



INSTITUTO MEXICANO DEL TRANSPORTE

ESTUDIO DE LOS EFECTOS DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA LÍNEA DE PLAYA DEL PUERTO DE VERACRUZ, VER.

Karina Griselda Ocaña Espinosa de los Monteros
Rodolfo Ramírez Xicotencatl
Manuel Mendoza Grande
Etelberto Dionisio Serrano Flores
Dora Luz Ávila Arzani
Jonatan Omar González Moreno

Publicación Técnica No. 652
Sanfandila, Qro.
2021

ISSN 0188-7297

Esta publicación fue realizada en la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte, por la Dra. Karina Griselda Ocaña Espinosa de los Monteros y en coautoría de Ing. Rodolfo Ramírez Xicotencatl, M. en I. Manuel Mendoza Grande, Ing. María Dolores Servín Hugo, Oc. Etelberto Dionisio Serrano Flores, M. en I. Dora Luz Ávila Arzani., M. en I. Jonatan Omar González Moreno.

Esta publicación es el producto final del proyecto de investigación de iniciativa interna VI-02/17 “Investigación de los efectos del cambio climático en la línea de playa del puerto de Veracruz, Ver”.

Se agradece la colaboración en el estudio al Dr. José Miguel Montoya Rodríguez y del Oc. Camilo Sergio Rendón Valdez.

Contenido

	Página
Índice de figuras.....	v
Índice de tablas.....	ix
Sinopsis.....	xi
Abstract.....	xiii
Resumen Ejecutivo.....	xv
Introducción.....	1
1 Delimitación de la zona de estudio.....	3
2 Estado del arte.....	5
3 Proyecciones de los procesos costeros.....	55
4 Determinación de los impactos.....	83
Conclusiones.....	91
Bibliografía.....	93

Índice de figuras

	Página
Figura 1.1 Puerto de Veracruz, Ver.....	3
Figura 1.2 Zona norte de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver.	4
Figura 2.1 Líneas de investigación relacionadas con vulnerabilidad debida a los efectos del cambio climático.	6
Figura 2.2 Sub-líneas de investigación en el tema de mitigación relacionadas con cambio climático.....	7
Figura 2.3 Tendencia del nivel del mar en Alvarado, Ver.....	19
Figura 2.4 Tendencia del nivel del mar en Cd. del Carmen, Camp.....	19
Figura 2.5 Tendencia del nivel del mar en Cd. Madero, Tamps.....	20
Figura 2.6 Tendencia del nivel del mar en Coatzacoalcos, Ver.	20
Figura 2.7 Tendencia del nivel del mar en Progreso, Yuc.....	21
Figura 2.8 Tendencia del nivel del mar en Tuxpan, Ver.....	21
Figura 2.9 Tendencia del nivel del mar en Veracruz, Ver.....	22
Figura 2.10 Escenario de incremento del nivel del mar de 0.6 m para las costas de los estados de Veracruz y Tabasco.	25
Figura 2.11 Escenario de incremento del nivel del mar de 1 m para México. ...	26
Figura 2.12 Escenario de incremento del nivel del mar de 1 m (Región Golfo Norte).	27
Figura 2.13 Escenario de incremento del nivel del mar de 1 m (Región Golfo Sur).	27
Figura 2.14 Escenario de incremento del nivel del mar de 1 m para México. ...	28
Figura 2.15 Escenario de incremento del nivel del mar de 2 m para México. ...	29

Figura 2.16 Mapa que identifica las zonas de mayor vulnerabilidad relativa en los deltas costeros.....	32
Figura 2.17 Resumen de huracanes extremos en el Océano Atlántico.....	33
Figura 2.18 Representación del retroceso de la línea de playa	35
Figura 2.19 Representación de la respuesta de la playa al incremento del nivel del mar.....	40
Figura 2.20 Comparación de perfiles.	43
Figura 2.21 Esquema del modelo SBeach.....	44
Figura 2.22 Esquema del modelo Leont'yev.	46
Figura 2.23 Imagen del módulo B_retreat2 GUI.....	49
Figura 2.24 Cuadro de diálogo de entrada con escenarios de aumento del nivel del mar por default.	49
Figura 2.25 Ejemplo del cuadro de diálogo con los resultados del modelo de Edelman.....	50
Figura 2.26 Ejemplo de la ecuación que describe el retroceso de la línea de playa de acuerdo a los modelos seleccionados.....	50
Figura 2.27 Ejemplo de la impresión de un conjunto de resultados para diferentes modelos seleccionados.....	51
Figura 2.28 Ejemplo del cálculo del retroceso de la línea de playa para un escenario específico del incremento del nivel medio del mar.	51
Figura 3.1 Mapa del Atlas de Oleaje Oceánico en México del IMT.....	56
Figura 3.2 Localización del nodo GOL07MX, latitud 20° Norte, longitud 96° Oeste.	56
Figura 3.3 Instalación de equipo en embarcaciones para realización de batimetría y medición de corrientes en la zona de estudio.	59
Figura 3.4 Banco de nivel proporcionado por APIVER, con coordenadas conocidas.....	59
Figura 3.5 Traslado de cota de nivel con equipo GPS de alta precisión RTK del Banco de Nivel VZ-3, al parapeto del rompeolas Poniente.....	60
Figura 3.6 Levantamiento topográfico y de secciones transversales de playa en la zona Noroeste del rompeolas Poniente del nuevo puerto de Veracruz.	60

Figura 3.7 Levantamiento topográfico y secciones playeros en la zona Noroeste del rompeolas Poniente del nuevo puerto de Veracruz.....	60
Figura 3.8 Imagen del GPS de alta precisión (RTK) y VANT Inspire 2.	61
Figura 3.9 Línea de costa entre el puerto de Veracruz y la desembocadura del río La Antigua.	62
Figura 3.10 Orto Mosaico geo-referenciado con puntos de control RTK, del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz y de la playa Noroeste.....	62
Figura 3.11 Levantamiento de la línea de playa en la zona Noroeste del rompeolas Poniente de la ampliación del nuevo puerto de Veracruz, Ver.	64
Figura 3.12 Levantamiento de secciones transversales de playa en la zona Noroeste del rompeolas Poniente de la ampliación del nuevo puerto de Veracruz, Ver.....	64
Figura 3.13 Diagrama del sistema de información construido para el análisis de la vulnerabilidad a la que está expuesta la zona de estudio por el incremento del nivel medio del mar debido al cambio climático.	67
Figura 3.14 Estructura del SIG.....	68
Figura 3.15 Encabezado del SIG (logotipos de la SCT, del IMT y título del estudio.	68
Figura 3.16 Capa correspondiente a la batimetría.	69
Figura 3.17 Capa correspondiente a la topografía.	70
Figura 3.18 Capa correspondiente a los resultados del transporte litoral.....	70
Figura 3.19 Capa correspondiente a las líneas de playa históricas	71
Figura 3.20 Capa correspondiente a los resultados obtenidos del modelo Beach Retreat Estimator (Static Models).....	72
Figura 3.21 Capa correspondiente a la información de oleaje del nodo GOL07MX del ATLOOM.	72
Figura 3.22 Visualización del Sistema de Información Geográfica en archivo Geo PDF para el puerto de Veracruz, Ver.	73
Figura 3.23 Pendientes de los 257 perfiles de playa.....	75
Figura 3.24 Retroceso máximo de la línea de playa obtenido con el modelo Edelman para un incremento del nivel del mar de 2.0 m.	76

Figura 3.25 Retrocesos medios de la línea de playa para el perfil con pendiente de 1/52, localizado a una distancia de 8,150 m al Oeste del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver.....	76
Figura 3.26 Retrocesos medios de la línea de playa para el perfil con pendiente de 1/100, localizado a una distancia de 1,600 m al Oeste del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver.....	77
Figura 3.27 Retrocesos medios de la línea de playa para el perfil con pendiente de 1/50, localizado a una distancia de 2,300 m al Oeste del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver.....	77
Figura 3.28 Retrocesos medios de la línea de playa para el perfil con pendiente de 1/265, localizado a una distancia de 2,500 m al Oeste del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver.....	78
Figura 3.29 Retrocesos medios de la línea de playa obtenidos con los modelos dinámicos del Beach Retreat Estimator (Static Models).....	78
Figura 3.30 Ubicación de las secciones de control para el cálculo del transporte litoral.....	79
Figura 3.31 Gráficas de los escenarios de volúmenes de transporte litoral vs incrementos del nivel del mar (1).	80
Figura 3.32 Gráficas de los escenarios de volúmenes de transporte litoral vs incrementos del nivel del mar (2).	81
Figura 4.1 Retrocesos máximos de la playa obtenidos con los modelos estáticos del Beach Retreat Estimator.	87
Figura 4.2 Retrocesos mínimos de la playa obtenidos con los modelos estáticos del Beach Retreat Estimator.	88
Figura 4.3 Retrocesos promedio de la playa obtenidos con los modelos estáticos y dinámicos del Beach Retreat Estimator, donde la ecuación que se muestra en la gráfica define el retroceso promedio estimado en la línea de playa para la zona de estudio.....	89

Índice de tablas

	Página
Tabla 2.1 Líneas de investigación formal relacionadas con cambio climático...	6
Tabla 2.2 Temática de los proyectos relacionados con cambio climático en México.....	8
Tabla 2.3 Principales efectos del cambio climático en las zonas costeras.....	15
Tabla 2.4 Tendencias del nivel del mar para los sitios analizados en el Golfo de México.....	22
Tabla 2.5 Estados costeros más impactados, por el incremento en el nivel del mar de 0.6 m.	24
Tabla 2.6 Estados costeros más impactados, por el incremento en el nivel del mar de 1 m.	26
Tabla 2.7 Estados costeros más impactados, por el incremento en el nivel del mar de 1 m.	28
Tabla 2.8 Estados costeros más impactados, por el incremento en el nivel del mar de 2 m.	30
Tabla 2.9 Pronóstico de temperatura y precipitación para México y El Caribe, comprendida entre las coordenadas 10° a 30°N, 116 a 83°O.	30
Tabla 2.10 Población afectada ubicada en zonas impactadas por el incremento del nivel del mar de 1 m.	33
Tabla 2.11 Pronósticos de cambios en la precipitación y temperatura media para el estado de Veracruz para el año 2050.....	37
Tabla 2.12 Resumen de municipios que recibieron el impacto de huracanes y tormentas tropicales en el estado de Veracruz.	37
Tabla 3.1 Análisis de oleaje para el puerto de Veracruz, Ver.....	76
Tabla 3.2 Niveles de incremento del nivel medio del mar (m) utilizados en los escenarios para la modelación numérica en el puerto de Veracruz, Ver.	76
Tabla 4.1 Retrocesos máximos para la línea de playa.....	109

Tabla 4.2 Retrocesos mínimos para la línea de playa..... 110

Tabla 4.3 Retrocesos promedio de la línea de playa. 111

Sinopsis

El estudio se realizó una investigación del estado del arte relacionada con el cambio climático, los factores asociados de interés a la ingeniería costera y se investigaron metodologías que se utilizan para realizar pronósticos del retroceso de la línea de playa debido al incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático.

Se recopiló la información batimétrica, se realizaron trabajos de campo de secciones transversales y de la línea de playa en la zona Norte del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver.

Con esta información y los escenarios de incremento del nivel del mar y de oleaje, se seleccionó una metodología con la que se calculó el retroceso de la línea de playa, se calculó el transporte litoral y se recabó información de un modelo de elevación para la zona de estudio para construir un sistema de información geográfica donde se relacionaron los resultados que se obtuvieron y con ello se hicieron las conclusiones y recomendaciones para el presente estudio.

Abstract

The study was conducted as an investigation of the state of the art related to climate change, it were also included the associated factors of interest to coastal engineering and several methodologies that are used to forecast the retreat of the beach line due to the rise in sea level by effect of climate change. Additionally, bathymetric information was collected and field work was carried out on cross sections and on the beach line in the North zone of West breakwater of New Veracruz Port.

With this information and the scenarios of sea level and surge increase, a methodology was selected and the recoil of the beach line was calculated. Littoral transport was also calculated and a model of elevation to build a geographic information system for the area of study was chosen. On the model used, the results obtained were utilized to make the conclusions and recommendations for the present study.

Resumen ejecutivo

La presente publicación se realizó por iniciativa del personal de la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Costera del Instituto Mexicano del Transporte (IMT); con el objetivo de realizar un estudio sobre los efectos del cambio climático en la línea de playa del puerto de Veracruz, Ver.

La publicación consiste en realizar la caracterización del oleaje normal con los datos disponibles de la Red Nacional de Estaciones Oceanográficas y Meteorológicas (RENEOM) y del Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano (ATLOOM); se realizó una investigación del estado del arte relacionada con el cambio climático, los factores asociados de interés a la ingeniería costera y se investigaron metodologías que permite realizar pronósticos del retroceso de la línea de playa debido al incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático.

Se recopiló la información batimétrica, se realizaron trabajos de campo de secciones transversales y de la línea de playa de la zona Norte del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver.

Con la información recopilada se plantearon los escenarios de incremento del nivel del mar y de oleaje y se seleccionó una metodología con la que se calculó el retroceso de la línea de playa, se calculó el transporte litoral y se recabó información de un modelo de elevación para la zona de estudio para construir un sistema de información geográfica donde se relacionaron los resultados que se obtuvieron y con ello se hicieron las conclusiones y recomendaciones para la presente publicación.

Introducción

La publicación se realizó en base al protocolo de investigación ***“VI-02/17 Investigación de los efectos del cambio climático en la línea de playa del puerto de Veracruz, Ver.”***

En este trabajo de investigación se estudiaron los efectos del cambio climático en la línea de playa del puerto de Veracruz, Ver., mediante la realización de modelaciones numéricas de procesos costeros considerando varios escenarios del incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático, se puso especial atención a la caracterización de los siguientes procesos costeros de erosión de la playa.

- (i) Erosión de largo plazo, la cual se caracteriza por un retroceso irreversible de la posición de la línea de playa debido a un incremento en el nivel del mar y/o a un balance sedimentario costero negativo.
- (ii) Erosión de corto plazo, el cual se presenta principalmente por tormentas y el incremento de nivel debido a la marea de tormenta la cual puede no necesariamente representar un retroceso irreversible de la línea de playa, pero crea un deterioro a gran escala en un periodo de tiempo (temporal).

Con la presente publicación se lograron los siguientes objetivos:

- Se caracterizaron los efectos del incremento del nivel del mar debidos al efecto del cambio climático en la posición de la línea de playa y en los perfiles playeros.
- Se determinó el grado de la erosión de la playa y se analizó el riesgo de inundación con diferentes niveles de incremento del nivel del mar.

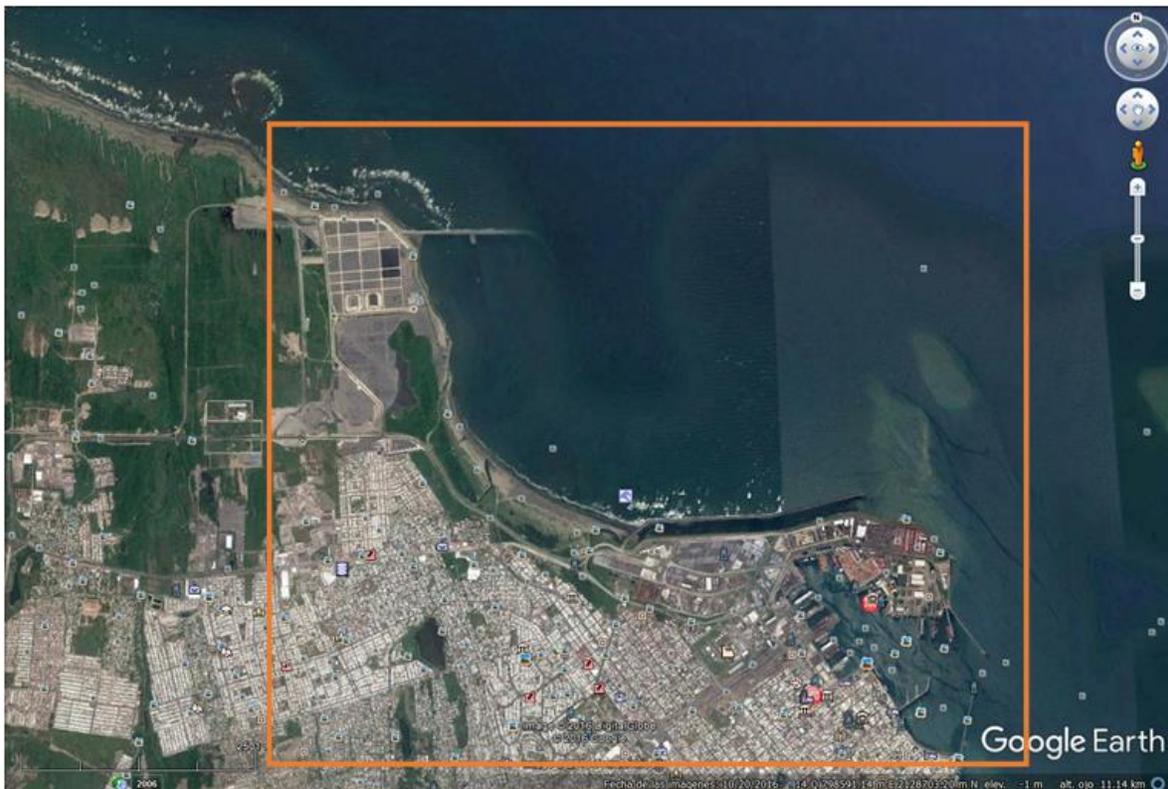
Para lograr los objetivos planteados, la presente publicación se realizó con los siguientes alcances:

- Se realizó una investigación del estado del arte del tema del incremento del nivel de mar, debido al efecto del cambio climático en México.
- Se determinaron en base a la investigación del estado del arte, los niveles del mar esperados por efecto de cambio climático en el sitio de estudio.
- Se estudiaron los efectos del incremento del nivel del mar en la posición de la línea de playa y de los perfiles playeros para el puerto de Veracruz, Ver.

- Se analizaron e interpretaron los resultados del estudio, y se establecieron las conclusiones y recomendaciones correspondientes.

1. Delimitación de la zona de estudio

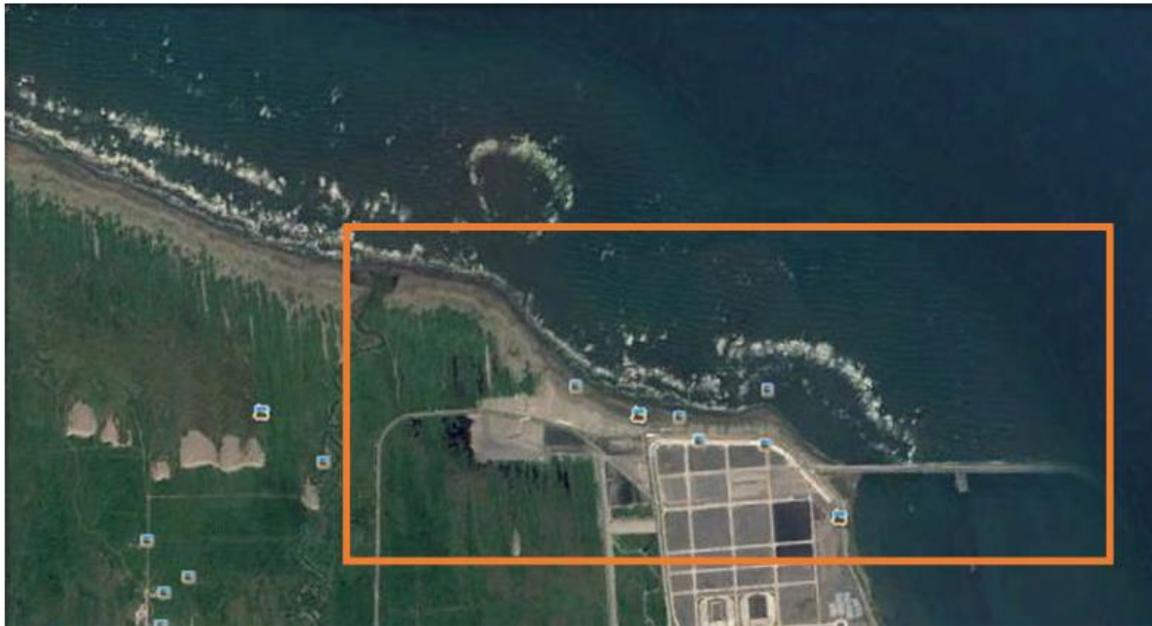
Se definió como caso de estudio el puerto de Veracruz (ver figura 1.1), en el cual se realizó la comparación de las condiciones en el estado actual y de los diferentes escenarios, tomando en cuenta el incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático.



Fuente: Google Earth, 2017

Figura 1.1 Puerto de Veracruz, Ver

Se definió como zona de estudio, el polígono ubicado al norte del conocido puerto de Veracruz en la zona de la Ampliación misma que se delimita por el río Medio y el rompeolas Poniente, como se puede observar en la figura 1.2.



Fuente imagen: Google Earth, 2017.

Figura 1.2 Zona norte de la Ampliación del Puerto de Veracruz, Ver

2. Estado del arte

Se realizó una investigación del estado del arte relacionado con el incremento del nivel del mar por efecto de cambio climático en México, también se investigó el estado del arte relacionado con diferentes parámetros y una metodología para el pronóstico de erosión ante los posibles escenarios de incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático (ver tabla 2.1).

Se pronostica que en los próximos 15 años el fenómeno del cambio climático tendrá severas repercusiones para los mercados turísticos del mundo, provocando una pérdida de entre 25% y 80% de visitantes al Caribe si la temperatura se eleva de dos a cuatro grados y de 10% si el incremento es de un grado. El aumento en la temperatura global provocará que habitantes de países con mayor emisión de turistas, se queden en su país a disfrutar de lo que habitualmente vienen a buscar al Caribe.

Existe evidencia científica que demuestra que el aumento de uno a dos grados en la temperatura del mar provocará que la intensidad de los huracanes crezca en 25%. "El océano ya tiene medio grado más de temperatura por los efectos del cambio climático, por lo que se espera una intensidad mayor y con ello problemas en zonas costeras, debido a que el océano es el que proporciona la energía a los huracanes" (Varillas, 2007).

En México, las principales preocupaciones con respecto al cambio climático son generar conocimientos que contribuyen a:

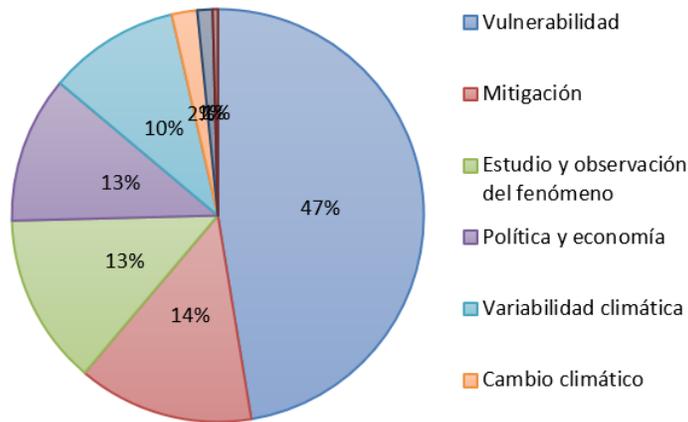
- Mitigar las emisiones de los gases de efecto invernadero.
- Determinar las zonas y actividades vulnerables en el país.
- Establecer las opciones de adaptación a los impactos ambientales, sociales y económicos generados por el cambio climático.

Tabla 2.1 Líneas de investigación formal relacionadas con cambio climático

Línea de interés de los contactos	Contactos	%
Contactos formales	253	100.0
Vulnerabilidad	120	47.4
Mitigación	35	13.8
Estudio y observación del fenómeno	34	13.4
Política y economía	29	11.5
Variabilidad climática	26	10.3
Cambio climático	5	2.0
Opciones de adaptación	3	1.2
Actividades de apoyo	1	0.4

Fuente: "Potencial de la investigación científica y tecnológica en materia de cambio climático en México" Secretaría de Investigación y Desarrollo de la UNAM.

En la figura 2.1 se puede observar estudios generales regionales relacionados con los impactos económicos y sociales del cambio climático, tomando en cuenta los efectos sobre los asentamientos humanos.



Fuente: "Potencial de la investigación científica y tecnológica en materia de cambio climático en México" Secretaría de Investigación y Desarrollo de la UNAM.

Figura 2.1 Líneas de investigación relacionadas con vulnerabilidad debida a los efectos del cambio climático

Vulnerabilidad

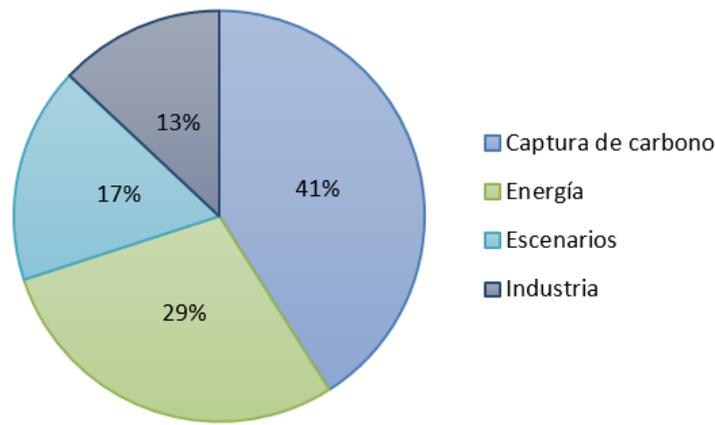
En México las líneas de investigación están directamente relacionadas con actividades productivas, donde se encuentran los estudios que tratan de determinar la forma en que el aumento en los niveles y temperatura del mar, y los cambios en las corrientes marinas, afectan la producción pesquera.

Se estudia la contaminación de las zonas costeras y los efectos del cambio climático en arrecifes y lagunas, de la misma manera existe el interés institucional en problemas de investigación de corriente principal (main stream) con efectos locales.

La vulnerabilidad de la biodiversidad, de los bosques y de los ecosistemas al cambio climático es otra de las líneas de investigación, donde la línea de indicadores se incluye también, ya que se incluyen índices globales de vegetación que podrían ser útiles en las tareas de conservación.

Mitigación

Con respecto a líneas de investigación relacionadas con la mitigación, se identifican sub-líneas de investigación que corresponden al desarrollo de escenarios de consumo de energía, el desarrollo de tecnologías de mitigación y la captura de carbono (ver figura 2.2).



Fuente: "Potencial de la investigación científica y tecnológica en materia de cambio climático en México" Secretaría de Investigación y Desarrollo de la UNAM.

