medida en que éstas sean acumuladas, se irán formando dunas; sin embargo es necesario un obstáculo que frene el movimiento de los materiales para que entonces puedan ser depositados los sedimentos y estabilizadas las dunas, para comenzar así su formación y, posteriormente, su movilidad (CIFSA, 1967). El avance de las dunas es un fenómeno que está en función de la velocidad del viento, ya que mientras más veloz sea este factor, las partículas de arena, podrán ser transportadas desde el flanco de barlovento hasta alcanzar la cresta de la duna y ser depositadas en el flanco de sotavento; su avance siempre estará dado en la dirección del viento. El movimiento de las dunas hacia el interior

de las costas se verá frenado (o disminuido) por el crecimiento de vegetación, que proporcionará a la duna estabilidad y que actúa como un modificador de la superficie de la duna, es decir, genera una mayor rugosidad de la superficie que contrarresta el efecto del viento sobre ésta y disminuye su remoción (Derrau, 1966).

La distribución de los sistemas de dunas en el planeta deriva de la producción de un amplio rango de formas de dunas costeras y dimensiones relacionadas a la espacialidad y a la variación temporal de la entrada de sedimentos y al régimen de vientos. Tienden a existir donde hay islas barreras o las playas que resultan del oleaje (Martínez y Psuty, 2004). Al igual que muchas otras estructuras en el planeta las dunas tienen variadas dimensiones, desde pequeñas acumulaciones de arena (dunas embrionarias) hasta ser grandes dunas de más de 100 m de altura y del mismo modo pueden ser desde un cordón de apenas unos metros de anchura o extenderse varios kilómetros al interior de los continentes.

1.5.4.3 Sistema estuarino dominado por mareas.

Un estuario es un cuerpo de agua costero semi-encerrado que tiene una conexión libre con el mar a través de bocas permanentes o que se abren en temporada de tormentas. Dentro de este sistema el agua del mar está sensiblemente diluida con agua dulce derivada del aporte de los ríos. De acuerdo con algunas de las características físicas de los estuarios, se pueden hacer cuatro clasificaciones (Pritchard, 1967).

- a) Valles de río inundado
- b) Estuarios tipo Fiordo
- c) Estuarios formados por barrera
- d) Estuarios producidos por procesos tectónicos

Existe otra clasificación en la que se puede agrupar los estuarios, considerando la predominancia de procesos físicos asociados con el movimiento y la mezcla de agua. Hay tres procesos básicos que producen movimiento y mezcla en los estuarios: el viento, la marea y el flujo de los ríos. En los estuarios dominados por mareas, la turbulencia asociada con las corrientes de mareas resulta en la mezcla entre el agua dulce y el agua salada, que a su vez producen gradientes de densidad no asociados con los patrones de circulación de las mareas (Pritchard, 1967).

1.5.4.4 Marismas.

Son planicies de poca pendiente en el lado de la laguna de la isla de barrera, también pueden establecerse en la orilla de la laguna del lado continental (Moreno-Casasola, 2009), deltas y esteros (Doody, 2008). Normalmente están sujetas a inundación, debido a la entrada de agua marina por el aumento de mareas, aunque puede ser agua de ríos cercanos, o la combinación de ambas (agua salobre); Las marismas son un sistema complejo, donde su estructura y funcionamiento ecológico está definido por la interacción de varios factores como la salinidad, el sustrato, nutrientes, disponibilidad de oxígeno, suministro de sedimentos y el clima; pero la hidrología (la frecuencia y duración de los flujos de marea) es el factor dominante en este ambiente (Roman y Burdick, 2012).

Los procesos que se combinan para facilitar su desarrollo, actúan por un rango de escalas y sobre diferentes intervalos de tiempo. Algunos de los factores que determinan si las marismas se

desarrollan o no, funcionan a una escala más allá de los límites de las propias marismas. La distribución y movimiento de sedimentos, ayudan a definir más ampliamente esta escala del ecosistema. Dos veces al día, los ciclos de las mareas transportan sedimentos a través de la playa. Ambos procesos de marea (bajamar y pleamar) determinan y limitan las áreas dentro de las cuales, se lleva a cabo la deposición y se establecen las marismas (Doody, 2008).

Generalmente se dividen en dos zonas (Moreno-Casasola, 2009):

- a) Marisma Alta que se inunda ocasionalmente; se ha reportado que algunas islas de barrera se inundan dos veces al mes con las mareas de primavera.
- b) Marisma Baja que se inunda con mayor frecuencia o que permanece inundada. En esta zona desarrolla vegetación halófila como *Cyperaceas* y, especies como *Salicornia* y *Batis* (humedales sumamente productivos) que pueden tolerar las condiciones de inundación y salinidad.

1.5.4.5 Planicie Costera

Como su nombre lo indica es una zona de poca pendiente donde ya no hay movimiento de arena. Puede estar formada por sedimentos arenosos de la propia duna o bien por sedimentos lodosos depositados por el oleaje de la laguna. Los sedimentos arenosos también pueden entrar por zonas donde el oleaje ha roto el cordón de dunas y transportada arena de la playa hacia dentro del sistema. Estas rupturas son más frecuentes durante tormentas y huracanes e indican zonas de gran fragilidad de la isla de barrera. Son puntos donde de manera natural, a través de este proceso, se abren bocas en la barrera (Moreno-Casasola, 2009).

CAPÍTULO 2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

2.1 Descripción

El “Sistema de Islas barrera de Laguna Madre” se ubica en el estado de Tamaulipas dentro de los municipios de Matamoros, San. Fernando y Soto la Marina. Al norte limita con los depósitos o planicie deltaicos del río Bravo, al sur con el río Soto la Marina, al este con el Golfo de México y al oeste con la Laguna Madre porción continental del estado de Tamaulipas. Sus coordenadas extremas son 24° 01´ y 25° 30´ de latitud norte, 97° 30´ de longitud oeste. Está orientada en sentido NNE-SSW, con una longitud de 185 km y con una anchura que va desde los 900 m hasta 3 km en su porción más septentrional, tomando en cuenta las islas de post barrera (Mapa 1).

La Isla Barrera y la Laguna Madre se encuentran en la subprovincia de la cuenca de Burgos, estructural y estratigráficamente la cuenca tiene rocas de basamento de edad paleozoica o precámbrica. Comprende sedimentos del terciario con rumbo general de N a S. Durante el Pleistoceno el desarrollo de la zona costera fue afectado por las fluctuaciones del nivel del mar durante las glaciaciones y se cree que la línea de costa actual se formó durante la transgresión marina del Holoceno (Yañez y Schlapfer, 1968).

Esta isla barrera es parte de la provincia fisiográfica de la *Llanura Costera del Golfo Norte* y a su vez, de la subprovincia de la *Llanura Costera Tamaulipeca*, en la que se desarrollan llanuras inundables que se ven interrumpidas por algunos lomeríos muy tendidos al oeste, de altitud máxima de 200 m (Síntesis Geográfica del Estado de Tamaulipas, 1983).

Hayes (1984, en Davies, 2013), ha clasificado la costa de barrera de acuerdo a la energía del oleaje, de mareas o ambos “energía mixta”. De acuerdo a estos modelos la zona de estudio se encuentra dominada por el oleaje, aunque tiene algunas características de energía mixta. Las costas de barrera dominadas por el oleaje son comúnmente estrechas, tienen una gran cantidad de abanicos de displayamiento y son de poca altitud. Las entradas son muy espaciadas, pequeñas e inestables

En la regionalización de costas realizada por Ortiz y de la Lanza (2006) el área de estudio pertenece a la *Costa Noroccidental del Golfo de México*. El litoral de este sistema de isla barrera está constituido por costas acumulativas de playas bajas arenosas de configuración rectilínea de fisonomía monótona, mientras que la costa interna adquiere una configuración irregular. La pendiente es suave hacia el Golfo, y por el contrario, una pendiente fuerte hacia la laguna. Existe presencia de dunas activas y otras ya estabilizadas por la vegetación con alturas máximas de 10 a 12 m). En la anteplaya, presenta una zona de dunas activas aproximadamente de 600 m de ancho y de 2 a 8 m de altura. Entre las dunas y la playa, se ha desarrollado una llanura de 100 a 200 m de ancho, donde el transporte eólico es muy importante (Yañez y Schlaepfer, 1968; Ortiz y de la Lanza, 2006).

A lo largo de la Isla Barrera de la Laguna Madre, existen tres bocas permanentes que conectan la laguna con el Golfo de México y una más que se encuentra intermitente. En la porción septentrional se encuentra la boca San Juan, una más se encuentra frente a la laguna El Catán la cual recibe el mismo nombre y la tercera es la boca Santa Isabel, la boca el Mezquital es intermitente, en las

cartas de INEGI 1:50000, ésta se encontraba cerrada, dejando que las barras Los Americanos y Jesús María formaran una sola (Mapa 2).

En Isla Barrera se observan abanicos interiores de displayamiento o de deslave (washover fans) que se encuentran en antiguas bocas; se desarrollan desde las antiguas bocas de Santa María hasta la boca Sandoval (Mapa 2).

2.2 Características climáticas.

Dentro de la clasificación climática hecha por García (1983) la zona presenta un climaBSx, semiárido con una temperatura media anual de 24.3° C; las temperaturas más altas se registran de los meses de abril a octubre. La precipitación media anual es de 1090 mm pero es superada por la evaporación con un rango de 1896 mm/anales, de junio a octubre se presentan las mayores precipitaciones (SMN, 2013); CIFSA (1967) menciona que el patrón de lluvias se repite a lo largo de todo el año, pero en invierno se presenta entre un 10 a 36 %del total de lluvias anual, como resultado de la presencia de nortes desde octubre hasta marzo.

Jordan C. L (en CIFSA, 1967) ha dividido el planeta en 6 regiones de acuerdo con la trayectoria y ocurrencia de tormentas tropicales. De acuerdo con esta regionalización, la zona de estudio pertenece a la región 3, en la cual los huracanes comúnmente ocurren de junio a noviembre, con una frecuencia mayor en agosto, septiembre y octubre, causando tormentas cuyas trayectorias comúnmente impactan el Caribe, costas del Golfo de México y la costa oriental de EE.UU.(Tabla 6 y Mapa 3).

Las tormentas tropicales, son capaces de restablecer naturalmente la condición de la laguna llena, por lo que a la laguna respecta, el efecto es más positivo que negativo, ya que por fuertes precipitaciones, la sobreelevación del nivel del mar y la extraordinaria acción del oleaje causan la apertura de las bocas de alimentación. Por otro lado, la misma sobreelevación del mar, rebasa el cordón litoral y arrastra arena hacia la Laguna, quedando atrapada y originando una disminución del prisma de marea en la Laguna, que permiten el pronto cierre de las bocas (López y Cortés, 1968). Respecto al cordón litoral las tormentas pueden debilitar su estructura, a través del acarreo de material hacia la laguna y el mar.

Los vientos reinantes son los Alisios que provienen del NE durante todo el año (Ortiz y de la Lanza, 2006); CIFSA (1967) reportó vientos del E como los reinantes, existen algunos patrones de viento estacionales (vientos dominantes), durante la primavera y verano; los vientos soplan del SE alcanzando velocidades de 35 km/h. Durante el otoño e invierno soplan del NW y el NE como resultado de la penetración de masas de aire polar en el Golfo (Figura 4). Tienen una frecuencia de 15 a 20 por año, soplando durante 1 a 3 días; de ellos 1 a 6, son tormentas severas con vientos de 25 a 50 nudos o más (46.3 a 92.6 km/h). Los vientos que ocurren en otoño e invierno, son importantes debido a que favorecen a la formación de corrientes playeras, permitiendo que una gran carga de sedimentos sea transportada desde las costas de Louisiana y Texas hacia las costas de Tamaulipas y poder así alimentar este litoral. De hecho, se ha señalado que bajo la acción de “Nortes”, grandes cantidades de arena son arrastradas hacia el mar, que en ocasiones el mar adopta un tono café en una faja que abarca 1 km mar adentro de la línea de playa (CIFSA, 1968). Ocurre lo mismo con los

vientos del SE; sin embargo, la energía de éstos es de menor magnitud, por lo que su capacidad de transporte es proporcionalmente menor a la de los vientos del norte.

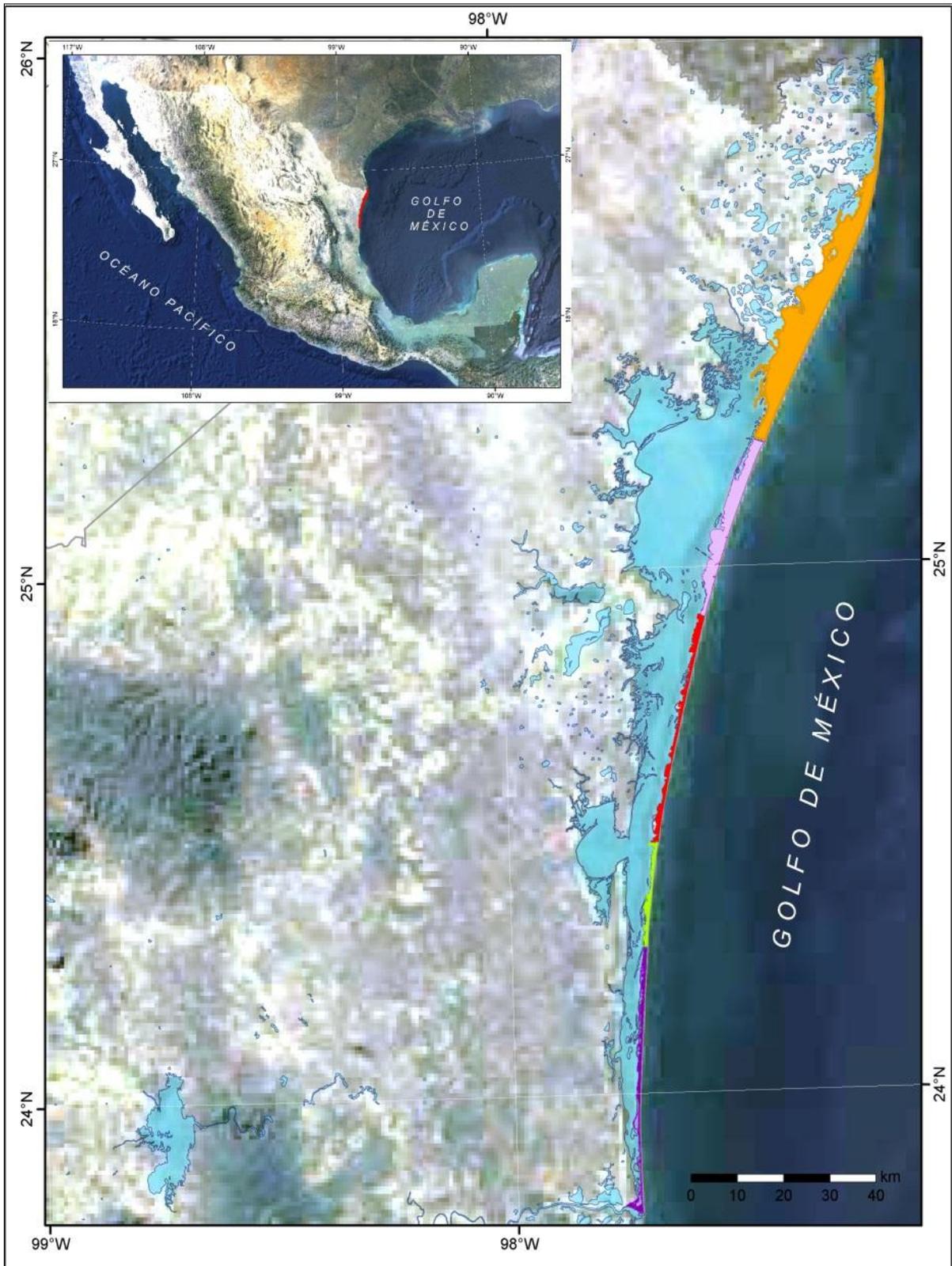
2.3 Oleaje y mareas.

El oleaje que se presenta es el típico de una playa de pendiente tendida, formando varias líneas de rompiente (6-8), el periodo de oleaje varía entre 4 y 6 segundos y ocasionalmente alcanza los 10 (CIFSA, 1967). Incide predominantemente del este-noreste, con frecuencia de poco más del 60 % y con menor incidencia del S, SE y E (Mapa 3); el periodo de oleaje es entre 5 y 7 segundos, cuyas crestas oscilan alrededor de 1.5 m de altura y solo en periodos de nortes y huracanes puede ser de 4.5 m o más de altura (Ortiz y de la Lanza, 2006) (Mapa 3).

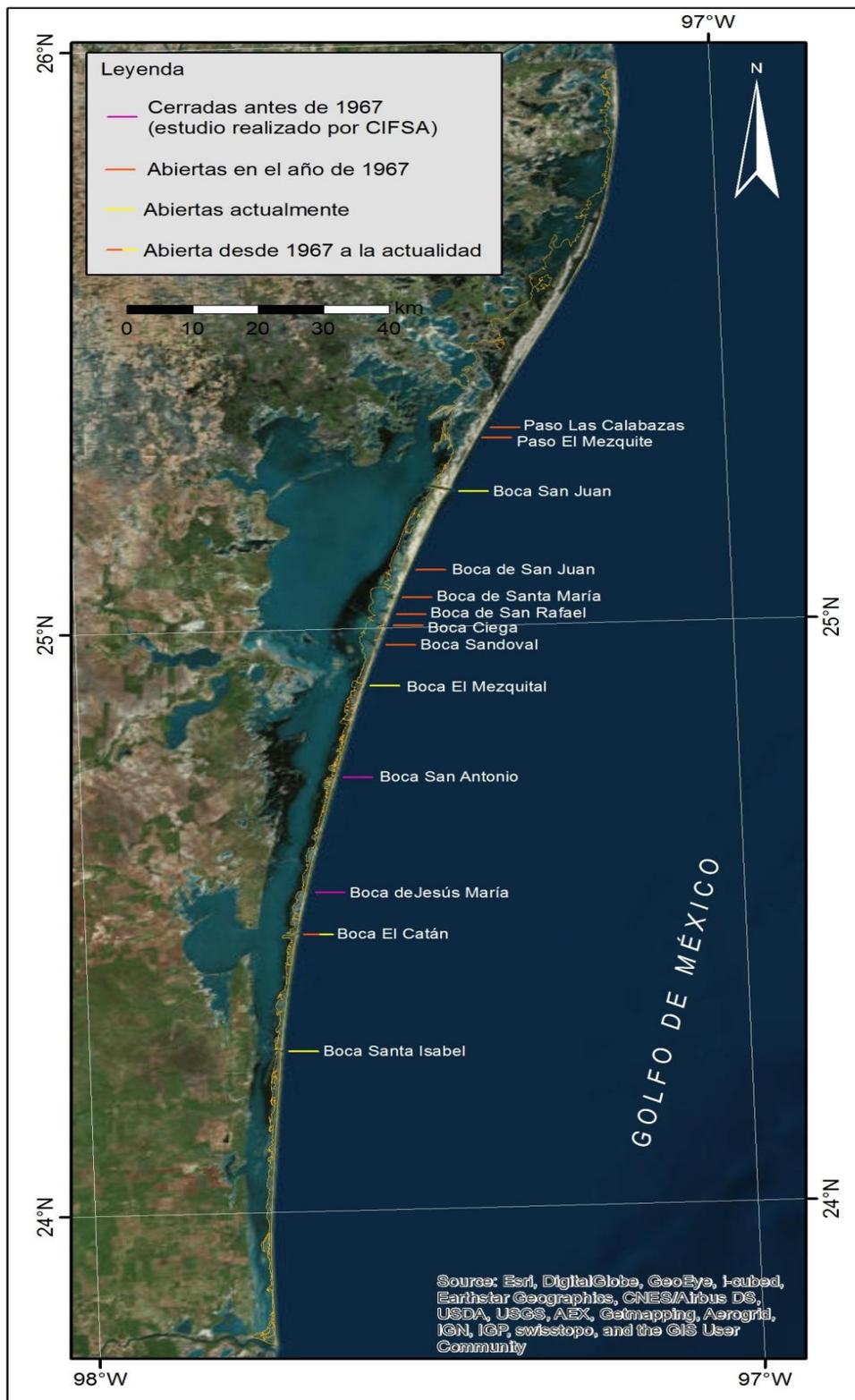
Las mareas predominantes son las diurnas y ocasionalmente son mixtas, tiene rangos de 30 a 40 cm (CIFSA, 1967) que, según la clasificación hecha por French (1997) son micromareales. Éstas son importantes en las zonas de mezclas de ambientes estuarinos con movimientos de agua y sedimentos, particularmente en las desembocaduras fluviales, esteros, brazos deltaicos y bocas de lagunas (Ortiz y de la Lanza, 2006).

Uno de los efectos producidos por los vientos en conjunto con las mareas astronómicas son las *mareas de viento*, ocurridas por la acción de éstos sobre la superficie de la laguna, generando oleaje y una corriente superficial en la dirección del viento, provocando una sobre elevación en el lado de sotavento y abatimiento en el lado de barlovento, se reportó un abatimiento en el extremo norte de la laguna aproximadamente 0.5- 0.6 m. Se considera que el efecto es favorable, tanto por alejar la masa de agua de las bocas, como cuando acumula el agua sobre estas, previendo un intercambio franco flujo y reflujo de las mareas (CIFSA, 1967) (Mapa 4).

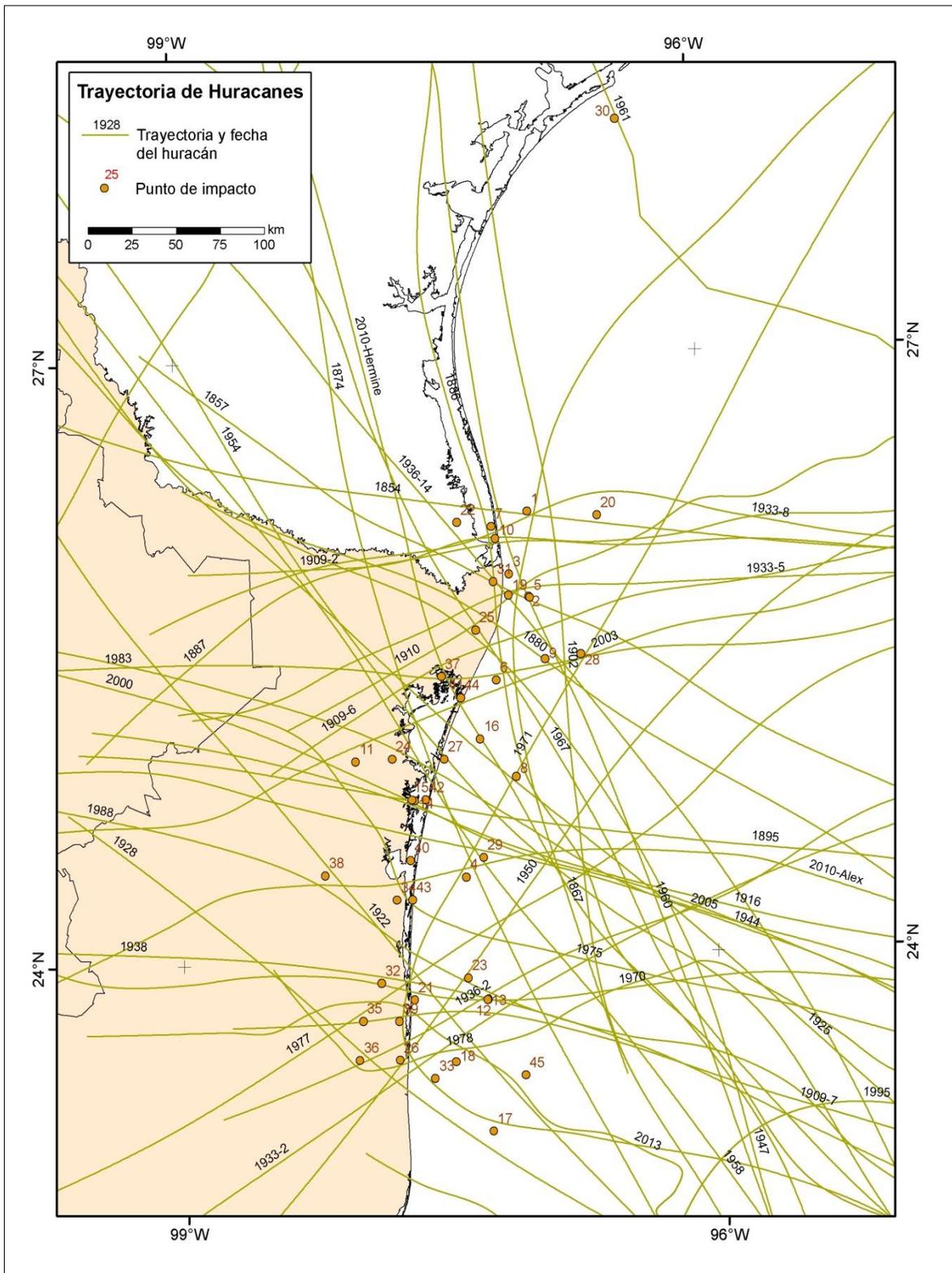
Las *mareas de tormenta*, se producen cuando ocurren tanto huracanes como nortes. Inicia con una elevación gradual del nivel de marea, antes de que la tormenta alcance su distancia mínima al lugar, la máxima elevación se da 1 o 2 horas después de que la tormenta alcanzó su distancia mínima a la costa. En zonas con buen drenaje, el descenso del nivel será rápido, e incluso podrá quedar por debajo del normal; pero, en zonas pantanosas o con drenaje deficiente, el descenso podrá durar incluso días. En zonas donde la plataforma continental es muy plana, la marea de tormenta es mayor. Cuando el cordón litoral es rebasado, las modificaciones serán proporcionales a la intensidad de la marea, rompiéndola y formando canales que después se podrán cerrar o no, como ha ocurrido con la boca el Mezquital (CIFSA, 1967).



Mapa 1. Localización del Sistema de Isla Barrera de la Laguna Madre de Tamaulipas.



Mapa 2. Ubicación de Bocas que se encuentran abiertas y, de otras que reportaba CIFSA en 1967.
Fuente: CIFSA 1967; Cartas INEGI 1:50000 e Imagen de Google Earth.



Mapa 3. Trayectoria de los huracanes que se muestran en la tabla 2, y puntos de impacto más cercanos a la barra, de acuerdo con las coordenadas indicadas por UnisysWeather. Fuente: <http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/index.php>

Tabla 6. Ocurrencia de tormentas tropicales y huracanes, en la costa de la Isla Barrera de la Laguna Madre, Tamaulipas, desde 1851-2013.

No.	Año	Periodo	Nombre	Categoría	Vientos máximos(km/h).	Lugar de entrada	
						latitud	longitud
1	1854	25-27 junio	1	Huracán 1	70	26° 13'	96° 59'
2	1857	14-30 sep.	4	Huracán 2	90	25° 48'	97° 01'
3	1867	2-9 octubre	7	Huracán 2	90	25° 55'	97° 06'
4	1874	2-7 sep	4	Tormenta tropical	50	24° 24'	97° 23'
5	1880	4-14 agosto	42	Huracán 4	130	25° 47'	96° 59'
6	1886	16-24 sep	8	Huracán 2	85	25° 23'	97° 11'
7	1887	11-22 sep	9	Huracán 2	85	26° 09'	97° 12'
8	1895	22-30 agosto	2	Huracán 2	95	24° 54'	97° 06'
9	1902	21-29 junio	2	Huracán 1	70	25° 29'	96° 54'
10	1909	25-30 junio	2	Huracán 2	85	26° 02'	97° 10'
11	1909	22-25 agosto	7	Tormenta tropical	45	25° 00'	98° 00'
12	1909	20-28 agosto	6	Huracán 3	105	23° 47'	97° 17'
13	1910	26-31 agosto	2	Tormenta tropical	40	23° 47'	97° 18'
14	1916	4-6 agosto	5	Tormenta tropical	50	24° 48'	97° 41'
15	1922	12-16 junio	1	Tormenta tropical	45	24° 48'	97° 42'
16	1925	6-7 sep	3	Tormenta tropical	45	25° 05'	97° 18'
17	1928	1-8 sep	3	Tormenta tropical	50	23° 08'	97° 18'
18	1933	24jun-7 jul	2	Huracán 2	95	23° 30'	97° 29'
19	1933	24 jul- 5 agos	5	Huracán 1	80	25° 48'	97° 07'
20	1933	22 agos-5 sep	8	Huracán 5	140	26° 11'	96° 36'
21	1936	19-22 junio	2	Tormenta tropical	45	23° 48'	97° 42'
22	1936	9-14 sep	14	Tormenta tropical	45	26° 11'	97° 24'
23	1938	23-29 agosto	4	Huracán 3	105	23° 54'	97° 24'
24	1944	18-23 agosto	5	Tormenta tropical	50	25° 00'	97° 48'
25	1947	31 jul- 2 agos	1	Tormenta tropical	40	25° 39'	97° 18'
26	1950	1-4 octubre	How	Tormenta tropical	50	23° 30'	97° 48'
27	1954	30 dic-6 ene	Alice	Huracán 1	70	25° 00'	97° 30'
28	1958	14-16 junio	Alma	Tormenta tropical	45	24° 30'	97° 18'
29	1960	22-29 junio	1	Tormenta tropical	40	25° 30'	96° 42'
30	1961	3-16 sep	Carla	Huracán 5	277	28° 30'	96° 30'
30	1967	5-22 sep	Beulah	Huracán 5	140	25° 52'	97° 11'
31	1970	8-13 sep.	Ella	Huracán 3	110	23° 54'	97° 53'
32	1971	5-18 sep	Edith	Huracán 5	140(45)	23° 24'	97° 36'
33	1975	24 agos-1 sep	Caroline	Huracán 3	100	24° 18'	97° 47'

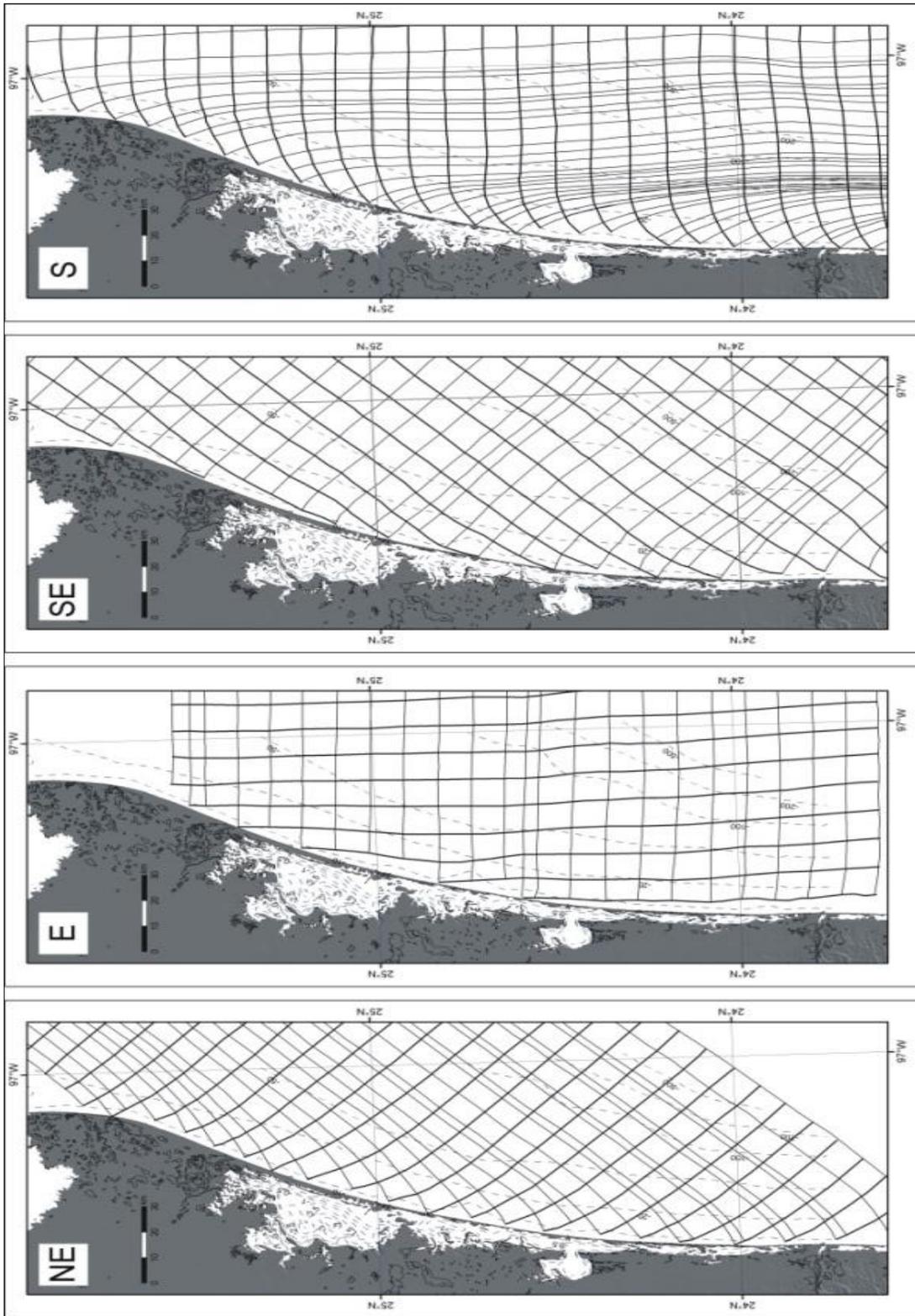
34	1977	29 agos-3 sep	Anita	Huracán 5	150	23° 42'	98° 00'
35	1978	8-10 sep	14	Depresión tropical	30	23° 30'	98° 01'
36	1983	23-29 agosto	Barry	Huracán 1	70	25° 25'	97° 30'
37	1988	8-20 sep	Gilbert	Huracán 5	160	24° 26'	98° 11'
38	1995	9-12 agosto	Gabrielle	Tormenta tropical	60	23° 42'	97° 47'
39	2000	13-15 agosto	Beryl	Tormenta tropical	45	24° 30'	97° 43'
40	2003	14-17 agosto	Erika	Huracán 1	65	25° 18'	97° 24'
41	2005	11-21 julio	Emily	Huracán 5	140	24° 47'	97° 37'
42	2010	24 jun - 2 jul	Alex	Huracán 2	95	24° 18'	97° 42'
43	2010	4-10 sep	Hermine	Tormenta tropical	60	25° 18'	97° 24'
44	2013	12 – 17 sep	Ingrid	Huracán 1	111 km	23° 25'	97° 06'

Fuente: <http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/index.php>.

2.4 Sedimentos.

Los estudios hechos por Yáñez y Schlaepfer (1965), clasifican los sedimentos de la laguna en tres grupos según su granulometría:

- I. Arenas muy bien clasificadas, distribuidas en las bocas y sotavento de la Isla Barrera, corresponden a sedimentos introducidos a la laguna por las mareas, llevados por el transporte eólico o por la acción erosiva de las olas desde la barrera arenosa. En consecuencia, su distribución está concentrada en una franja paralela a la ribera este de la laguna en contacto con el cordón litoral (Isla Barrera). Es claro que la mayor extensión donde se tienen sedimentos de este grupo es donde ocurren las más frecuentes e intensas entradas del mar a la laguna durante fuertes temporales.
- II. Sedimentos mixtos limo-arcillosos mal clasificados. Son el depósito más importante de la laguna; se extienden paralelos a la orilla continental y su proceso de deposición parece haber sido tanto por drenaje superficial como por la erosión eólica.
- III. Sedimentos finos limo-arcillosos, acarreados por los ríos o por la erosión del oleaje sobre la costa, depositados en la parte más profunda del área y en la bahía del Catán; principalmente se mantienen en suspensión por su pequeño diámetro, cada vez que el viento actúa sobre la superficie del agua.



Mapa 4. Procedencia y destino del oleaje. Fuente: CIFSA, 1967.

2.5 Sistemas hidrológicos.

Los principales ríos que integran el sistema de Isla Barrera de la Laguna Madre son los ríos Soto la Marina, San Fernando y algunos otros de menor importancia, que descargan sus aguas en la Laguna Madre (CIFSA, 1967).

De acuerdo con INEGI (1999), el sistema de Islas Barrera se encuentra dentro de dos regiones hidrológicas y, a su vez, en subcuencas en cada región. La primera es la región Río Bravo-Conchos, en la cuenca río Bravo- Matamoros- Reynosa, y la segunda es la región de San Fernando-Soto la Marina, en la cuenca Laguna Madre.

En la clasificación ecogeográfica de las cuencas de México realizada por Ortiz (2010), la zona de estudio se encuentra en varias cuencas. Ésta se realizó de acuerdo con el tipo de cuenca (Tabla 2).

Tabla 2. Clasificación ecogeográfica de cuencas.

Tipo de cuenca	Número de cuenca	Nombre	Superficie (km²)
Alóctona distante exorreica.	1	Río Bravo	222,489
Alóctona por altura de vertiente simple exorreica.	2	Río Soto la Marina	21, 083
	3	Río Concho-Chorreras	17,992
Autóctona de vertiente compuesta con nivel base endorreico	4	Laguna Honda	5,522
	5	Río el Carrizo	1,047
	6	Río el Perro	737
	7	Río el Caracol	537
	8	Arroyo Olivares	529
	9	Arroyo el Catán	501
	10	Arroyo la Pelusa	327
	11	Río Lavaderos	225

Fuente: Ortiz, 2010.

Las cuencas alóctonas son aquellas cuyos nacimientos se encuentran distantes, en las cuales las corrientes se han perfilado cruzando por varias regiones naturales, originando una diversidad en su composición espacial; además, tienen como ventaja recibir un flujo de amplio rango que asegura una gran conectividad para captar, almacenar, concentrar, asimilar, transformar y transferir materia y energía hasta su desembocadura en los océanos, contribuyendo a la configuración de las costas. Las cuencas autóctonas se caracterizan por tener nacientes cercanas y paisajes homogéneos (Ortiz, 2010).

De los tres ríos que influyen el sistema de isla barrera dos forman deltas: el río San Fernando desemboca en la laguna y ahí se forma el delta; el escurrimiento de éste ha disminuido debido a la canalización de sus aguas para riego. El segundo es el río Bravo, forma un delta costero, que por su aspecto curvo se puede describir como un delta cónico.

2.6 Vegetación.

La acción de los factores físicos de la isla barrera y la intensidad con la que se presentan le permiten que se generen microambientes en los cuales se desarrollan varias y distintas especies de vegetación (Moreno-Cassasola, 2009).

Existe una diferencia entre la flora que se desarrolla entre la porción septentrional y meridional de la laguna. El conjunto florístico que predomina en la zona norte, guarda más relación con la flora de la isla barrera de Texas, una región más seca; mientras que en la zona sur, la flora guarda más relación con las especies de las dunas de Veracruz, del trópico húmedo (Yañez y Schlaepfer, 1968).

La composición de la vegetación es principalmente de halofitas, las cuales soportan una concentración de sal en el suelo y contribuyen a fijar los sedimentos transportados por el viento (Yañez y Schlaepfer, 1968). Especialmente en las zonas protegidas, se incrementan los matorrales y el número de especies de arbustos (Moreno-Cassasola, 2009).

Sauer (1967), reporta que durante el paso del huracán Carla, la vegetación fue dispersada y desorganizada; especies que normalmente se encontraban en la playa de tormenta fueron dispersadas a través de las dunas y sobre la margen de marismas de post-barrera. Tiempo después, especies vegetales de dunas como *Uniolapaniculata* reaparecieron, se desarrollaron parches de mangle negro, de *Avicenniagerminans* y otras especies halófitas reaparecieron en la zona de post-barrera.

2.7 Población e infraestructura.

Según el censo de INEGI (2010), Tamaulipas tiene una población total de 3, 268,554 habitantes. De los tres municipios en los que se localiza políticamente el sistema de Isla Barrera solo Soto la Marina con 24 764 habitantes, y Matamoros con 489 193 habitantes; son los que tiene una localidad en barra de la Laguna Madre.

La población de La Pesca, en el municipio de Soto la Marina, es la localidad más grande en la Isla Barrera de la Laguna Madre, cuenta con 1632 habitantes y se localiza en la barra Soto la Marina. Una segunda localidad se encuentra al extremo sur de la barra San José llamada La Higuierilla, con 706 habitantes, dentro del municipio de Matamoros (Mapas 6 y 10).