Figura 2.2 Sub-líneas de investigación en el tema de mitigación relacionadas con cambio climático

Los esfuerzos de mitigación incluyen los trabajos relacionados con la captura de carbono, donde las investigaciones tienen que ver principalmente con proteger los bosques, regular el cambio de uso de suelo y difundir formas alternativas de desarrollo comunitario, el tema se relaciona directamente con los arrecifes coralinos y la forma en que la producción de carbono afecta a estos ecosistemas.

Estudio y observación del fenómeno

Esta línea de investigación incluye las observaciones directas o el desarrollo de metodologías e indicadores que demuestren la variación climática, la elaboración de los inventarios de emisiones de gases de efecto invernadero.

Política y economía

Las áreas sociales han dirigido su atención a la evaluación de los impactos de las alteraciones del cambio climático en sectores productivos como la agricultura y la pesca, la forma en que afectará los asentamientos humanos y la disponibilidad de

recursos como el agua. Con respecto a la política internacional de México, se trata de evaluar la posición nacional al fenómeno y a los compromisos internacionales adquiridos.

En México, los estudios realizados con respecto a cambio climático, se engloban en 20 temas (ver tabla 2.2), el principal interés se pone en ecología y biodiversidad con el 11.2%, seguido de una distribución más uniforme de otros temas como son: clima y atmósfera (8.8%), zonas costeras, (5.3%) y ENSO, 3.7%.

Tabla 2.2 Temática de los proyectos relacionados con cambio climático en México

Total de temas cultivados por los contactos		%
Ecología y biodiversidad	42	11.2
Clima y atmósfera	33	8.8
Economía	28	7.5
Aspectos sociales	27	7.2
Zonas marinas	26	6.9
Recursos hídricos	25	6.7
Bosques	21	5.6
Energía	20	5.3
Zonas costeras	20	5.3
Agricultura y ganadería	18	4.8
Zonas áridas	17	4.5
Salud	16	4.3
Industria y transporte	15	4.0
Aspectos urbanos	14	3.7
ENSO	14	3.7
Inventarios	14	3.7
Cambio climático general	12	3.2
Política internacional	7	1.9
Política nacional	5	1.3
Educación y capacitación	1	0.3
S U M A	375	100.0
Promedio de temas cultivados por contacto	1.5	

Nota. Los contactos cultivan más de un tema.

Fuente: "Potencial de la investigación científica y tecnológica en materia de cambio climático en México" Secretaría de Investigación y Desarrollo de la UNAM.

2.1 Cambio climático

El 6 de abril de 2007 se presentó en Bruselas, Bélgica la síntesis del Grupo de Trabajo II del Reporte de Evaluación **Cambio Climático 2007** del Panel Intergubernamental de Cambio Climático de Naciones Unidas (IPCC, siglas en

inglés), el cual es el segundo reporte del IPCC; el primero se presentó en febrero de 2006 en París y el tercero se llevó a cabo en Bangkok en 2008.

En su reporte regional científicos latinoamericanos entre ellos los de México, Costa Rica y Venezuela, presentaron sus principales hallazgos a nivel mundial, así como aquellos impactos regionales más relevantes para América Latina, en el reporte del Grupo II se evaluaron las investigaciones ambientales y socioeconómicas con respecto a los Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad ante el Cambio Climático.

Se realizó un análisis de cómo el cambio climático está afectando los sistemas naturales y humanos, cuáles podrían ser los impactos en el futuro y cómo la adaptación y la mitigación pueden reducir estos impactos. En el reporte se incluyeron capítulos sobre sistemas, sectores y regiones específicos para América Latina.

El Grupo de Trabajo I concluyó que *“La mayor parte del calentamiento global observado durante el siglo XX se debió muy probablemente (90% de confianza) al aumento en las concentraciones de gases de efecto invernadero causado por acciones humanas”*. En congruencia con lo anterior, el Grupo de Trabajo II concluyó que:

- En todos los continentes y en la mayoría de los océanos, un gran número de sistemas naturales han sido afectados por los cambios climáticos regionales, particularmente por los aumentos en la temperatura.
- La evidencia acumulada desde 1970 indica el calentamiento ha tenido una influencia indiscutible en muchos sistemas físicos y biológicos.

Cambios observados

Muchos de los sistemas hidrológicos se están afectando, tal como ha ocurrido con el calentamiento de lagos y ríos de muchas regiones, lo que afecta su estructura térmica y la calidad del agua que contienen. Se ha observado también un incremento en caudales y máximo de descargas en primavera de muchos ríos que se nutren de glaciares y nieve en esta estación.

También se tiene evidencia del incremento en el número de lagos glaciales, avalanchas de hielo y rocas en las regiones montañosas. Se observa que el calentamiento reciente ha ocasionado un grado de afectación importante en los sistemas biológicos, lo cual tiene efectos en un rango de especies y comunidades en ecosistemas terrestres, así como en sistemas marinos y de agua dulce.

Es importante destacar que hay una coincidencia espacial entre las regiones que han sufrido un calentamiento significativo y las regiones en donde se han observado mayores cambios en los sistemas físicos y biológicos. Los modelos que se han empleado para evaluar los impactos de estos cambios se aproximan en gran medida a los cambios que se han observado siempre y cuando toman en cuenta, además

de la variabilidad natural del clima, el grado de influencia de las actividades humanas al calentamiento global.

En los sistemas humanos los efectos del calentamiento global no se detectan tan directamente debido a otros factores no climáticos y a que se dan acciones de adaptación.

El aumento del nivel del mar y el desarrollo de asentamientos humanos en las costas están contribuyendo a la pérdida de humedales y manglares costeros y ha aumentado el daño por inundaciones costeras en muchas áreas.

En el reporte se encuentran evidencias con un alto nivel de certidumbre de que la sociedad ya percibe los costos de los efectos del cambio climático, lo anterior se presenta en forma desigual entre países, regiones y grupo socioeconómicos. La investigación determinó que en América Latina y el Caribe el costo por desastres o eventos extremos asociados a fenómenos climáticos como efecto del cambio climático, supera los 5 mil millones de dólares al año. Como ejemplo en el año 2005 se destacó como la estación ciclónica más fuerte en décadas y tuvo un impacto superior a los 5 mil millones de dólares sólo en México.

Impactos futuros

De las investigaciones realizadas por el Grupo de Trabajo I, se concluyó que las evaluaciones de los impactos del cambio climático en el futuro indican que serán afectados de manera importante las poblaciones humanas y el ambiente. En América Latina, como a nivel global, se observa que algunos sectores y sistemas son especialmente vulnerables:

- Es muy alta la probabilidad de que los recursos hídricos se verán disminuidos entre el 10% y 30% en regiones de latitudes medias y en la zona tropical húmeda y que en el transcurso de este siglo se reduzca el agua almacenada en los glaciares y nieve.
- Los ecosistemas experimentarán pérdida de especies (entre un 20% al 30% de las especies estudiadas en riesgo de extinción), así como reducciones en la biodiversidad y cambios en el rango.
- Si se presenta un aumento global menor a 3°C, es probable que la productividad agrícola se incremente en latitudes altas. En latitudes bajas, los decrementos en esta productividad se pueden dar aun con cambios locales de temperatura menores (entre 1-2°C. Si se presenta un aumento superior a los 3°C de incremento en la temperatura global, es probable que la productividad disminuya en la mayoría de las regiones del planeta.

Una de las principales amenazas para las zonas costeras es el incremento del nivel del mar, una forma de impacto es la pérdida del suelo costero y el incremento en el riesgo de inundación para las poblaciones que habitan esas zonas lo cual se prevé vaya aumentando hasta finales de siglo.

Entre los impactos específicos detectados en América Latina se destacan:

- A mediano plazo (mitad de siglo), la combinación del incremento de temperatura y los cambios en el uso del suelo provocarán cambios en la cobertura vegetal, por ejemplo, en las zonas semi-áridas habrá cambios a vegetación de tierras áridas, lo que se traduce en un riesgo de pérdidas en la biodiversidad regional y/o la posible extinción de especies, especialmente en las regiones tropicales.
- En climas secos el cambio climático provocará una salinización y desertificación de la tierra agrícola, con ello se pronostican disminuciones en la productividad de algunos cultivos y de la ganadería, sólo en algunas regiones templadas la productividad de ciertos cultivos como la soya tienen probabilidad de aumentar; el principal riesgo es la seguridad alimentaria.
- El incremento en las temperaturas de los océanos de la región tendrá efectos negativos en los arrecifes coralinos y en las pesquerías regionales.
- Los cambios que se pronostican en los patrones de lluvia, así como la probabilidad de desaparición de los glaciares, afectarán directamente la disponibilidad de agua para consumo humano, para la agricultura y para la generación de energía eléctrica, entre otros usos.

Las principales medidas de adaptación son, particularmente a través de la conservación de ecosistemas, el fortalecimiento de sistemas de alerta temprana, estrategias para mitigar los efectos de las sequías, inundaciones, el apoyo a los sistemas de salud y la mejora en el manejo de las zonas costeras. La efectividad de estas medidas es menor por la falta de información básica, sistemas de observación y monitoreo, el incremento de la pobreza, así como los asentamientos humanos en zonas altamente vulnerables, pero sobre todo a la falta de estrategias políticas, institucionales y tecnológicas adecuadas que estén adaptadas a cada región o zona en particular

En el futuro los impactos no serán sólo debido al cambio climático, el manejo y las medidas de adaptación y mitigación de las sociedades también serán un factor preponderante en la intensidad de dichos impactos, los cuales variarán por regiones, sin embargo, no hay duda de que a corto, mediano y largo plazo se generarán costos netos anuales los cuales se irán incrementando.

Pese a las medidas que se han implementado para mitigar los impactos del cambio climático, la capacidad adaptativa es muy limitada aún, existen factores poco controlados como por ejemplo las emisiones de gases de efecto invernadero los cuales no permiten que dichas estrategias sean más efectivas. La capacidad de adaptación se puede incrementar, pero hay ciertos costos y límites para lograrla. El hecho es que contar con una serie de medidas y estrategias de adaptación y mitigación puede disminuir los riesgos asociados con los efectos del cambio climático (IPCC, 2007).

2.2 Impacto, adaptación y vulnerabilidad ante el cambio climático

Vulnerabilidad

Las causas que además de las climáticas, contribuyen a aumentar la vulnerabilidad de los sistemas humanos son la presión demográfica, el crecimiento urbano sin planificación, la pobreza, la migración rural y la baja inversión en infraestructura y servicios, entre otros; los riesgos que la población enfrenta como enfermedades (infecciosas, transmisibles, crónicas y degenerativas) se suman a los riesgos de inundaciones y deslizamientos de tierra.

Uno de los más grandes problemas en las zonas costeras donde la población está más expuesta a los efectos del cambio climático es la pobreza urbana, en áreas donde están presentes la desnutrición, la baja calidad del agua, la falta de servicios sanitarios y de educación; existen otros factores que influyen en la vulnerabilidad como la sobre explotación de los recursos naturales, la deforestación y la pérdida de biodiversidad ya que el cambio climático incrementará la tasa actual de pérdida de especies en peligro de extinción.

Adaptación

Las medidas de adaptación como la gestión costera y ambiental, los cambios en el uso de la tierra, manejos sustentables, seguros agrícolas, riego suplementario y cambios en las técnicas culturales de los cultivos, se utilizan para enfrentar los efectos adversos del cambio climático.

La carencia de estrategias de adaptación para enfrentar eventos extremos y riesgos de inundaciones y sequías, se debe principalmente al reducido producto interno bruto, el incremento de la población asentada en áreas vulnerables, falta de políticas, así como de estructuras institucionales y tecnológicas preparadas para afrontar este tipo de problemáticas.

Impacto

Se pronostica que dentro de los efectos más adversos a los efectos del cambio climático por el incremento del nivel medio del mar son el incremento de las inundaciones y la erosión que tendrán un gran impacto sobre la población, los recursos y las actividades económicas, es probable que también se incremente el riesgo de incendios forestales, los asentamientos urbanos en zonas montañosas se verán afectados por avalanchas y torrentes de barro.

El crecimiento acelerado de la población en zonas urbanas contribuirá a la escasez de agua, sin acceso a servicios sanitarios, contaminación de las aguas

subterráneas, ocupación de valles inundables en época de sequía e impactos graves durante los periodos de inundación.

También se espera una disminución de la biodiversidad de las especies ante una variación en la temperatura. Las selvas y bosques probablemente se reemplazarán por ecosistemas con mayor resistencia a tensiones múltiples, ocasionadas por incrementos en las temperaturas, sequías e incendios, como en las sábanas tropicales. Los bosques de neblina (bosques húmedos de montaña) se encuentran en peligro si las temperaturas aumentan debido a cambios en la altitud de la base de las nubes durante la estación seca.

El efecto combinado del cambio climático y el cambio en el uso de suelo sobre la producción de alimentos y seguridad alimentaria está relacionado con una mayor degradación de las tierras y un cambio en los patrones de erosión. La demanda de agua para riego aumentará con un clima más cálido, acrecentando la competencia entre el uso doméstico, agrícola e industrial (IPCC, 2007).

2.3 Cambio climático en México

El cambio climático supone un importante factor adicional de desgaste de los sistemas ya afectados por una creciente demanda de recursos, por unas prácticas de gestión insostenibles y por la contaminación, que en muchos casos pueden ser de magnitud igual o mayor que con el cambio climático (IPCC, 1997).

La elevación del nivel del mar es probablemente el impacto antropogénico más importante del cambio climático en este siglo (Grinsted, *et al.*, 2009). El enfoque utilizado por el IPCC (Meehl, *et. al*, 2007), para estimar la elevación futura del nivel del mar, ha sido la de modelar sus dos principales componentes: la expansión térmica y la fusión del hielo.

El nivel del mar es una importante variable oceanográfica afectada por el cambio climático. De acuerdo con el Cuarto Informe de Evaluación del IPCC (2007), datos globales indican que en el periodo comprendido entre 1961 y 2003 el nivel del mar ha aumentado a una tasa promedio de 1.8 ± 0.5 mm/año. Estos datos muestran también que en el período 1993-2003 la tasa de incremento fue de 3.1 ± 0.7 mm/año, aunque no se sabe si el aumento en este último período es debido a oscilaciones naturales de escala decadal o si puede ser atribuido al cambio climático. Las estimaciones del siglo XX muestran que el nivel medio mundial del mar se elevó a una tasa de unos 1.7 mm/año.

Según el IPCC (2007) se esperan incrementos de nivel del mar de 18 cm a 59 cm a finales del siglo XXI. Lara (2008), menciona que un calentamiento de entre 1.5 y 5 °C significaría una posible subida del nivel del mar de entre 20 y 165 cm, lo que inundaría por completo zonas densamente pobladas del mundo y muchas ciudades

de nuestro país (Gallegos, et al., 2004). Otros autores han realizado estimaciones aún más críticas, en 1987, Titus cita a varios autores, los cuales mencionan que el nivel del mar puede subir 70 cm para el año 2080 y Hoffman, *et al.* (1983), estiman un ascenso del nivel del mar de 26 a 39 cm para 2025 y de 91 a 136 cm para 2075.

El aumento en el nivel del mar como resultado del calentamiento global, tendrá diferentes efectos ambientales sobre los sistemas costeros como tormentas, inundaciones, pérdida de humedales, de los efectos bio-geofísicos y sus interacciones.

Dichos efectos, tendrán además impactos socioeconómicos directos e indirectos sobre el turismo, los asentamientos humanos, la agricultura, el suministro, la cantidad y calidad de agua dulce, las pesquerías, así como los servicios financieros y de salud (McLean, *et al.*, 2001; Nicholls, 2002), afectando a la población residente. Habría también cambios en los bienes y servicios comercializados tales como las tierras, infraestructura urbana y la productividad agrícola e industrial.

Los efectos del cambio climático se reflejarán en la vulnerabilidad de los ecosistemas y a su capacidad de adaptación. Las zonas costeras caracterizadas por su diversidad y actividades socioeconómica se han visto afectadas por el rápido crecimiento de la población ya que ha crecido dos veces más rápido; se estima que actualmente más de la mitad de la población mundial habita en estos lugares, lo cual depende de cada país. El Panel de Observación de las Costas y los Océanos (COOP, por sus siglas en inglés) determinó que los bienes y servicios de los ecosistemas se concentran en la zona costera.

Aproximadamente, el 60 % de la población mundial vive en las zonas costeras (UNESCO, 2003), lo que las hace vulnerables a desastres naturales e impactos debidos a las actividades humanas y definitivamente al incremento del nivel medio del mar debido al calentamiento global.

El cambio climático afectará a las zonas costeras debido al incremento del nivel del mar, a un mayor riesgo de mareas por tormenta y a la posibilidad de aumento en la frecuencia e intensidad de los fenómenos meteorológicos. Las playas, dunas, estuarios y humedales cambiarán para adaptarse a los cambios de las condiciones hidro-meteorológicas (IPCC, 1997).

Tabla 2.3 Principales efectos del cambio climático en las zonas costeras

Factor climático	Dirección del cambio	Efectos biogeofísicos	
Temperatura superficial del mar	Aumento	Blanqueamiento de corales, migración de especies costeras, disminución de la incidencia del hielo en altas latitudes	
Intensidad de la precipitación/escorrentía superficial	Ciclo hidrológico intensificado con amplias variaciones regionales	Cambios en el Aportación de sedimentos fluviales, cambios en el riesgo de inundación en zonas costeras bajas	
Oleaje	Poco conocido, pero significativa variabilidad temporal y espacial esperada	Cambios e incrementos en los patrones de erosión costera, cambios en los impactos de oleaje por tormenta	
Intensidad de ciclones tropicales	Poco conocidos, significativa variabilidad temporal y espacial esperada	Cambios en la ocurrencia de inundaciones y daños por ciclones tropicales	
CO ₂ atmosférico	Aumento	Aumento en la productividad en ecosistemas costeros, disminución de los impactos de la saturación de CaCO ₃ en arrecifes coralinos	
Efectos biogeofísicos		Climáticos	No climáticos
Inundación y daños	Oleaje	Oleaje de tormenta, cambios morfológicos, Aportación de sedimentos	Aportación de sedimentos, manejo de inundaciones, adjudicación de tierras
	Efecto de arrastre	Escorrentía superficial	Manejo de cuencas y uso de la tierra
Pérdida de humedales		Fertilización con CO ₂ , Aportación de sedimentos	Aportación de sedimentos, espacio de migración, destrucción directa
Erosión		Aportación de sedimentos, Mareas y ciclones tropicales	Aportación de sedimentos
Intrusión de agua salada	Agua superficial	Escorrentía superficial	Manejo de cuencas y uso de la tierra
	Agua subterránea	Precipitación	Uso de la tierra, uso de acuíferos
Aumento de la capa freática		Precipitación	Uso de la tierra, uso de acuíferos

Fuente: INE, 2012

La tendencia es el incremento del nivel medio del mar por efecto del Cambio Climático; los principales efectos son inundaciones, intrusión de la cuña salina y erosión de las costas, pérdida de humedales, daño en dunas costeras como barrera contra las mareas y oleaje de tormenta y retroceso en la línea de playa.

Al incrementarse el nivel medio del mar aumenta la profundidad, lo que disminuye la fricción de fondo y aumenta el oleaje incidente, los cambios hidrológicos alterarían la distribución de nutrientes y de sedimento (Voice, *et al.*, 2006).

Se espera que el cambio climático altere en la variación interanual e interdecadal del clima, ocasionando que los fenómenos de El Niño y La Niña se presenten con mayor frecuencia e intensidad, así como, huracanes de mayor magnitud, cambio en los periodos de lluvia (Lara, 2008). Dichas alteraciones pueden provocar cambios en las zonas costeras, debido a la interdependencia e interconexión que existe entre los factores geológicos, físicos, químicos, climatológicos, biológicos de igual manera las zonas al irse adaptando a estos cambios y a los provocados por las actividades

antropogénicas, influirán en cambios de variables como la temperatura, niveles de oxígeno, nutrientes y salinidad, etc., lo que modificará todos los ciclos de todo tipo en las zonas costeras.

Otro aspecto muy importante es la circulación superficial oceánica, que influye directamente en los sistemas de corrientes marinas y afectan el equilibrio del agua dulce y agua salada alterando los procesos costeros (Hendry, 1993).

Autores como Ortiz y González (2008), determinaron que las zonas más vulnerables por el incremento del nivel medio del mar de 1 a 2 m, tanto en el Golfo de México como en el Mar Caribe, son la desembocadura del río Bravo, la laguna de Alvarado, la desembocadura del río Papaloapan; el sistema Grijalva-Mezcalapa-Usumacinta; la zona de los Petenes y las bahías de Sian Kaa'in, debido a la ubicación de la zona intermareal

Los ecosistemas más vulnerables son los humedales, que sirven de amortiguadores de oleaje y ambientales, la principal amenaza es la alteración del sistema hidrológico debido al incremento de construcción de infraestructura lo cual altera la hidrodinámica de la zona que se traduce en la desaparición de especies, parámetros fisicoquímicos y de calidad del agua, cambios en los nutrientes, etc.

2.4 Efectos del incremento del nivel medio del mar

Los efectos del incremento medio del nivel del mar por efectos de cambio climático son el aumento en la frecuencia de las inundaciones, cambios morfológicos, como erosión de las playas y reducción de las dunas. El incremento del nivel medio del mar que se espera a finales de este siglo es de aproximadamente 1m, los impactos que se pronostican alteraciones de oleaje, marea, marea por tormenta o la morfología costera.

El incremento de la temperatura por efecto de cambio climático, impacta en el desplazamiento de especies, mismo que se incrementa por la influencia de otras variables como la acidificación del mar.

Los efectos más importantes son inundación de zonas costeras, cambio en zona de humedales, erosión de la línea de costa, intrusión salina en estuarios y acuíferos, cambios en la composición y productividad de los ecosistemas, pérdida de biodiversidad, alteración del régimen de mareas, cambios en patrones de sedimentación, disminución de la penetración de la luz para organismos bentónicos, y los impactos socioeconómicos como el daño a la infraestructura costera entre muchos otros (Hernández, 2007; Estrada, 2001).

Desde el punto de vista socioeconómicos se pronostican los siguientes efectos:

- Pérdida directa de valores económicos, ecológicos, culturales y de subsistencia a causa de la pérdida de tierras, infraestructura y hábitats costeros.
- Aumento del riesgo de inundación para personas, tierras e infraestructura.
- Otros efectos relacionados con cambios en el manejo del agua, la salinidad y la actividad biológica, tales como la pérdida de turismo, la pérdida de hábitats costeros y los efectos en la agricultura y acuicultura.

En el estudio realizado para la “Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático” (INE/PNUD,2012), se generaron escenarios regionales del incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático así como de fenómenos hidro-meteorológicos extremos, en zonas costeras tomando en cuenta la configuración topográfica de los diferentes sitios; se analizaron los impactos de los fenómenos hidro-meteorológicos extremos, en los ecosistemas de las zonas costeras y los asentamientos humanos que los rodean; también se identificaron los deltas más vulnerables ante el incremento del nivel medio del mar.

Estas proyecciones que se obtuvieron de la investigación del estado del arte se muestran a continuación y son parte de la “Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático” (INE/PNUD,2012); se investigaron diferentes fuentes de información, se citan y replican en este informe, ya que se determinó que las proyecciones realizadas por esta fuente son las que para efecto de este estudio reflejan pronósticos con mayor certeza debido a los elementos que tomaron en cuenta para la construcción de los escenarios que se plantearon.

2.5 Proyecciones del incremento del nivel medio del mar en México

Observaciones del incremento del nivel del mar

Los cambios en el nivel medio del mar en un sitio son el resultado de la suma de una gran variedad de fenómenos, como la marea; los seiches¹, las corrientes costeras; los fenómenos meteorológicos como los nortes y los huracanes, fenómenos oceanográficos como *El Niño*, las variaciones interdecadales como por ejemplo, la oscilación decadal del Pacífico; también influyen fenómenos que se generan lejos de la zona de influencia, por ejemplo los tsunamis, los movimientos verticales de la corteza terrestre, los cambios en la presión atmosférica y en espacial el cambio del nivel medio del mar como efecto del cambio climático.

En el estudio de referencia, se presentaron estimaciones de las tendencias a largo plazo en el nivel del mar para 17 sitios de las costas mexicanas, considerando los promedios mensuales de las series de nivel del mar más largas del país a partir de los datos obtenidos por el Servicio Mareográfico Nacional (SMN)² de la UNAM, hay que tomar en cuenta que estas observaciones fueron limitadas por la longitud y la continuidad de las series de tiempo debido a los diversos factores que intervienen para la continuidad de los registros.

En la fuente de información, se realizó el análisis de las tendencias en el nivel del mar³ para 17 sitios en México, en las gráficas de las figuras 2.3 a la 2.9, se presentan las correspondientes a las proyecciones realizadas para costas en el Golfo de México. En éstas los promedios mensuales se indican con líneas azules, los promedios corridos de doce meses (o menos si no existen los datos de algunos meses) se muestran con una línea roja y los promedios de los años en que existen datos completos se indican con puntos negros. Es muy importante señalar que, en el reporte de la fuente de información seleccionada, destaca que los pronósticos de los datos de nivel del mar en México tuvieron tendencias similares a las proyecciones globales, adicionalmente se realizaron estimaciones de los ciclos anuales en 50 años de los sitios analizados (INE/PNUD,2012).

Notas:

¹ Es una onda estacionaria en un cuerpo de agua encerrado o parcialmente encerrado. Los seiches y los fenómenos relacionados a seiche se han observado en lagos, embalses, piletas, bahías, mares. La clave de requerimiento para formar un seiche es que tal cuerpo de agua esté al menos parcialmente delimitado, lo que permite la formación de la onda estacionaria.

² El SMN inició el monitoreo del nivel del mar en la década de los 40's (con series que datan de 1946), entre otras variables, es pionero en México, cuenta con mareógrafos, y bancos de nivel que han sido fundamentales para la georeferenciación, muchos de ellos utilizados por el INEGI para sus labores de cartografía del territorio nacional. Actualmente la UNAM mantiene, en colaboración con otras instituciones, 15 sitios de medición del nivel del mar, los cuales se encuentran en un proceso de modernización utilizando técnicas de telemetría y cómputo que permitirán conocer el estado de esta variable en tiempo real.

³ La metodología se muestra en el anexo A.1 de la Guía Metodológica que se utilizó como fuente de información.

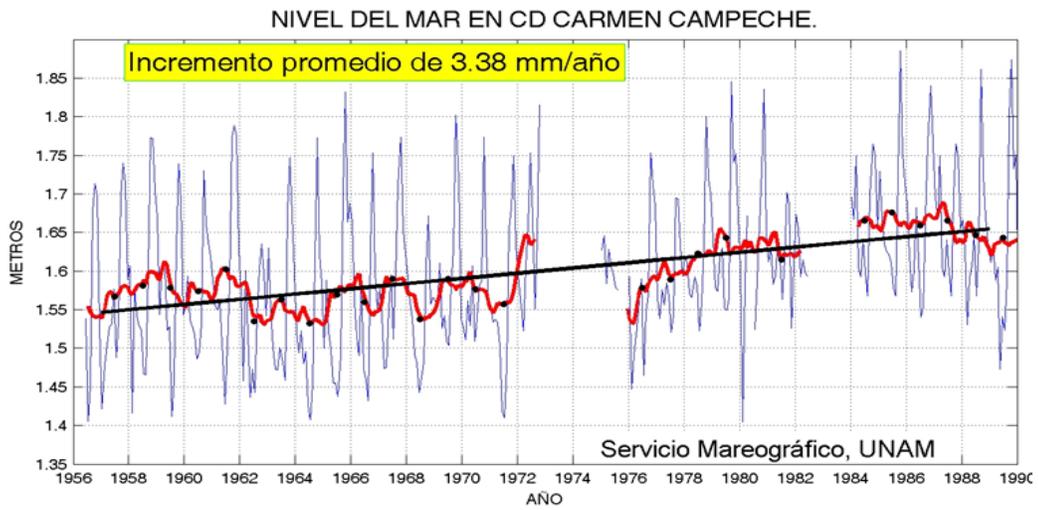
2.6 Tendencias del nivel del mar en el Golfo de México

En las figuras 2.3 a la 2.9, se muestran las gráficas con las tendencias proyectadas de acuerdo a la fuente de información en puertos del Golfo de México.



Fuente INE,2012

Figura 2.3 Tendencia del nivel del mar en Alvarado, Ver



Fuente INE,2012

Figura 2.4 Tendencia del nivel del mar en Cd. del Carmen, Camp



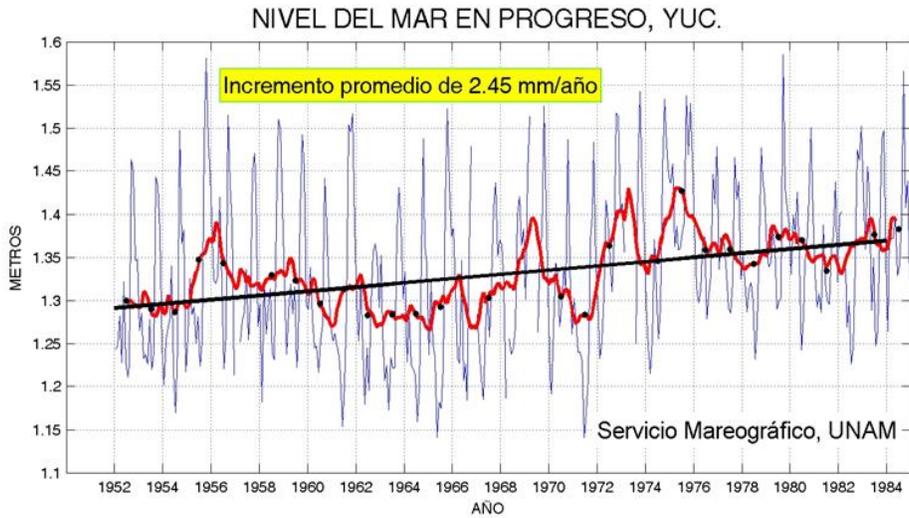
Fuente INE,2012

Figura 2.5 Tendencia del nivel del mar en Cd. Madero, Tamps



Fuente INE,2012

Figura 2.6 Tendencia del nivel del mar en Coatzacoalcos, Ver



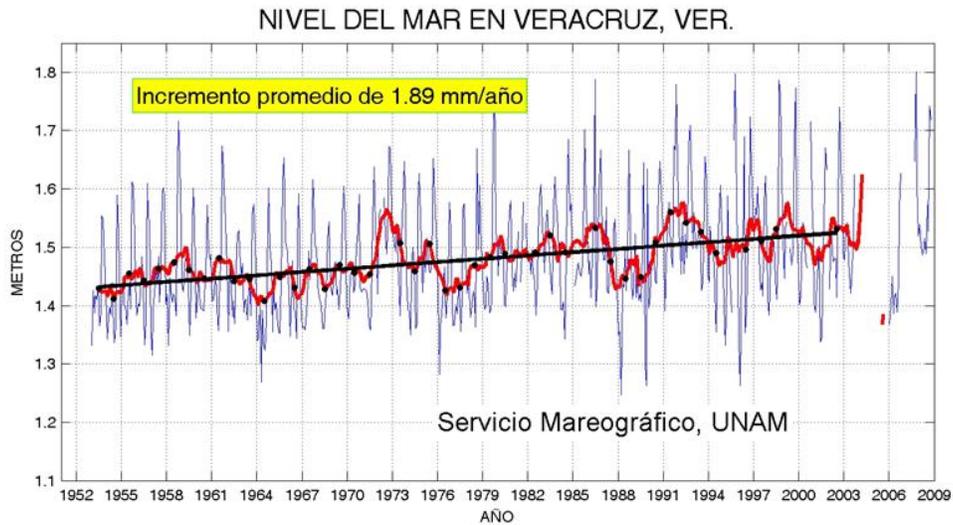
Fuente INE,2012

Figura 2.7 Tendencia del nivel del mar en Progreso, Yuc



Fuente INE,2012

Figura 2.8. Tendencia del nivel del mar en Tuxpan, Ver



Fuente INE,2012

Figura 2.9 Tendencia del nivel del mar en Veracruz, Ver

Los datos de la tabla 2.4, muestran tendencias muy diferentes para el Golfo de México ya que van de 1.79 mm/año en Alvarado, Ver., hasta 9.16 mm/año en Cd. Madero, Tamps., aunque debe tenerse en cuenta que las series de datos con las que se realizaron estas estimaciones no corresponden a los mismos períodos.

Tabla 2.4 Tendencias del nivel del mar para los sitios analizados en el Golfo de México

Sitio	Tendencia (mm/año)	Periodo	No. De años en el cálculo
Alvarado, Ver.	1.79	1955-1981	19
Cd. Del Carmen, Camp.	3.38	1956-1990	26
Cd. Madero, Tamps.	9.16	1962-1979	15
Coatzacoalcos, Ver.	2.90	1952-1988	22
Progreso, Yuc.	2.45	1952-1984	27
Veracruz, Ver.	1.89	1952-2003	16
Tuxpan, Ver.	2.82	1958-1989	43

Nota. Se indica el período en el que si hay datos disponibles

Fuente INE,2012

En los siete sitios analizados en el Golfo de México se encontró una tendencia de aumento en el nivel del mar. Las series de tiempo muestran claramente variaciones interanuales y de escala decadal que, para ser separadas del cambio producido por el calentamiento global del planeta, es deseable tener series más largas, de varias décadas. Aunque estas series tienen longitudes variables, se buscó tener más información al comparar las tendencias de cada sitio con relación a las variaciones del nivel del mar en Veracruz, que se encuentra en la parte central de las costas mexicanas del Golfo de México y tiene la serie de tiempo más larga.

Es importante notar que la tendencia de aumento en el nivel del mar en Veracruz, de 1.89 mm/año, es muy similar a la reportada por el IPCC para el océano mundial lo que sugiere que, en principio, no ha habido movimientos verticales de la corteza terrestre importantes en la región lo que hace que el sitio sea una buena referencia para comparar con la variación en otros sitios.

Los valores que se obtienen muestran tendencias positivas en los siete sitios analizados, tanto en el análisis de cada una de las series como en la comparación con Veracruz. Los resultados muestran una menor tendencia en Veracruz y Alvarado con 1.89 mm/año y 1.79 mm/año, respectivamente, y de 2.76 mm/año en Alvarado cuando se considera la tendencia relativa a Veracruz. Progreso muestra una tendencia de 2.45 mm/año o de 2.60 mm/año con respecto a Veracruz. Le siguen Cd. del Carmen, Camp., Coatzacoalcos, Ver., y Tuxpan, Ver., con tendencias entre 3 y 4 mm/año, mientras que en Cd. Madero, Tamps., la tendencia es mucho mayor con un valor de 9.16 mm/año y de 7.93 mm/año con respecto a la variación del nivel del mar en Veracruz.

En conclusión, las series de datos del Servicio Mareográfico de la UNAM muestran tendencias de aumento en el nivel del mar en todos los sitios analizados excepto en Acapulco, Gro., en donde se observa una tendencia negativa. Las series ajustadas con base en la tendencia relativa a las series más largas también muestran que el nivel del mar ha aumentado.

Las tendencias observadas en el nivel del mar muestran que es muy importante continuar con las mediciones de esta variable en los sitios en que se tienen las series de tiempo más largas para poder actualizar estas estimaciones. Algunos de los sitios considerados se han mantenido y otros se están rehabilitando, por lo que habrá que dar seguimiento a los datos que se vayan generando para actualizar estas tendencias las cuales fueron calculadas con datos que se interrumpieron, en la mayoría de los casos, en las décadas de los ochentas o noventas.

2.7 Proyecciones nacionales de incremento en el nivel medio del mar

De acuerdo a la fuente de información, para las proyecciones de incremento en el nivel medio del mar a nivel global, nacional y regional, se tomaron como las proyecciones globales, las citadas en el Cuarto Informe de Evaluación (2007) del IPCC; para las proyecciones nacionales se tomó como referencia las estimadas por el Laboratorio de Estudios Ambientales del Departamento de Geo-ciencias de la Universidad de Arizona, las cuales se encuentran disponibles en la página web <http://geongrid.geo.arizona.edu/arcims/website/slrworld/viewer.htm>.

Cabe señalar que varias de las estimaciones en el reporte consultado se adecuaron de acuerdo a diversas metodologías y dependiendo de la disponibilidad de información en cada sitio, en general son cálculos realizados a partir de imágenes de satélite.

2.7.1 Escenario con incremento del nivel del mar de 0.6 m

En el Sureste Mexicano, se observa que la costa de Quintana Roo y Campeche podrían ser las más afectadas (figura 2.10). Sin embargo, en estos estados se observa la influencia de los errores introducidos por la vegetación y que sólo es posible corregir con mediciones más precisas. En Veracruz se observa la posible afectación en los municipios de Alvarado, Tuxpan y Pánuco (figura 2.11). El estado de Tamaulipas podría tener afectaciones en la zona del río Pánuco y del río Bravo, así como en su sistema lagunar adyacente (figura 2.10).

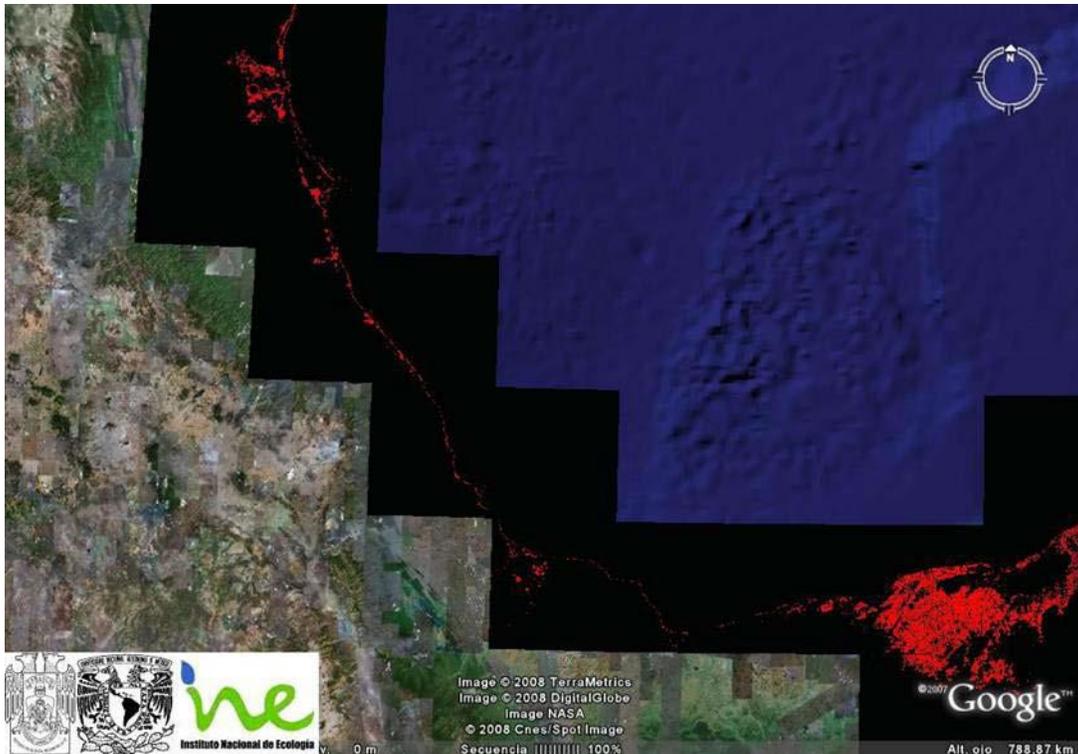
Para el escenario de 0.6 m de incremento, se encontró que Tabasco, Campeche y Sinaloa podrían ser los estados más afectados del País (tabla 2.5).

Tabla 2.5 Estados costeros más impactados, por el incremento en el nivel del mar de 0.6 m

Estados	Superficie (Km²)	Superficie (%)
Campeche	7,698	13.29
Sinaloa	5,445	9.49
Tabasco	5,240	21.18
Quintana Roo	2,177	5.14
Nayarit	1,967	7.07
Veracruz	1,939	2.70
Tamaulipas	1,764	2.20
Yucatán	1,018	2.57

Nota. La superficie relativa está en función de la superficie total del estado

Fuente INE,2012.



Fuente INE,2012

Figura 2.10 Escenario de incremento del nivel del mar de 0.6 m para las costas de los estados de Veracruz y Tabasco

2.7.2 Escenario con incremento del nivel del mar de 1 m

De acuerdo a la referencia consultada se puede observar en las figuras 2.11 a la 2.14, los escenarios de 1 m de incremento del nivel medio del mar, donde se detectó que el grado de impacto es similar al pronóstico para 2 m. Con base en los resultados que se obtuvieron, se estimó que la superficie afectada es de 22,078.4 km² para México (tabla 2.6). Las costas de Quintana Roo, Tabasco, Campeche y Sinaloa tienen gran probabilidad de ser los más afectados con un porcentaje aproximado entre el 6.58 y 9.47 % de su superficie.



Nota: El mar en azul, las zonas susceptibles en rojo y el territorio en verde con las poblaciones en blanco

Fuente: INE, 2012. [Laboratorio de Estudios Ambientales del Departamento de Geo ciencias de la Universidad de Arizona]

Figura 2.11 Escenario de incremento del nivel del mar de 1 m para México

Tabla 2.6 Estados costeros más impactados, por el incremento en el nivel del mar de 1 m

Estados	Superficie afectada (Km ²)	Superficie relativa (%)
Campeche	4,321	7.46
Quintana Roo	4,011	9.47
Sinaloa	3,775	6.58
Veracruz	3,591	5.00
Tabasco	2,024	8.18
Yucatán	1,862	4.70
Tamaulipas	1,604	2.00
Nayarit	890	3.20
Total	22,078	

Nota. La superficie relativa está en función de la superficie total del estado.

Fuente INE,2012.



Nota: El mar en azul, las zonas susceptibles en rojo y el territorio en verde con las poblaciones en blanco

Fuente: INE [Laboratorio de Estudios Ambientales del Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona]

Figura 2.12 Escenario de incremento del nivel del mar de 1 m (Región Golfo Norte)



Nota: El mar en azul, las zonas susceptibles en rojo y el territorio en verde con las poblaciones en blanco

Fuente: INE [Laboratorio de Estudios Ambientales del Departamento de Geociencias de la Universidad de Arizona]

Figura 2.13 Escenario de incremento del nivel del mar de 1 m (Región Golfo Sur)

En la bibliografía consultada, se utilizó una metodología distinta a la primera, con la que se obtuvo un mapa de áreas inundadas con el incremento del nivel del mar de 1 metro con mayor definición¹ (figura 2.14), y se realizó una segunda estimación de la superficie afectada para los estados de Campeche, Tabasco, Quintana Roo, Tamaulipas y Veracruz como se observa en la tabla 2.7.

Del análisis que se realizó se estimó que la mayor extensión de área inundada relativa por estado, será en Campeche, Ortiz y Méndez (1999), encontraron resultados similares, a diferencia de que en su análisis se tomaron en cuenta otros factores como los procesos costeros de erosión, hundimiento costero, entre otros.

¹ Con resolución de 90 m en la horizontal y de 1 metro en la vertical

Tabla 2.7 Estados costeros más impactados, por el incremento en el nivel del mar de 1 m

Estados	Superficie afectada (Km ²)	Superficie relativa (%)
Campeche	3,643.90	6.50
Tabasco	3,065.70	12.60
Quintana Roo	2,447.90	2.40
Tamaulipas	964.50	1.20
Veracruz	762.20	1.10

Nota. La superficie relativa está en función de la superficie total del estado

Fuente: INE, 2012



Nota: el área roja muestra las zonas de posible afectación por aumento de 1 m del nivel del mar

Fuente: INE, 2012

Figura 2.14 Escenario de incremento del nivel del mar de 1 m para México

2.7.3 Escenario con incremento del nivel del mar de 2 m

El escenario de 2 m para México, se observa que Campeche, Sinaloa y Quintana Roo tienen una mayor probabilidad de ser los estados más afectados, en términos absolutos; en el pronóstico se estimó que en México se puede tener una superficie total de afectación de 29,622.6 km² (tabla 2.8). Hablando en términos relativos, de acuerdo a la bibliografía consultada Tabasco sería el estado más afectado con el 14 % de su superficie; en menor proporción se encontraron Quintana Roo, Campeche y Sinaloa con 11.94, 9.50 y 8.90 % respectivamente.



Fuente: INE, 2012

Figura 2.15 Escenario de incremento del nivel del mar de 2 m para México

Tabla 2.8 Estados costeros más impactados, por el incremento en el nivel del mar de 2 m

Estados	Superficie afectada (Km ²)	Superficie relativa (%)
Campeche	5,503	9.50
Sinaloa	5,106	8.90
Quintana Roo	5,058	11.94
Veracruz	3,806	5.30
Tabasco	3,463	14.00
Tamaulipas	2,886	3.60
Yucatán	2,484	6.27
Nayarit	1,316	4.73
Total	29,622	

Nota. La superficie relativa está en función de la superficie total del estado

Fuente: INE, 2012

2.8 Proyecciones climáticas para México

En la bibliografía consultada, se observó que los Modelos de Circulación General Océano-Atmósfera (AOGCM, por sus siglas en inglés) pronostican para México y el Caribe que el calentamiento entre los años 2000 y 2100, será mayor que en el resto del planeta, pero la precipitación decrecerá en un porcentaje considerable (tabla 2.9). Las temperaturas se incrementarán de 1.5 a 3° C en el escenario más frío y de 3 a poco más de 5° C, en el más cálido (Christensen et al., 2007), en comparación con las condiciones que se presentaron el siglo pasado, con un valor de 0.5° C, se prevé que el mayor impacto se presentará en la primavera tanto en la masa continental como en la costa (tabla 2.9).

Tabla 2.9 Pronóstico de temperatura y precipitación para México y El Caribe, comprendida entre las coordenadas 10° a 30°N, 116 a 83°O

Estaciones	Respuesta térmica (°C)						Respuesta pluvial (%)						Estaciones extremas		
	Mín	25	50	75	Máx	T (años)	Mín	25	50	75	Máx	T (años)	Cálida	Húmeda	Seca
Invierno	1.4	2.2	2.6	3.5	4.6	15	-57	-18	-14	-9	0	>100	96	2	25
Primavera	1.9	2.7	3.6	3.8	5.2	10	-46	-25	-16	-10	15	75	100	2	18
Verano	1.8	2.7	3.4	3.6	5.5	10	-44	-25	-9	-4	12	90	100	*	24
Otoño	2	2.7	3.2	3.7	4.6	10	-45	-10	-4	7	24	-	100	*	15
Anual	1.8	2.6	3.2	3.6	5	10	-48	-16	-9	-5	9	65	100	2	33

Fuente: INE, 2012

Además, en las costas y mares de México existen cambios debidos a otro tipo de eventos naturales, con ciclos de unos cuantos años, de extensión global, como El Niño-La Oscilación del Sur (ENOS)¹⁰ y la Oscilación Decadal del Pacífico Norte

(OPN) y la Oscilación del Atlántico Norte (OAN) y la Oscilación Multidecadal del Atlántico (OMA). Es importante señalar la interdependencia e interrelación de estos fenómenos que no son locales y propios de una región, por ejemplo, en México, el fenómeno del Niño tiene influencia en las costas nororiental y oriental, intensificando los vientos del norte (Nortes); una vez que se presenta dicho fenómeno se reduce la frecuencia de los huracanes y tormentas tropicales en el Atlántico.

2.9 Impactos y vulnerabilidad ante el incremento del nivel del mar

Los principales impactos que se esperan por el efecto del cambio climático son el aumento del nivel medio del mar, con lo que aumentan en intensidad y frecuencia las inundaciones, el oleaje de tormenta, la erosión, etc., lo que se traduce en daño a los ecosistemas y la infraestructura portuaria y costera (IPCC, 2007).

El incremento del nivel medio del mar afectará a los humedales costeros, incluidos marismas de agua salada y manglares, se calculan pérdidas mundiales del 33% si el nivel del mar aumenta 36 cm de 2000 a 2080, en mayor medida en donde existen barreras que retienen el paso del agua y los sedimentos en el lado tierra. Existen dos factores principales que favorecen las pérdidas de los humedales y manglares costeros, así como los daños por inundaciones en la costa, los cuales son las actividades humanas y el incremento del nivel medio del mar por efecto de cambio climático (IPCC, 2007).

Este incremento aumentará las zonas salinas en las aguas subterráneas y los estuarios, los manglares y arrecifes de coral sufrirán se deteriorarán al grado que impactarán a la pesca y al turismo; esto se traduce en menor disponibilidad de agua dulce para los seres humanos y los ecosistemas costeros; la intrusión salina podría aumentar el hábitat de la pesquería en aguas salobres, pero dañar la industria de la acuicultura en un grado considerable (IPCC, 2007).

El delta de río Grijalva se identificó como una zona de vulnerabilidad media ante el incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático (figura 2.16).

De acuerdo a la bibliografía y los pronósticos que se realizaron para finales de este siglo, se pueden identificar zonas de impacto en casi todo el litoral del Golfo de México, en las zonas costeras de los estados de Tamaulipas, Veracruz, Tabasco, Campeche, Yucatán, Quintana Roo; en el litoral del Pacífico las zonas con mayor vulnerabilidad ante los efectos del incremento del nivel medio del mar por cambio climático son las costas de Sinaloa, Nayarit y Chiapas.

En la bibliografía se señala que en México las zonas críticas serán la Laguna de Términos en Campeche, el Complejo Deltaico Grijalva-Usumacinta y el Sistema

Lagunar Carmen-Pajonal Machona en Tabasco, La Reserva de la Biosfera Sian Kaa'n en Quintana Roo y los Marismas Nacionales en Nayarit y Sinaloa.

Uno de los principales impactos asociados al incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático, es el aumento del nivel de marea de tormenta asociado a ciclones tropicales los cuales se pronostican con mayor intensidad de precipitaciones, lo que incrementa el riesgo de inundación.



Nota: ● Vulnerabilidad extrema = >1 millón, ● Alta = de 1 millón a 50.000, ● Media = de 50.000 a 5.000. Estimación de población desplazada en 2050 tomando en cuenta las tendencias del incremento del nivel medio del mar

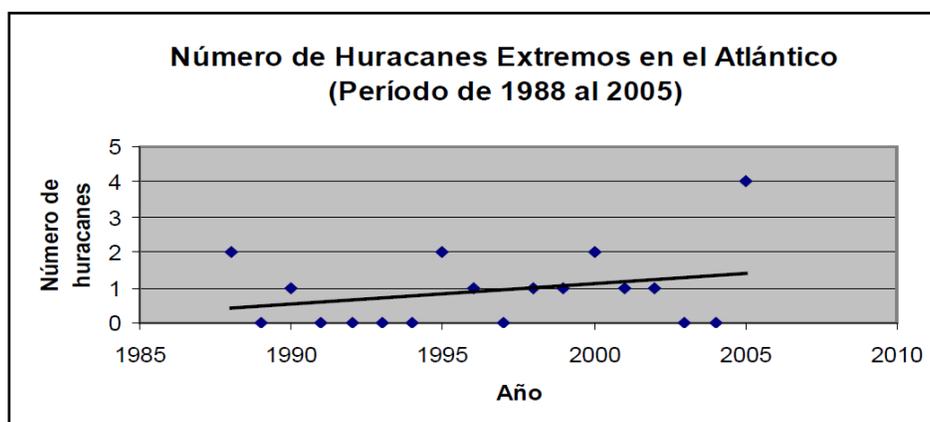
Fuente: INE, 2012 [IPCC, 2007]

Figura 2.16 Mapa que identifica las zonas de mayor vulnerabilidad relativa en los deltas costeros

En la bibliografía (INE, 2012), se pronostica la probabilidad de que los huracanes sean más intensos, con aumento en la temperatura de la superficie del mar, en relación al incremento de frecuencia es un tema sobre el que se continúa estudiando.

Otra observación es el desplazamiento en la misma dirección de los nortes en los últimos 50 años, se prevé que serán más frecuentes con vientos más fuertes y altura de las olas extremas, aunque disminuirán en frecuencia.

Se realizó un análisis que determinó una tendencia del incremento de la frecuencia hacia el 2050, con 4 huracanes de categoría 5 asociados al cambio climático (ver figura 2.17).



Fuente: INE,2012

Figura 2.17 Resumen de huracanes extremos en el Océano Atlántico (1985-2005)

Población afectada

Se proyectó el impacto en la población costera del incremento del nivel medio del mar para los municipios costeros de los estados del Golfo de México, con base en el censo nacional 2005 del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Los estados con la mayor afectación son Veracruz, Quintana Roo y Tamaulipas. En términos relativos, el orden es Quintana Roo, Campeche y Tamaulipas (tabla 2.10). En los estados considerados, se encontró que con esa proyección aproximadamente 3'289,000 habitantes están en situación vulnerable, pero se requiere un estudio con mayor detalle para aportar datos más precisos y actualizados.

Tabla 2.10 Población afectada ubicada en zonas impactadas por el incremento del nivel del mar de 1 m

Estado	Población total	Población afectada	Población afectada (%)
Veracruz	7'110,214	1'008,928	14.18
Quintana Roo	1'135,309	920,772	81.10
Tamaulipas	3'024,238	651,647	21.54
Campeche	754,730	440,910	58.41
Tabasco	1'989,969	199,491	10.02
Yucatán	1'818,948	66,763	3.67
Total		3'288,511	

Fuente: INE,2012

Sector pesquero y acuícola

El principal impacto en estos sectores del incremento de nivel del mar, el aumento de temperatura del mar, los fenómenos de *El Niño* y *La Niña*, muy probablemente

será la distribución de las especies que tendrá efectos sobre los ecosistemas y los recursos pesqueros y acuícolas, en poblaciones pesqueras con una distribución que exceda los límites nacionales, será difícil prever el impacto a escalas locales.