En ambas localidades hay muelles para embarcaciones pequeñas, en La Pesca se localizan del lado del río Soto la Marina y en La Higuierilla del lado de la laguna. Existen algunos caminos de manera paralela a la barra Soto la Marina, pero sin ser tan significativos. La playa Bagdad (Barra San José) y la playa de La Pesca, han sido utilizadas como lugares turísticos en los que se han construido algunos restaurantes e instalado palapas.

En las bocas de San Juan, El Catán, en la desembocadura del río Soto la Marina y en la boca Santa Isabel se han construido espigones y escolleras, totalizando cuatro obras.

2.8 Antecedente histórico. La Laguna Madre.

Esta reseña histórica se retoma de los trabajos hechos por CIFSA(1967).

Existen datos que refieren que durante el siglo XIX la laguna permaneció seca por 21 años y fue hasta 1909, cuando un ciclón azotó el área y llenó la laguna, situación que duró nueve años más. Otro periodo de sequía se reinició en 1919 y finalizó en 1933 con la llegada de otro ciclón. Posteriormente se dio un periodo de relativa estabilidad, pero la pérdida de agua continuaba hasta que en 1955 se cerró la última de las bocas que comunicaba con el Golfo: Jesús María (Mapa 2). Durante el periodo en el que la laguna tenía agua, la pesca y la navegación fueron actividades intensas que se desarrollaron, esta última se pudo desarrollar ya que de norte a sur, partiendo de la Laguna de Jasso (desembocadura del río Tigre) empezaba un canal por donde se podía navegar hasta la desembocadura del río San Fernando, ahí se desviaba con dirección Este a la Boca Sandoval y poco antes de llegar al mar, el canal torcía hacia el Sur y volvía a alinearse con la costa interna de la laguna hasta llegar a "Punta Brava". En los 25 km que separaban Jesús María de Punta Brava el canal podía tener una profundidad media de 10 m.

El problema de la sequía y la extinción de la pesca fueron atribuidos al control del río Bravo, a raíz de la construcción de la Presa Falcón en el periodo de 1950 a 1953, ya que gran parte del volumen de agua escurría hacia la zona norte de la laguna a través del arroyo del Tigre, y al cierre de las bocas, como consecuencia de la sequía el agua dulce que existía en algunas de las islas se fue salando gradualmente hasta que solo "Loma de Agua" frente a la barra de Sandoval (barra Los Americanos) tenía agua dulce.

Durante un estudio en la década de los 1960, se establecía que geológicamente la laguna estaba en claro proceso de desaparición debido a los constantes periodos de sequía y por la poca atención que se le había dado.

La anchura de la barra era de 3000 m en la parte norte, mientras que en la zona sur era de 900 m frente a la desembocadura del río San Fernando, si se incluían las islas de post-barrera. En toda la barra se presenta una parte de dunas activas y otras que ya se encuentran estabilizadas por la vegetación, con fuerte pendiente hacia la laguna, la orientación de las dunas se puede considerar como un índice de la dirección de los vientos dominantes y como indicador de un intenso transporte eólico, que tiene una influencia directa en el azolvamiento de la laguna que según Carothers, (1959 en CIFSA, 1967), es del orden de 0.8 cm por año.

Los abanicos interiores de tipo deltaico, se encuentran en zonas de antiguas bocas, fueron formados por las corrientes de marea del Golfo de México, cuando aquellas estaban abiertas. Respecto a los materiales de la playa, (se clasifican como finos) y, se ubican en las fosas y hacia las profundidades, aunque también existen restos de concha de almeja. Sobre las partes altas de la playa se encuentran materiales más gruesos. La playa en general es de pendiente suave 1:50 o 1:100 (es decir que por cada 50 o 100 m de distancia la playa solo aumenta 1 m de nivel aproximadamente), aunque solo al Norte de la boca Jesús María, se acentúa. El perfil de playa está compuesto por una serie de barras paralelas de 30 a 90 cm de altura que interrumpen la pendiente de la playa. Su trazo en planta es uniforme, exceptuando la ribera de la laguna que es irregular en extremo.

La Laguna queda dividida en dos cuencas por el delta del río Sn Fernando: la meridional y la septentrional. La influencia de este afluente ha sido determinante en la evolución de la laguna, ejemplo de esto ha sido, que la reducción de su gasto ha tenido influencia en el azolve de algunas bocas. Uno de los rasgos distintivos de la cuenca meridional es la laguna de “Bahía del Catán o Bahía Salada”. La cuenca meridional ocupa una depresión semicircular excavada con sedimentos tal vez del Pleistoceno. En la entrada de la bahía existen afloramientos de playa en ambos márgenes. Por otro lado la cuenca septentrional, está limitada por los aluviones deltaicos del río Bravo, se vuelve muy irregular por las islas remanentes de erosión; entre ellas se extienden llanuras de lodo inundadas intermitentemente por las mareas provocadas por los vientos.

En la parte norte de la laguna, gran parte de los sedimentos eran aportados por el río Bravo a través del arroyo del Tigre, el volumen de agua aportada era tal que según Hildebrand (1958, en CIFSA 1967) era posible viajar en barco desde la Laguna Madre hasta puerto Isabel, Texas sin salir al Golfo de México.

Las bocas de comunicación con la laguna, están cerradas en su totalidad, para 1962 y 1963 se reportaba que las bocas de Sandoval y Jesús María estaban abiertas como consecuencia del huracán Carla en el año de 1961. En 1966 se reportaba la presencia de pequeñas acumulaciones de agua con gran concentración salina en las bocas de Sandoval, San Rafael, Santa María y Ciega. Al sur las bocas de Carbonero, Algodones, San Antonio, Jesús María y Barrita estaban cerradas, aunque se creía que había agua que posiblemente era un remanente de las lluvias. El cierre de las bocas es un proceso evolutivo y se marca la mitad del siglo XX como el inicio de este proceso, que ha marcado el comienzo de condiciones críticas para la vida acuática (debido al aumento de la salinidad). Varios fueron los intentos por abrir las bocas pero el resultado no fue el esperado debido al acarreo litoral, aun cuando se podían abrir canales artificiales, era necesario lograr un intercambio eficaz del agua introducida, como lo fue en la Laguna Madre de Texas, a través de la construcción del Canal Intracostero.

CAPÍTULO 3. RESULTADOS DE LA VULNERABILIDAD DE LA ISLA BARRERA.

Como primer punto se debe decir que el estudio de la isla barrera fue hecho en gabinete con la metodología descrita en el capítulo 1.

Los resultados exponen el grado de vulnerabilidad que tiene cada sector, además de mostrar cuáles son los aspectos por los que se vuelven más vulnerables. Para poder llevar a cabo la evaluación como se ha mencionado anteriormente se tomaron en cuenta los siguientes variables:

- a) Suministro y almacenamiento de sedimentos.
- b) Dimensiones morfográficas y morfométricas.
- c) Composición y organización espacial de las unidades naturales de las barras.
- d) Transformaciones antropogénica.
- e) Susceptibilidad de inundación por efectos del ascenso del nivel del mar.

Para poder llevar a cabo la metodología fue necesario utilizar herramientas como: Cartas Topográficas 1: 50000 (INEGI), Google Earth y SIG (ArcGis).

Para hacer una evaluación más certera, la barra se dividió en sectores, tomando en cuenta las bocas y cercenaduras para esta delimitación. Los nombres corresponden a la toponimia de INEGI.

-Barras (Mapa 5):

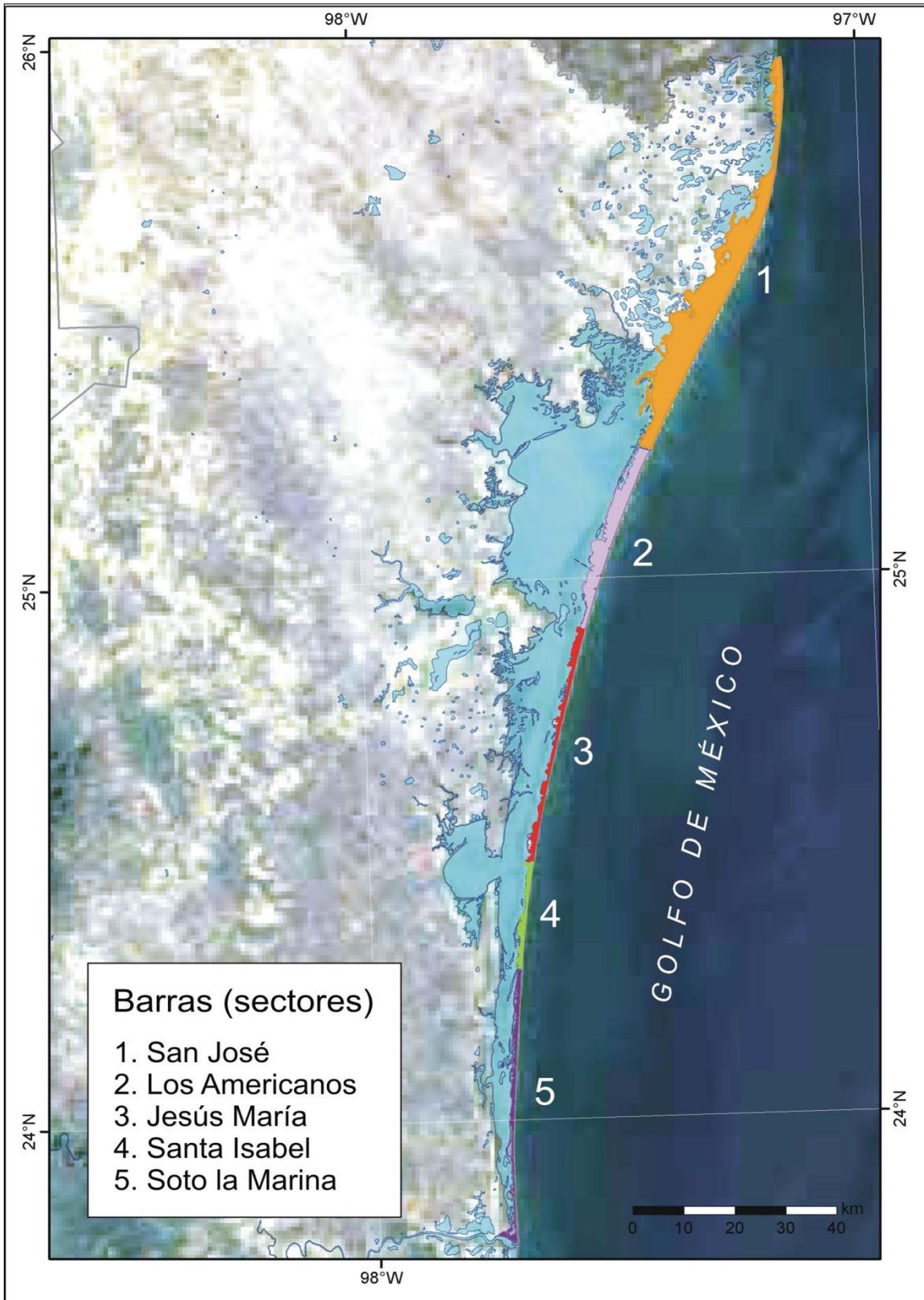
1°. Barra de San José (extremo septentrional).

2°. Barra Los Americanos (centro-norte).

3°. Barra Jesús María (centro).

4°. Barra Santa. Isabel (centro-sur).

5°. Barra Soto la Marina (extremo sur).



Mapa 5. Localización de las barras (sectores) de la Isla Barrera de la Laguna Madre.

3.1 Resultados.

3.1.1 Primer sector. Barra de Sn. José.

La barra de San José está comprendida entre el límite norte con la desembocadura del río Bravo y, con la boca San Juan al sur. Esta barra está orientada NNE-SSW.

La costa tiene una trayectoria ligeramente curvilínea, que corresponde al flanco sur del delta del río Bravo, configurando así un delta cónico; mientras la costa interna de la barra tiene un trazo de mayor irregularidad, debido a la serie de islas de post- barrera y de los diversos niveles y contornos de inundación. Su fisiografía es de una playa baja arenosa entremezclada con cascajo conchífero y de pendiente suave.

Hacia el interior se desarrolla un campo de dunas embrionarias, seguidas de dunas frontales, que ponen en evidencia la acción de la energía eólica. Las dunas se encuentran semiestabilizadas por la vegetación; en tanto las dunas que están inmediatas al cauce del río Bravo y en la zona sur pueden alcanzar hasta los 10m de altura (Tunell y Judd, 2002). En una secuencia vertical o estratigráfica tenemos abajo del campo de dunas a la secuencia de cordones litorales, los cuales son más evidentes en el flanco de sotavento que de barlovento.

3.1.1.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos.

La barra de San José tiene una distancia promedio a los depocentros de 112 km, por lo que con respecto a los valores asignados de vulnerabilidad el criterio es muy alto; este dato es un tanto relativo, si sabemos que el río Bravo es el depocentro más cercano, pero sin que represente una gran fuente de sedimentos, debido a que el escurrimiento ha sido represado y controlado, con derivaciones para riego agrícola. Por otra parte, en el otro extremo no se ve influenciado dada la distancia tan lejana del Río Soto la Marina, la cual es poco más de 200 km.

La altura de las dunas resulta en una vulnerabilidad moderada, en promedio su altura es de 4 m; aunque en los extremos de la barra las dunas son de mayor altura, los campos que se encuentran en el medio de la barra tienen una altura de no más de 2 m.

La cobertura vegetal en las dunas frontales, permite que las dunas sean estables y que su vulnerabilidad se califique como muy baja. La vegetación se establece primordialmente en la parte baja y media, y solo las crestas son las que quedan expuestas a procesos eólicos.

Al igual que el criterio anterior las dunas que son modeladas por la erosión eólica su vulnerabilidad es muy baja, es solo el frente del campo de dunas el que se encuentra más expuesto a procesos eólicos, generalmente son dunas embrionarias; en este sentido hay estabilidad.

El campo frontal de dunas ocupa un 73% de la longitud de la barra, lo que significa que se asegura un buen abastecimiento que a su vez es la fuente de suministro de la extensión total de dunas, son solo algunas zonas donde no se han desarrollado dunas frontales, por ejemplo en la playa Bagdad, no porque no exista la capacidad para su desarrollo si no porque las construcciones hechas representan un obstáculo para su desarrollo y migración.

Tabla 6. Suministro y almacenamiento de sedimentos de la barra San José.

Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
1.1 Distancia media a los depocentros (km)	112 km	Muy alta-5
1.2 Altura promedio de las dunas internas parcialmente activas (m)	4	Moderada-3
1.3 Superficie sin cobertura vegetal del total de la duna frontal (%)	≤ 10 %	Muy baja-1
1.4 Anchura media de la franja frontal de dunas modeladas por la erosión eólica (km).	0.805 km	Muy baja-1
1.5 Franja acumulativa de la duna frontal con respecto a la longitud de la barra (%).	73.4 %	Muy baja-1

3.1.1.2 Dimensiones morfológicas y morfométricas de la barra.

Las medidas que nos hablan de la consolidación de la barra, son los parámetros morfométricos entre los que se encuentran la anchura promedio de 3560 m, valor que indica una buena amplitud de la barra y por ello en una situación de vulnerabilidad muy baja, por esta característica es poco probable que se lleguen a desarrollar bocas o cercenaduras con la presencia de mareas de tormentas. En cuanto a la altura promedio de la barra es de 2 m, que la torna altamente vulnerable debido a la posibilidad de que se generen zonas bajas en las que se formen cercenaduras o corredores de viento, sin embargo el índice de istmicidad denota una vulnerabilidad muy baja, solo se vislumbra una posibilidad de que forme una brecha, al este de la Laguna el Rabón (Mapa 6).

La longitud de 85.7 km y la superficie de 296 km² otorgan a la barra vulnerabilidad muy baja, dadas sus amplias dimensiones que nos indican una consolidación y madurez en su desarrollo evolutivo. No así el parámetro de la pendiente, que es del orden de 2° correspondiente a una planicie subhorizontal, que resulta altamente vulnerable al oleaje o la marea de viento rebase la barra, remueva sedimentos y se formen corredores de abrasión.

Tabla 7. Dimensiones morfológicas y morfométricas de la barra Sa. José.

Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
2.1 Anchura media (m)	3560 m	Muy baja-1
2.2 Altura media (m)	2 m	Alta-4
2.3 Longitud total (m)	85700 m	Muy baja-1
2.4 Superficie total (km ²)	296 km ²	Muy baja-1
2.5 Pendiente media de los flancos	Planicie subhorizontal 0° -2°	Alta-4
2.6 Índice de istmicidad	no hay	Sin vulnerabilidad

3.1.1.3 Composición y organización espacial de las unidades naturales de las barreras.

En este módulo la vulnerabilidad resulta en promedio baja. Si consideramos que la barra San José es la única que se encuentra anclada al continente otorgándole una vulnerabilidad moderada. La diversidad en la composición del paisaje es amplia, tiene el máximo de unidades que señala la metodología, por esta circunstancia la vulnerabilidad es muy baja.

Hay una combinación del material sedimentario constituido en su mayoría por arenas finas, pero también existe cascajo conchífero a lo largo de toda la barra. Respecto a las arenas, se atribuye una vulnerabilidad muy alta, y al cascajo conchífero vulnerabilidad moderada.

Tabla 8. Composición y organización espacial de las unidades naturales de la barra San José.

Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
3.1 Tipo de barrera	Anclada a tierra de costas bajas arenosas	Moderada -3
3.2 Materiales conformadores de la barra.	Limos y arenas Cascajo conchífero	Muy Alta-5 Moderada-3
3.3 N° de unidades naturales	5 unidades	Muy baja-1

3.1.1.4 Transformación Antropogénica.

Una de las formas que se proyecta la actividad humana, es en el desplazamiento de la vegetación, en este caso particular no es la presión de carácter antropogénico el factor limitante para el desarrollo de la vegetación, se debe a factores limitantes como los elementos de un clima extremo y a la presencia de blanquizales (cuencas de evaporación) en planicies de inundación, debido a ello la vegetación ocupa un 40% de cobertura natural, que la caracteriza como vulnerabilidad moderada.

Con respecto a la longitud total de caminos longitudinales con respecto a la longitud total de la línea de costa es de 39% que representa una vulnerabilidad moderada; éstos se ubican en la porción baja

del flanco de sotavento, y, la porción media y alta de barlovento, representan una vulnerabilidad moderada y alta respectivamente.

Respecto a la anchura de la barra el 11% es ocupado por caminos transversales, ubicados en los flancos de sotavento y barloventos, en la población de Higuierillas y en la playa Bagdad respectivamente. El camino que conduce de la ciudad de Matamoros a la playa antes mencionada es perpendicular a la barra por lo que representa una vulnerabilidad alta, seguido por los caminos que están en barlovento (vulnerabilidad alta) y al final los caminos en sotavento con vulnerabilidad moderada.

La población de Higuierillas y el centro recreativo/turístico construido en la playa Bagdad, son los únicos asentamientos humanos en la barra San José, ambos representan el 1.23% de la superficie total de la barra, lo que significa una vulnerabilidad muy baja.

Por su ubicación (flanco de sotavento), la población de Higuierillas representa una vulnerabilidad baja, aunque es un obstáculo para el desarrollo de las dunas en ese flanco. De modo contrario, el centro recreativo/turístico de la playa Bagdad representa una vulnerabilidad muy alta, ya que fue construido en el flanco de barlovento de la playa. Al observar imágenes de la zona, se aprecia como esta construcción interfiere con el desarrollo y configuración de las dunas, además de interferir con el desarrollo de vegetación.

También se han llevado a cabo algunas construcciones portuarias como muelles y escolleras. Los primeros se ubican en la costa interna de la barra a lo largo de la población de Higuierillas y significan una vulnerabilidad bajapara la barra. En la parte central de la barra se construyeron dos escolleras una de 74 m y la segunda de 195 m (muy cercanas entre sí), una tercera está en el límite de la barra y la boca San Juan con una longitud de 437 m, éstas representan una vulnerabilidad muy alta. Por un lado (en la porción norte de las escolleras) la playa se ha sedimentado, sin embargo, al lado sur de las mismas (escollera) la playa ha comenzado a erosionarse y en la que se encuentra en la boca San Juan, la refracción del oleaje ha comenzado a erosionar la porción posterior de la escollera, que de continuar así, ésta podría quedar aislada de la barra.

Tabla 9. Transformación Antropogénica.

Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
4.1 Superficie de la Cobertura natural (%).	40-20	Moderada-3
4.2 Caminos en dirección longitudinal de la isla barrera.	Baja de sotavento, y, media y alta de barlovento	Moderada -3 Alta-4
4.3 Longitudes del camino paralelos a la línea de costa con respecto a la longitud total de la barrera (%).	39%	Moderada-3
4.4 Disposición de los caminos transversales.	Perpendicular al flanco de barlovento	Muy alta-5
4.5 Longitud de caminos transversales respecto a la anchura de la barra.	11%	Baja-2
4.6 Localización de asentamientos humanos.	Sotavento Flanco de barlovento	Baja-2 Muy alta-5
4.7 Superficie ocupada por asentamientos humanos respecto a la superficie de la barra.	1.23 %	Muy Baja-1
4.8 Presencia de infraestructura portuaria.	Escolleras muelles	Muy alta-5 Baja-2

3.1.1.5 Susceptibilidad de inundación por efectos del ascenso del nivel del mar.

El perímetro de la barra en contacto con cuerpos de agua es del 70%, que resulta en una vulnerabilidad alta, ya que es susceptible para que el agua del océano y las aguas de planicie de inundación y lagunar desborden sobre la barra.

Aunque el retroceso de la costa no es tan perceptible se ha podido obtener un promedio de -28.35 m de pérdida de la costa externa, durante el periodo 1999 – 2013 (14 años), lo que significa que anualmente se han perdido 2 m, identificando una vulnerabilidad alta. La porción norte es la que presenta mayor cambio con retrocesos de hasta 4 m por año,- al este de la laguna Mar Negro (Mapa San José, Anexo 1). La costa interna se ha mantenido estable, aunque en la porción media (barra Conchillal), ésta ha ganado terreno del ambiente lagunar en promedio 100 m, en este período.

Tabla 10. Susceptibilidad de inundación por efectos del ascenso del nivel del mar de la barra Sn. José.

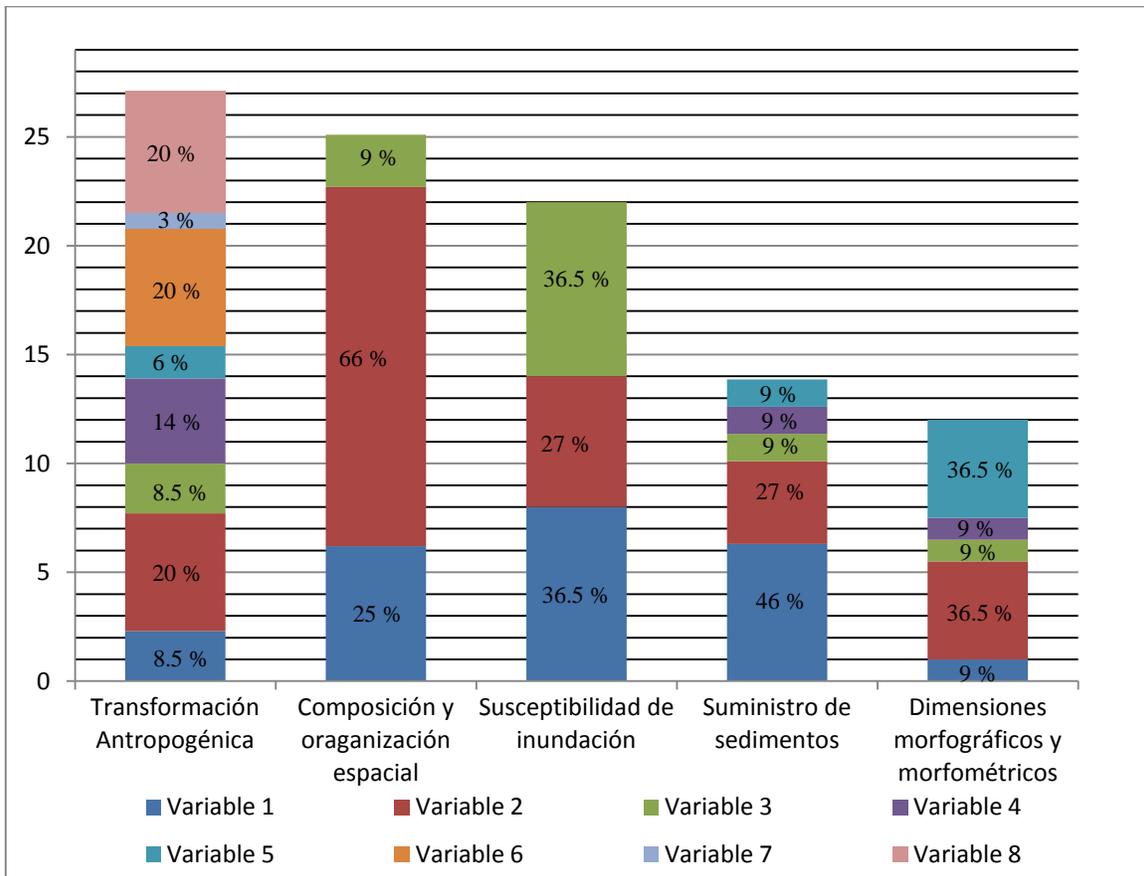
Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
5.1 Perímetro en contacto con cuerpos de agua (%).	70 %	Alta -4
5.2 Porcentaje de superficie con vegetación inundada.	32%	Moderada-3
5.3 Retroceso de la línea de costa en metros/año	2 m/a	Alta -4

3.1.1.6 Jerarquía de los grupos de variables, Barra San José.

Como resultado de la metodología se puede observar que la variable que otorga a la barra mayor vulnerabilidad es la asimilación antrópica, obtiene el 27% del peso del total de los grupos, las variables más representativas de éste grupo son: localización de asentamientos humanos, presencia de infraestructura portuaria y en tercer lugar la localización de caminos paralelos; las tres anteriores variables representan un 20% de peso respectivamente.

La composición y organización espacial obtiene el 25% del peso, los materiales conformadores tienen un 66% del valor total seguido por el tipo de barrera con un 25%.

La susceptibilidad de inundación tiene el 22% de peso, el retroceso de la línea de costa y el perímetro en contacto con el agua son las variables más significativas. El cuarto grupo es el suministro de sedimentos y por último las dimensiones morfológicas y morfométricas, con 14% y 12% respectivamente (*Gráfica 1*).



Gráfica 1. Jerarquía de grupos y variables de acuerdo a la vulnerabilidad que generan en la barra San José. En el grupo de dimensiones morfológicas y morfométricas, solo se representan 5 de las 6 variables, ya que el índice de istmicidad no representa ninguna vulnerabilidad.

3.1.2 Segundo sector. Barra Los Americanos.

La barra Los Americanos se encuentra limitada al norte por la boca San Juan y al sur por la boca El Mezquital (ésta es muy inestable, al término de este trabajo ya se había cerrado y la barra se encontraba unida con la barra Jesús María). La trayectoria de la barra tiene una dirección Norte modificando su trayecto en orientación Sureste.

La costa externa es de configuración rectilínea, por el contrario, la costa interna es de orilla irregular, al norte, sobre la margen de la laguna, hay una serie de islas alargadas que probablemente formaron parte de la misma isla barrera pero ahora ya se encuentran inundadas. En la parte centro y sur se desarrolla una serie de abanicos de displayamiento, que por algunos momentos fragmentan la barra, un ejemplo lo constituye la boca El Carrizal, la cual por su configuración sugiere la de un abanico de displayamiento.

3.1.2.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos.

La distancia media a los depocentros de la barra Los Americanos es de 92 km, lo que califica el grado de vulnerabilidad como muy alto; respecto a los ríos Bravo y Soto la Marina su distancia es mayor a 100 km, el río San Fernando es el más cercano, a una distancia de 25 km, sin embargo, éste ya se encuentra canalizado para riego agrícola y su aporte de sedimentos ya es muy escaso (Yañez y Schlapfer, 1967).

La vulnerabilidad por altura de las dunas es moderada, el promedio de altura es de 3.7 m; en algún punto llegan hasta los 9 m, pero son la excepción. La superficie de dunas sin cobertura vegetal es 40% propiciando que la vulnerabilidad sea moderada.

La anchura promedio de las dunas frontales es de 696 m, resultando una vulnerabilidad moderada, ya que esta zona representa el área de removilización de los sedimentos. Por otro lado la longitud que ocupan respecto a la longitud de la barra es del 60% que genera una vulnerabilidad muy alta. En este caso específico, del total de las dunas, el 60% se encuentra sujeto a erosión e inundación, aproximadamente el 40% refiere a zonas de acumulación.

Tabla 11. Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos de la barra Los Americanos.

Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
1.1 Distancia media a los depocentros (km)	92 km	Muy Alta-5
1.2 Altura promedio de las dunas internas parcialmente activas (m)	3.7 m	Moderada-3
1.3 Superficie sin cobertura vegetal del total de la duna frontal (%)	20-40%	Moderada-3
1.4 Anchura media de la franja frontal de dunas modeladas por la erosión eólica (km).	0.696 km	Moderada-3
1.5 Franja de la duna frontal erosiva e inundada con respecto a la longitud de la barra.	≥ 50 (60%)	Muy Alta-1

3.1.2.2 Dimensiones morfológicas y morfométricas de la barra.

Del total de las variables a evaluar, la anchura media de 2324m, la longitud total de 39.2 km y la superficie total de 88.27 km²; es decir el 50% de éstas evalúan la barra con una vulnerabilidad muy baja, significando con ello que ha tenido una buena evolución de acrecentamiento y que se ha ido consolidando.

De modo contrario, el otro 50% de las variables como: la altura media de la barra (4 m), pendiente media de los flancos (1°), y el índice de istmicidad (0.226) evalúan a la barra con una vulnerabilidad alta; que indican que es una barra frágil ante eventos meteóricos.

Tabla 12. Dimensiones morfológicas y morfométricas.

VARIABLES	VALORES	GRADO DE VULNERABILIDAD
2.1 Anchura media (m)	2324 m	Muy Baja-1
2.2 Altura media (m)	4 m	Alta-4
2.3 Longitud total (m)	39 200 m	Muy Baja-1
2.4 Superficie total (km ²)	88.27 km ²	Muy Baja-1
2.5 Pendiente media de los flancos	0.9°	Alta-4
2.6 Índice de istmicidad	0.226	Alta-4

3.1.2.3 Composición y organización espacial de las unidades naturales de la barra.

La barra es una isla libre conformada por arenas, estos dos criterios le otorgan un grado de vulnerabilidad muy alto, debido a la exposición y fragilidad de sus materiales.

El grado de vulnerabilidad por el número de unidades naturales es moderado, ya que la barra de Los Americanos posee playa, cordón frontal de dunas y humedales dispuestos en la costa interna, indicando un comportamiento moderado.

Tabla 13. Composición y organización espacial de las unidades de la barra.

VARIABLES	VALORES	GRADO DE VULNERABILIDAD
3.1 Tipo de barrera	Barra libre o isla barrera	Muy Alta-5
3.2 Materiales conformadores de la barra.	Limos y arenas	Muy Alta-5
3.3 N° de unidades naturales	3 unidades	Moderada-3

3.1.2.4 Transformación Antropogénica.

La perturbación por actividades humanas es muy poca; de hecho, en el caso de los caminos son ausentes, solo se observan trazos de brechas cercanas a una pequeña población que se localiza en el flanco de sotavento en el extremo norte, la cual ocupa solo el 1% de la superficie de la barra; estas características ayudan a que el grado de vulnerabilidad sea muy bajo y bajo por la construcción de muelles.

La superficie de cobertura natural es del 40%, lo que significa vulnerabilidad moderada, este porcentaje se debe a las zonas de bajos inundados y de abanicos de desplazamiento, que no permiten la formación de vegetación. Solo la construcción de escolleras en los límites con las bocas propicia una vulnerabilidad muy alta.

Tabla 14. Transformación Antropogénica.

Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
4.1 Superficie de la Cobertura natural (%).	40-20	Moderada-3
4.2 Caminos en dirección longitudinal de la isla barrera.	Ausentes	Sin Vulnerabilidad
4.3 Longitudes del camino paralelos a la línea de costa con respecto a la longitud total de la barrera (%).	Ausentes	Sin Vulnerabilidad
4.4 Disposición de los caminos transversales.	Ausentes	Sin Vulnerabilidad
4.5 Longitud de caminos transversales respecto a la anchura de la barra.	Ausentes	Sin Vulnerabilidad
4.6 Localización de asentamientos humanos.	Sotavento	Sin Vulnerabilidad
4.7 Superficie ocupada por asentamientos humanos respecto a la superficie de la barra.	1%	Sin Vulnerabilidad
4.8 Presencia de infraestructura portuaria.	Muelles Escolleras	Baja-1 Muy Alta-5

3.1.2.5 Susceptibilidad de inundación por efectos del nivel del mar.

La barra Los Americanos se encuentra totalmente en contacto con agua, el grado de vulnerabilidad de esta variable es muy alto. La vulnerabilidad por superficie de la vegetación inundable es moderada, el resultado se ha calculado en 48% de superficie inundable.

El retroceso de la línea de costa externa ha sido de 36.74 m en el periodo de 1999-2013, es decir, una pérdida promedio de 2.64 m anuales. El máximo dato llega a los 78 m en este periodo, de la

zona centro y hacia el sur de la barra la mayoría de los datos es mayor a -30 m de retroceso en el periodo antes mencionado.

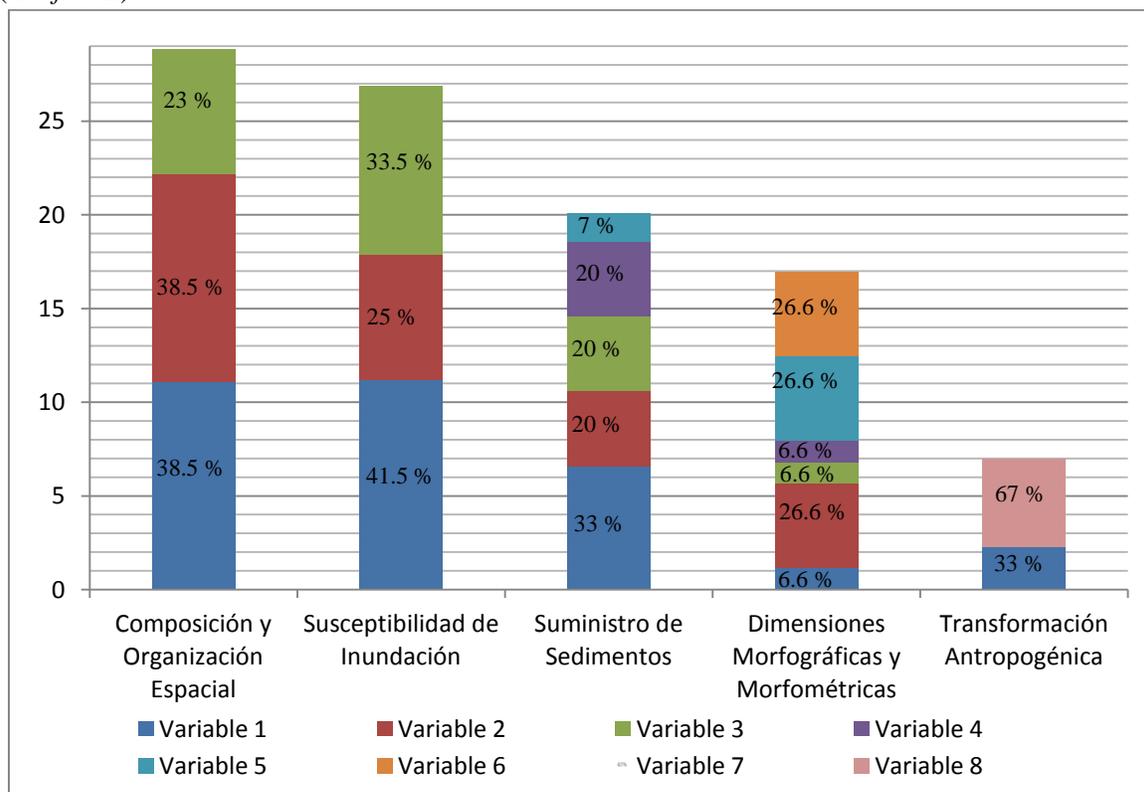
Tabla 15. Susceptibilidad de inundación por efectos de ascenso del nivel del mar.

VARIABLES	VALORES	GRADO DE VULNERABILIDAD
5.1 Perímetro en contacto con cuerpos de agua (%).	100%	Muy Alta-5
5.2 Porcentaje de superficie con vegetación inundada.	48%	Moderada-3
5.3 Retroceso de la línea de costa en metros/año	2.6	Alta-4

3.1.2.6 Jerarquía de los grupos de variables de la Barra Los Americanos.

En la barra Los Americanos el mayor peso lo obtienen la composición y organización espacial con el 29% del peso, las variables más representativas de este grupo son el tipo de barrera y los materiales conformadores. El siguiente grupo es la susceptibilidad de inundación con un 27% del peso y la variable más importante es el retroceso de la línea de costa.

El tercer grupo es el suministro de sedimentos con el 20% del peso; las dimensiones morfográficas tienen el 17% del peso y obviamente la asimilación antrópica es la variable con menor peso (7%) (Gráfica 2).



Gráfica 2. Orden jerárquico de los grupos de variables de acuerdo a la vulnerabilidad que generan a la barra Los Americanos. En el grupo de transformación antropogénica, solo se muestran 2 variables, ya que el resto no representan vulnerabilidad para ésta barra.

3.1.3 Tercer sector. Barra Jesús María.

La barra Jesús María está orientada N-SW, está limitada al norte por la boca El Carrizal y al sur por la boca El Catán. La configuración de la costa externa es rectilínea, la costa interna es irregular debido a la serie de islas de post barrera y los abanicos de displayamiento.

En los primeros 7 km en dirección N-S, se ha formado una serie de cercenaduras y abanicos de displayamiento, al sur de esta zona la barra se configura accidentada y sinuosa. A partir de 16 km hacia el sur de la boca El Carrizal, se desarrollan varios abanicos de displayamiento, aproximadamente 14 abanicos, en algunos casos se encuentran separados y en otros se desarrollan en conjunto.

3.1.3.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos.

La distancia media de la barra Jesús María a los depocentros es de 91.2 km, en función del criterio de la metodología, el grado de vulnerabilidad es muy alto. El depocentro más cercano es el río San Fernando a 23.7 km, el río Bravo y el río Soto la Marina se encuentran a una distancia mayor, 102 y 148 km respectivamente.

La altura promedio de las dunas es de 1.6 m, que representan una vulnerabilidad alta. La mayoría del frente de dunas se encuentra cubierto por vegetación y en promedio tiene una anchura de 222 m, estas dos variables contrarrestan la vulnerabilidad de la poca altura de las dunas, ya que estas dos últimas son de vulnerabilidad muy baja y baja respectivamente.

De la longitud total de la barra el 87% es ocupado por dunas, representando una vulnerabilidad muy baja, ya que es el mismo porcentaje en el que los sedimentos se están movilizand.

Tabla 16. Suministro y almacenamiento de sedimentos, barra Jesús María.

Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
1.1 Distancia media a los depocentros (km)	91 km	Muy Alta-5
1.2 Altura promedio de las dunas internas parcialmente activas (m)	1.6 m	Alta-4
1.3 Superficie sin cobertura vegetal del total de la duna frontal (%)	-10%	Muy Baja-1
1.4 Anchura media de la franja frontal de dunas modeladas por la erosión eólica (m).	0.222 m	Baja-2
1.5 Franja de la duna frontal acumulativas con respecto a la longitud de la barra (%).	87%	Muy Baja-1

3.1.3.2 Dimensiones morfológicas y morfométricas de la barra.

La anchura promedio de la barra es de 862 m, esto significa que de ser perforada la vulnerabilidad es muy baja. La altura media es de 1 m, la máxima es de 3; por tal razón su vulnerabilidad es muy alta. La longitud promedio es de 48.5 km, lo que ayuda a la barra a adquirir mayores dimensiones, apuntando a una mayor consolidación.

La superficie total es de 38.9 km², al igual que la longitud, esta variable adquiere una vulnerabilidad muy baja, ya que es mayor el área en la que se pueden acumular sedimentos. La pendiente media de los flancos es de 1.3°, de acuerdo con los criterios es una planicie subhorizontal y de vulnerabilidad alta.