Playas y dunas

Se pronostica que el aumento en la frecuencia e intensidad de tormentas afectará en el incremento de la erosión y pérdida de hábitats de playa para flora y fauna propias de estas zonas (Brown y McLachlan, 2002).

Los procesos costeros como la formación de dunas, su migración, la formación de bocas, el transporte litoral, las zonas de erosión por oleaje, se dan a lo largo de toda la costa, en diferente magnitud y frecuencia. Estos procesos dependen de las condiciones climáticas y oceánicas generales y locales.

Las zonas costeras están sujetas a las condiciones físicas y a las actividades antropogénicas, así como a los efectos del cambio climático. Existen diversas formas de contrarrestar estos efectos como las obras de protección portuaria y costera, las cuales pueden tener impactos ecológicos severos y pérdida de biodiversidad a escalas locales, dichos efectos también tendrán consecuencias acumulativas a gran escala (Schlacher, *et al.*, 2007).

Se tiene poca información de las respuestas de las comunidades de dunas que dependen del espacio y su pérdida (hábitat). De acuerdo a la bibliografía consultada (INE, 2012) se encontró que se desarrolló un modelo para analizar la sucesión en las dunas de la Isla de Galveston, Texas, donde se consideró que la elevación del nivel del mar es el factor que produce erosión local, lo que resultó en someter a las plantas a un espacio restringido ocasionando un desajuste del proceso costero (INE, 2012 [Feagin, *et al.*, 2005]).

El incremento del nivel del mar incidirá en un nivel más alto de la playa lo que ocasionará que una mayor superficie esté sujeta al impacto del oleaje. Al incrementarse la frecuencia e intensidad de huracanes las playas estarán sujetas a un oleaje con mayor energía, favoreciendo los procesos de erosión. En México cada vez más se observa que existen playas que no cuentan con protección (natural o artificial) y que se encuentran sometidas a condiciones de oleaje extremo por diferentes factores, las cuales presentan erosión y retroceso en la línea de playa; esta tendencia se agravará con el incremento en el nivel medio del mar debido al cambio climático y todos los factores asociados.

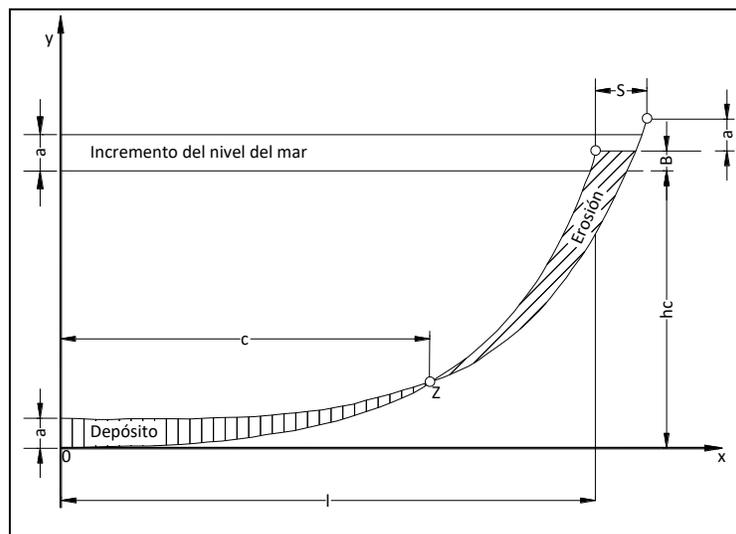
2.10 Vulnerabilidad ante el incremento del nivel medio del mar

Es de suma importancia estimar el grado de vulnerabilidad del impacto que se pronostica para los diferentes escenarios del incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático, con el fin de poder proponer medidas que permitan evitar, mitigar o bien recuperar zonas costeras ante los impactos y la materialización de los riesgos de los diferentes pronósticos y proyecciones que las fuentes prevén.

Erosión costera

La vulnerabilidad de un sistema está en función del grado de sensibilidad, su grado de respuesta, y el grado de adaptación al cambio. Los sistemas costeros tienen una gran capacidad de adaptación; su respuesta ante incremento en el nivel del mar además de la inundación, será la reorganización de la dinámica de los sedimentos.

Existe una relación entre el incremento en el nivel medio del mar y el retroceso de la línea de costa; a largo plazo en sistemas abiertos de playas de duna, el retroceso depende de la aportación de arena, el gradiente costero y el incremento del nivel del mar; dicho retroceso puede pronosticarse utilizando la metodología propuesta por Bruun, la cual aplica para playas desprotegidas y no consolidadas, esta metodología no considera otros factores como oleaje por tormenta o vegetación (figura 2.18).



Nota: Proporción del retiro, $R = (L/B + el h) S = (1/\tan \varnothing)S$, donde S es valor del incremento del nivel del mar, L es longitud de perfil a profundidad del cierre h (base de perfil en el cual el intercambio del sedimento es despreciable), \varnothing es el ángulo de la pendiente del perfil, y B es altura de la duna (Bruun, 1962)

Fuente: Bruun, 1988

Figura 2.18 Representación del retroceso de la playa

Las playas también se protegen con los sistemas arrecifales, su respuesta al incremento del nivel del mar no es tan fácil de pronosticar debido a los diversos factores que intervienen en su desarrollo.

De acuerdo a la bibliografía un estudio de IPCC determinó que hay poca probabilidad de que el incremento del nivel del mar afecte la capacidad de amortiguar el oleaje ya que los arrecifes tienen la capacidad de nivelarse con incrementos de hasta 12-14 mm/año (INE,2012).

Población afectada

Las zonas urbanas que cuentan con muy buenos indicadores de desarrollo humano, están sujetas a dinámicas de vulnerabilidad ambiental y particularmente de vulnerabilidad a fenómenos de cambio climático, la razón está en el crecimiento en las franjas costeras y su expansión en las desembocaduras de los ríos al Golfo.

Las zonas metropolitanas de las zonas con mayor vulnerabilidad detectadas en la bibliografía son Tampico-Ciudad Madero, Coatzacoalcos-Minatitlán, Villahermosa y Cárdenas, Tecolutla y Martínez de la Torre, Ciudad del Carmen y Campeche.

Los factores que exponen estos sitios a mayor vulnerabilidad son el crecimiento urbano, el incremento del nivel medio del mar, el impacto de los huracanes, las inundaciones y el desbordamiento de los ríos que desembocan al Golfo de México. Son zonas con asentamientos populares, con mayor índice de pobreza, ubicadas en los cuerpos de agua (pantanos, ríos, lagunas) (INE, 2008).

2.11 Cambio climático en el estado de Veracruz, Ver.

En el Capítulo “Escenarios de riesgo para el territorio veracruzano ante un posible cambio climático”, del Libro Inundaciones 2005 en el Estado de Veracruz (Universidad Veracruzana), se identificaron las zonas del territorio veracruzano más expuestas a los efectos del cambio climático, así mismo se identificaron las zonas más vulnerables en función de las condiciones sociales, económicas y ambientales y con ello se generaron los escenarios de riesgo. En esta fuente se analizó la amenaza del incremento del nivel del mar con escenarios de 1 y 2 m para evaluar el impacto en la población de la franja costera.

De acuerdo a la literatura consultada, se pronosticó en el estado de Veracruz con ayuda de dos modelos numéricos, cambios en la precipitación y la temperatura media para las regiones Norte, Centro y Sur.

Tabla 2.11 Pronósticos de cambios en la precipitación y temperatura media para el estado de Veracruz para el año 2050

Modelo de Circulación General		Cambios en la precipitación de verano (%)			Cambios en la temperatura media de verano (°C)		
		Región			Región		
		Norte	Centro	Sur	Norte	Centro	Sur
HasCM2	Escenario de sensibilidad media	-2 a -4	-6 a -8	-8 a -10	1.9	1.9 a 2.0	
	Escenario de sensibilidad alta	-2 a -6	-6 a -10	-10 a -14	2.6 a 2.7	2.7 a 2.8	
ECHAM4	Escenario de sensibilidad media	6 a 8	4 a 6	1 a 4	1.5 a 6		

Nota. El signo (-) indica decremento.

Fuente: Conde Álvarez, Cecilia; Palma Grayeb, Beatriz; Escenarios de riesgo para el territorio veracruzano ante un posible cambio climático. Universidad Veracruzana, México, 2005.

De acuerdo a la investigación realizada en la bibliografía consultada, se pronosticó con base en el modelo termodinámico Emmanuel (1987), que de incrementarse la temperatura superficial del océano por arriba de los 26.5°C, se ampliarían las regiones donde se originan las circulaciones ciclónicas lo que se traduce en el incremento del potencial destructivo de los huracanes debido al incremento de las presiones a las cuales están asociados los huracanes. Por lo que se pronostica que en el Golfo de México y el Mar Caribe se intensificarán dichos eventos asociados a escenarios donde se duplica el bióxido de carbono atmosférico.

En la investigación antes citada se recopiló información histórica de los huracanes que han impactado en el estado de Veracruz misma que se resume en la tabla 2.12. Se identificaron 8 sitios costeros que presentan una amenaza por impacto de huracanes los cuales se localizan al norte del estado.

Tabla 2.12 Resumen de municipios que recibieron el impacto de huracanes y tormentas tropicales en el estado de Veracruz

Municipio	Frecuencia
Puerto de Veracruz	6
Alvarado	1
Pánuco	6
Tuxpan	6
Nautla	4
Los Tuxtlas	2
Coatzacoalcos	1
Martínez de la Torre	1

Fuente: Conde Álvarez, Cecilia; Palma Grayeb, Beatriz; Escenarios de riesgo para el territorio veracruzano ante un posible cambio climático. Universidad Veracruzana, México, 2005.

La investigación presenta como referencia a Tejeda (2003), que pone especial énfasis en la alta vulnerabilidad de las zonas costeras bajas arenosas situadas a menos de 1 m del nivel del mar en un escenario con un incremento del nivel del mar debido al efecto del cambio climático el cual se estima que será entre 1990 y 2100 entre 0.09 y 0.88 m (IPCC,2003).

El autor estima que debido al incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático habrá una pérdida de 600 Km de playa que impactará a la industria turística principalmente a las zonas de Boca del río, Costa Esmeralda y el puerto de Veracruz; adicionalmente estima que se afectarán 200 Km de caminos y carreteras y aproximadamente 20 Km de puertos, así como 3,000 hectáreas de zonas urbanas están en peligro de inundación al igual que 200,000 hectáreas de pastizales y zonas de cultivo.

De análisis que se realizó en la investigación, se encontró que para los escenarios de 1 y 2 m de incremento del nivel del mar debidos al efecto del cambio climático el impacto afectará a 305 localidades que se ubican a una altitud de 4 m o menos y a aproximadamente un total de 40,884 habitantes en el estado de Veracruz.

2.12 Metodología RIVAMP

El Proyecto de Desarrollo de Metodologías de Evaluación de Riesgos y Vulnerabilidades (RiVAMP) es una colaboración entre la División de Alerta Temprana del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente y Evaluación (DEWA) y la División de Implementación de Políticas Ambientales (DEPI) y tiene como objetivo identificar y cuantificar el papel de los ecosistemas en la Reducción del Riesgo de Desastres (RRD) y la adaptación al cambio climático (CCA).

Dicha metodología se puede aplicar en diferentes ecosistemas, esta se adapta al rol de los ecosistemas costeros y marinos en la mitigación de la erosión de las playas, reduciendo así los oleajes de tormenta generados por ciclones tropicales y los impactos del aumento del nivel del mar. Esto es más específicamente dirigida a los Pequeños Estados Insulares en Desarrollo (PEID).

El estudio piloto se llevó a cabo en Jamaica y se concentró en la erosión de las playas en Negril, área (a petición del gobierno de Jamaica). La metodología incluye expertos locales y consultas comunitarias integradas con análisis espaciales (SIG y teledetección), modelos de erosión y análisis estadístico.

La herramienta de evaluación fue probada experimentalmente en Jamaica, como un pequeño estado insular en desarrollo. Los socios nacionales fueron el Instituto de Planificación de Jamaica (PIOJ). De acuerdo con el Cuarto informe de evaluación del IPCC, el cambio climático global tendrá un impacto particular en los Estados

Insulares en desarrollo (PEID), como Jamaica, que tienen una alta densidad de población costera y vulnerabilidad existente a los peligros naturales. La importancia del turismo basado en la naturaleza y los medios de vida sensibles al clima (agricultura y pesca) en Jamaica hacen que sea fundamental comprender los patrones cambiantes de riesgo y desarrollar una respuesta efectiva.

Tras el lanzamiento de los resultados del estudio RiVAMP, el gobierno de Jamaica, a través de PIOJ, solicitó al PNUMA que transfiriera esta metodología a científicos de Jamaica. DEWA financió la creación del manual de capacitación, incluida la transferencia de la metodología en forma gratuita El software Open Source (para evitar la creación de dependencias) y DEPI / PCDMB financiaron el proyecto.

El gobierno de Jamaica, da acceso a un manual que permite la capacitación en línea, para que cualquier persona interesada en cuantificar el papel de los ecosistemas pueda acceder a dicha capacitación y herramientas relacionadas (SIG, estadísticas y software de modelado de erosión de playas). El documento de capacitación fue realizado por Bruno Chatenoux (UNEP / DEWA / GRID Geneva), y consta de los siguientes capítulos:

1. Capítulo GIS y Análisis estadístico, Pascal Peduzzi (UNEP / DEWA / GRID-Ginebra)
2. Adonis Velegrakis (Universidad del Egeo) Capítulo de Hidrología.

2.13 Módulo de pronóstico del retroceso de la playa

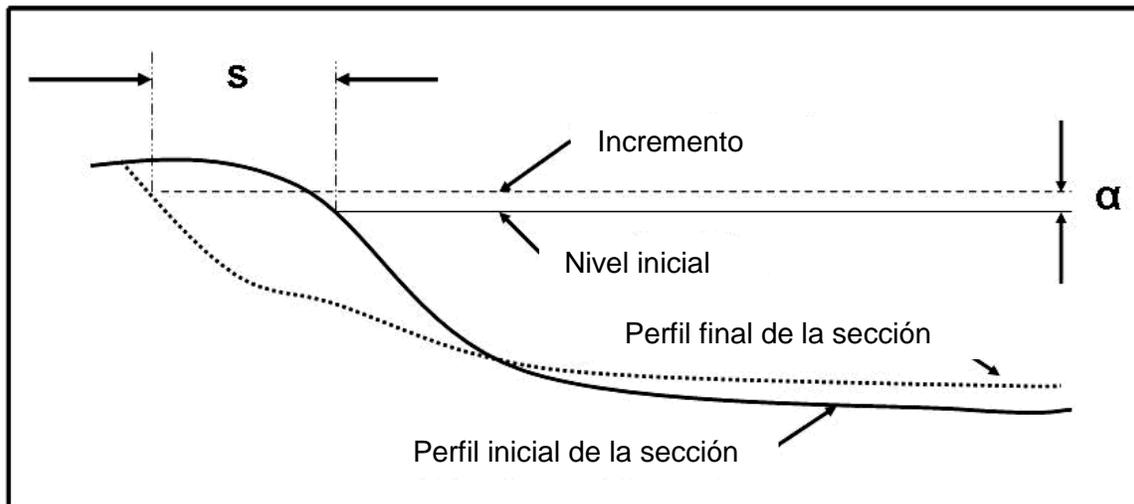
La base de datos de Pronóstico de retroceso de la línea de playa y la utilizaría para el cálculo de retroceso de la playa comprenden una herramienta que puede estimar el rango de retroceso de la playa para diferentes morfologías, bajo diferentes escenarios de incremento del nivel del mar a corto y largo plazo y para diferentes condiciones en términos de sedimentología e hidrodinámica.

La base de datos incorporada ha resultado a través de la construcción / aplicación de conjuntos (un conjunto a corto y largo plazo) de diferentes modelos morfodinámicos 1-D analíticos y numéricos de variada complejidad. Cabe señalar que esta herramienta no tiene la intención de reemplazar los estudios detallados, que se basan en los modelos morfodinámicos 2-D / 3-D calibrados / validados a través de la recopilación de conjuntos completos de observaciones de campo (ver McLeod et al., 2010 para una revisión), su objetivo es proporcionar una metodología fácil de implementar que pueda proporcionar una primera evaluación rápida del riesgo de erosión / inundación de las playas bajo el incremento del nivel del mar.

2.14 Modelos morfodinámicos de retroceso en la playa

Las playas se encuentran entre los entornos más dinámicos en términos morfológicos, y están controlados por mecanismos complejos y procesos de respuesta que operan en varias escalas temporales y espaciales (Van Rijn, 2003). La erosión de las playas se puede diferenciar en: (i) erosión a largo plazo, es decir, retroceso irreversible de la posición de la línea de playa debido al incremento del nivel del mar y / o la pérdida de los volúmenes sedimentarios costeros (Nicholls et al., 2007) que forzan la migración de las playas o la erosión; y (ii) la erosión a corto plazo, causada por tormentas y marejadas ciclónicas, que pueden no necesariamente dar lugar a retiros costeros permanentes, pero pueden crear una devastación a gran escala (Niedoroda et al., 2009).

El incremento del nivel del mar puede tener un impacto significativo en la geomorfología de las playas, ya que las playas se verán obligadas a retroceder (figura 2.19). El alcance y la tasa de retroceso de la playa dependen de varios parámetros, p. la pendiente de la playa, el tipo / suministro de los sedimentos de la playa y las condiciones hidrodinámicas (Dean, 2002).



Fuente: Komar, 1998

Figura 2.19 Representación de la respuesta de la playa al incremento del nivel del mar

Para pronosticar la respuesta de la costa de la playa al incremento del nivel del mar, se han desarrollado varios modelos estáticos y dinámicos. El principio básico en el que se basan dichos modelos es que el nivel del mar y / o las diferentes condiciones de oleaje provocan cambios en el perfil de la playa el cual se adapta a dichas condiciones (Komar, 1998).

A MODELOS ESTÁTICOS

En la literatura que se revisó, se encontró que se han desarrollado diferentes modelos estáticos (analíticos) para evaluar el retroceso de la línea de playa tomando en cuenta el incremento del nivel medio del mar. En la presente publicación, se consideraron los siguientes modelos:

1. El modelo de Bruun (Bruun, 1988), el cual se basa en el concepto del perfil de equilibrio (Zhang et al., 2004). La principal expresión utilizada en el modelo es:

$$S = \frac{l \cdot a}{h_c + B}$$

Donde:

S = Es el retroceso de la playa.

l = Es la distancia entre la línea de playa y la profundidad de inicio de movimiento (Komar, 1998).

a = Es el incremento del nivel del mar

h_c = Es la profundidad de inicio de movimiento

B = Es la altura de la berma

2. El modelo de Edelman (1972), el cual se utiliza con perfiles de playa reales y con cambios de nivel medio del mar temporalmente variables. El retroceso de la línea de playa de acuerdo con este modelo está dado por:

$$S(t) = w_b \ln \left[\frac{h_b + B_o}{h_b + B - a(t)} \right]$$

Donde:

$S(t)$ = Es el retroceso de la playa,

w_b = Es la distancia entre la línea de playa y la profundidad de inicio de movimiento de la sección transversal.

h_b = Es la profundidad de inicio de movimiento.

B = Es la altura de la berma tomando en cuenta el incremento del nivel medio del mar.

B_o = Es la altura inicial de la berma tomando en cuenta el nivel medio del mar actual.

a = Es el incremento del nivel del mar.

3. El modelo Dean (1991), fue desarrollado para el diagnóstico y/o pronóstico del retroceso de la línea de playa debido al oleaje por tormenta, se basa en el concepto de perfil de equilibrio, con el retroceso de la línea de playa ocasionado por la profundidad del tirante de agua en la zona de rompiente, la altura del oleaje rompiente, el ancho de la zona de rompiente, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$S = (a + 0.068H_b) \frac{w_b}{B + h_b}$$

Donde:

S = Retroceso de la línea de la playa

B = Altura de la berma

w_b = ancho de la zona de rompiente

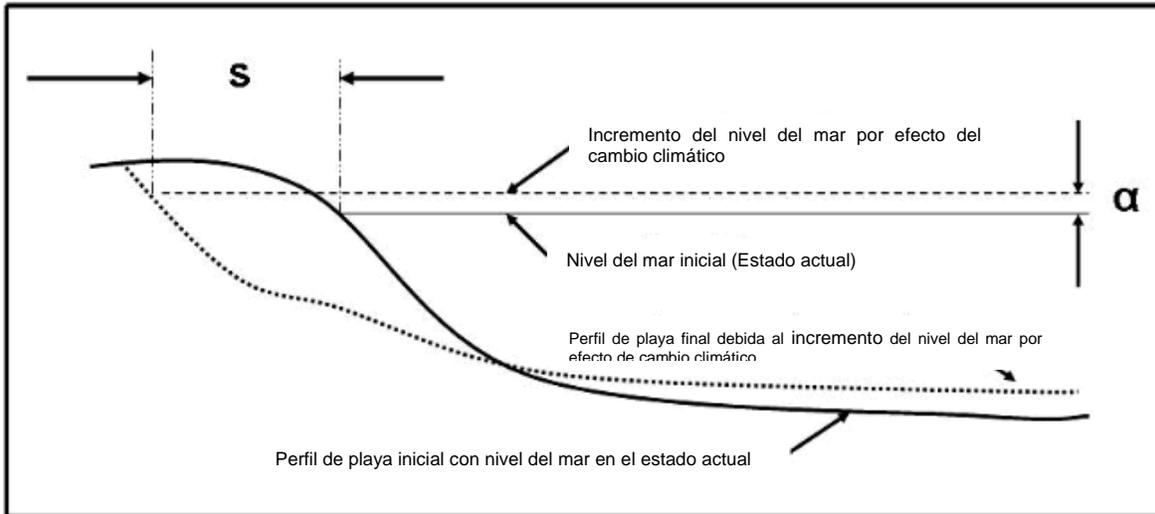
h_b = Profundidad de inicio de movimiento

H_b = Altura de ola en la rompiente

a = Es el incremento del nivel del mar

B. MODELOS DINÁMICOS

1. Modelo SBEACH (Larson and Kraus, 1989).
2. Modelo basado en el algoritmo de Leont'yev (1996), dicho modelo utilizó las aproximaciones energéticas (Battjes and Janssen, 1978), con el balance de energía del oleaje en la dirección transversal de la playa controlada por el ángulo de propagación del oleaje, la velocidad de grupo, la energía del oleaje y la disipación debido a la rompiente.



Fuente: Larson, 1988

Figura 2.20 Comparación de perfiles

MODELO DE LARSON AND KRAUS (SBEACH)

El modelo de Larson and Kraus (1989), es un modelo morfodinámico, el cual consiste en la combinación de la hidrodinámica y el transporte de sedimentos en el sitio de estudio. La parte hidrodinámica consiste en la transformación del oleaje, la cual se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{dE_F}{dx} = -\frac{k}{h}(E_F - E_{Fs})$$

Donde:

k , es el coeficiente empírico del decaimiento del oleaje

E_F es el flujo de energía del oleaje

E_{Fs} es el flujo de energía estable del oleaje

El transporte de sedimentos está definido por el flujo de energía de oleaje y la pendiente de la playa, y su expresión se muestra de la siguiente manera:

$$q = K \left[D - D_{eq} + \frac{\epsilon}{K} \frac{dh}{dx} \right], \quad D > D_{eq} - \frac{\epsilon}{K} \frac{dh}{dx}$$

$$q = 0, \quad D < D_{eq} - \frac{\epsilon}{K} \frac{dh}{dx}$$

Donde:

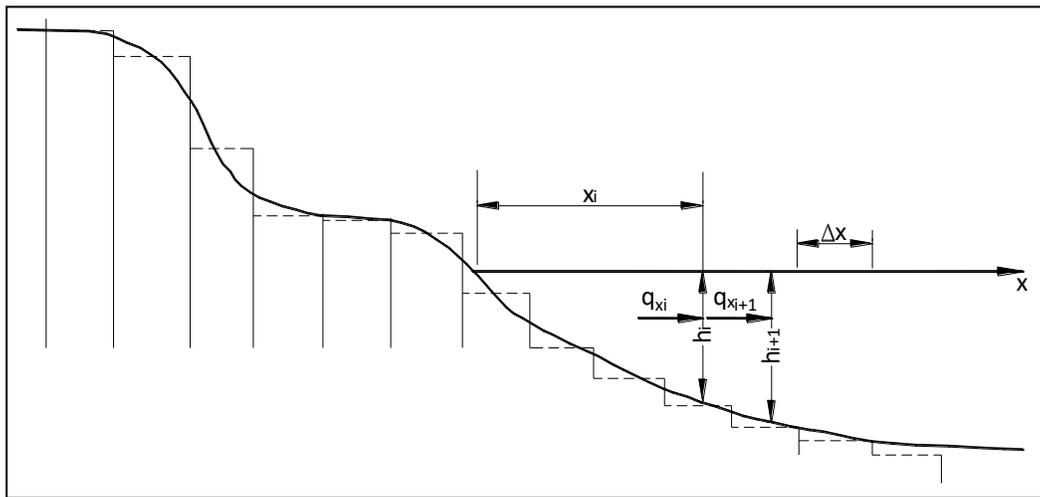
K es el coeficiente empírico del transporte

D = es la disipación de energía de oleaje por unidad de volumen

D_{eq} = es la disipación de energía en equilibrio por unidad de volumen

e es el coeficiente del transporte

Finalmente, el desarrollo de las ecuaciones se realiza mediante el método de diferencias finitas y el perfil de playa se discretiza para su análisis.



Fuente: Larson, 1988

Figura 2.21 Esquema del modelo SBeach

MODELO DE LEONT'YEV

El modelo está basado en el algoritmo de Leont'yev (1996), está basado en el balance de energía del oleaje en dirección a la costa, definido por el ángulo del oleaje, la velocidad de grupo, la energía del oleaje y la disipación debido a la rompiente, el cual se expresa de la siguiente manera:

$$\frac{\delta(\bar{E}c_g * \cos\phi)}{\delta x} = -D$$

El transporte de sedimentos se calcula de forma separada, el transporte q_w debido a la interacción entre el oleaje-corriente, y la cual se determina de la siguiente manera:

$$q_w = \frac{\varepsilon_b}{2 \tan\phi} f_w \rho (\bar{u}^3 \cos\phi + \bar{u}^2 U_d) + \varepsilon_s (F + B) \left(\frac{W_s}{U_d} - \frac{\delta d}{\delta x} \right)^{-1}$$

Donde:

f_w es el coeficiente de fricción de fondo

u es la velocidad orbital (Nielsen, 1992)

U_d es la velocidad de fondo

W_s es la velocidad de caída del sedimento

e_s es el factor de eficiencia del transporte suspendido

Los factores de F y B expresan la potencia debido a la fricción de fondo y al exceso de turbulencia en el fondo. En la zona del surf, el transporte de sedimentos se determina de la siguiente forma:

$$\hat{q}_R = c_1 \rho (2gR)^{3/2} (\tan \beta_{eq} - \tan \beta)$$

Donde:

c_1 es un coeficiente proporcional

$\tan \beta_{eq}$ es la pendiente de playa

Para la zona de swash, el transporte de sedimentos se determina de la siguiente manera:

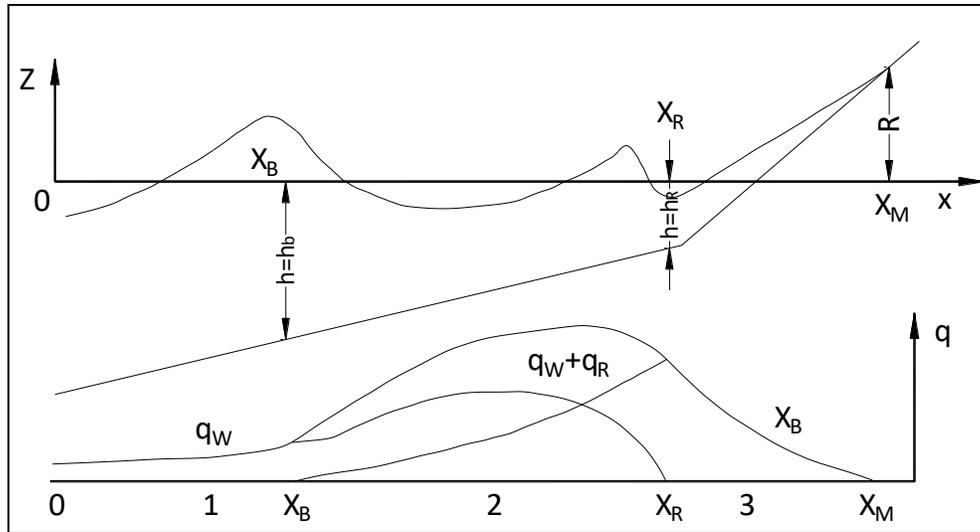
$$q_R = \hat{q}_R \left(\frac{1 - x/x_M}{1 - x_R/x_M} \right)^{3/2} \quad x_R \leq x \leq x_M$$

Donde:

x_R y x_M Son los límites inferior y superior de la zona de estrán.

El transporte inducido q_R decae desde la zona de estrán hasta la frontera exterior de la zona de rompiente, se define de la siguiente manera:

$$q_R = \hat{q}_R \exp(c_3(x - x_R)/H_0)$$



Fuente: Leont'yev, 1996

Figura 2.22 Esquema del modelo Leont'yev

El transporte suspendido y de fondo se asume que decaen linealmente a cero desde el punto de rompiente a la frontera de la playa. Finalmente, la evolución del perfil de la playa se resuelve mediante un esquema de diferencias finitas.

2.15 Interfaz gráfica del usuario (GUI)

La interfaz gráfica de usuario (GUI) de la metodología RiVAMP, se desarrolló con el Lenguaje de programación MATLAB y proporciona al usuario un entorno amigable, en el cual se utilizan los botones de usuario, botones de variación, listas, menús, cuadros de texto, etc., para que el usuario se concentre en usar la aplicación y optimice tiempo y energía en obtener resultados congruentes y realice el análisis de los mismos. Los 3 elementos principales necesarios de la Interfaz Gráfica de Usuario de MATLAB son:

1. Componentes. Cada elemento de una GUI de MATLAB (botones, etiquetas, cuadros de edición, etc.) es un componente gráfico. Los tipos de componentes incluyen controles gráficos (botones, cuadros de edición, listas, controles deslizantes, etc.), elementos estáticos (marcos y cadenas de texto), menús y ejes. Los controles gráficos y los elementos estáticos son creados por la función `uicontrol`, y los menús son creados por las funciones `uimenu` y `uicontextmenu`. Los ejes de las funciones crean ejes que se utilizan para mostrar los datos gráficos.
2. Figuras. Los componentes de una GUI se organizan en una ventana en la pantalla de la computadora. En el pasado, las figuras se creaban

automáticamente cada vez que había datos para trazar. Sin embargo, las figuras vacías se pueden crear a través de la figura de función y se pueden usar para contener cualquier combinación de componentes.

3. Respuestas. Por último, debe haber alguna manera de realizar una acción si un usuario hace clic en un botón o escribe información en un teclado. Un clic del mouse o presionar una tecla es una acción, y el programa MATLAB debe responder a cada acción si el programa va a realizar su función. Por ejemplo, si un usuario hace clic en un botón, esa acción debe hacer que se ejecute el código MATLAB que implementa la función del botón. El código que se ejecuta en respuesta a una acción se conoce como Respuesta. Debe haber una Respuesta para implementar la función de cada componente gráfico en la GUI. Las GUI de MATLAB se crean utilizando una herramienta llamada Guía, en el entorno de desarrollo de GUI.

Una vez que los componentes están en su lugar, el programador puede editar las propiedades: nombre, color, tamaño, fuente, texto para mostrar, etc. Además, el programador puede modificar los parámetros o las Etiqueta de los componentes. El parámetro Tag es básicamente el nombre de la variable de un componente, y se utiliza como identificador en el código de programación. Cuando la Guía guarda la GUI, crea un programa de trabajo que incluye funciones esqueleto (como archivo m) que el programador puede modificar para implementar el comportamiento de la GUI. El archivo m es donde el programador adjunta el código apropiado a la devolución de llamada de cada componente. Entonces, una GUI de Matlab consiste en (i) una figura que es la plataforma que el programador ha creado y (ii) un archivo m creado por la guía de Matlab y modificado por el programador.

2.16 Proyecciones del retroceso de la línea de playa

Los modelos que se utilizan para crear la base de datos son: 3 estáticos (Edelman, Bruun, Dean) (Edelman, 1972; Bruun, 1988; Dean, 1991); Los 2 modelos dinámicos (SBEACH y Leont'yev) (Larson y Kraus, 1989). Leont'yev, 1996). Los modelos Leont'yev, SBEACH y Edelman principalmente estiman los cambios a corto plazo de la línea de playa y los modelos de Bruun y Dean estiman cambios a largo plazo.

Para que este volumen de datos sea manejable, se utilizó una plataforma simplificada utilizando la utilidad GUI. En la plataforma de la metodología RIVAMP, se pueden buscar en la base de datos las condiciones ambientales (pendiente de la playa, altura de las olas, período de oleaje, tamaño del sedimento) de su interés. También es posible utilizar condiciones específicas (es decir, un valor para cada parámetro) y obtener (si estas condiciones se encuentran en la base de datos) el retroceso de playa (para una pequeña escala espacial, por ejemplo, una playa) para los cinco modelos (Leont'yev, SBEACH, Edelman, Bruun y Dean) y para los 14

escenarios del nivel del mar (0.038, 0.05, 0.10, 0.15, 0.22, 0.30, 0.40, 0.50, 0.75, 1, 1.25, 1.50, 2 y 3 m) y la ecuación polinómica que describe la relación entre el incremento del nivel del mar y el retroceso de la playa.

Para aplicaciones de gran escala (espacial), los usuarios pueden ingresar a un rango de condiciones ambientales en la plataforma y obtener el límite superior e inferior del retroceso de la playa, proyectado por los modelos. También se pueden seleccionar modelos para crear un conjunto y obtener la media (por modelos seleccionados) límites superiores medios y bajos del retroceso proyectado. Un criterio para la selección de modelos puede ser la clasificación de los modelos a corto y largo plazo para proyecciones a corto y largo plazo, respectivamente.

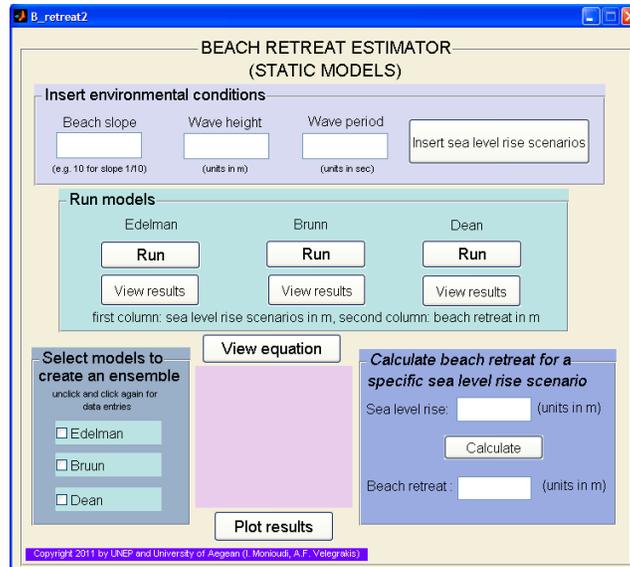
Los usuarios de la herramienta pueden seleccionar todos o algunos de estos modelos para crear un conjunto y luego pueden obtener los valores medios (por modelos seleccionados) del retroceso de la playa y la ecuación polinómica que se ajusta a los valores medios del retroceso.

2.17 Estimación del retroceso de la línea de playa (Beach Retreat Estimator)

La herramienta GUI de la metodología RiVAMP con el módulo *Beach Retreat Estimator*, se utiliza para estimar el retroceso de la playa con los modelos estáticos (Edelman, Bruun y Dean) para condiciones ambientales particulares (pendiente de la playa, altura de ola, período de oleaje, tamaño de sedimento) y para los escenarios de elevación del nivel del mar que se hayan seleccionado. Los usuarios pueden seleccionar todos o algunos de estos modelos para crear un conjunto y posteriormente es posible obtener los valores medios (de los modelos seleccionados) del retroceso en la línea playa y la ecuación que se ajusta a los valores medios del retroceso. Esta herramienta se integra por el archivo de figuras (B_retreat2.fig) y el archivo m (B_retreat2.m).

Uso de la herramienta

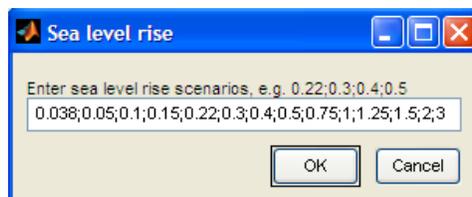
La herramienta se utiliza con el programa MatLab. Use el ícono (GUI) a continuación del menú principal y abrir el archivo B_retreat2. Al ver la pantalla que se muestra en la figura 2.23. Para ejecutar el programa, presionar el botón y para ver el archivo m-file, presionar el botón.



Fuente: Manual RIVAMP, 2010.

Figura 2.23 Imagen del módulo B_retreat2 GUI

En el panel llamado 'Insertar datos', el usuario ingresa información sobre la pendiente de la playa, la altura de las olas y el período de olas. También puede insertar escenarios de aumento del nivel del mar presionando el botón 'Insertar escenarios de aumento del nivel del mar'. Luego aparece un cuadro de diálogo de entrada con los valores predeterminados ya insertados que el usuario puede usar, o puede borrarlos e ingresar nuevos valores. El cuadro de diálogo de entrada con valores predeterminados se muestra en la figura 2.24.

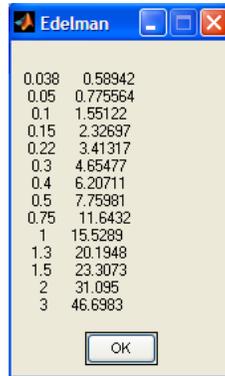


Fuente: Manual RIVAMP, 2010

Figura 2.24 Cuadro de diálogo de entrada con escenarios de aumento del nivel del mar por default

Una vez que se definen todos los parámetros, el usuario puede ejecutar los modelos usando los botones 'Ejecutar' dentro del panel llamado 'Ejecutar modelos' (figura 2.23). El usuario tiene la opción de ver el cálculo del retroceso de la línea de playa realizado para cada uno de los modelos seleccionados presionando el botón 'Ver resultados' debajo del botón 'Ejecutar'. Cuando se presiona el botón 'Ver resultados', se abre un cuadro de diálogo con una tabla compuesta por 2 columnas. La primera columna son los escenarios del incremento del nivel medio del mar (en m) y la segunda es el cálculo del retroceso de la línea de playa (en m) realizadas por el

modelo. En la figura 2.25 se muestra un ejemplo del cuadro de diálogo. El usuario puede seleccionar diferentes modelos para crear un conjunto haciendo clic en los botones de verificación correspondientes.

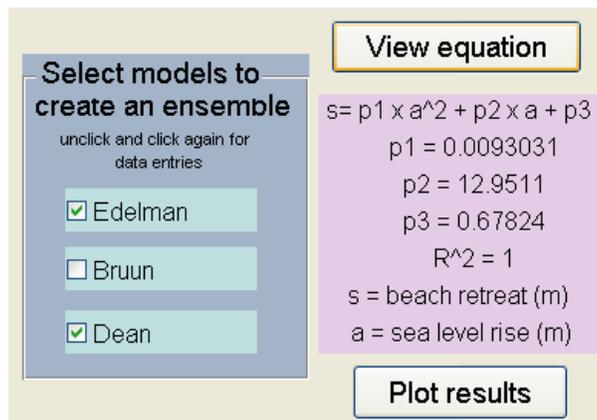


0.038	0.58942
0.05	0.775564
0.1	1.55122
0.15	2.32697
0.22	3.41317
0.3	4.65477
0.4	6.20711
0.5	7.75981
0.75	11.6432
1	15.5289
1.3	20.1948
1.5	23.3073
2	31.095
3	46.6983

Fuente: Manual RiVAMP, 2010

Figura 2.25 Ejemplo del cuadro de diálogo con los resultados del modelo de Edelman

Posteriormente, el usuario da click en el botón 'Ver ecuación'; y aparece una ecuación polinomial que describe el cálculo del retroceso de la línea de playa en los campos de texto debajo del botón. Se muestra un ejemplo en la figura 2.26. La ecuación tiene la forma: $s = p_1 a^2 + p_2 a + p_3$, donde s : es el retroceso de la línea de playa, p_1 , p_2 y p_3 : son los coeficientes polinomiales y a : es el incremento del nivel medio del mar. El valor de R^2 también se da en el campo de texto.



Select models to create an ensemble
unclick and click again for data entries

- Edelman
- Bruun
- Dean

View equation

$$s = p_1 \times a^2 + p_2 \times a + p_3$$

$p_1 = 0.0093031$
 $p_2 = 12.9511$
 $p_3 = 0.67824$
 $R^2 = 1$

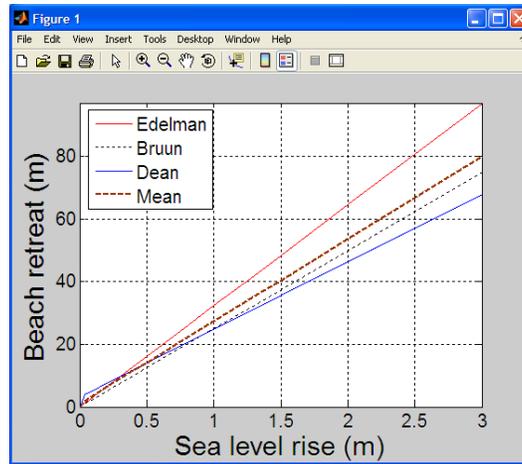
$s =$ beach retreat (m)
 $a =$ sea level rise (m)

Plot results

Fuente: Manual RiVAMP, 2010

Figura 2.26 Ejemplo de la ecuación que describe el retroceso de la línea de playa de acuerdo a los modelos seleccionados

Al presionar el botón 'Imprimir resultados', las ecuaciones polinomiales de todos los modelos seleccionados se calculan y grafican junto con la ecuación polinómica que se ajusta a los valores medios del retroceso de la playa. Un ejemplo de un conjunto de resultados se puede observar en la figura 2.27.



Fuente: Manual RiVAMP, 2010

Figura 2.27 Ejemplo de la impresión de un conjunto de resultados para diferentes modelos seleccionados

De la ecuación calculada por el programa, el rango del retroceso de la playa debido a un valor específico del incremento del nivel medio del mar se puede calcular fácilmente. Este programa le da al usuario la posibilidad de calcular el rango de retroceso solo haciendo clic en el botón calcular dentro del panel “Calcular el retroceso para un escenario específico del incremento del nivel medio del mar”. En la figura 2.28 se muestra un ejemplo.

Fuente: Manual RiVAMP, 2010

Figura 2.28 Ejemplo del cálculo del retroceso de la línea de playa para un escenario específico del incremento del nivel medio del mar

Las funciones de respuesta del programa

En el Manual de capacitación para la utilización de la Metodología RiVAMP, se presentan y describen las funciones de respuesta de los módulos del programa GUI. Las funciones de respuesta son los códigos que se ejecutan al dar un clic en el mouse o al presionar una tecla y están escritos en el archivo m (B_retreat1.m).

2.18 Retrocesos de la línea de playa debido al incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático

Los principales objetivos de la metodología descrita en su Manual de capacitación son (a) transferir el conocimiento de “Cómo hacerlo” desarrollado dentro de RiVAMP y (b) proporcionar plataformas gratuitas / soluciones de software a los usuarios de Jamaica y el Caribe con respecto a una evaluación rápida de la erosión / retroceso de la línea de playa debido al incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático. Esta parte de la capacitación forma parte integral del objetivo general de la sesión de capacitación de RiVAMP, es decir, promover una mejor comprensión del papel de los ecosistemas en la reducción del riesgo de desastres (incluidos los riesgos relacionados con el cambio climático), a través de evaluaciones integradas que utilicen metodología de toma de decisiones basadas en modelos de planificación.

“El cambio climático ocasiona diferentes impactos relacionados con las áreas costeras, incluido el incremento del nivel medio del mar, temperaturas del agua más cálidas, mayor intensidad de ciclones, marejadas y precipitaciones, así como cambios en el régimen de oleaje (por ejemplo, Emanuel, 2005; Allan and Soden, 2008; y Ruggiero et al., 2010). Estos cambios pueden afectar gravemente los ecosistemas costeros y las actividades económicas, como a los arrecifes de coral (p. ej. Woodroffe, 2008), humedales costeros, pastos marinos y lagunas (por ejemplo, Cruz-Palacios y van Tussenbroek, 2005; Karim y Mimura, 2008), playas (McKee Smith et al., 2010), turismo (por ejemplo, Bardolet y Sheldon, 2008), puertos marítimos y otras infraestructuras costeras (por ejemplo, Nicholls et al., 2007; McGranahan et al., 2007; CCSP, 2008; Lenton et al., 2009), especialmente en países en desarrollo y PEID (por ejemplo, Dasgupta et al. 2009).

Aunque se requieren pronósticos de exposición a cambios climáticos a escalas decenales, la mayoría de los modelos y/o sistemas de información disponibles tratan a largo plazo (siglo a milenio) (por ejemplo, Nott et al, 2009), anuales (por ejemplo, Greenwood y Orford, 2008) o incluso por evento específico de tormenta (p. Ej., Callaghan et al., 2008). Se han intentado desarrollar bases de datos mundiales de amenazas costeras (por ejemplo, Vafeidis et al., 2008), así como metodologías / herramientas para evaluar rápidamente la vulnerabilidad costera al incremento del nivel del mar y eventos extremos (por ejemplo Hinkel y Klein, 2009), se observa que los estudios sobre este tema aún están muy lejos de concluir (McLeod et al., 2010).” (Chatenoux, et al, 2012).

Las herramientas y programas que integran el RiVAMP, utilizan una metodología simple y rápida (Estrella et al., 2010) para evaluar el retroceso de la línea de playa debido al incremento del nivel medio del mar a corto y largo plazo (Velegrakis et al., 2009).

De acuerdo a esta metodología, se utilizan conjuntos de modelos morfodinámicos de playa de complejidad variable para evaluar el retroceso de la playa en condiciones variables (pendiente de la playa y/o tamaño del sedimento) y con modelos estáticos/analíticos (incremento del nivel medio del mar y condiciones de oleaje).

En el Manual de capacitación de la Metodología RiVAMP así como en el presente apartado, se describe la herramienta desarrollada, la cual se basa en la construcción de escenarios (a corto y largo plazo) de diferentes modelos morfodinámicos 1-D analíticos y numéricos de complejidad variada.

Con esta metodología se puede estimar rápidamente los rangos del retroceso de la línea de playa para diferentes secciones, bajo diferentes escenarios de incremento del nivel medio del mar a corto y largo plazo, así como para diferentes condiciones hidrodinámicas.

Es muy importante señalar que, esta herramienta no reemplaza a los estudios detallados, que se basan en los modelos morfodinámicos 2-D y/o 3-D, los cuales se validan a través de la recopilación de estudios completos de observaciones de campo, sino para proporcionar una metodología fácil de implementar que puede proporcionar una primera evaluación rápida de los riesgos de erosión / inundación de las playas debidas a el incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático.

3. Proyecciones de los procesos costeros

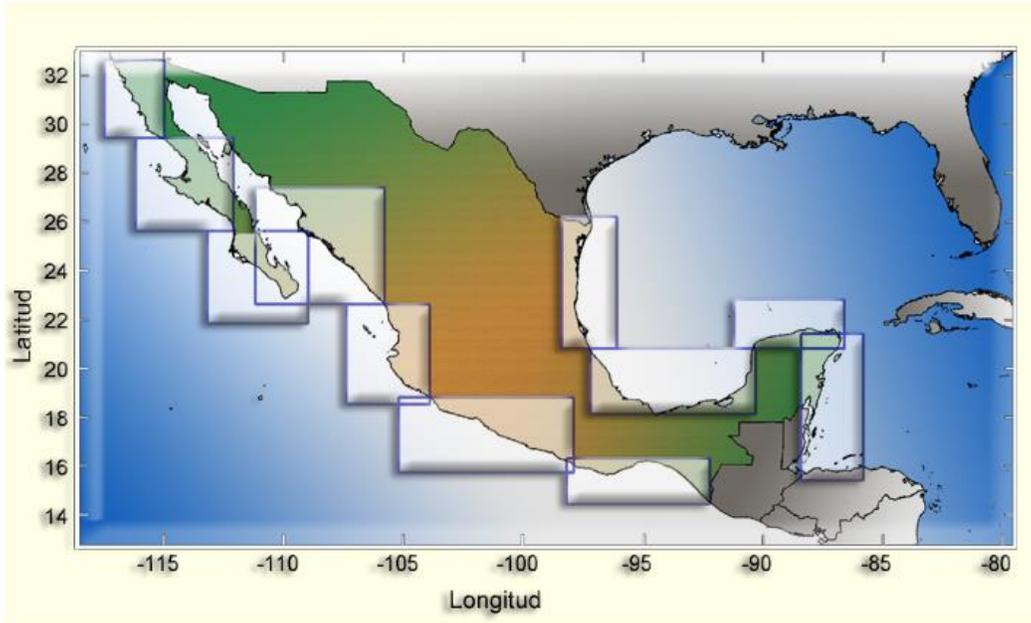
Para el presente estudio y de acuerdo a la investigación realizada en el estado de arte se determinaron los escenarios para las modelaciones numéricas de la estimación de los retrocesos tomando en cuenta el oleaje normal y los incrementos del nivel medio del mar.

3.1 Preparación de la información

Información de oleaje

Para llevar a cabo las simulaciones es necesario conocer el oleaje que se presenta en la zona de estudio, para este caso se utilizó la información del Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano (ATLOOM), el cual fue elaborado en el año 2004 en la División de Ingeniería de Puertos y Costas del Instituto Mexicano del Transporte, como parte de las diversas actividades que el Instituto ha desarrollado para definir las condiciones del oleaje medio y extremal que se presenta en los litorales nacionales.

Para la creación del ATLOOM se utilizó el modelo numérico WAM (Wave Model), se generaron los espectros direccionales del oleaje en 23 lugares de aguas profundas del Golfo de México y el Mar Caribe, y 38 en el Océano Pacífico (ver figura 3.1), así como las series de tiempo con los principales parámetros estadísticos del oleaje: altura significativa, periodo medio, frecuencia pico y dirección media, para cada uno de estos sitios. Las series de tiempo contienen datos a cada hora, con periodo de 44 años comprendido del 1 de enero de 1958 al 31 de diciembre de 2001.



Fuente: IMT, 2004

Figura 3.1 Mapa del Atlas de Oleaje Oceánico en México del IMT

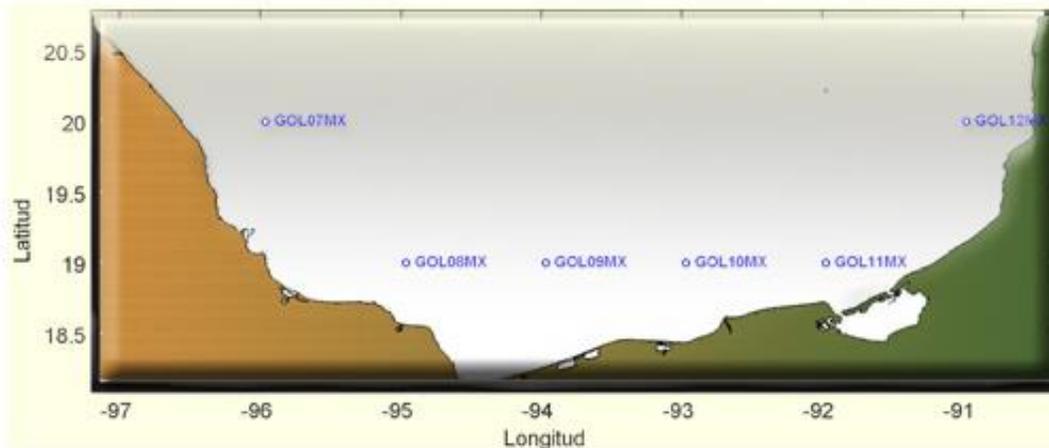


Figura 3.2 Localización del Nodo GOL07MX, Latitud 20°Norte, Longitud 96° Oeste

Para tal efecto se tomó en cuenta el análisis estadístico de oleaje del cual se obtuvieron los datos del ATLOOM, se realizó el análisis estadístico de las características del oleaje normal (clima medio del oleaje) para el Nodo GOL07MX. Se determinaron las características del clima medio del oleaje representativo en la zona de estudio para el régimen anual. Lo anterior se calculó de acuerdo a las siguientes formulaciones:

El período medio del oleaje pico T_p se estimó mediante la siguiente ecuación:

$$\overline{T_p} = \frac{1}{N} \sum_{l=1}^{l=N} T_{pl}$$

Donde:

T_p Es la serie de datos de los periodos del oleaje pico.