El índice de istmicidad es de 0.314 (vulnerabilidad alta), esto denota una gran susceptibilidad a la formación de estrechos, donde la erosión por el viento y oleaje remueven los sedimentos y los depositan en la laguna, lo que genera una debilidad en la estructura de la barra.

Tabla 17. Dimensiones morfológicas y morfométricas de la barra Jesús María.

VARIABLES	VALORES	GRADO DE VULNERABILIDAD
2.1 Anchura media (m).	862	Baja-2
2.2 Altura media (m).	1 m	Muy Alta-5
2.3 Longitud total (m).	48 500 m	Muy Baja-1
2.4 Superficie total (km ²).	38.9 km ²	Muy Baja-1
2.5 Pendiente media de los flancos.	1.32°	Alta-4
2.6 Índice de istmicidad.	0.314	Alta-4

3.1.3.3 Composición y organización espacial de las unidades de la barra.

La barra Jesús María es una isla libre, de vulnerabilidad muy alta. Está conformada principalmente por arenas finas que también tornan la barra muy vulnerable, debido a la poca estabilidad que tiene este material.

La vulnerabilidad por número de unidades es moderada; la barra cuenta con playa, dunas frontales y humedales dispuestos en las orillas, por lo que se infiere que la barra tiende a ser paisajísticamente homogénea.

Tabla 18. Composición y organización espacial de las unidades de la barra.

VARIABLES	CRITERIOS O INTERVALOS DE VALORES	GRADO DE VULNERABILIDAD
3.1 Tipo de barrera.	Barra libre o isla barrera	Muy Alta-5
3.2 Materiales conformadores de la barra.	Limos y arenas	Muy Alta-5
3.3 N° de unidades naturales.	3 unidades	Moderada-3

3.1.3.4 Transformación Antropogénica.

La barra Jesús María es uno de los sectores que no tiene ninguna expresión antrópica en su superficie, a excepción de la escollera que se construyó en el límite con la boca El Catán, la cuales de una vulnerabilidad muy alta, ya que propician la erosión en un lado de la barra ya que representan un obstáculo para los sedimentos, y posterior a la escollera se erosiona por refracción del oleaje.

Como antes ya se ha mencionado, no existe injerencia humana, así que no es ésta la razón por la que no se encuentre cubierta en más de un 50%, el grado de vulnerabilidad es bajo.

Tabla. 3.3.4 Transformación Antropogenética

Variables	Criterios o intervalos de valores	Grado de vulnerabilidad
4.1 Superficie de la Cobertura natural (%).	60-40%	Baja-2
4.2 Caminos en dirección longitudinal de la isla barrera.	Ausente	Sin Vulnerabilidad
4.3 Longitudes del camino paralelos a la línea de costa con respecto a la longitud total de la barrera (%).	Ausente	Sin Vulnerabilidad
4.4 Disposición de los caminos transversales.	Ausente	Sin Vulnerabilidad
4.5 Longitud de caminos transversales respecto a la anchura de la barra.	Ausente	Sin Vulnerabilidad
4.6 Localización de asentamientos humanos.	Ausente	Sin Vulnerabilidad
4.7 Superficie ocupada por asentamientos humanos respecto a la superficie de la barra.	Ausente	Sin Vulnerabilidad
4.8 Presencia de infraestructura portuaria.	Escolleras	Muy Alta-5

3.1.3.5 Susceptibilidad de inundación por efectos del ascenso del nivel del mar.

La barra Jesús María al ser una isla libre, su perímetro está totalmente rodeado por cuerpos de agua, derivando en una vulnerabilidad muy alta. El porcentaje de la superficie inundable es del 39%, significando vulnerabilidad moderada.

El retroceso de la línea de costa externa ha sido en promedio de 4 m anuales durante el periodo de 1999-2013, que otorga a la barra una vulnerabilidad muy alta; dentro de la zona de estudio este sector es el que tiene un mayor retroceso anual, más de la mitad de los datos son mayores a 50 m, el máximo dato es de 90 m (6.5 anuales) durante el periodo antes mencionado.

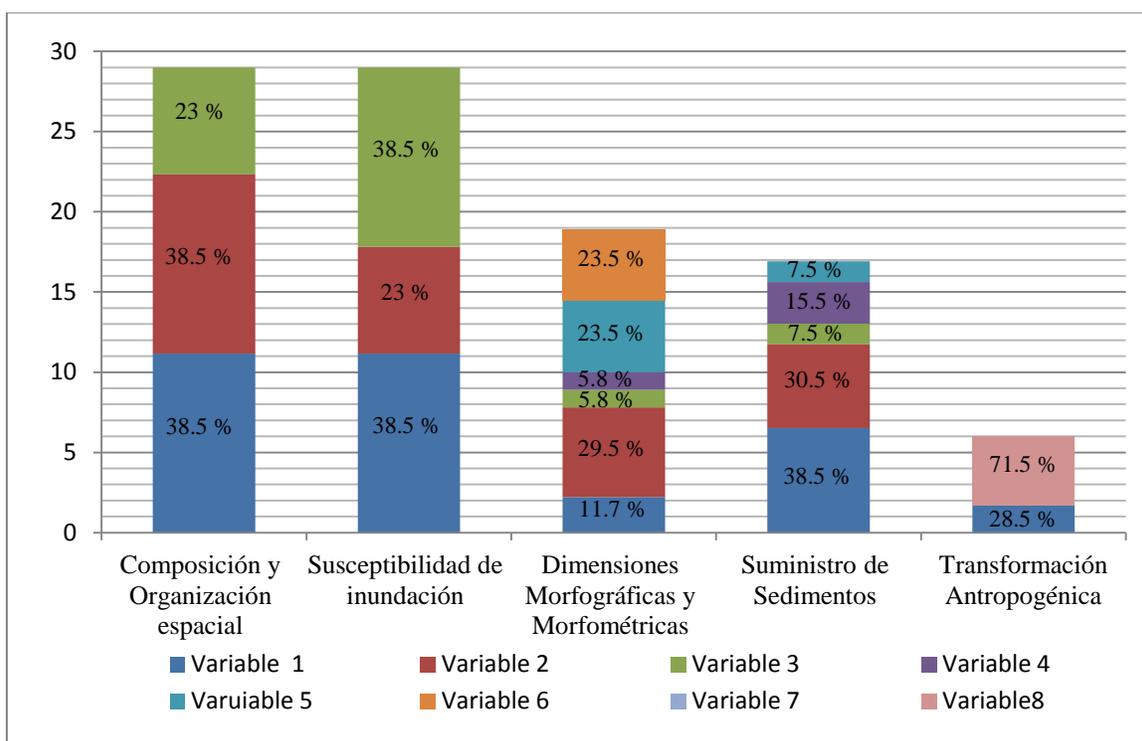
Tabla 20. Susceptibilidad de inundación por efecto del ascenso del nivel del mar.

Variables	Criterios o intervalos de valores	Grado de vulnerabilidad
5.1 Perímetro en contacto con cuerpos de agua (%).	100%	Muy Alta-5
5.2 Porcentaje de superficie con vegetación inundada.	39%	Moderada-3
5.3 Retroceso de la línea de costa en metros/año.	4 m/a	Muy Alta-5

3.1.3.6 Jerarquía de los grupos de variables de la Barra Jesús María.

En esta barra, los grupos de composición y organización espacial, y la susceptibilidad de inundación son los que representan la mayor vulnerabilidad, cada uno tiene el 29 % del peso. En conjunto representan el 58 % del peso total.

En tercer lugar se encuentra el grupo correspondiente a las dimensiones morfográficas y morfométricas, con un 19 %; le sigue el suministro y almacenamiento de sedimentos con un 17% del. Finalmente la transformación antropogénica representa solo el 6 %, ya que como se ha mencionado, no existe presencia de actividades humanas (Gráfica 3).



Gráfica 3. Orden jerárquico de los grupos de acuerdo al peso total por vulnerabilidad. También se muestra el orden jerárquico de cada variable.

3.1.4 Cuarto sector. Barra Santa Isabel.

La barra Santa Isabel está orientada N-SSW; está limitada por la boca El Catán y boca Santa Isabel. La configuración de la costa externa es rectilínea. La costa interna es sinuosa e irregular, en su porción norte con una serie de entrantes y salientes. En la porción sur hay algunas islas paralelas a la costa interna que posiblemente formaron parte de la barra.

3.1.4.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos.

La barra Santa Isabel se encuentra a una distancia media de los depocentros de 102 km; el más lejano es el río Bravo, mientras que el río San Fernando y Soto la Marina están a una distancia menor a 70 km; sin embargo, como en los casos anteriores, actualmente estos ríos ya no aportan la misma cantidad de sedimentos debido a la canalización por obras de derivación para riego.

Pese al aparente déficit de aporte de sedimentos, éste es contrarrestado por el aporte de material proveniente de la corriente de deriva, la cual en verano proviene del sur con una menor magnitud debido al oleaje generado por los Alisios, mientras que la deriva que proviene del norte es generada por las masas de viento polar, se traducen en una energía del oleaje con mayor capacidad para enviar una mayor cantidad de sedimentos, los cuales son acarreados desde Louisiana y Texas.

De este modo, los sedimentos que llegan a la barra son fuente importante para la formación de las dunas; en este sector la altura promedio de éstas es de 2 m; el dato máximo es de 4 m, lo que deriva en una vulnerabilidad alta. La superficie sin cobertura natural es del 10%, por lo que las dunas son semimóviles debido a la buena cobertura vegetal que se localiza en ellas, la estabilidad obtenida permite que su vulnerabilidad sea muy baja. La anchura media de dunas frontales modeladas por erosión eólica es de 356 m, lo que representa el 15% de la anchura de la barra, esto indica que por este parámetro las dunas son estables y de vulnerabilidad baja. Respecto a la longitud de la barra, el campo de dunas frontales ocupa el 99.7 %, esto resulta en una vulnerabilidad muy baja, ya que esta área representa la zona de acumulación de sedimentos.

Tabla 21. Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos.

Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
1.1 Distancia media a los depocentros (km).	102 km	Muy Alta-5
1.2 Altura promedio de las dunas internas parcialmente activas (m).	2.1 m	Alta-4
1.3 Superficie sin cobertura vegetal del total de la duna frontal (%).	10%	Muy Baja-1
1.4 Anchura media de la franja frontal de dunas modeladas por la erosión eólica (km).	0.356 m	Baja-2
1.5 Franja de la duna frontal con respecto a la longitud de la barra (%).	99.7	Muy Baja-1

3.1.4.2 Dimensiones morfológicas y morfométricas de la barra.

La anchura media de la barra (2324 m), su longitud (22.2 km) y la superficie (17.7 km²) otorgan a la barra una vulnerabilidad muy baja, a medida que sus dimensiones aumentan la capacidad de volumen y de retención de sedimentos también será mayor. Por otra parte, nos indica el desarrollo evolutivo, con una tendencia hacia la estabilidad y madurez, en sentido de que ha perdurado por más tiempo acumulándose.

Por otro lado, el resto de las variables como la altura (4 m), la pendiente de los flancos (< 1°) y el índice de istmicidad, propician una vulnerabilidad muy alta, ya que éstas indican que puede existir una gran posibilidad de que la barra se perforo o se fragmente, al constituir estrechos de estructura frágil.

Tabla 22. Dimensiones morfológicas y morfométricas.

Variabes	Criterios o intervalos de valores	Grado de vulnerabilidad
2.1 Anchura media (m).	2324 m	Muy Baja-1
2.2 Altura media (m).	4 m	Alta-4
2.3 Longitud total (m).	22 200 m	Muy Baja-1
2.4 Superficie total (km ²).	17.71 km ²	Muy Baja-1
2.5 Pendiente media de los flancos.	0.86°	Alta-4
2.6 Índice de istmicidad.	0.349	Alta-4

3.1.4.3 Composición y organización espacial de las unidades naturales de la barrera.

En este apartado se ha tratado de evaluar el desarrollo evolutivo de acuerdo con la diversidad paisajística con la que cuenta la barra Jesús María, resultando en un punto moderado ya que posee tres unidades naturales (playa, campo de dunas bajas estabilizadas por la vegetación y humedales dispuestos en las orillas); estas unidades brindan soporte y ayudan a la barra a contrarrestar la poca estabilidad que le otorgan sus materiales conformantes (arenas y cascajo conchífero) y ante la exposición de fragilidad de isla libre al estar limitada por bocas, en donde dicha configuración es más susceptible por el impacto de fenómenos hidrometeorológicos.

Tabla 23. Composición y organización espacial de las unidades naturales.

Variables	Criterios o intervalos de valores	Grado de vulnerabilidad
3.1 Tipo de barrera	Isla libre	Alta-4
3.2 Materiales conformadores de la barra.	Casajo conchífero Arenas	Moderada-3 Muy Alta-5
3.3 N° de unidades naturales	3 ambientes (playa, campo de dunas bajas estabilizadas por la vegetación y humedales dispuestos en la orilla interna)	Moderada-3

3.1.4.4 Transformación Antropogénica.

En la barra Santa Isabel no existen ni caminos ni poblados, por esta razón la vulnerabilidad es muy baja; la única expresión de carácter antropogénico es la construcción de dos escolleras que limitan los extremos de la barra (boca El Catán y boca Santa Isabel); éstas representan una vulnerabilidad muy alta por las modificaciones en el transporte de sedimentos, en algunos lados permite la sedimentación y en otros genera erosión.

El porcentaje de la superficie con vegetación demuestra que la perturbación por presencia antrópica es nula, la vegetación ocupa más del 60% de la cobertura total de la superficie de la barra. Las zonas que están sin vegetación, refieren más a zonas en las que se llevan a cabo procesos de acumulación/removilización de sedimentos y formación de dunas, por lo que estas áreas no representan perturbación.

Tabla.3.4.4 Transformación Antropogénica.

Variables	Criterios o intervalos de valores	Grado de vulnerabilidad
4.1 Superficie de la cobertura natural (%).	> 60	Muy baja-1
4.2 Caminos en dirección longitudinal de la isla barrera.	Ausentes	Sin Vulnerabilidad
4.3 Longitudes del camino paralelos a la línea de costa con respecto a la longitud total de la barrera (%).	Ausentes	Sin Vulnerabilidad
4.4 Disposición de los caminos transversales.	Ausentes	Sin Vulnerabilidad
4.5 Longitud de caminos transversales respecto a la anchura de la barra.	Ausentes	Sin Vulnerabilidad
4.6 Localización de asentamientos humanos.	Ausentes	Sin Vulnerabilidad
4.7 Superficie ocupada por asentamientos humanos respecto a la superficie de la barra.	Ausentes	Sin Vulnerabilidad
4.8 Presencia de infraestructura portuaria.	Escolleras	Muy Alta-5

3.1.4.5 Susceptibilidad de inundación por efectos de ascenso del nivel del mar.

El grado de vulnerabilidad por este grupo de procesos es moderado; solo se presenta una vulnerabilidad muy alta por el perímetro en contacto con el agua, ya que representa una mayor exposición al embate de fenómenos meteóricos que prevé que el agua del mar y la laguna desborden sobre la barra y la inunden. Muestra de ello es el porcentaje de superficie con vegetación inundable que es del 51 %.

Aunque, el perímetro de la barra Santa Isabel está totalmente en contacto con el agua y la mayor parte de la superficie con vegetación es inundable, el retroceso de la costa es el de menor magnitud con respecto al resto de las barreras. Los resultados son de un promedio de 0.54 m anuales de retroceso, durante el periodo 1999-2013, esto es un total de 7.6 m en este periodo de tiempo, con algunas excepciones en la zona sur, donde la medición realizada es del orden de 2.6 m anuales de retroceso.

De manera general la barra Santa Isabel es el sector con menor retroceso en toda el área de estudio, con un valor de 2.25 km², hay también sectores con progradación que se extienden avanzando sobre el mar con una superficie de 0.60 km², en un periodo de 14 años.

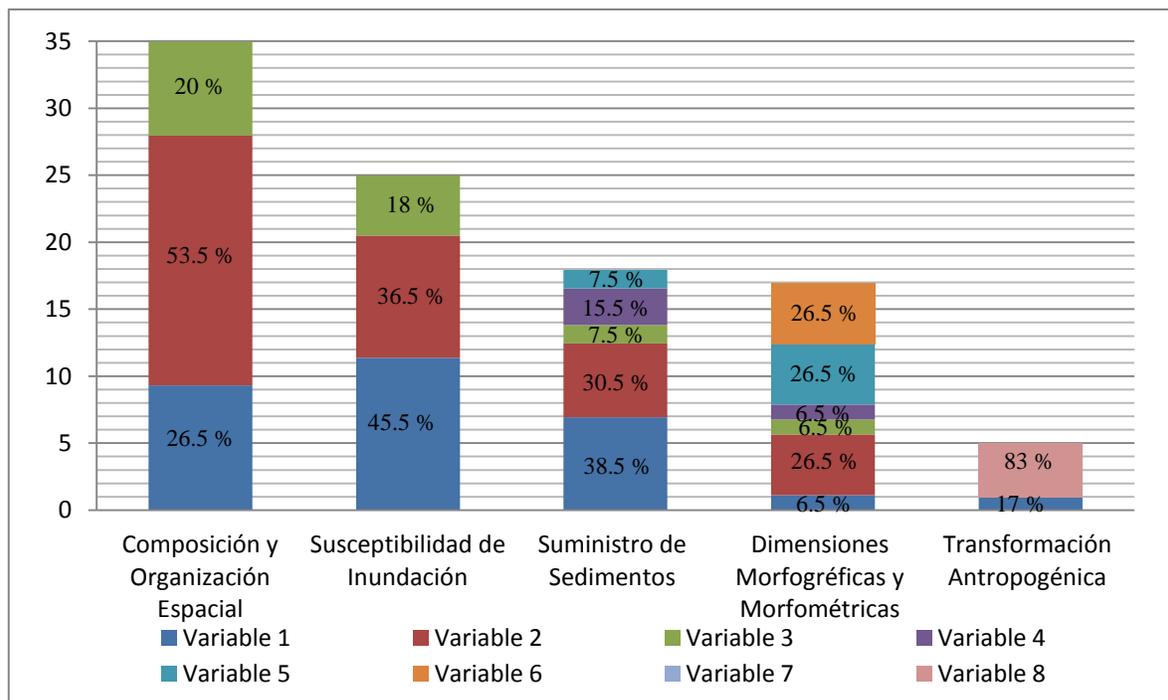
Tabla 25. Susceptibilidad de inundación por efectos del ascenso del nivel del mar.

Variables	Criterios o intervalos de valores	Grado de vulnerabilidad
5.1 Perímetro en contacto con cuerpos de agua (%).	100 %	Muy Alta-5
5.2 Porcentaje de superficie con vegetación inundada.	51%	Alta-4
5.3 Retroceso de la línea de costa en metros/año	0.545	Baja-2

3.1.4.6 Jerarquía de los grupos de variables de la barra Santa Isabel.

En la barra Sta. Isabel, el grupo más representativo es la composición y organización espacial con 35% del peso total, la variable más representativa son los materiales conformadores con el 53.5 %, seguido por el tipo de barrera con el 26.5 %. La susceptibilidad de inundación obtiene un 25% del peso.

El tercer lugar lo ocupa el suministro de sedimentos con el 18 % del peso. Las dimensiones morfológicas y morfométricas ocupan el cuarto sitio con un 17% del peso; por último se encuentra la asimilación territorial con el 5 % del peso total (gráfica 4).



Gráfica 4. Orden jerárquico de los grupos de variables de la barra Santa Isabel. Las variables del grupo "transformación antropogénica", no están representadas en la gráfica porque no generan vulnerabilidad en la barra, a excepción de la infraestructura portuaria y la superficie con vegetación.

3.1.5 Quinto sector. Barra Soto la Marina.

La costa externa de este sector es rectilínea, la orientación general de la barra es N-S y la porción interna de la laguna es de configuración irregular, debido a una serie de islas ancladas (tómbolos) que dejan entre sí pequeñas entrantes a manera de ensenadas y que son remanentes de lo que en algún momento pudo ser parte de la misma barra. En el extremo sur se reduce considerablemente su anchura, siendo los valores muy variables, entre 90 y 200 m.