N Es el número total de datos de períodos de oleaje, ($l = 1, 2, \dots, N$).

La altura media del oleaje significativo H_s se estimó mediante la ecuación, la cual toma en cuenta el flujo de la energía del oleaje.

$$\overline{H_s} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{l=1}^{l=N} H_{sl}^2}$$

Donde:

H_s Es la serie de datos de las alturas de oleaje significativo.

N Es el número total de datos de las alturas de oleaje significativo, ($l = 1, 2, \dots, N$).

Con las ecuaciones anteriormente mencionadas se determinaron las características medias del oleaje en el régimen anual y estacional, estos resultados se presentan en la tabla 3.1.

Tomando en cuenta la información de oleaje del análisis estadístico, en la tabla 3.1 se muestran los resultados por dirección con sus respectivas alturas y períodos de oleaje en forma anual como estacional.

Se realizó la interpretación de los resultados que se obtuvieron, definiéndose las características del clima medio del oleaje representativo de la zona de estudio en aguas profundas, el resumen se presenta en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Análisis de oleaje para el puerto de Veracruz, Ver

Dirección de oleaje	H (m)	T(s)
N 22.5° O	0.95	4.94
NORTE	1.90	6.39
N 22.5° E	1.38	6.15
N 45° E	0.77	5.28
N 67.5° E	0.56	4.86
ESTE	0.45	4.46
S 67.5° E	0.47	4.21

Fuente: Elaboración propia.

Información del incremento del nivel medio del mar

De acuerdo a los informes y reportes revisados en la revisión del estado del arte se obtuvo que el incremento anual del nivel medio del mar esperado es de 1.89 mm. Por tal motivo y bajo los diferentes escenarios que se plantean en el estado del arte se contempla que, para el puerto de Veracruz, Ver., los escenarios de incremento del nivel medio del mar son los que se presentan en la Tabla 3.2.

Tabla 3.2 Niveles de incremento del nivel medio del mar (m) utilizados en los escenarios para la modelación numérica en el puerto de Veracruz, Ver

No.	Incremento del nivel medio del mar (m)
1	0.10
2	0.15
3	0.20
4	0.30
5	0.50
6	1.00
7	1.50
8	2.00
9	2.50
10	3.00

Fuente: Elaboración propia.

Cálculo de la pendiente

Con base en las secciones transversales de playa obtenidas de los levantamientos realizados en marzo y julio de 2017 por el personal de la Coordinación de Ingeniería Portuaria y Sistemas Geoespaciales, se obtuvo la pendiente promedio de cada una de las 52 secciones que se realizaron del cadenamamiento 0+000 al 12+942.

Trabajos de campo

Se realizó un levantamiento de secciones de playa en la zona comprendida entre el río de La Antigua y la playa Norte del rompeolas Poniente de la ampliación del Puerto de Veracruz, así como un levantamiento batimétrico y de corrientes en la zona exterior de dicho rompeolas.

Para dichos trabajos en la zona de estudio, se instaló el equipo en la embarcación como se observa en la figura 3.3.



Fuente: González, 2017.

Figura 3.3 Instalación de equipo en embarcación para realización de batimetría y medición de corrientes en la zona de estudio

Se realizaron trabajos de topografía, como referencia se tomó como base para el levantamiento topográfica y los seccionamientos transversales de playa el banco de nivel denominado VZ-3 con coordenadas $X=2'130,611.168$, $Y=796,553.547$ $Z=6.8930$ m. El nivel obtenido se trasladó mediante el equipo satelital de alta precisión RTK, marca NAVCOM, al parapeto del nuevo rompeolas para la realización del levantamiento de secciones transversales de playa (ver figuras 3.4 y 3.5).



Fuente: González, 2017.

Figura 3.4 Banco de nivel proporcionado por APIVER, con coordenadas conocidas



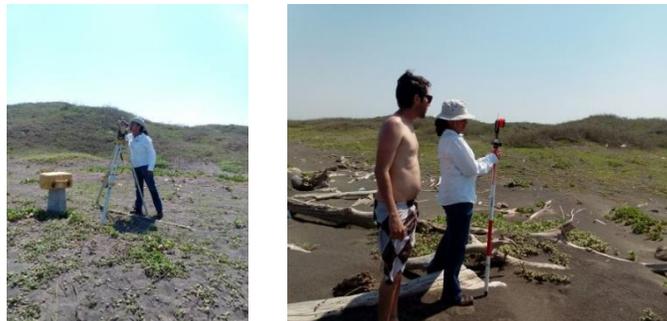
Fuente: González, 2017.

Figura 3.5 Traslado de cota de nivel con equipo GPS de alta precisión RTK del Banco de Nivel VZ-3, al parapeto del rompeolas Poniente



Fuente: González, 2017.

Figura 3.6 Levantamiento topográfico y de secciones transversales de playa en la zona Noroeste del rompeolas Poniente del nuevo puerto de Veracruz



Fuente: González, 2017.

Figura 3.7 Levantamiento topográfico y seccionamientos playeros en la zona Noroeste del rompeolas Poniente del Nuevo del puerto de Veracruz

Posteriormente se realizó un análisis espacial utilizando imágenes satelitales para observar el comportamiento de la línea de playa a través del tiempo, la cual se complementó con orto mosaicos que se generaron con un levantamiento realizado con Vehículos Aéreos No Tripulados (VANTS) en marzo del 2017, estas actividades

realizaron para conocer el comportamiento de la línea de playa en las dimensiones tiempo y espacio, y con ello se complementó la información obtenida con el levantamiento topográfico y los seccionamientos playeros en la zona de estudio.

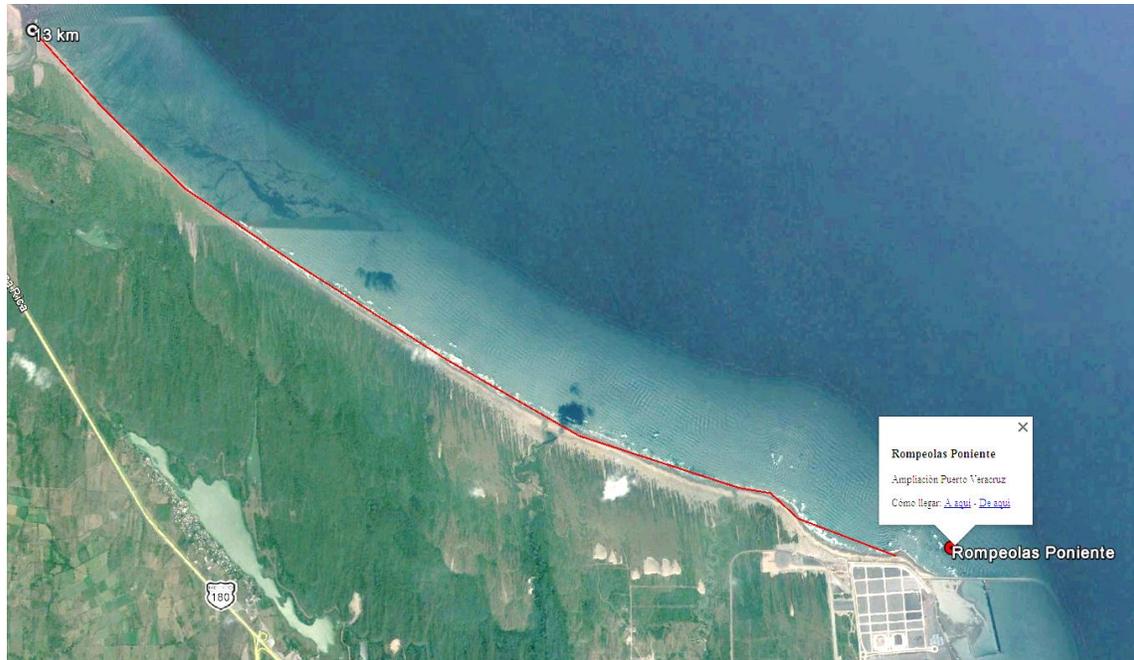
Los orto mosaicos son resultado del procesamiento de imágenes aéreas obtenidas con el VANT Inspire 2, realizado en vuelos fotogramétricos a una altura aproximada de 50 m con un traslape del 80% en un área seleccionada para la zona de estudio.

Se generaron Modelos Digitales de Elevación con resolución espacial de 5 cm, geo referenciado con base en el levantamiento topográfico realizado con el sistema RTK (ver figura 3.8) a lo largo de la línea de costa (figuras 3.9 y 3.10), de donde se obtuvieron puntos de control terrestre (PCT).



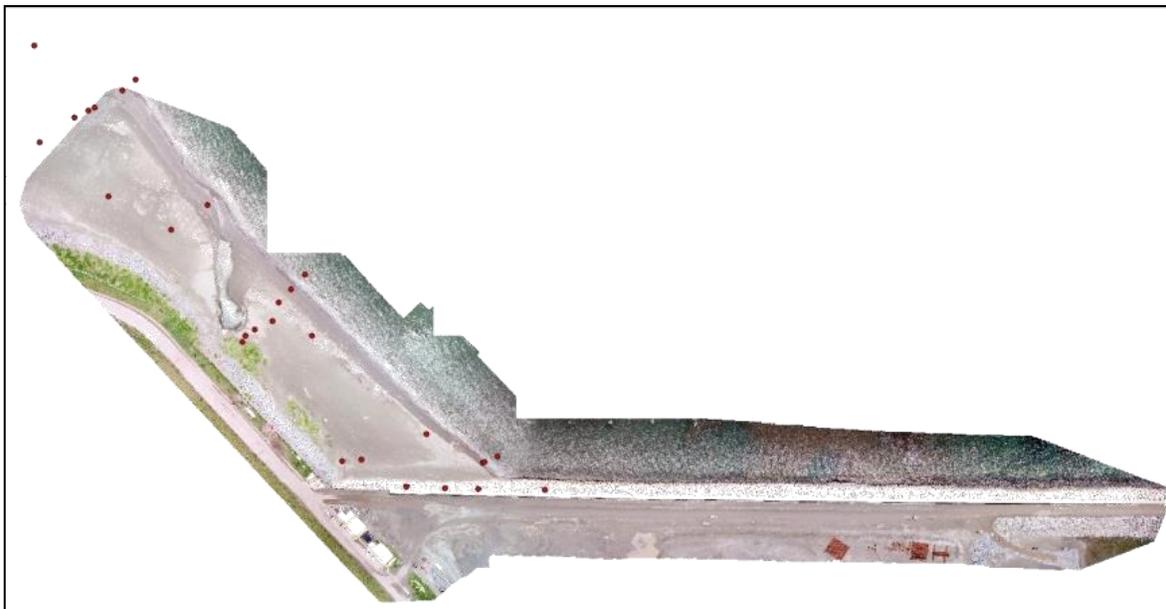
Fuente: González, 2017.

Figura 3.8 Imagen del GPS de alta precisión (RTK) y VANT Inspire 2



Fuente: Google Earth, 2017.

Figura 3.9 Línea de costa entre el Puerto de Veracruz y la desembocadura del rio La Antigua



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.10 Orto mosaico geo referenciado con puntos de control RTK, del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz y de la playa Noroeste

Los dispositivos de captura de información en formato digital y de alta resolución espacial, permiten fortalecer y ampliar una investigación; el uso y aplicación de VANTS apoyan el empleo de las imágenes de satélite, para como apoyo en trabajos donde se requiere determinar la línea de playa.

Los VANTS se utilizan como herramienta, para el desarrollo de estudios de dinámica costera, para identificar procesos de fenómenos en espacio – tiempo que afectan a las zonas costeras, así como procesos en cambios morfológicos, los cuales se pueden integrar con otros datos espacialmente geo referenciados y/o diferentes programas gestores de información geoespacial, para una mejor interpretación y resultados de mejor calidad.

En este estudio se pudo observar que las ventajas del uso de VANTS son la disponibilidad inmediata de información, imágenes de alta resolución, la operación requiere pocas personas, el equipo es ligero y fácil de transportar y la relación costo –beneficio es alta comparándola con otras herramientas para adquisición de datos.

Es importante tener presente varios aspectos que si bien no limitan el uso de los VANTS, si pueden mejorar su eficiencia y la precisión de los trabajos, dentro de dichos aspectos es importante verificar los tiempos máximos de vuelo, tener en stock baterías extras para cubrir el área de estudio que se requiera realizando el mínimo de cambios posible y es necesario que quien realiza la operación y el procesamiento cuente con la experiencia necesaria para poder detectar inconsistencias en la información en el momento que se genera la información.

Otro aspecto que es muy importante en el uso de este tipo de herramientas es tomar en cuenta que los levantamientos fotogramétricos y las imágenes generadas por VANTS pueden tener imprecisiones en la zona intermareal debido al efecto del agua en la generación de las imágenes, es por esta razón que es necesario complementar la información con un levantamiento batimétrico.

3.2 Levantamientos de secciones de playa

De los trabajos descritos anteriormente se realizaron dos levantamientos de secciones transversales de playa, el primero en marzo de 2017 y el segundo en julio del mismo año, los seccionamientos se utilizaron como base para las modelaciones numéricas para obtener el retroceso de la línea de playa en cada una de las secciones. Las secciones se realizaron a cada 250 m del cadenamiento 0+000 a 12+942.

El resultado de dichos levantamientos se presenta en el Anexo “Levantamiento de secciones transversales de playa” del estudio de iniciativa interna VI-02/17,

3.3 Metodología aplicada

Tomando como base la recopilación de información de la zona de estudio antes descrita, se utilizó la metodología que a continuación se describe.

- Se realizó en análisis de las condiciones de oleaje para la zona de estudio.
- Se realizó el análisis de la información de líneas de playa e información batimétrica obtenida de planos y de los levantamientos realizados en marzo de 2017.
- Se obtuvieron las secciones transversales de playa de la zona de estudio.
- Se realizó el análisis estadístico de regresión múltiple con los modelos estáticos de la metodología propuesta, utilizando como variables la pendiente promedio de la sección, la altura, el período y las direcciones del oleaje seleccionados para la zona de estudio para los escenarios del incremento del nivel del mar que se determinaron en base al estado del arte.
- Se desarrolló una herramienta que permitió determinar las líneas de playa en cada uno de los escenarios planteados.
- Se determinó la línea de playa base de la zona de estudio y con ello se realizó el análisis comparativo con las líneas de playa obtenidas para cada uno de los escenarios propuestos.
- Se realizaron modelaciones numéricas de transporte litoral para cada uno de los escenarios propuestos y con ello se realizó un análisis de acuerdo a los escenarios de incremento del nivel medio del mar propuestos.
- Con base a información satelital y geográfica disponible en línea, se obtuvieron los modelos de elevación de la zona de estudio a partir de la elevación 0.00 m de la zona de estudio.
- Utilizando toda la información que se describió anteriormente, se construyó un Sistema de Información Geográfica, donde se incluyó la topografía, la batimetría de la zona de estudio, así como las líneas de playa base y las obtenidas del análisis numérico y estadístico que se realizó para los escenarios propuestos.
- Con ello se desarrolló un mapa de riesgos de zonas de inundación donde se pueden determinar las zonas con mayor vulnerabilidad, así como las zonas de mayor impacto de acuerdo a los escenarios que se analizaron en este estudio.

- Con la información obtenida en el Sistema de información, se determinaron para la zona de estudio los grados de vulnerabilidad, los principales riesgos detectados, así como la determinación de los impactos debidos al incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático.

Se determinaron las zonas de erosión y depósito de la playa, en condiciones actuales y con varios escenarios de incremento del nivel del mar por efecto de cambio climático de acuerdo con las proyecciones obtenidas de las diferentes fuentes de información que se investigaron como parte del estado del arte, y con los resultados obtenidos, se determinaron por zonas, los riesgos de inundación con los diferentes incrementos del nivel del mar que se estudiaron.

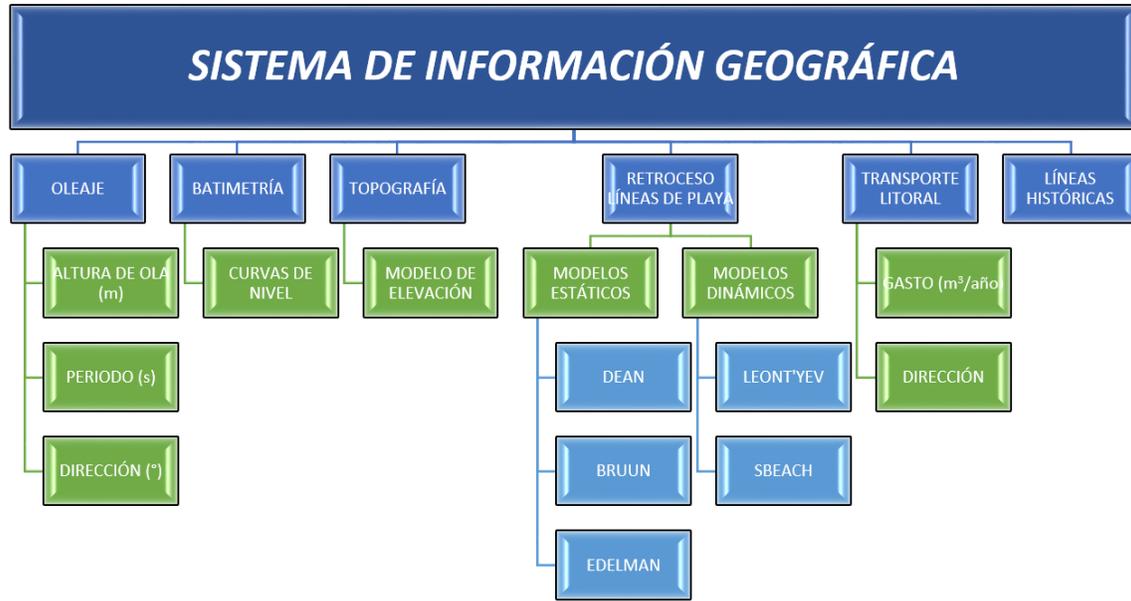
Con los resultados que se obtuvieron, se estableció la caracterización de los procesos de erosión en el corto y en el largo plazo en la zona de estudio.

En éste proceso se utilizaron los 3 modelos numéricos estáticos y los dos modelos dinámicos, los cuales son parte de la metodología utilizada por RIVAMP descrita en el apartado 2.14 del estado del arte.

Se utilizaron varios modelos estáticos y dinámicos, se aplicaron para el caso de las playas, utilizando perfiles lineales con pendientes calculadas para cada una de las secciones. Las simulaciones numéricas se llevaron a cabo usando condiciones variables de oleaje altura y periodo) de acuerdo a la Tabla 2. Para todos los casos, se probaron 10 escenarios de aumento del nivel del mar (0.1, 0.15, 0.20, 0.30, 0.50, 1.00, 1.50, 2.00, 2.50 y 3.00 m) como se indica en la tabla 3.2.

3.4 Sistema de información geográfica

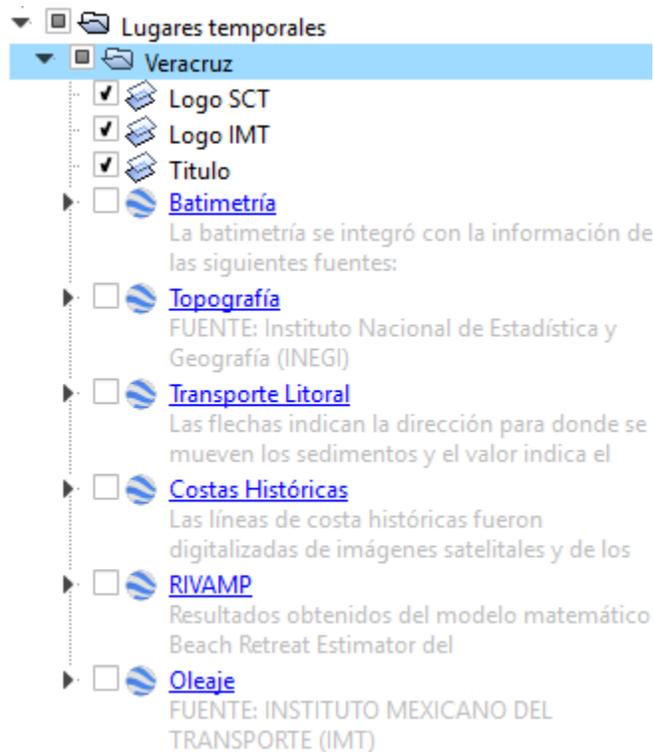
Los datos de SIG son datos espaciales que hacen referencia a ubicaciones geográficas reales de la Tierra. Hay dos tipos de datos de SIG y ambos se pueden importar: datos **vectoriales** y datos de **tramas**. Los conjuntos de datos vectoriales están formados por puntos, líneas o polígonos que representan objetos del mapa. Los conjuntos de datos de tramas constituyen cuadrículas regulares de datos que pueden representar imágenes como, por ejemplo, fotografías aéreas o tomadas por satélite, superficies continuas (como los modelos de elevación) o clases temáticas (como la cubierta terrestre o los mapas de hábitats).



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.13 Diagrama del sistema de información construido para el análisis de la vulnerabilidad a la que está expuesta la zona de estudio por el incremento del nivel medio del mar debido al cambio climático

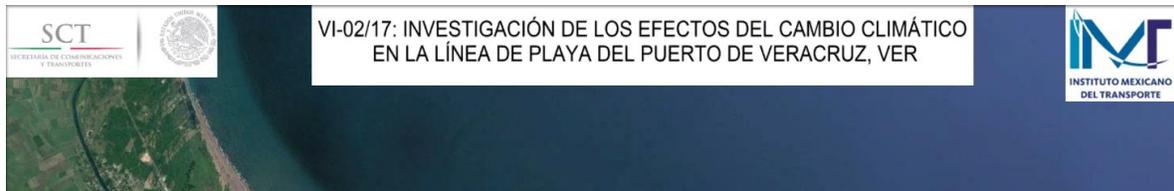
La información antes señalada fue procesada para su visualización en la plataforma Google Earth Pro, la cual se integró en el archivo digital denominado **Sontecomapan.KMZ**. Dicho archivo se estructuró tal como se muestra en la figura 3.14.



Fuente: Elaboración propia

Figura 3.14 Estructura del SIG

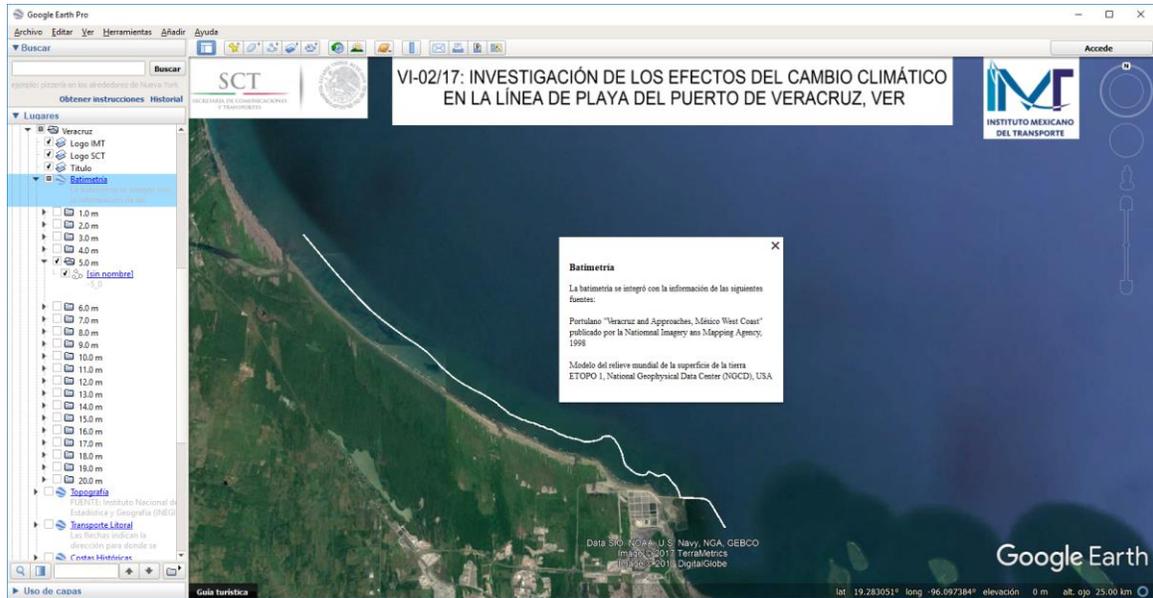
Las tres primeras capas (Logo SCT, Logo IMT y Titulo), cargan sobre la plataforma Google Earth Pro, el nombre del proyecto y los logos de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes y del IMT, tal como se muestra en la figura 3.15.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.15 Encabezado del SIG (logotipos de la SCT, del IMT y título del estudio)

La capa **Batimetría**, contiene la información de las profundidades en la zona de estudio, así como una breve descripción de la fuente de donde se obtuvo. Dicha información está estructurada por carpetas con las curvas de igual profundidad en intervalos de 1 m hasta la profundidad de 10 m, dicha carpetas se pueden activar todas al mismo tiempo y/o de forma individual. (ver figura 3.16).



Fuente: Elaboración propia

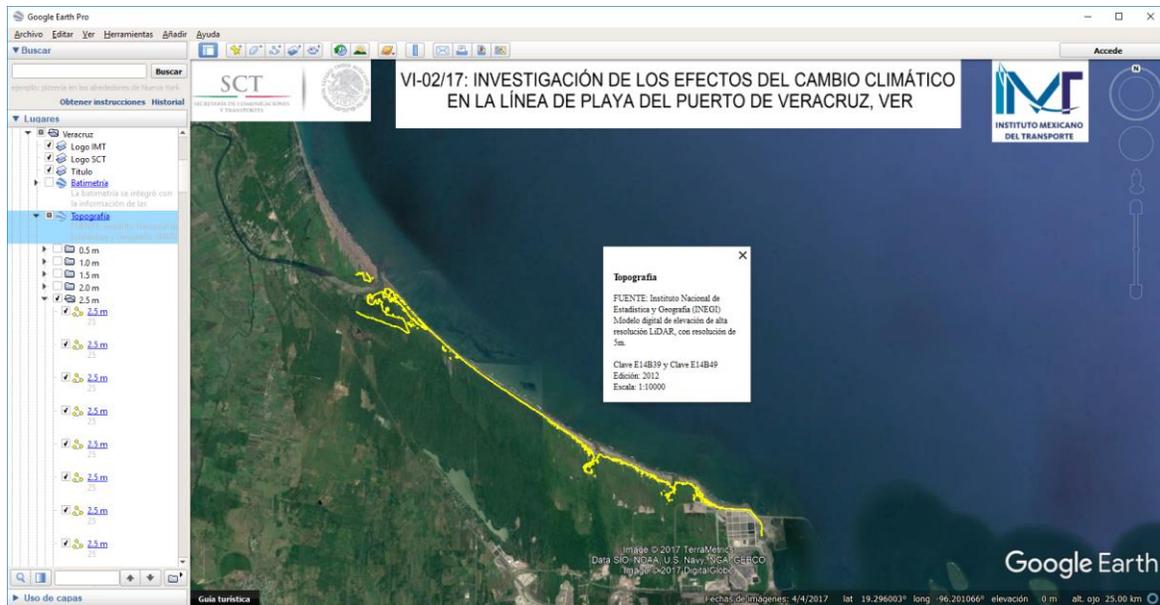
Figura 3.16 Capa correspondiente a la batimetría

De igual forma, la **Topografía** contiene la información de las elevaciones en la zona de estudio, así como una breve descripción de la fuente de donde se obtuvo. Dicha información está estructurada por carpetas con las curvas de igual elevación en intervalos de 0.50 m hasta la elevación de 10 m, dicha carpetas se pueden activar todas al mismo tiempo y/o solamente alguna curva en específico. (ver figura 3.17).

Cabe señalar que la fuente de información de la topografía se obtuvo del Modelo digital de elevación de alta resolución LiDAR, con resolución de 5m, 2012. Del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

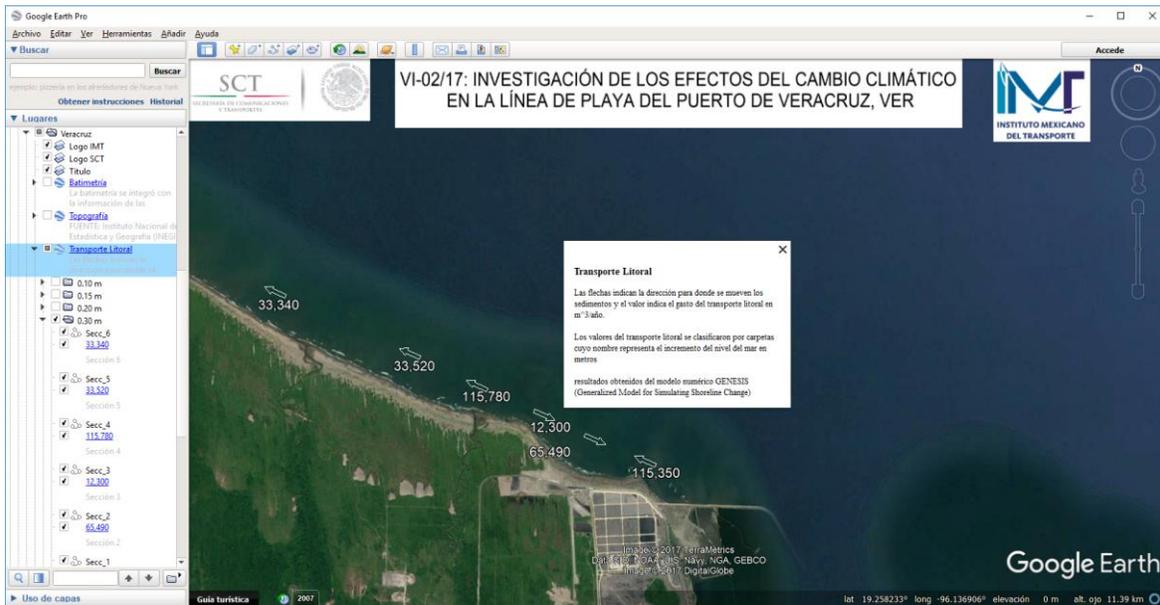
La capa **Transporte Litoral**, contiene los resultados del cálculo del transporte de sedimento en 6 secciones de control a lo largo de la playa, dicha información está estructurada en carpetas que corresponden a los escenarios del incremento del nivel del mar, tal como se muestra en la figura 3.18.

Cabe señalar que el cálculo del transporte litoral se realizó con el modelo GENESIS (Generalized Model for Simulating Shoreline Change). Cada carpeta contiene 12 elementos, los cuales indican para cada sección de control la dirección en la cual se mueven los sedimentos y el gasto del transporte litoral en $m^3/año$.



Fuente: Elaboración propia.

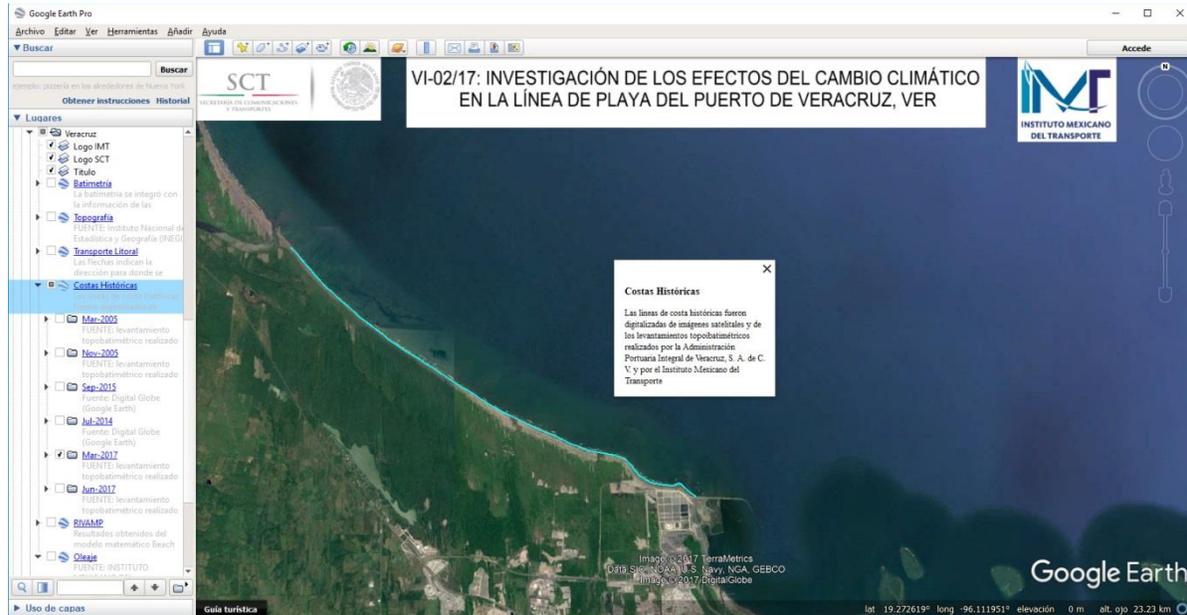
Figura 3.17 Capa correspondiente a la topografía



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.18 Capa correspondiente a los resultados del transporte litoral

La capa **Costas históricas**, contiene líneas de playa para diferentes tiempos, las cuales fueron obtenidas de imágenes satelitales Digital Globe (disponibles de Google Earth) y del satélite SPOT, así como las líneas de playa obtenidas de los vuelos realizados por el IMT con un dron (ver figura 3.19). La capa está estructurada en carpetas que indican la fecha que corresponde a la línea de costa, así como la fuente de información de donde se obtuvo.

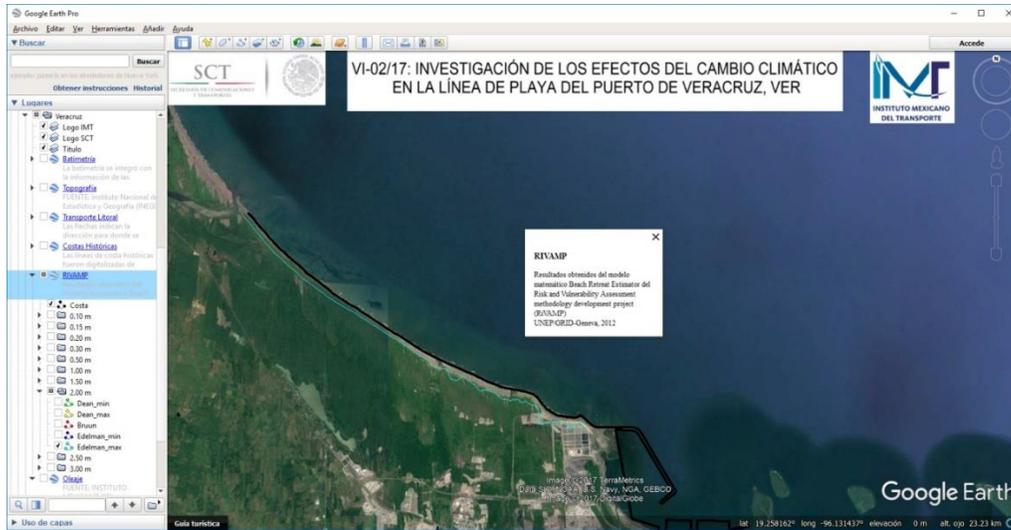


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.19 Capa correspondiente a las líneas de playa históricas

La capa **RIVAMP** contiene los resultados del cálculo de los retrocesos de la playa máximos y mínimos de los modelos matemáticos de Dean, Bruun y Edelman, obtenidos del programa de cálculo Beach Retreat Estimator (Static Models) del RIVAMP.

La capa está estructurada en carpetas que corresponden a los escenarios del incremento del nivel del mar, tal como se muestra en la figura 3.20, cada carpeta contiene 5 elementos, los cuales indican las posiciones máximas y mínimas de la línea de playa para cada uno de los modelos matemáticos antes señalados.

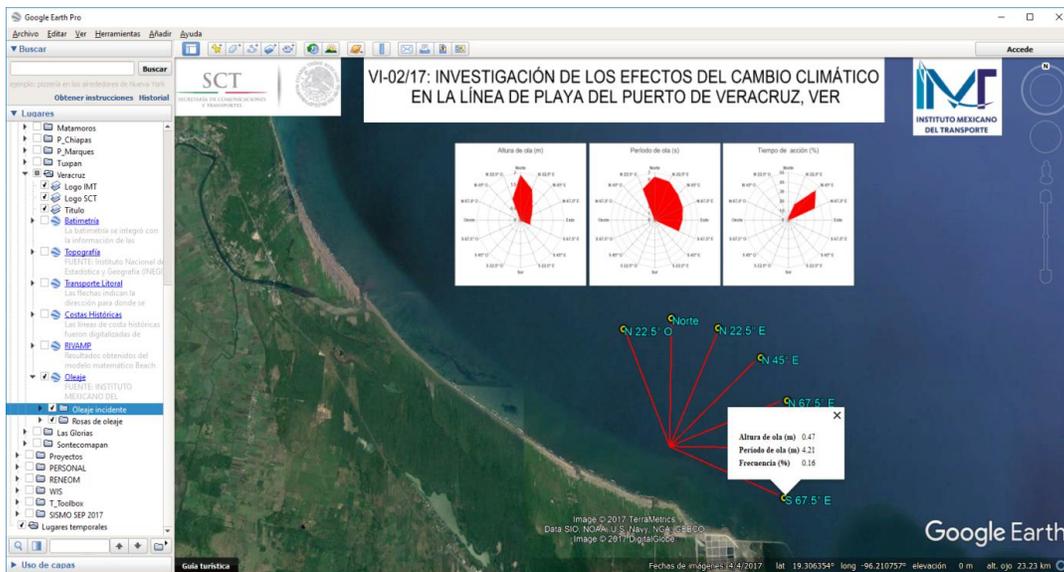


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.20 Capa correspondiente a los resultados obtenidos del modelo Beach Retreat Estimator (Static Models)

La capa **Oleaje**, contiene las características medias del oleaje incidente en la zona de estudio, obtenidas del análisis estadístico del oleaje normal con la información del nodo GOL07MX del Atlas de Oleaje Oceánico Mexicano (ATLOOM).

La información está estructurada en 2 carpetas, la carpeta denominada **Oleaje incidente** contiene las direcciones y la información de las características del oleaje para cada dirección incidente, y la carpeta denominada **Rosas de oleaje** contiene las rosas de altura, período y frecuencia del oleaje medio. (ver figura 3.21).

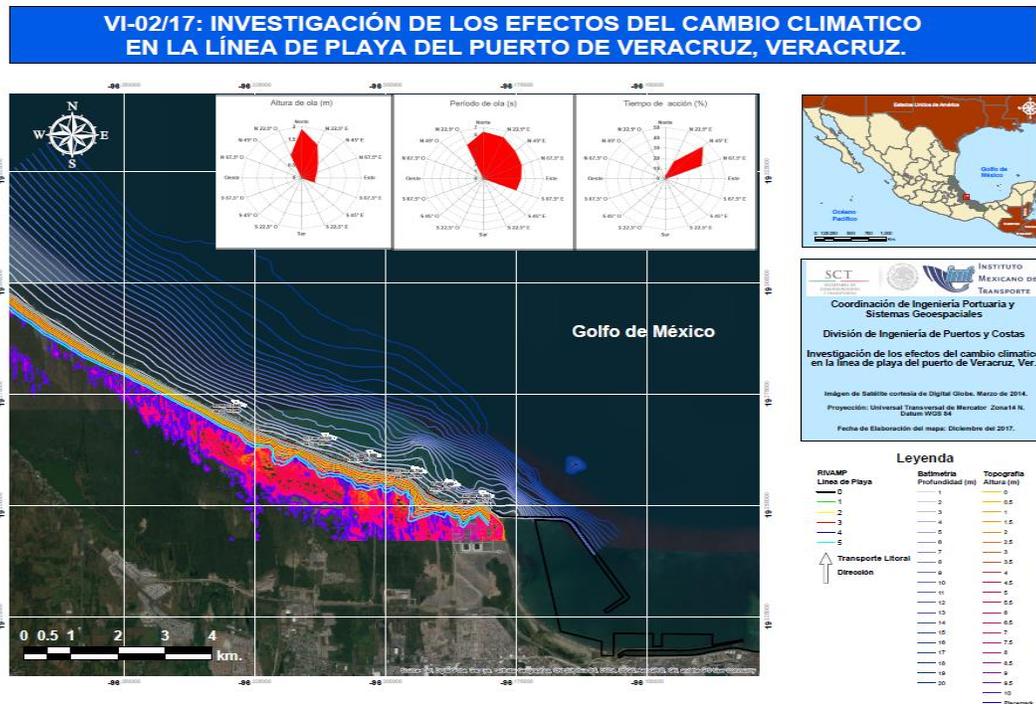


Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.21 Capa correspondiente a la información de oleaje del nodo GOL07MX del ATLOOM

Presentación de resultados en formato PDF

Los resultados del presente estudio se realizaron en un Sistema de información geográfica, adicionalmente y para facilidad de usuarios que no cuenten con la herramienta del Google Earth, se realizó una presentación en formato Geo PDF, el cual contiene las mismas capas y atributos que el Sistemas de información Geográfica y permite la portabilidad del archivo con los resultados de este estudio como se muestra en la Figura 3.22.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.22 Visualización del Sistema de Información Geográfica en archivo Geo PDF para el puerto de Veracruz, Ver

3.5 Análisis de resultados

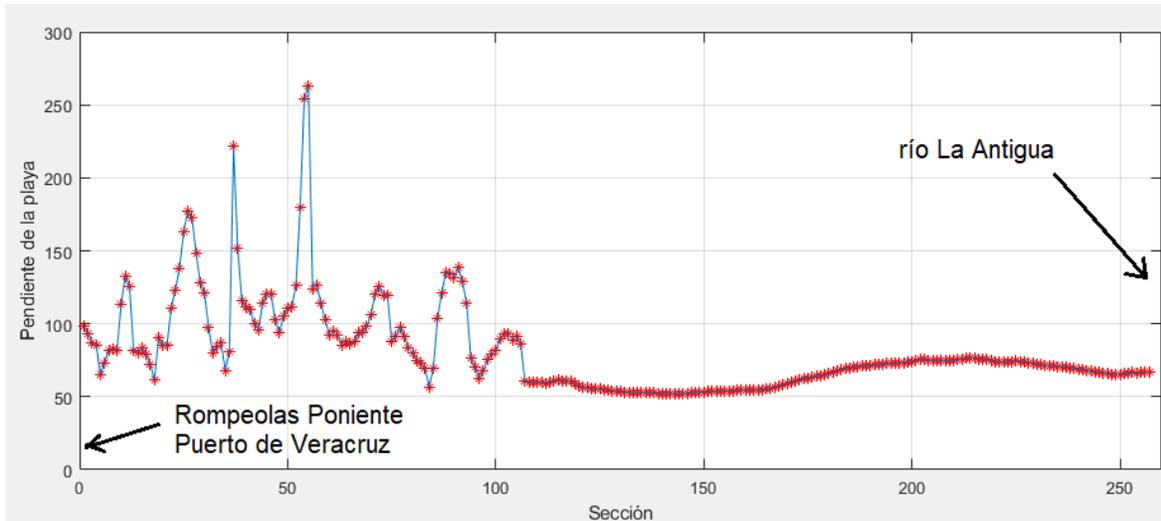
Se realizó el análisis de los resultados que se obtuvieron con la aplicación de la metodología descrita con anterioridad, poniendo énfasis en la caracterización de la dinámica litoral relacionada con los efectos del incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático.

Como parte de la recopilación de información y de la literatura revisada sobre los efectos del cambio climático en el incremento del nivel del mar, así como de las

metodologías que se revisaron para evaluar los impactos para las condiciones señaladas en el apartado 3, relativo a las Proyecciones para procesos costeros. Para ello se realizaron las siguientes actividades:

- Se realizó un análisis de imágenes satelitales para determinar la morfología de la zona costera, para identificar zonas con señales de erosión de la playa.
- Se utilizó un modelo hidrodinámico utilizando el régimen de oleaje normal y se tomaron en cuenta diferentes incrementos del nivel medio del mar para estudiar los efectos en el retroceso de la línea de playa.
- Se realizó un análisis estadístico (utilizando regresiones múltiples con modelos estáticos/analíticos; Dean, Bruun y Eldelman) para establecer la correlación entre la erosión de las playas y el incremento del nivel medio del mar por efecto de cambio climático, tomando en cuenta factores como la pendiente de las playas y el régimen de oleaje normal los cuales influyen en el retroceso de la línea de playa.
- Se proyectaron con los modelos estáticos líneas de playa para los diferentes escenarios con riesgo de erosión en la playa Noroeste del rompeolas Poniente del Nuevo puerto de Veracruz, para diferentes condiciones de oleaje y de incrementos del nivel medio del mar pronosticados, así como niveles extremos de sobre elevación por tormenta en la zona de estudio.
- Mapas de elevación generados para presentar la topografía actual y compararla con los escenarios de riesgo tomando en cuenta los incrementos del nivel medio del mar por efecto del cambio climático y poder relacionarlos para obtener las zonas de vulnerabilidad a las inundaciones en la zona de estudio.
- Identificación de las principales amenazas en la zona de estudio debidas al incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático.
- Se establecieron zonas de vulnerabilidad en la zona de estudio de acuerdo a los escenarios propuestos.
- Identificación de zonas de riesgo en la zona de estudio debidas al incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático.

De la información topobatimétrica, se obtuvo la pendiente de la playa para un total de 257 perfiles de playa, los cuales se construyeron a partir de el acoplamiento de las secciones transversales, la batimetría y topografía obtenidas en campo, así como de información histórica recopilada para la zona de estudio. Las pendientes de los perfiles playeros obtenido varían de 1/52 a 1/265, tal como se muestra en la figura 3.23.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.23 Pendientes de los 257 perfiles de playa

Para cada uno de los perfiles de playa se calculó con el modelo matemático Beach Retreat Estimator (Static Models), el retroceso de la línea de playa para todos los escenarios del incremento del nivel de mar, con dicha información se obtuvieron los retrocesos mínimos y máximos esperados a lo largo de la playa desde el rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz hasta la desembocadura del río La Antigua para cada uno de los escenarios de incremento del nivel del mar y para cada uno de los modelos (Edelman, Bruun y Dean), en la figura 3.24 se indica, a manera de ejemplo, el retroceso máximo de la línea de playa (línea roja) para un incremento del nivel del mar de 2.0, obtenido con el modelo de Edelman.

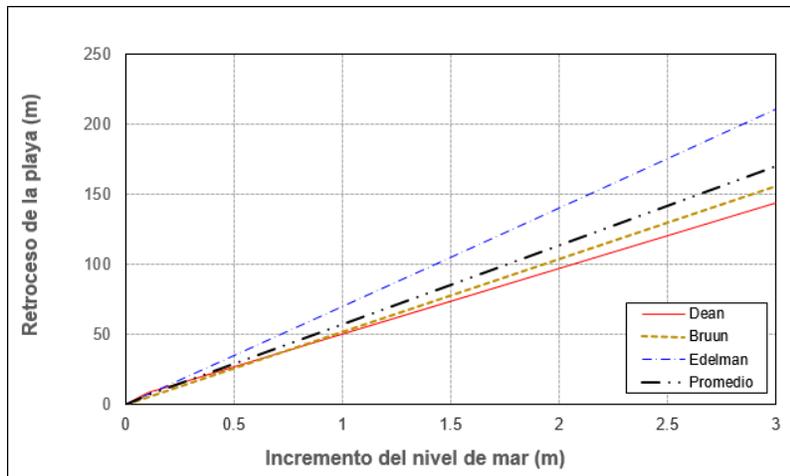
De igual forma, se obtuvieron los retrocesos de la línea de playa con los modelos numéricos de Leont'yev y SBeach (modelos dinámicos del Beach Retreat Estimator), en figura 3.25 se presentan los retrocesos medios de la línea de playa.



Fuente: Imagen: Google Earth, 2017, Línea de playa con retroceso: Elaboración propia.

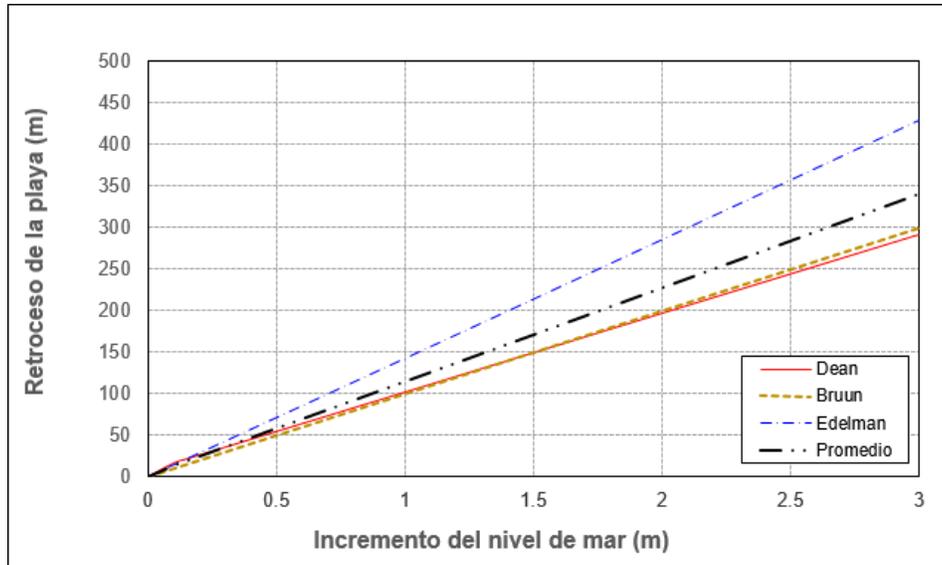
Figura 3.24 Retroceso máximo de la línea de playa obtenido con el modelo Edelman para un incremento del nivel del mar de 2.0 m

A manera de ejemplo, en las figuras 3.25 a 3.29, se presentan los resultados obtenidos (valores medios) para las secciones de playa con pendientes de 1/52, 1/100, 1/150 y 1/265.



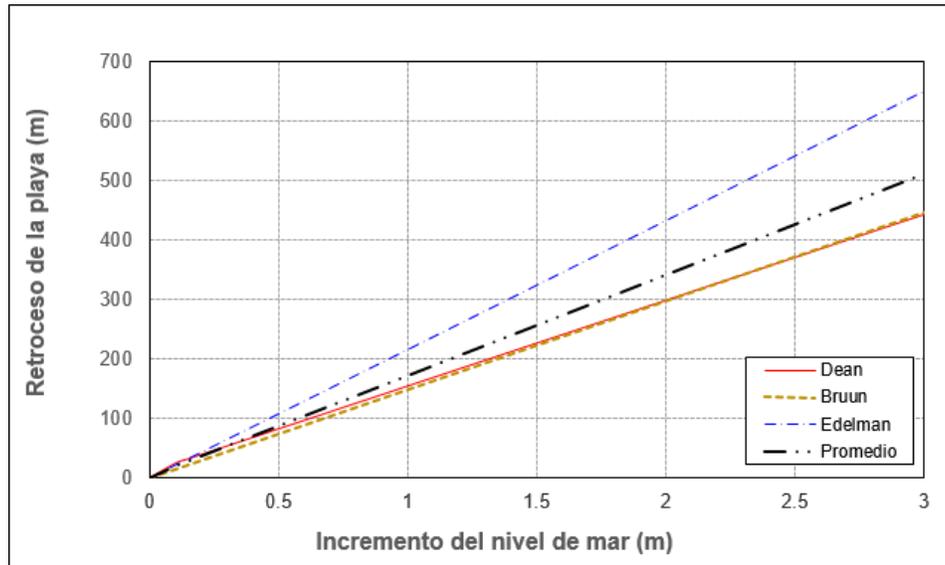
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.25 Retrocesos medios de la línea de playa para el perfil con pendiente de 1/52, localizado a una distancia de 8,150 m al Oeste del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver



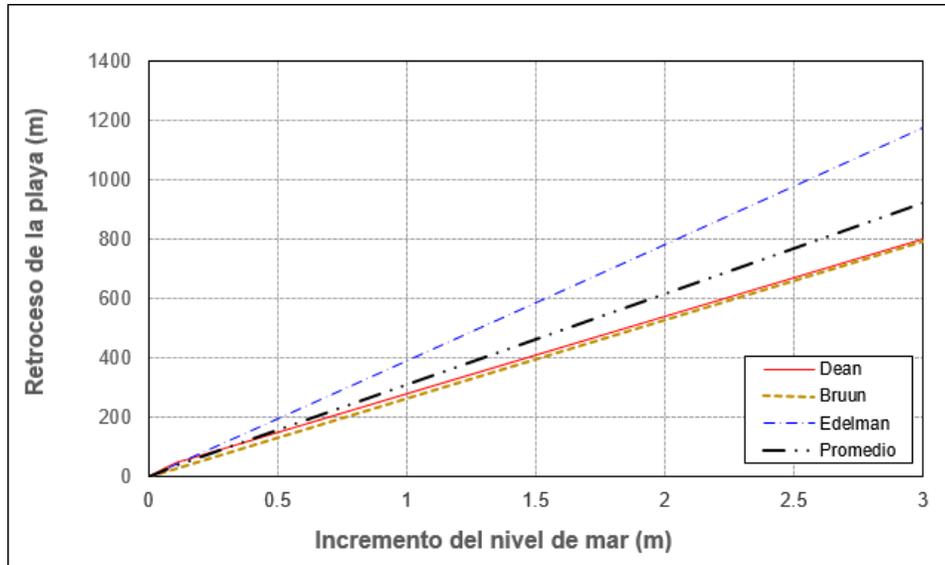
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.26 Retrocesos medios de la línea de playa para el perfil con pendiente de 1/100, localizado a una distancia de 1,600 m al Oeste del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver



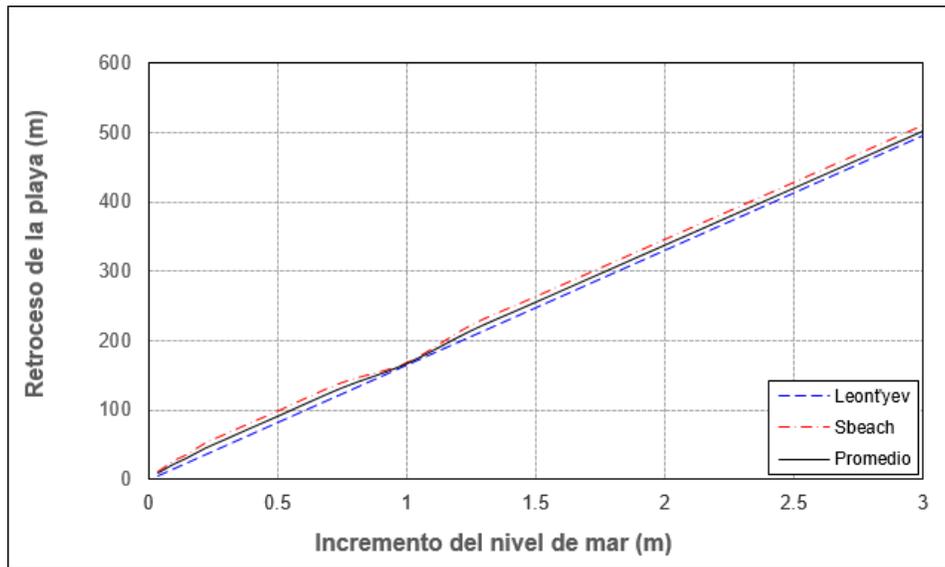
Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.27 Retrocesos medios de la línea de playa para el perfil con pendiente de 1/150, localizado a una distancia de 2,300 m al Oeste del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.28 Retrocesos medios de la línea de playa para el perfil con pendiente de 1/265, localizado a una distancia de 2,500 m al Oeste del rompeolas Poniente de la ampliación del puerto de Veracruz, Ver



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.29 Retrocesos medios de la línea de playa obtenidos con los modelos dinámicos del Beach Retreat Estimator

3.6 Resultados del cálculo del transporte litoral

Para determinar el transporte litoral a lo largo de la costa, se realizaron modelaciones numéricas con el software GENESIS (Generalized Model for Simulating Shoreline Change), considerando la posición media de la playa obtenida del cálculo del retroceso por el incremento del nivel del mar.