3.1.5.1 Suministro y almacenamiento de sedimentos.

Los ríos son una fuente de sedimentos proveniente de la porción continental que suministran arena a las islas barrera. Sin embargo, por obras de irrigación, se han realizado derivaciones de canalización de los cursos, como consecuencia, ha disminuido el aporte. Además, al respecto, los ríos que pueden alimentar a la isla barrera se encuentran distribuidos a una distancia promedio de los depocentros de 115 km, el más cercano es el Río Soto la Marina a una distancia de 27 km, seguido por el río San Fernando a 97 km, y por último, el Río Bravo a más de 200 km de distancia. Estos ríos solo aportan sus escasos sedimentos en el temporal de lluvias pero, en compensación, son las corrientes de deriva que provienen del sur y del norte las que dejan mayor cantidad de sedimentos, sobre todo, la proveniente de la costa de Texas.

Los sedimentos además de ser materiales para la formación de la barra, contribuyen al desarrollo de las dunas. Éstas, en este sector, alcanzan una altura de 3 m en promedio y tiene una anchura media de 239 m, que representan el 38% de la extensión horizontal de la barra; y su longitud representa el 91 % del total de la longitud de la barra. En este caso en particular las dunas representan el área de acumulación y retención de sedimentos, ayudadas por la gran cantidad de vegetación que se desarrolla en ellas (90 %); la vegetación establecida favorece y refuerza a las dunas como un área de amortiguamiento ante tormentas.

Tabla 26. Suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos

Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
1.1 Distancia media a los depocentros (km)	115 km	Muy Alta-5
1.2 Altura promedio de las dunas internas parcialmente activas (m)	3.3 m	Moderada-3
1.3 Superficie sin cobertura vegetal del total de la duna frontal (%)	< 10%	Muy Baja-1
1.4 Anchura media de la franja frontal de dunas modeladas por la erosión eólica (km).	239	Baja-2
1.5 Franja de la duna frontal con respecto a la longitud de la barra.	91.5%	Muy Baja-1

3.1.5.2 Dimensiones morfológicas y morfométricas de la barra.

Las características morfométricas son importantes ya que, a mayores dimensiones, las barras tienen mayor posibilidad de acumular sedimentos. En este sentido esta barra tiene una vulnerabilidad muy baja ya que tiene una longitud de 55.9 km y una superficie total de 34.26 km²; sin embargo, esta capacidad para captar sedimentos se reduce, debido a la anchura de la barra que es solo de 617 m.

La altura promedio es de 6 m, que en conjunto con la pendiente media (2°-planicie ligeramente inclinada) contrarrestan el índice de istmicidad, el cual indica la tendencia de la barra para formar corredores de abrasión, cercenaduras o bocas; ya que la altura y la pendiente son una limitante para que el agua rebase la barra y que derive en la pérdida de sedimentos y en la fragmentación de la barra.

Tabla 27. Dimensiones morfológicas y morfométricas, barra Soto la Marina

Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
2.1 Anchura media (m).	617 m	Moderada-3
2.2 Altura media (m).	6 m	Moderada-3
2.3 Longitud total (m).	55 900 m	Muy Baja-1
2.4 Superficie total (km ²).	34.26 km ²	Muy Baja-1
2.5 Pendiente media de los flancos.	2.17°	Moderada-3
2.6 Índice de istmicidad.	0.277	Alta-4

3.1.5.3 Composición y organización espacial de las unidades naturales de la barrera.

Espacialmente, la barra Soto la Marina es una isla barrera (isla libre), conformada por arenas y cascajo conchífero. Ambas variables (tipo de barrera y materiales conformadores) le otorgan a la barra una vulnerabilidad muy alta, ya que al ser isla libre tiene una gran exposición a los procesos hidrodinámicos de la costa (corrientes de marea vientos, oleaje, mareas de tormenta), todo su perímetro está expuesto a la remoción de materiales, los cuales por otra parte no tienen una gran cohesión.

La vulnerabilidad dada por las características anteriores, puede ser mitigada con la estabilidad que le imparte el grado de desarrollo de la diversidad de las unidades naturales, ya que cuenta con playa, cordón frontal de dunas y humedales dispuestos en la orilla. Lo que sugiere que la barra se encuentra en un punto medio encaminado hacia una estabilidad, que se da por la heterogeneidad paisajística, además de indicar el desarrollo evolutivo que ha tenido este sector.

Tabla 28. Composición y organización espacial de las unidades naturales de la barrera.

Variables	Criterios o intervalos de valores	Grado de vulnerabilidad
3.1 Tipo de barrera	Isla libre	Muy Alta-5
3.2 Materiales conformadores de la barra.	Cascajo conchífero Arenas	Moderada-3 Muy Alta-5
3.3 N° de unidades naturales	3 unidades	Moderada-3

3.1.5.4 Transformación Antropogénica.

En la barra Soto la Marina la presencia humana está concentrada en el extremo sur de la misma, con límite del río Soto la Marina. Los caminos de terracería y brecha se extienden discretamente por la barra hacia el centro. Muestra de la poca presencia antrópica es la gran superficie que ocupa la vegetación, ubicada especialmente en la zona de dunas; la superficie que ocupa es del 80% aproximadamente.

Aunque los asentamientos humanos y caminos ocupan poco más del 3.5 % de la superficie total de la barra, su localización implica una vulnerabilidad alta para la barra, tal es el caso del centro recreativo/turístico que se ubica en la playa La Pesca, ha transformado el paisaje natural de la boca-barra por uno artificial (casas, restaurantes, infraestructura vial); además, están en el flanco de barlovento, lo que provoca una obstrucción al flujo de sedimentos, con la consecuencia de la pérdida de formación de dunas y vegetación. De hecho, en esa zona la vegetación original no existe y la vegetación nativa se ha recorrido en promedio 80 m hacia el interior de la barra, la formación de dunas embrionarias es muy escasa, y comprende solo algunas pequeñas formaciones aisladas de poca superficie y altura.

Los caminos longitudinales ocupan un 23 % respecto a la longitud total de la barra; se encuentran en los flancos de sotavento y barlovento, estos últimos son los que generan mayor vulnerabilidad, ya que representan una barrera física para el flujo de energía y materiales. Midiendo la longitud total de los caminos, se optó por dividir la longitud total de estos entre el número de vialidades cuyo resultado fue mayor a la anchura media de la barrera en un 118 %. Los caminos se disponen en la porción media y alta del flanco de sotavento, y, perpendicular del flanco de barlovento, estos caminos no interfieren con los flujos de energía, pero representan una posibilidad donde se formen corredores de abrasión, los caminos que son perpendiculares al flanco de barlovento y son los que dan mayor vulnerabilidad a la barra, ya que la seccionan de flanco a flanco.

Otras construcciones que se han llevado a cabo, son muelles y escolleras. Los muelles se ubican en la costa de la laguna y en la ribera del río Soto la Marina; propicia baja vulnerabilidad. Por el contrario, las escolleras se construyeron en las bocas, para garantizar que éstas no se cerraran y asegurar el intercambio de agua entre la laguna y el Golfo de México. Sin embargo, estas construcciones (escolleras), también modifican los procesos de transporte y depositación de sedimentos; en el lado norte de las escolleras existe acumulación de sedimentación mientras que en su lado sur hay erosión, aunada a la que se presenta por la difracción del oleaje que se origina en la zona posterior a la escollera (seno de escollera).

Tabla 29. Transformación Antropogénica.

Variables	Valores	Grado de vulnerabilidad
4.1 Superficie de la cobertura natural (%).	> 60%	Muy Baja-1
4.2 Caminos en dirección longitudinal de la isla barrera.	Baja sotavento Media y alta barlovento Baja de barlovento	Moderada-3 Alta-4 Muy Alta-5
4.3 Longitudes del camino paralelos a la línea de costa con respecto a la longitud total de la barrera (%).	23%	Baja-2
4.4 Disposición de los caminos transversales.	Media y alta de barlovento Perpendicular a barlovento	Alta-4 Muy Alta-5
4.5 Longitud de caminos transversales respecto a la anchura de la barra (%).	118%	Muy Alta-5
4.6 Localización de asentamientos humanos.	Sotavento Barlovento	Baja-2 Alta-4
4.7 Superficie ocupada por asentamientos humanos respecto a la superficie de la barra.	3.5%	Muy Baja-1
4.8 Presencia de infraestructura portuaria.	Muelles Escolleras	Baja-2 Muy Alta-5

3.1.5.5 Susceptibilidad de inundación por efectos del ascenso del nivel del mar.

Debido a su configuración como isla libre, todo su perímetro se encuentra en contacto con cuerpos de agua, por lo que es amplia la posibilidad de sufrir inundaciones de las zonas bajas. Una señal de esto, es que aproximadamente el 49 % de la vegetación se inunda con el incremento del nivel de la laguna en épocas de lluvias y tormentas.

Este sector es el que mayores datos de retroceso tiene, durante el periodo 1999-2013 ha sido de un total de 25 m o 1.8 m anuales. El 30% de los datos rebasa los 20 m en el periodo antes mencionado; el máximo dato es de 63.11 m y se ubica en la zona norte de la barra.

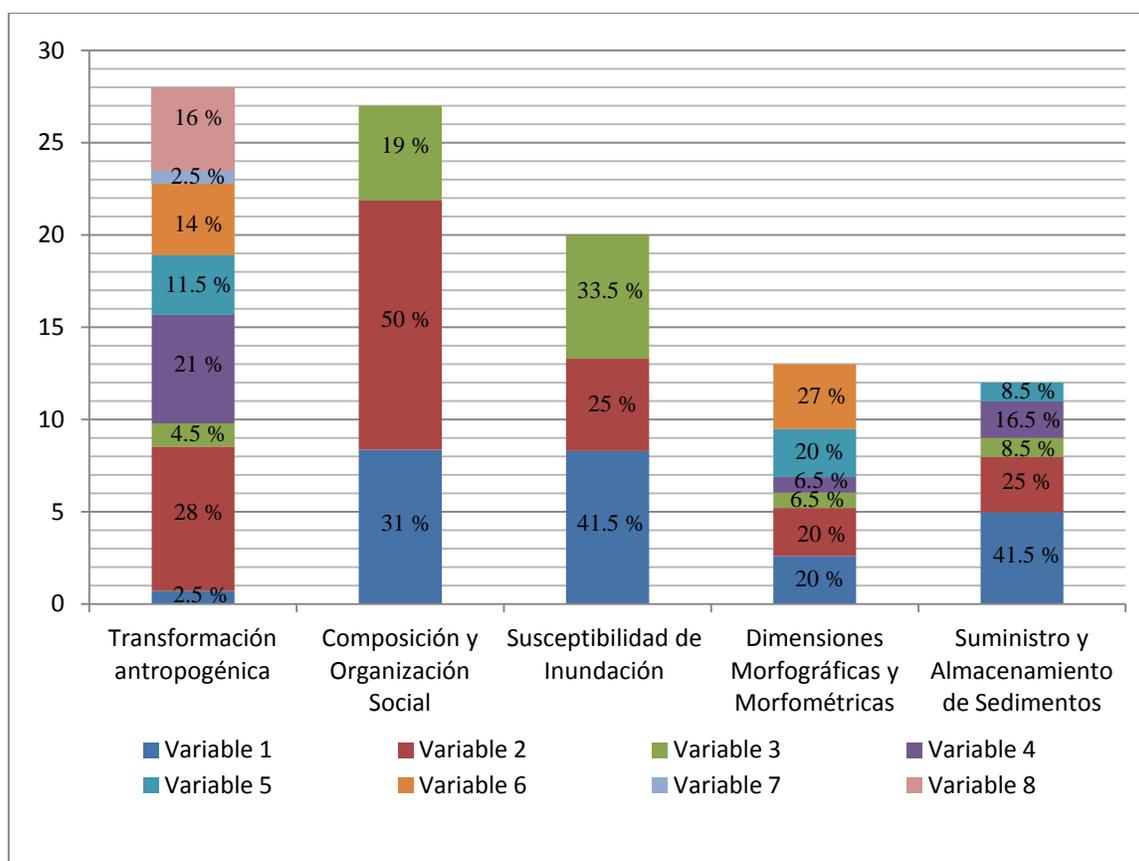
El área total que se perdió fue de 14.7 km² contra un ganancia de 0.4 km², durante el mismo periodo, por lo que el área real de retroceso es de 14.2 km², tomando en cuenta las costas interna y externa.

Tabla 30. Susceptibilidad de inundación por efecto del ascenso del nivel del mar.

Variables	Criterios o intervalos de valores	Grado de vulnerabilidad
5.1 Perímetro en contacto con cuerpos de agua (%).	100%	Muy Alta-5
5.2 Porcentaje de superficie con vegetación inundada.	49%	Moderada-3
5.3 Retroceso de la línea de costa en metros/año	1.8-25.27	Alta-4

3.1.5.6 Jerarquía de los grupos de variables de la barra Soto la Marina.

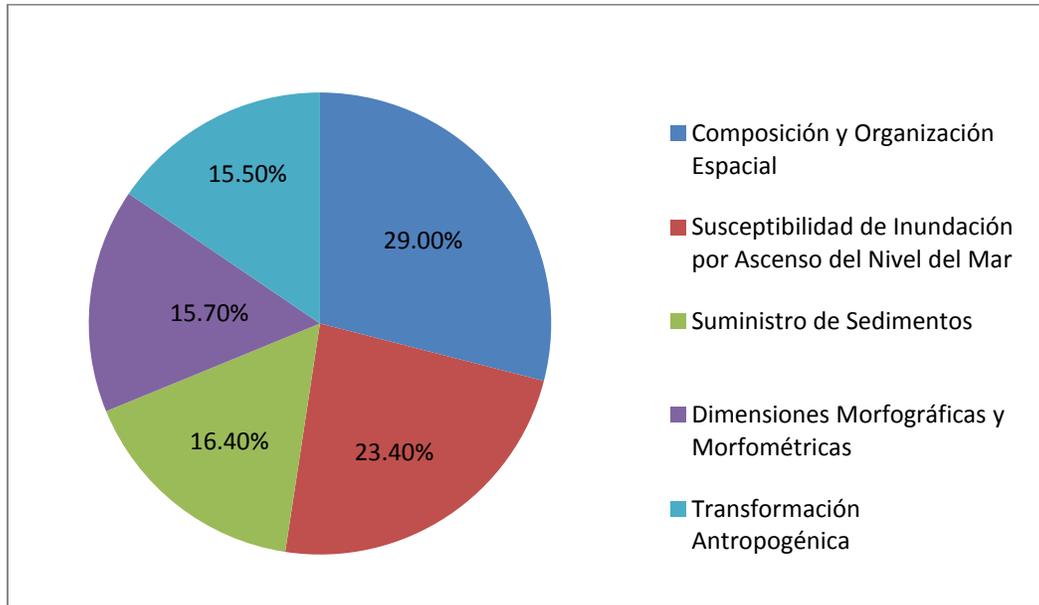
En la barra Soto la Marina la transformación antropogénica es la que ocupa el 28 % del peso total de los grupos; los caminos en dirección longitudinal ocupan el 28% de las variables seguido por los caminos transversales. El segundo grupo es la composición y organización espacial con el 27 % del peso, seguido por la susceptibilidad de inundación con el 20 % del peso. El cuarto lugar lo ocupan las dimensiones morfológicas y morfométricas con el 18 % del peso total; finalmente el suministro y almacenamiento de sedimentos arenosos es el que menor vulnerabilidad genera, éste grupo tiene el 12 % del peso (Gráfica 14).



Gráfica 5. Jerarquía de los grupos de variables de la barra Soto la Marina

CAPÍTULO 4. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.

De manera general el grupo que mayor vulnerabilidad representa en toda el área de estudio es la composición y organización espacial (29 %), seguida de la susceptibilidad de inundación por ascenso del nivel del mar (23.4 %), en tercer lugar está el de suministro de Sedimentos, el cuarto lugar lo ocupa el grupo de las Dimensiones Morfológicas y Morfométricas (15.7 %) y por último la Transformación Antropogénica (15.5 %), (gráfica 6).



Gráfica 6. Se muestran el porcentaje que ocupa cada grupo de variable, de acuerdo a la vulnerabilidad que generan en la Isla Barrera de manera general.

Como podemos observar en la gráfica anterior, los resultados son congruentes con la mayoría de las barras; es decir, para las barras Los Americanos, Jesús María y Santa Isabel, la composición y organización espacial, fue el grupo que generó mayor vulnerabilidad, mientras que la transformación antropogénica es el grupo menos relevante para éstas (Gráficas 2, 3,4). Sin embargo, para las barras San José y Soto la Marina, la transformación antropogénica fue el grupo más representativo; además, fueron las barras con un grado mayor de vulnerabilidad (tabla 31).

Tabla 31. Se muestran las barras ordenadas de mayor a menor, de acuerdo a su vulnerabilidad, a partir de los resultados de la metodología.

Jerarquía	Barra	Grado de vulnerabilidad
1°	Soto la Marina	3.8 Moderado
2°	San José	3.0 Moderado
3°	Jesús María	2.9 Bajo
4°	Los Americanos	2.9 Bajo
5°	Santa Isabel	2.8 Bajo

De acuerdo con los datos de la tabla 31, el grado de vulnerabilidad promedio de la Isla Barrera de la Laguna Madre es moderada, lo que indica que la barra ha tenido una evolución encaminada a la madurez y a la estabilidad.

Se puede decir que la Isla Barrera está en un estadio de mediana madurez evolutiva. Las fortalezas en todos los sectores son sus dimensiones, así como la heterogeneidad paisajística, que se traduce en una diversidad de fronteras naturales que fortalecen su estructura para confrontar, absorber y disipar la energía proveniente de fenómenos naturales que se presenten; además, estas fortalezas contrarrestan otras variables como la pendiente (en todos los sectores es muy suave), el índice de istmicidad, la altura, los materiales conformadores y el retroceso de la costa, que vulneran las barras sobre todo ante el aumento del nivel marino, que consecuentemente deriva en el desborde y avance de los cuerpos de agua (océano y laguna) sobre la barra durante tormentas.

Al observar la tabla 31, se observa que la barra San José es la segunda más vulnerable; este resultado se deriva de la interferencia de las actividades antrópicas que existen; sin embargo, lo que respecta a sus características físicas, ésta barra es la más estable y con mayores fortalezas (dimensiones y configuración espacial).

Por otro lado, las barras Los Americanos y Jesús María, se apreciaban como los sectores más vulnerables debido a la serie de abanicos de desplazamiento y cercenaduras que se aprecian; no obstante, aún y con estas características físicas el promedio de vulnerabilidad de estos dos sectores es bajo con tendencia a moderado. La barra Santa Isabel, tienen una tendencia similar a las barras anteriores; aunque, es la barra con menos longitud y se aprecia estrecha, la vegetación que se desarrolla ahí, le permite mantenerse estable y le brinda fortaleza.

La barra Soto la Marina, no se apreciaba como el sector más vulnerable, ya que pese a su estrechez se vislumbraba como un sector sin grandes tendencias a fragmentarse, además la vegetación de dunas propicia que estos campos fortalezcan su estructura y puedan entonces absorber y disipar la energía que pudiera debilitar a la barra. Sin embargo, al igual que en la barra San José, las actividades antrópicas generan que su vulnerabilidad sea la más alta. La ubicación y longitud de los caminos son las variables que mayor vulnerabilidad generan (en ambos casos barras San José y Soto la Marina), ya que, como se mencionó en el capítulo 2, representan barreras u obstáculos en el movimiento de materiales y energía, o representan una posibilidad para generar zonas bajas o corredores de abrasión, dependiendo de su extensión.

Si se omite la transformación antropogénica, podemos observar de manera más clara cuáles son las barras con mayor vulnerabilidad, de acuerdo a sus características físicas, y podemos apreciar el impacto que tienen las actividades humanas (tabla 32).

Tabla 32. Orden jerárquico de las barras, tomando solo en cuenta sus características físicas y dejando fuera la transformación antropogénica.

Jerarquía	Barra	Grado de vulnerabilidad
1°	Soto la Marina	3.5 Moderado
2°	Jesús María	3.5 Moderado
3°	Los Americanos	3.4 Bajo
4°	Santa Isabel	3.4 Bajo
5°	San José	2.9 Bajo

El retroceso de la costa es un indicador importante del aumento del nivel del mar (entre otros aspectos como la tectónica y los procesos de erosión). Los resultados al respecto en la Barrera de la Laguna Madre son muy variados; en general en el periodo de 1999-2013 la costa ha retrocedido y perdido un área total de 44.67 km² contra una ganancia de 27.83 km², esto es una pérdida de superficie de 3.19 km² contra 1.99 km² de ganancia anualmente. Ahora, si restamos “pérdida menos ganancia”, podemos observar que la pérdida neta es de 16.4 km² (1.2 km² por año).

Es importante hacer una comparación, tomando solo en cuenta el retroceso y avance de cada sector, para poder entender cuál es la interferencia real que generan las actividades humanas en los sectores. En la siguiente tabla se muestra, el orden jerárquico de los sectores de acuerdo con la pérdida de superficie respecto al balance entre avance y retroceso, durante el período 1999-2013 (tabla 33).

Tabla 33. Se ordenan jerárquicamente los sectores, de acuerdo al balance de pérdida y ganancia de superficie.

Jerarquía	Barra (Sector)	Retroceso costa externa (m/año)	Pérdida de 1999-2013 (km²).	Ganancia de 1999-2013 (km²).
1°	Soto la Marina (5° sector)	1.8	14.73	0.49
2°	Jesús María	4	9.80	3.56
3°	Santa Isabel	.5	2.25	0.60
4°	San José	2	9.53	7.14
5°	Los Americanos (2° sector)	2.6	8.34	16.03

Al comparar las tablas 32 y 33, podemos observar, que cada sector cambia de jerarquía al solo evaluarlos por la erosión y acumulación de las barras.

La barra Soto la Marina se mantiene en el primer lugar en las tablas 31, 31 y 33; con lo que se puede señalar como la barra más vulnerable. La pérdida neta derivada del retroceso menos el avance, es de 17.2 km², esto es proporcional al 50% de su superficie actual. El retroceso más importante está del lado de la laguna; es posible que sea a causa de la falta de sedimentos aportados por el río San Fernando y la escasa comunicación con el río Soto la Marina (mapa 10 anexo 1); el retroceso de la costa externa de la barra también es muy importante (del orden de 1.8 m).

Por otro lado, la barra de San José, en función de la pérdida de terreno emergido, se sitúa en el penúltimo lugar de acuerdo con la tabla 33, reconfirmando que las actividades antrópicas tienen una gran injerencia en la dinámica de la barra y la tornan vulnerable (tablas 31 y 32). Es difícil establecer la pérdida y la ganancia de superficie en el interior de la barra, debido a las amplias fluctuaciones del embalse lagunar existentes a lo largo del año; por ejemplo, en época de nortes tenemos un abatimiento del nivel del agua en la porción norte, mientras que existe una sobre-elevación del agua en la porción meridional, inundando las zonas bajas de los terrenos emergidos. Por tanto es difícil determinar si existe pérdida o ganancia, ya que también existe influencia de los vientos reinantes, que en gran parte del año provienen del N y NE, y solo en primavera y verano provienen del SE (mapa 6).

La barra Jesús María ocupa el segundo lugar en la tabla 33, ya que el área que retrocede la costa es mayor a la que gana, este dato es congruente con el retroceso de la costa externa, el cual es de

4 m/año. Es el sector con mayor retroceso en la zona de estudio (mapa 8 anexo 1). El área de pérdida de esta barra es de 6.24 km², lo que representa el 16% de su superficie actual (Tabla 6).

La barra Los Americanos es un caso interesante, ocupa el último lugar en la tabla 33 por área de retroceso, debido a que es el único sector en el que el retroceso es superado por el avance de la costa interna, asumiendo que no hay pérdida. Si comparamos el dato por área de retroceso en el que se ha tomado en cuenta todo el perímetro de la barra, con el de retroceso de la costa externa (2.6 m/año) el dato no es congruente, ya que el retroceso representa una vulnerabilidad alta, al observar el mapa de Los Americanos (mapa 7 anexo 1) se puede concluir que solo hay una removilización de los materiales hacia la parte interna de la barra, en este caso la pérdida de área o el retroceso, no representa erosión. Como ya se ha mencionado, la barra Los Americanos no tiene pérdida de superficie, por el contrario, de acuerdo con los datos de la tabla anterior 33 se puede observar que la barra ha ganado una superficie de 7.69 km² o un similar del 9 % de su superficie actual (Tabla 7).

Por último la barra Santa Isabel es el sector menos vulnerable, la regresión de la costa externa es el menor registro en toda el área de estudio (-0.5 m/año), pero por área de retroceso de todo el perímetro ocupa el tercer lugar. Hay cierta tendencia hacia el equilibrio entre el avance y el retroceso en la costa externa, de manera opuesta la zona interna de la barra tiende a retroceder (mapa 9 anexo 1). Este sector ha perdido un área total de 1.65 km², equiparado al 9.3% de su superficie actual (Tabla 6).

Tabla 34. Se muestran la pérdida neta de cada sector, derivado del balance avance-retroceso, y se refiere una equivalencia con su superficie. El caso de la barra San José, debe tomarse con ciertas reservas, ya que las variaciones representan cambios del nivel de las lagunas, más que un cambio por pérdida o ganancia de superficie.

Jerarquía	Barra	Retroceso real (km²)	Retroceso en función de la superficie (%)
1°	Soto la Marina	17.24	50.3%
2°	Jesús María	6.24	16%
3°	Santa Isabel	1.65	9.3%
4°	San José	<2.39	< 1%

Tabla 35. Se muestra la ganancia de superficie de la barra Los Americanos, la cual es resultado de la formación de abanicos de desplazamiento, lo que indica que es una ganancia de superficie, más no de material.

Jerarquía	Barra	Avance real (km²)	Avance en función de la superficie (%)
5°	Los Americanos	7.69	9%

4.1 El aumento del nivel marino y sus efectos en la costa de la isla barrera de la Laguna Madre.

Para Bird (1993), una de las primeras manifestaciones del ascenso del nivel del mar, son las inundaciones de tierras bajas en las costas y zonas deltaicas. Como son los casos de los campos de dunas inundadas de la Laguna Madre (figura 11).

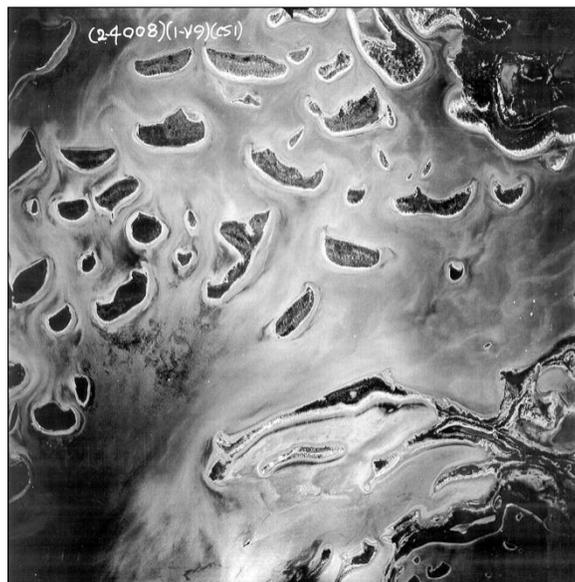


Figura 11. Antiguo campo de dunas en la Laguna Madre de Tamaulipas, inundado en las zonas más bajas por el aumento del nivel de la laguna. Fuente

La combinación del aumento del nivel marino y el rango de subsidencia son factores que favorecen la fragmentación de las islas barrera; además, la poca aportación de materiales recibida desde el continente, crea un déficit del volumen de sedimentos que conforma las islas barrera. De modo que, estarán expuestas a la misma cantidad e intensidad de energía proveniente del oleaje, mareas de tormenta, corrientes, huracanes y nortes; pero sin que cuenten éstas con la estructura para poder absorber estos fenómenos. De marea tal, que habrá una tendencia a que las barra se erosiones, perdiendo parte de su estructura espacial; esto es, de una forma consolidada a una forma efímera o en tránsito, perdiendo sus atributos de auto-regeneración. Ejemplo de lo anterior, son las barras Los Americanos y Jesús María, se han fragmentado y son inestables, formado grandes abanicos de desplajamiento, y al sur, las barras Soto la Marina y Sta. Isabel son evidentemente más delgadas, hecho que se atribuye a la reducción de sedimentos.

Si tomamos la tasa de aumento del nivel marino registrada para el sur de Padre Island de 3.44 mm/año (Montagna, s/f), que es la porción más cercana a la frontera y que pudiera ser similar por formar parte de los flancos del río Bravo, y el rango de subsidencia medido por Rona (1974) de 5mm en el delta del río Bravo y de 1 mm en la desembocadura del río Soto la Marina, se puede calcular un balance de 8.44 mm y de 4.44 mm de aumento del nivel del mar respectivamente.

Lo anterior nos indica que en 20 años el mar habrá aumentado 16 cm en la costa del delta del río Bravo y 8 cm en la desembocadura del río Soto la Marina sobre la Isla Barrera; lo que representa un

gran avance del mar en las barras, ya que la poca pendiente que tienen todos los sectores, le permite al mar una mayor zona de cobertura, ya que no existe la suficiente pendiente que mitigue o contrarreste su avance.

Generando el retroceso de la costa hacia el continente, a menos que el suministro de sedimentos sea lo suficientemente importante como para compensar el avance marino y la subsidencia; tal como ocurre en la costa externa de la Isla Barrera de la Laguna Madre, donde el aporte de sedimentos de la corriente de deriva que proviene de las costas de Louisiana y Texas (Norte) y la del sur que es de 2 o 3 meses (verano) proveniente del norte de Veracruz y sur de Tamaulipas, han logrado que el retroceso no sea tan significativo, aún y con los datos de subsidencia y de aumento del mar en el lugar.

El adelgazamiento de las barras, es un efecto más del aumento del nivel marino, con el avance del mar sobre la barra la orilla va retrocediendo, anteriormente ya se mencionaba que la costa externa está siendo compensada, sin embargo, la costa interna es la que ha sufrido mayores cambios en su configuración y en la que es posible observar claramente los efectos que ha tenido el aumento del mar. Sobre todo la barra Soto la Marina, que en su porción media y sur es considerablemente angosta.

FitzGerald (2008), mencionan que otra respuesta de las barras es la fragmentación de estas, y, la formación y ampliación de abanicos de displayamiento. Sin tomar en cuenta el primer sector todas las barras tienen abanicos de displayamiento, pero la barra Los Americanos en su porción sur se localizan los abanicos más grandes en el área. Es posible que estén relacionados con las bocas que anteriormente estuvieron abiertas (San Juan, San Rafael y Santa María) (Mapa 2).

La barra Jesús María también tiene abanicos de displayamiento, pero son de menor dimensión en comparación con los de la barra Los Americanos. Sin embargo, en su límite con la boca El Mezquital hay una gran zona de cercenaduras. De hecho, esta barra y Los Americanos anteriormente eran una sola, pero al momento de llevar a cabo esta tesis se encontraba separada por una boca de 100 m de ancho (boca El Mezquital) y al finalizar esta tesis (1 año) la boca se había azolvado.

Las bocas, cercenaduras y abanicos de displayamiento son importantes formas de acarreo de sedimentos hacia la laguna. Especialmente las bocas y cercenaduras permiten el intercambio de agua entre la laguna y el océano y, a través del refluo de los canales se permite el regreso de sedimentos hacia el océano. Este intercambio de agua y sedimentos es importante ya que, por un lado se evita la desecación de la laguna y por otro el azolvamiento de ésta por exceso de material (FitzGerald *et al.* 2008).

El aumento del nivel del mar no solo influye la costa de la barra, sino que también modifica la funcionalidad de las bocas. Van Goor (*et al.*, 2003 en FitzGerald *et al.* 2008), tomando en cuenta tres elementos (el refluo de las bocas, el canal de las bocas y la planicie interna de mareas) del modelo de equilibrio de sedimentos y un continuo suministro de arenas de las barras adyacentes, muestra que para un estudio hecho en AmelanderGat, el tamaño del canal se incrementó al igual que la tasa del aumento del nivel del mar, mientras que el volumen de arena contenida en el refluo de marea del delta y las planicies de marea decrecieron. Lo que sugiere una mayor posibilidad de desintegración de la barra y un posible azolvamiento de la laguna, ya que no se garantiza un buen funcionamiento en los canales de las bocas.

Hayes (1984, en Davis, 2013), ha clasificado la costa de barrera de acuerdo a la energía del oleaje, de mareas o ambos “energía mixta”. De acuerdo a estos modelos la zona de estudio se encuentra dominada por el oleaje (Figura 12). Con el aumento del nivel del mar, la fuerza del oleaje aumentara, lo que podrá ocasionar el desborde sobre la barra y la formación de más abanicos de desplajamiento de mayor dimensión. Consecuentemente, el acarreo de arena hacia la Laguna generará que el prisma de marea disminuya, y los sedimentos depositados que no puedan ser redistribuidos de nueva cuenta, contribuirán al azolve de ésta.

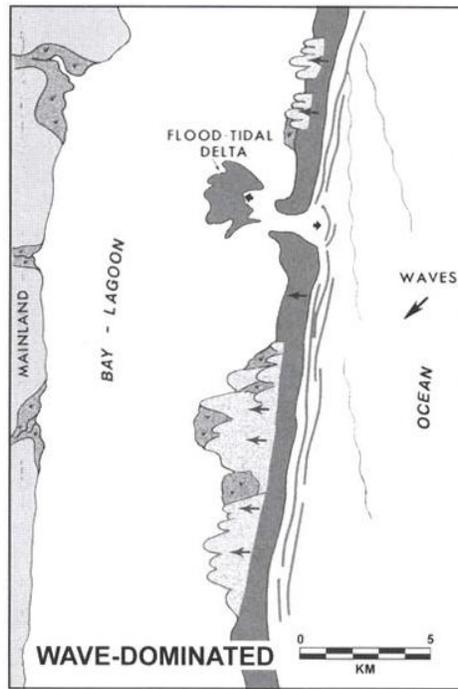


Figura 12. Modelado para las costas de barrera, se observan los abanicos de desplajamiento que se forman a causa del oleaje según Hayes (Davis, 2013).

4.2 Implicaciones por el aumento del nivel del mar (naturales y antrópicas).

El mar es un elemento y actor fundamental en las dinámicas de las costas de islas barrera ya que, en conjunto con otros elementos, logra formar un sistema que se ha adecuado a ciertas circunstancias en las cuales puede llevar a cabo su dinámica y funcionamiento.

Las consecuencias de este fenómeno (aumento del nivel del mar) son la erosión, las inundaciones, y, la salinización de tierras, aguas superficiales y del manto freático cercano que, a su vez, influyen en las características estructurales y en la distribución espacial de los ecosistemas asociados y, por otro lado, se altera la verdadera vocación original del uso del suelo, con efectos directos sobre la economía regional (Ortiz, 2007).

También conllevan a una serie de modificaciones en los ambientes naturales y antrópicos que se desarrollan en las costas, la principal es la necesidad de migrar. Tanto las especies naturales como actores sociales recurren al desplazamiento por no poder continuar su desarrollo en las nuevas condiciones o en situaciones drásticas (especialmente la flora) desaparecer del nuevo contexto y consecuentemente son sustituidas por otras especies.

La salinización de suelo y agua impacta en la estructura y composición de la vegetación que se desarrolla (vegetación de pantano y especies de dunas), mediante el remplazo de comunidades hidrófitas por la colonización de pastos halófitos, en detrimento de la capacidad agrológica de los suelos (Zavala, 1988; en Ortiz, 1994).

La vegetación de dunas por ejemplo, está adaptada para sobrevivir con agua dulce, salobre o del rocío existente; el agua salada la utilizan como el último recurso para sobrevivir y solo en condiciones extremas; en situaciones de inundación marina existe un gradiente de tolerancia durante la germinación, en algunas especies se logra, pero en otras especies no resultan tan tolerantes.

Además, se debe recordar que los suelos también han adquirido condiciones de salinidad, que igualmente afectan el crecimiento de vegetación, pero no todas las especies logran desarrollarse en estas condiciones, por este proceso de desertificación en el cual se va reconociendo un proceso de marchitamiento y muerte de la vegetación nativa (Ortiz, 1994).

Además de las especies vegetales, la fauna acuática de la laguna se ve afectada por el aumento de la concentración salina en el agua. Como en todos los procesos biológicos, la adaptación osmótica a las variaciones en la salinidad en el ambiente solo se produce para un rango determinado o umbral de tolerancia. Superados estos niveles, los procesos de regulación requieren mayores esfuerzos energéticos lo que conlleva, en primer lugar, a una disminución en el crecimiento, o en la disminución de otros procesos metabólicos (tasa de fotosíntesis, reproducción, etc.) seguido por un daño en los tejidos e incluso la muerte. La capacidad de tolerar mayores o menores modificaciones de la salinidad depende de adaptaciones genéticas a nivel de especie o fisiológicas a nivel de organismos o comunidades expuestas a ambientes con mayores fluctuaciones (Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, 2012).

En la Laguna Madre se llevan a cabo actividades económicas como la extracción de sal (ya que al ser una laguna hipersalina presenta >40 ‰, en las márgenes del embalse de fondo somero sujetas a una fuerte evaporación lo que permite el aprovechamiento de este ambiente para la explotación de salinas), pesca, pesca deportiva y cultivos de camarón (40 ppm 26 ppm), jaiba (35 ppm), ristras de

ostiones, langosta (26 g/L), bagre, tilapia (poca resistencia a la salinidad del agua), corvina (38 ppm) y encierro de pescados (CONANP, 2012).

Las personas involucradas en estas actividades han señalado tener problemas por el menor aporte de agua, azolve de humedales, erosión de playas y el aumento de la salinización de suelos por la actividad agrícola (Moreno Casasola, 2009) y por la hipersalinización de los cuerpos de agua (CONANP, 2012).

En un estudio hecho por Hildebranden 1958 (CIFSA, 1967), se describe que unos 1000 km² de la zona norte de la laguna, tenían concentraciones salinas tales, que las especies de pesca ya habían desaparecido, probablemente a causa de la temporada de estiaje. Como contraste, al sur de la laguna, no obstante las variadas condiciones de salinidad (41 a 47 ppm), presentaba zonas de pesca muy intensa.

La hipersalinidad afecta directamente a los peces por perturbación de su balance osmótico e indirectamente en el decrecimiento del oxígeno disuelto en el agua, especialmente durante el verano. Sin embargo, la mayoría de las especies encontradas en la Laguna Madre son eurihalinas y probablemente son más capaces de hacer frente a severas condiciones porque son capaces de osmoregularse en salinidades que varían de agua dulce hasta agua marina (Tunell y Judd, 2002).

CONCLUSIONES.

- Las tormentas, los Nortes y los huracanes parecen ser fenómenos significativos en las islas barrera, ya que vienen a retroalimentar los mecanismos de productividad natural, estableciendo un nuevo equilibrio con tasas de renovación de agua, disolución de sales, abatiendo la salinidad de suelos y agua; puesto que se restablece una nueva circulación de flujo de agua y sedimentos de la deriva litoral, instaurando condiciones de ambiente estuarino; después, este flujo de sedimentos se irá depositando en las barras a través de las playas, para edificar junto con los vientos las dunas, fortaleciendo la estructura de la Isla Barrera y favoreciendo la productividad biológica de las costas. De este modo, estos eventos extraordinarios forman parte de su misma existencia.

Por lo tanto, tanto la atribución que en un inicio se les hacía a las tormentas como los posibles responsables de las cercenaduras, puede ligarse más a las antiguas bocas que actualmente se encuentran cerradas, pero de las cuales pudieron quedar zonas de debilidad en las barras, en las que la fuerza del oleaje ha podido romper algunas partes de las barras.

- Aunque en general las islas barrera parecen ser estructuras débiles debido a su estrechez, poca altura, índice de istmicidad, etc.; poseen mecanismos de autorregulación (flexibilidad) estructural que les permite ceder ante tormentas y recuperarse en momentos de calma. Aunque los abanicos de desplazamiento representan zonas en las que los sedimentos han sido removidos hacia la laguna y podrían ser zonas de debilidad que permitan la fragmentación de la barra, de modo tal, también son un modo que la barra se extiende a manera de permitir que la energía generada por tormentas actúe y, posteriormente, el material sea de nueva cuenta depositado en la barra.

En toda la zona de estudio existen expresiones de lo que pueden ser relictos de antiguos abanicos de desplazamiento, que por lo que se percibe pudieron durar mucho tiempo y ser estabilizados por la vegetación cuando la Laguna Madre estuvo seca por varios años. En este sentido, la pérdida de área no significa erosión de la barra, es más la redistribución de los sedimentos en toda la barra; la erosión ira más en sentido de la pérdida total de volumen (material). Si los materiales son removidos a otros sectores de la barra, entonces sí existe pérdida de área, por lo tanto es erosión, llegando a la conclusión de que existe un retroceso paulatino del frente de la barra, pero mejor evidenciado en el litoral interno de la barra.

- Se puede reafirmar la gran influencia que generan las actividades humanas sobre el sistema de isla barrera. Las interferencias antrópicas quizá por sí mismas no son generadoras de vulnerabilidad, lo que sucede es que al interferir con la funcionalidad, dinámica y flujos de energía de los elementos de las barras, éstos no solo tienen que dirigir su energía a actuar como defensa, sino que además tienen que lograr reponerse a las trampas que representan las construcciones humanas, especialmente cuando estas instalaciones no son amigables con la funcionalidad de las barras.

Las poblaciones deben respetar la zona de amortiguamiento (posterior a la zona de dunas), ya que así el sistema de islas barrera puede funcionar correctamente y las poblaciones pueden aprovechar un servicio ambiental que les brinde protección ante embates meteorológicos.

No solo las construcciones hechas en las costas interfieren en las islas barrera, también las infraestructuras en los cauces de los ríos como presas, canalizaciones y derivaciones para riego, las cuales, como se ha mencionado reiteradamente, retienen sedimentos y agua; modificando la configuración física de la barra, y afectando los ecosistemas de humedales por un déficit de escurrimiento y material.

- El ascenso del nivel del mar por cambio climático es un fenómeno que impacta la configuración del sistema de isla barrera de la Laguna Madre, ya que ante la falta de sedimentos que retroalimenten a la barra, el aumento en los niveles del mar y de la laguna han comenzado a inundar las zonas bajas, resultando en el decrecimiento de las tierras emergidas de la costa externa pero, sobre todo, en la costa interna de la barra y en el margen continental, como evidencia de ello, ha quedado un campo de dunas inundados donde el embalse de la laguna ocupa los niveles más bajos de la topografía de las dunas.

La subsidencia diferencial en la costa de la Laguna Madre es un proceso importante, ya que éste determina que el aumento total oscile anualmente entre 8 mm para el ápice del delta y 4 mm para la porción distal de éste, debido al gran peso que genera la columna de aproximadamente 10 km de sedimentos que han sido acumulados; además, este proceso es catalizado por los pozos de agua para la agricultura.

- Haciendo un balance sintético de toda la costa de barrera de la Laguna Madre y del delta del Bravo, se observa la que barra San José (Norte) resulta ser la menos vulnerable y de mayor fortaleza estructural, debido a la gran cantidad de material que posee, como resultado de los depósitos de sedimentos que fueron acarreados por el río Bravo, lo que le ha permitido mantenerse estable ante fenómenos naturales que la acontecen; sin embargo, las actividades humanas generan una modificación moderada a través de la presencia de los asentamientos humanos (La Higuierillas y el centro turístico Playa Bagdad) y de actividades como la acuicultura y del aprovechamiento salino a través de parcelas de evaporación (eras) delimitadas por diques o bordos.

Por otro lado, las barras Los Americanos (centro-norte), Jesús María (centro) y Santa Isabel (centro-sur), son sectores que han logrado establecer mecanismos de autorregulación ante tormentas que pueden debilitar su estructura, ya que forman deltas de desplazamiento en momentos de tormenta y después recuperan su configuración en tiempos de calma. Además, son los sectores que no tienen ninguna presencia humana, permitiendo así que los servicios ambientales con los que cuentan, cumplan su función para consigo mismas y con los ambientes vecinos.

De modo contrario a los casos anteriores, la barra Soto la Marina es la más vulnerable, pues tiene los mayores valores de área perdida en un periodo de 14 años (14.7 km²); es posible que se deba a la falta de sedimentos provenientes del continente, además de la lejanía de

los ríos San Fernando y Bravo que, al momento de aportar sedimentos, no lograron ser capturados por esta barra. Otro factor importante para su vulnerabilidad, es la infraestructura antrópica que se ha construido, que al igual que en la barra San José no permite una correcta dinámica, y sí ocasionan perturbación en los sistemas de flujo y en su funcionamiento que se refleja en la disminución de su capacidad de autorregulación. Por tanto, existe una asimetría en la distribución de los patrones de estabilidad.

Bibliografía.

- Barrios, M. L. (2012). *Variaciones Morfodinámicas de la Costa Delática de Tabasco*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México, 154 pp.
- Bird, E. (2008). *Coastal geomorphology: an introduction*. 2nd edición. West Sussex, Inglaterra, John Wiley & Sons Ltd, 2000, 411 pp.
- Cardona, O. D. (2001). *La necesidad de repensar de manera holística los conceptos de vulnerabilidad y riesgo: Una crítica y una revisión necesaria para la gestión*. En: International Work-Conference on Vulnerability in Disaster Theory and Practice (Wageningen, Holanda, 29 y 30 junio del 2001). Disaster Studies of Wageningen University and Research Centre, Holanda.
- Ceia, F.R.; Patricio, J.; Marques, J. C; Días, J.A. (2010). *Coastal vulnerability in barrier islands: The high risk areas of the RiaFarmosa (Portugal) system*. *Ocean&Coastal Management*. (53), 478-486 pp.
- Compañía Ingenieril FluvioMarítima S.A (CIFSA). (1967). Estudio Preliminar para la Rehabilitación de la Laguna Madre de Tamaulipas, México. México
- Comisión Internacional de Límites y Aguas Internacionales entre México y los Estados Unidos, Sección mexicana (CILA). (2014). En <http://www.sre.gob.mx/cilanorte/>
- Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP). (2012). *Área de protección de flora y fauna laguna madre y delta del río Bravo*. Proyecto de programa de manejo. México.
- Cruz, M. (2012). *Variaciones Estacionales en la Línea de Costa Entre el Canal de Cuautla y el Estero de San Cristobal, Nayarit*. Tesis de Licenciatura, Facultad de Filosofía y Letras. UNAM. México, 142 pp.
- Davis, R.; Yale, K.; Pekala, J.; Hamilton, M. (2003). *Barrier island stratigraphy and Holocene history of west-central Florida*. *Marine Geology*, 03, 103-123pp.
- Davis, R.; FitzGerald, D. (2004). *Beaches and coasts*. 1st edición. Cowley Road, Oxford, UK: Blackwell Science, 2004, 419 pp.
- Davis, R. (2013). A new look at barrier-inlet morphodynamics. *Journal of Coastal Research*, 2(69), 1-12 pp.
- Derruau, M. (1966). *Geomorfología*. España, Ariel. 442 pp.

- Doody, J.P. (2008). *Saltmarsh Conservation, Management and Restoration*. Brampton, UK: Springer. (237 pp).
- Donoghue, J. F. (2011). *Sea level history of the northern Gulf of Mexico coast and sea level rise scenarios for the near future*. *Climatic Change*, 107, 17-33 pp.
- Feagin, R.; Smith, W.; Psuty, N.; Young, D.; Martínez, M.L.; Carter, G.; Lucas, K.; Gibeaut, J.; Gemma, J.; Koske, R. (2010). *Barrier Islands: Coupling anthropogenic stability with ecological sustainability*. *Journal Coastal Research*, 26 (6), 987-992 pp.
- FitzGerald, D.; Fenster, M.; Argow, B.; Buynevich, I. (2008). *Coastal impacts due to sea-level rise*. *Annual review of earth and planetary sciences*. (30), 601-647 pp.
- Gama, L.M. (2011). *Vulnerabilidad física de la zona costera de Tabasco ante la problemática de ascenso del nivel del mar: Tercer informe*. Gobierno del estado de Tabasco, Instituto Nacional de Ecología (INE), Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), Universidad Juárez Autónoma.
- Haslett, S. (2009). *Coastal system. (Routledge introduction to environment: Environmental science)*. 2nd edición. Londres y Nueva York: Taylor and Francis Group, 216 pp.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI). (1999). *Anuario estadístico y geográfico de Tamaulipas*. México, INEGI. 470 pp.
- Lampis, A. (2012). *Vulnerabilidad y adaptación al cambio climático: Debates acerca del concepto de vulnerabilidad y su medición*. *Revistacolombiana de Geografía*, 22 (2), 17-33 pp.
- Martínez, M.L.; Psuty, N.P. (2004). *Coastal dunes, ecology and conservation*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 388 pp.
- Mateo, J.M; Ortiz, M.A. (2001). *La degradación de los paisajes como concepción teórico-metodológica*. *Serie Varia*, 1, 9-40 pp.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente; Ministerio de Fomento; Gobierno de España; Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas. (2012). *Asistencia técnica en la evaluación de impacto ambiental de vertidos líquidos y de actuaciones en el medio marino: Umbrales de tolerancia al incremento de salinidad de diversas especies marinas*. Informe Técnico, Madrid.
- Montagna, P.; Gibeaut, J.; Tunell, J. (2007). *South Texas climate 2100: Coastal Impacts*. En: Norwine, J.; John, K. *The Changing Climate of South Texas 1900-2100: Problems and Prospects, Impacts and Implications* (155 pp.). Texas A&M University-Kingsville. EE.UU.
- Moreno-Casasola, P. (2009). *Elaboración de un Plan de Restauración Ecológica de Humedales y Playas y Dunas en el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna Madre y*

Delta del Río Bravo (APFFLMDRB), Tamaulipas. Ministerio Federal del Medio Ambiente, Protección al Ambiente y Seguridad Nuclear; Comisión Nacional de Áreas Naturales Protegidas (CONANP); Cooperación: Estados Unidos Mexicanos y República Federal de Alemania, 181 pp.

- Ortiz, M.A. (1994). Repercusiones del ascenso del nivel del mar en costas bajas de planicies deltaicas. *Geografía y Desarrollo*, 2:11, 69-72 pp.
- Ortiz, M.A.; Méndez, A.P. (1999). *Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar y sus implicaciones en las costas bajas del Golfo de México y mar Caribe*. Instituto de Geografía, 14 pp.
- Ortiz, M.A.; De la Lanza, G. (2006). *Diferenciación del espacio costero de México: un inventario regional*. 1st edición. México: UNAM, Instituto de Geografía, 138 pp.
- Ortiz, M.A. (2010). Clasificación ecogeográfica de cuencas hidrográficas: El caso de México. En: Cotler, H. *Las cuencas hidrográficas de México: Diagnóstico y priorización* (232 pp). 1st edición. Instituto Nacional de Ecología y cambio climático (INECC). México.
- Ortiz, M.A.; Sommer, I.; Oropeza, O. (2010). *Criterios para estimar la vulnerabilidad física de las costas de barrera ante los impactos hidrometeorológicos*. En: Rivera-Arriaga, E.; Azuz-Adeath, I.; Gual, L.; Villalobos-Zapata, G. *Cambio climático en México: Un enfoque costero y marino* (944 pp). Universidad Autónoma de Campeche, Cety-Universidad. Gobierno del Estado de Campeche. México.
- Pritchard, D.W. (1967). What is an estuary: Physical viewpoint. AAAS publication (83), 3-5 pp.
- Raper, S.C.B.; Wigley, T.M.L.; Warrick, R.A. (1996). Global sea-level rise: Past and future. En: Milliman, J.D.; Haq, B.U. *Sea-level rise and coastal subsidence: Causes, consequences and strategies* (370 pp). Netherlands, Kluwer Academic Publishers.
- Roman, C.; Burdick, D. (2012). *Tidal Marsh Restoration: A synthesis of science and management*.
- Rona, P.A. (1974). *Subsidence of Atlantic continental margins*. *Tectonophysics*, 22, 283-299 pp.
- Sauer, J. (1967). Geographic reconnaissance of seashore vegetation along the Mexican gulf coast. *Coastal Studies Series, Louisiana State University Studies* (21), 1-59 pp.
- Simms, A.; Lambeck, K.; Purcell, A., Anderson, J.; Rodríguez, A. (2007). *Sea-level history of the Gulf of Mexico since the last Glacial Maximum with implications for the melting history of the Laurentide Ice Sheet*. *Quaternary Science Reviews*, (26), 920-940 pp.
- *Síntesis Geográfica de Tamaulipas*. (1983). Instituto Nacional de Geografía y Estadística (INEGI). México. 158 pp.

- Servicio Meteorológico Nacional (SMN). (2014). En: http://smn.cna.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=12&Itemid=77
- Tunell, J.; Judd, F. (2002). *The Laguna Madre of Texas and Tamaulipas*. 1st edición. EE.UU, Texas A&M University Press. 346 pp.
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO); Comisión Oceanográfica Intergubernamental. (2010). *Aumento y variabilidad del nivel del mar: Resumen para responsables de políticas*. Francia. 7 pp.
- Unisys Weather. (2014). En <http://weather.unisys.com/hurricane/atlantic/index.php>
- Yañez, A.; Schlaepfer, C. (1968). *Composición y distribución de los sedimentos recientes de la Laguna Madre, Tamaulipas*. En: sedimentología de la Laguna Madre, México. Boletín del Instituto de Geología, UNAM (84). 5-44 pp.



Avance y retroceso de la línea de costa en la barra Soto la Marina

SIMBOLOGÍA

- Localidad
- Laguna Caja Pintada --- Rasgo hidrográfico
- Playa La Pesca --- Rasgo litoral
- Retroceso 1999-2013
- Avance 1999-2013

PARÁMETROS DE LA PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA

Proyección: Universal Transversa de Mercator
 Esferoide: GRS 80
 Datum: ITRF92 Escala aprox: 1:110,000

0 2,5 5 km

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Filosofía y Letras
 Colegio de Geografía

Elaboró: Evelyn Cuevas Cortes

Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community



Avance y retroceso de la línea de costa en la barra de San José

SIMBOLOGÍA

- Localidad
- Laguna Horcones --- Rasgo hidrográfico
- Playa Bagdad --- Rasgo litoral
- Retroceso 1999-2013
- Avance 1999-2013
- Cambios intermitentes

PARÁMETROS DE LA PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA

Proyección: Universal Transversa de Mercator

Esferoide: GRS 80

Datum: ITRF92 Escala aprox: 1:165,000

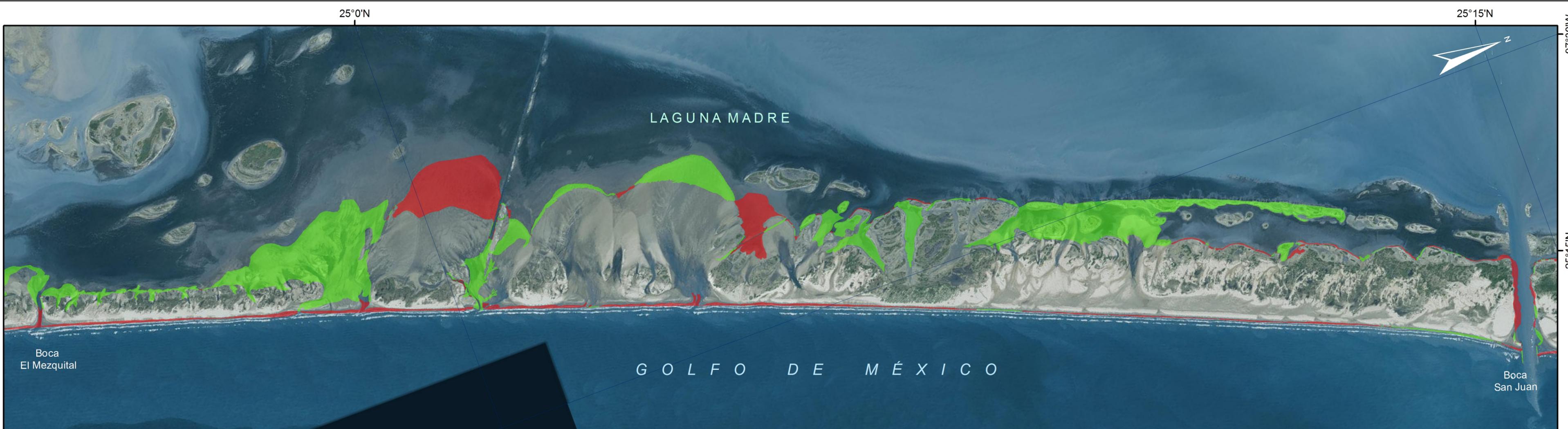
0 5 10 km

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Filosofía y Letras
Colegio de Geografía

Elaboró: Evelyn Cuevas Cortes

Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community



Avance y retroceso de la línea de costa en la barra Los Americanos

SIMBOLOGÍA

Laguna Madre --- Rasgo hidrográfico
● Retroceso 1999-2013
● Avance 1999-2013

PARÁMETROS DE LA PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA

Proyección: Universal Transversa de Mercator
 Esferoide: GRS 80
 Datum: ITRF92 Escala aprox: 1:77,000
 0 2,5 5 km

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
 Facultad de Filosofía y Letras
 Colegio de Geografía
 Elaboró: Evelyn Cuevas Cortes

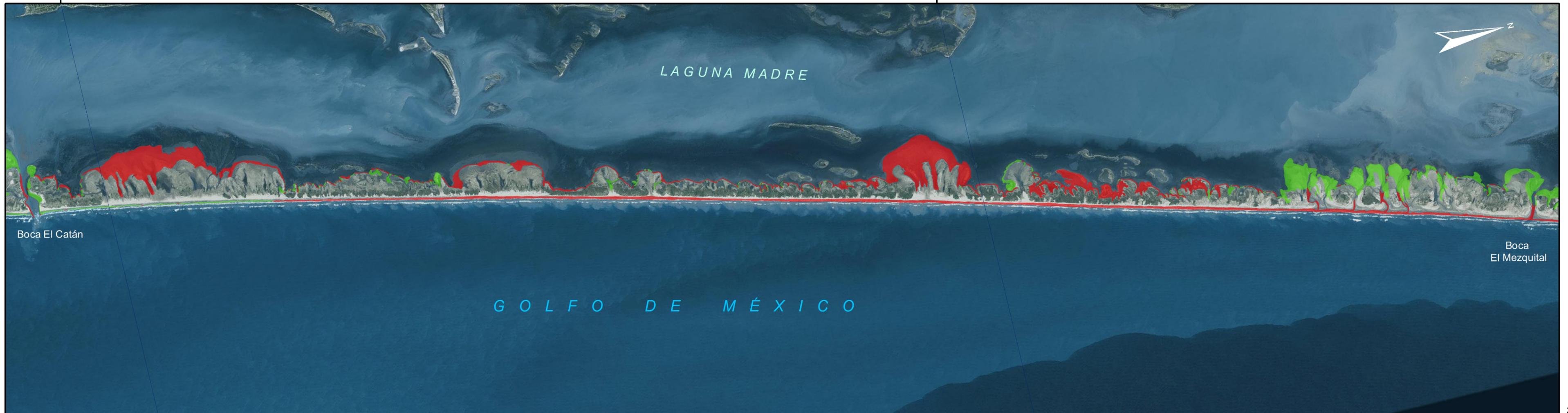
Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

97°30'W

25°0'N

24°30'N

24°45'N



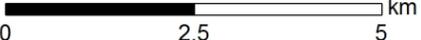
Avance y retroceso de la línea de costa en la barra Jesús María

SIMBOLOGÍA

 --- Rasgo hidrográfico
 Retroceso 1999-2013
 Avance 1999-2013

PARÁMETROS DE LA PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA

Proyección: Universal Transversa de Mercator
 Esferoide: GRS 80
 Datum: ITRF92 Escala aprox: 1:95,000

 km
 0 2,5 5

UNIVERSIDAD NACIONAL
 AUTÓNOMA DE MÉXICO
 Facultad de Filosofía y Letras
 Colegio de Geografía
 Elaboró: Evelyn Cuevas Cortes

Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

24°30'N

24°45'N

97°30'W



Avance y retroceso de la línea de costa en la barra Santa Isabel

SIMBOLOGÍA

Laguna Horcones --- Rasgo hidrográfico

● Retroceso 1999-2013

● Avance 1999-2013

PARÁMETROS DE LA PROYECCIÓN CARTOGRÁFICA

Proyección: Universal Transversa de Mercator

Esferoide: GRS 80

Datum: ITRF92

Escala aprox: 1:45,000

0 1 2 km

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Facultad de Filosofía y Letras
Colegio de Geografía

Elaboró: Evelyn Cuevas Cortes

Source: Esri, DigitalGlobe, GeoEye, i-cubed, Earthstar Geographics, CNES/Airbus DS, USDA, USGS, AEX, Getmapping, Aerogrid, IGN, IGP, swisstopo, and the GIS User Community

24°20'N

24°25'N