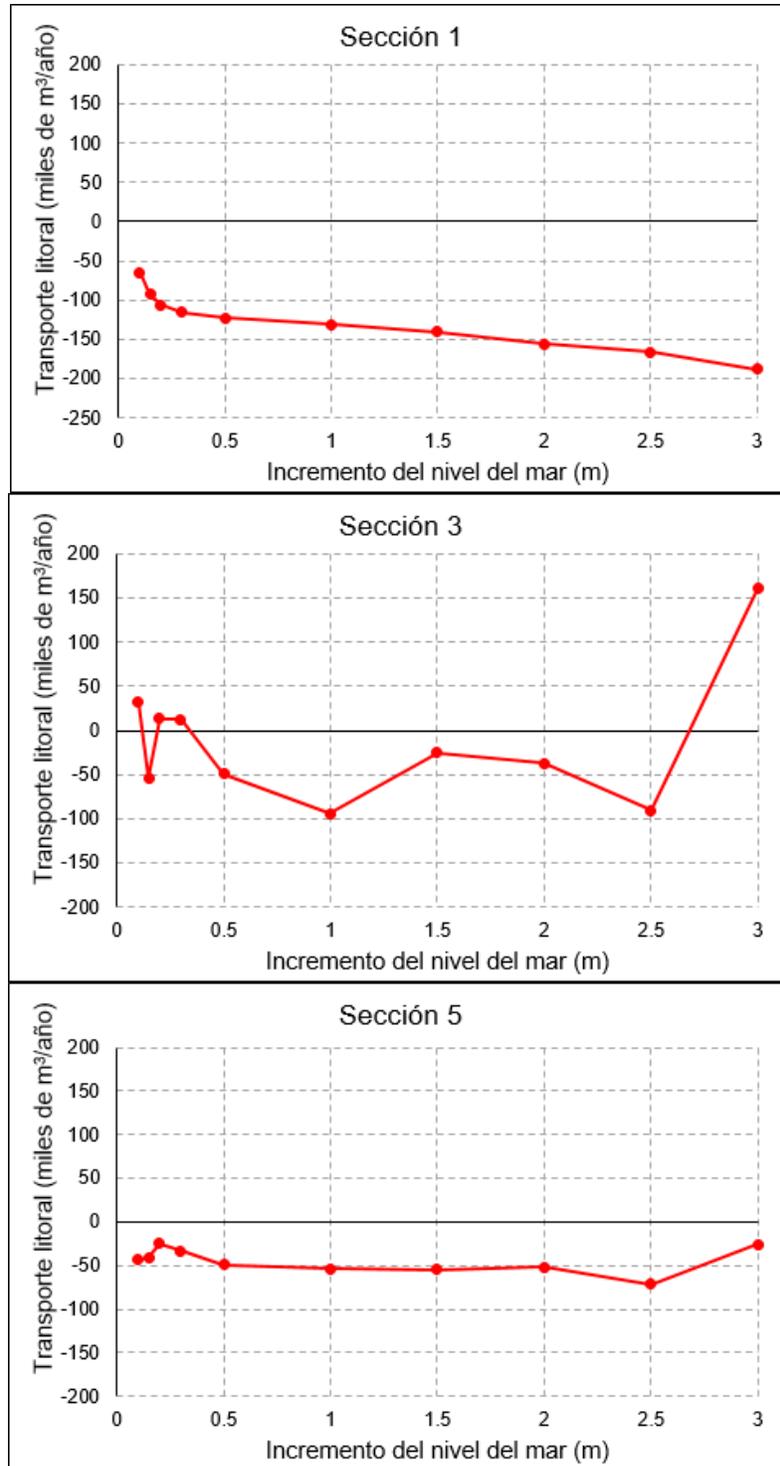
De los resultados de dichas modelaciones se obtuvo el gasto del transporte de sedimentos en las 6 secciones de control que se indican en la figura 3.30.



Fuente: Elaboración propia.

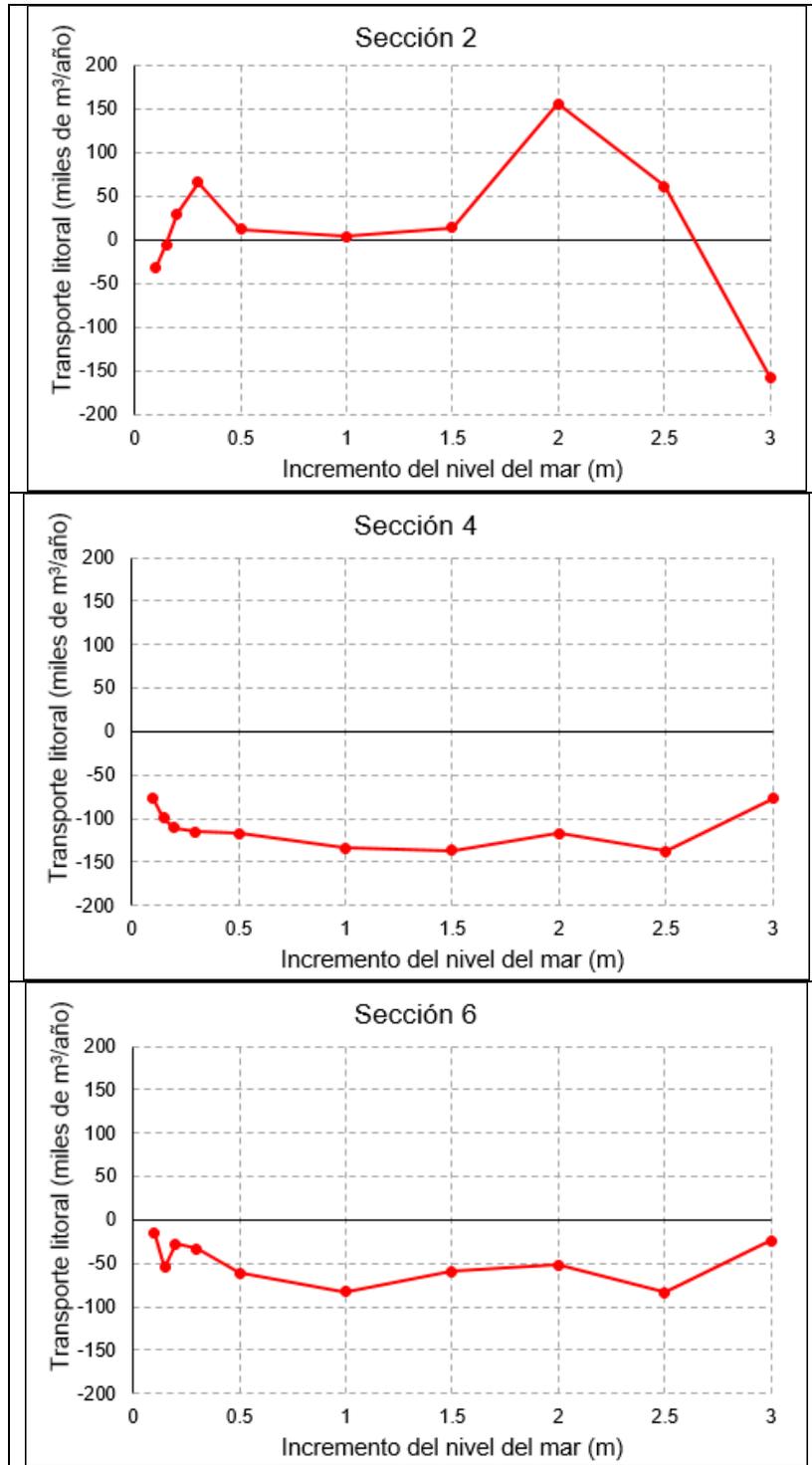
Figura 3.30 Ubicación de las secciones de control para el cálculo del transporte litoral

De los resultados obtenidos, se realizaron gráficas que relacionan los cambios en el transporte de sedimentos por efecto del incremento del nivel del mar, las cuales se muestran en las figuras 3.31 y 3.32.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.31 Gráficas de los escenarios de volúmenes de transporte litoral vs. incrementos del nivel del mar (1)



Fuente: Elaboración propia.

Figura 3.32 Gráficas de los escenarios de volúmenes de transporte litoral vs. incrementos del nivel del mar (2)

En las figuras 3.31 y 3.32, se puede observar que para las secciones 1 y 2, las cuales son las más cercanas al rompeolas, el incremento del nivel medio del mar influye en el aumento de volumen del transporte litoral, el cual es de aproximadamente 140,000 m³/año para la sección 1 y para la sección 2 es de casi 300,000 m³/año, en un rango de incremento de nivel de 0.10 a 3 m, cabe señalar que la diferencia de volumen corresponde al escenario de 3 m y los escenarios menores tienen una diferencia proporcional.

En las figuras 3.31 y 3.32, para las secciones 3 y 4, se muestra que en el mismo rango de incremento del nivel medio del mar el volumen de transporte litoral es menor con un aumento de aproximadamente 250,000 m³/año para la sección 3 y para la 4 es de 75,000 m³/año y para el escenario de 3m que es el máximo del rango, en los rangos menores la diferencia es proporcional.

En la figura 3.32, para la sección 5 la influencia es menor a 50,000 m³/año y para la sección 6 la influencia del incremento del nivel del mar en el volumen de transporte de sedimentos es del orden de los 50,000 m³// años se incrementa en comparación con la sección 5 tomando en cuenta que esta sección está más cerca de la desembocadura del río La Antigua, lo que nos indica que el mayor grado de influencia para el movimiento de volumen de transporte litoral se encuentra cercano al rompeolas.

4. Determinación de los impactos

Se determinaron los impactos, las amenazas, las zonas de vulnerabilidad, así como la identificación de los principales riesgos en la zona costera de sitio de estudio, para identificar las zonas de inundación con los escenarios de los incrementos del nivel del mar que se plantearon.

Las modificaciones producidas al medio natural, han provocado importantes desequilibrios en la tasa erosión-acumulación que regulan el equilibrio dinámico de la playa. En la mayoría de los casos, con consecuencias no deseables para la actividad turística tales como: altos costos de construcción y mantenimiento e instalación en la sociedad lo que ocasiona conflictos de intereses.

Grados de vulnerabilidad en zonas costeras:

1. Zonas con erosión extrema.
2. Zonas con erosión muy alta.
3. Zonas con alta erosión.
4. Zonas con erosión moderada.
5. Zonas con baja erosión.

De la evaluación de las características naturales regionales, las restricciones de los sectores de aporte de sedimentos y las interrupciones de la dinámica litoral a lo largo de la costa sirven para elaborar lineamientos principales para llevar adelante estrategias de carácter regional.

Para abordar la problemática de erosión, según la zonificación propuesta, se proponen estrategias locales para la mitigación de este proceso, aplicando tareas generales y específicas.

Para dar continuidad a los trabajos y aumentar su eficiencia es necesario llevar a cabo el monitoreo, evaluación y mantenimiento de las medidas de mitigación contra la erosión. (Marcomini.2008).

Vinculación de los ecosistemas con la protección de la costa contra el incremento del nivel del mar y la marea de tormenta

Los ambientes costeros y los ecosistemas se verán significativamente afectados tanto por el cambio climático (incremento del nivel del mar a largo plazo y la intensificación de las tormentas), como por los cambios ambientales ocasionados por los seres humanos. Estos cambios tendrán un impacto significativo en las zonas costeras altamente vulnerables.

Conde (2003), considera que el riesgo es una función de la amenaza como un agente externo y la vulnerabilidad como un agente interno; si tomamos en cuenta que el cambio climático se considera como la probabilidad de que un sistema determinado sufra un daño bajo la exposición a una perturbación o estrés climático”.

$$\text{Riesgo} = f(\text{Amenaza, Vulnerabilidad})$$

Donde:

- **Amenaza.** Es el factor relacionado con la probabilidad de ocurrencia de un evento natural específico, cuya intensidad sea capaz de dañar al sistema, por ejemplo, un evento climático adverso.
- **Vulnerabilidad.** Es el grado de exposición y fragilidad de un sistema, de tal forma que las amenazas climáticas representen daños a la economía, la población y/o el entorno que se estudia.
- **Riesgo.** Es la probabilidad de que se materialice de un peligro o de una amenaza vinculada al grado de impacto y vulnerabilidad ante un evento.

Detección de Amenazas

De acuerdo a la información recopilada y organizada en el sistema de información que se generó en el presente estudio, se determinó que la zona de estudio tiene las siguientes amenazas debido al incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático:

- Retroceso en la línea de playa en la zona de infraestructura portuaria adyacente al rompeolas Poniente del nuevo puerto de Veracruz, Ver.
- A la fecha, en la zona de estudio no se observan cambios en la configuración de la costa debidos a eventos hidro meteorológicos extremos, los cambios que se prevén son el retroceso de la línea de playa que se calcularon, mismos que se muestran en las tablas 4.1 a la 4.3.
- La principal amenaza es la zona que se muestra en la zona Norte del rompeolas Poniente en donde el retroceso afecta directamente a la infraestructura portuaria localizada en ese punto.

Identificación de zonas Vulnerables

Derivado de las modelaciones numéricas y la proyección del retroceso de la línea de playa debida al incremento del nivel del mar por efecto del cambio climático se prevé que la zona con mayor vulnerabilidad a daños en la zona de estudio es la parte Norte del rompeolas Poniente del Nuevo puerto de Veracruz.

En dicha zona el retroceso pronosticado afecta la infraestructura que forma parte de la zona de ampliación del nuevo puerto de Veracruz, lo cual en un futuro podría afectar en cierto grado as operaciones que se realizan en esa zona, en el presente estudio no se determinó en qué grado sería dicha afectación. Adicionalmente el hecho de que se presente un retroceso disminuye la capacidad de crecimiento en la zona ubicada entre el río de La Antigua y la parte norte del rompeolas Poniente.

Debido a que en la actualidad en esta zona no hay poblaciones ni desarrollos turísticos, en el presente estudio no se identificó que haya vulnerabilidad en el aspecto social o turístico, pero la información generada y presentada en las tablas 4.1 a la 4.3 puede servir de base para tomarla en cuenta en un ordenamiento territorial para limitar la zona donde se permitan construcciones o desarrollos ya sea de tipo inmobiliario o de infraestructura y determinar la zona a la que es conveniente tener como reserva para prever la materialización del riesgo del retroceso de la línea de playa y no se afecte en un futuro dichos desarrollos.

Identificación de riesgos

Los principales riesgos que se identificaron para la zona de estudio fueron:

- Riesgos debidos a fenómenos naturales, ocasionados por eventos hidrometeorológicos extremos.
- Erosión costera e inundaciones por el retroceso en la línea de playa debido al incremento del nivel medio del mar
- Incremento del nivel medio del mar debido a la sobre elevación por tormenta.
- Incremento en la magnitud de los vientos debido a eventos hidrometeorológicos extremos.
- Incremento de corrientes marinas por aumento en la temperatura del mar y debido al incremento de la magnitud del oleaje por efecto del cambio climático.
- Riesgos debido al incremento de actividades antropogénicas en la zona de estudio, al realizar desarrollos inmobiliarios, comerciales, turísticos o de infraestructura que queden dentro de la zona vulnerable al retroceso de la línea de playa, misma que se estimó en la presente publicación.

- Riesgo en la preservación de las dunas costeras debido al retroceso de la línea de playa.
- Riesgo de daño en zonas de cultivo sujetas a inundación por el incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático.
- Alteración de las desembocaduras en los ríos La Antigua, río Medio y río Grande debidas al incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático.

Determinación de los impactos

En las tablas 4.1 a la 4.3, se muestra el resumen de los retrocesos de la línea de playa obtenidos para todos los escenarios del cambio de la elevación del nivel del mar.

Tabla 4.1 Retrocesos máximos de la línea de playa

Incremento del nivel del mar (m)	Retrocesos máximos de la línea de playa (m)			
	Modelo			Promedio
	Bruun	Dean	Edelman	
0.10	26.513	59.007	39.072	41.531
0.15	39.770	72.095	58.612	56.826
0.20	53.027	85.183	78.153	72.121
0.30	79.540	111.359	117.242	102.714
0.50	132.567	163.710	195.445	163.908
1.00	265.134	294.588	391.100	316.941
1.50	397.702	425.466	586.965	470.045
2.00	530.269	556.345	783.192	623.269
2.50	662.836	687.223	980.176	776.745
3.00	795.403	818.101	1178.275	930.593

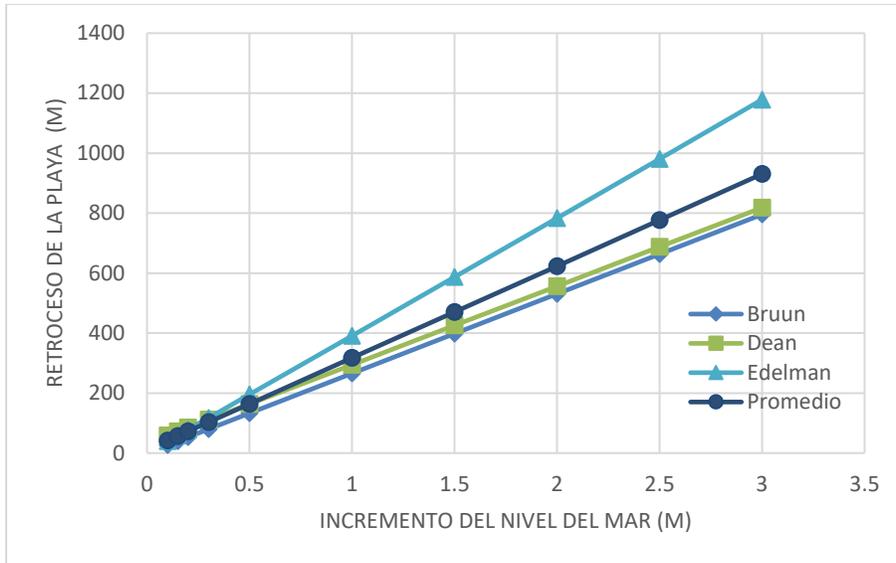


Figura 4.1 Retrocesos máximos de la playa obtenidos con los modelos estáticos del Beach Retreat Estimator

Tabla 4.2 Retrocesos mínimos de la línea de playa

Incremento del nivel del mar (m)	Retrocesos mínimos de la línea de playa (m)			
	Modelo			Promedio
	Bruun	Dean	Edelman	
0.10	5.19	6.55	6.86	6.20
0.15	7.78	8.84	10.29	8.97
0.20	10.38	11.14	13.72	11.75
0.30	15.57	15.73	20.59	17.30
0.50	25.95	24.92	34.34	28.40
1.00	51.90	47.88	68.81	56.20
1.50	77.84	70.84	103.42	84.03
2.00	103.79	93.81	138.15	111.92
2.50	129.74	116.77	173.03	139.85
3.00	155.69	139.73	208.03	167.82

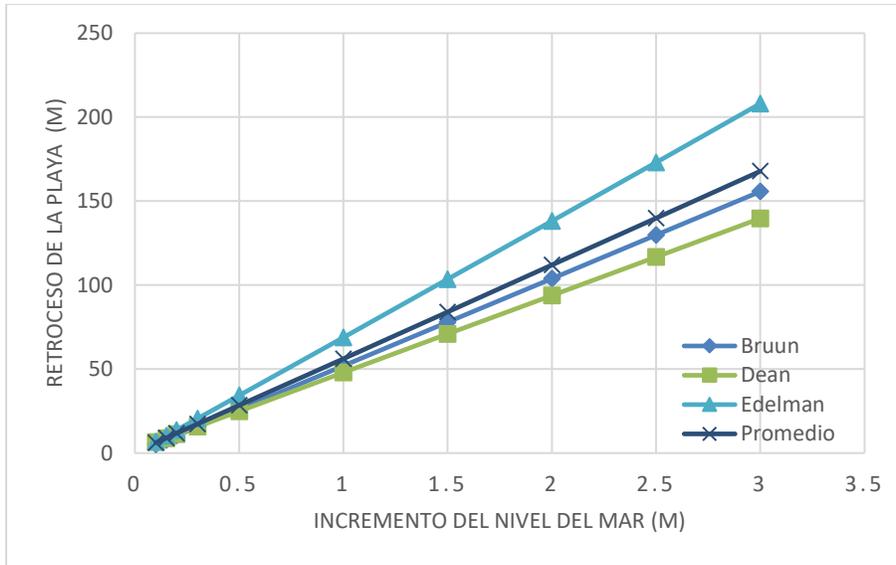


Figura 4.2 Retrocesos mínimos de la playa obtenidos con los modelos estáticos del Beach Retreat Estimator

Tabla 4.3 Retrocesos promedio de la línea de playa

Incremento del nivel del mar (m)	Retrocesos de la línea de playa (m)					
	Modelos estáticos			Modelos dinámicos		Promedio
	Bruun	Dean	Edelman	Leont'yev	Sbeach	
0.10	15.852	32.777	22.965	16.092	27.077	22.952
0.15	23.777	40.469	34.450	24.346	35.435	31.695
0.20	31.703	48.161	45.937	32.599	43.793	40.438
0.30	47.555	63.545	68.915	49.106	60.509	57.926
0.50	79.258	94.313	114.892	82.120	93.941	92.905
1.00	158.515	171.234	229.956	164.655	177.521	180.376
1.50	237.773	248.155	345.191	247.190	261.101	267.882
2.00	317.030	325.076	460.673	329.725	344.681	355.437
2.50	396.288	401.997	576.601	412.260	428.261	443.081
3.00	475.545	478.917	693.154	494.795	511.841	530.851

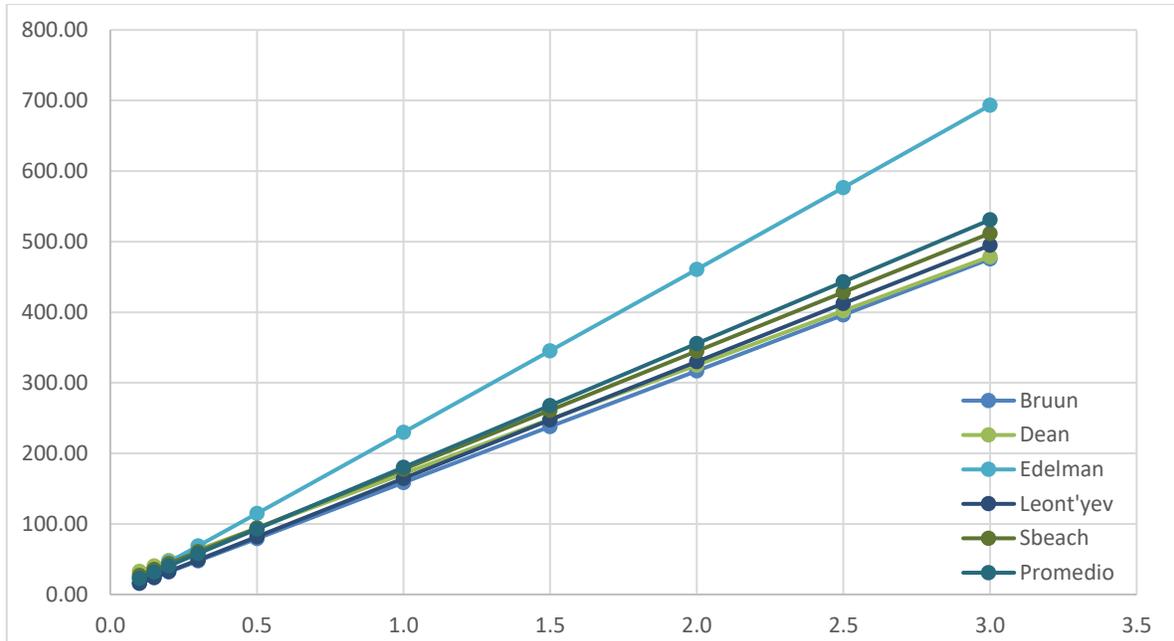


Figura 4.3 Retroceso promedio de la playa obtenidos con los modelos estáticos y dinámicos del Beach Retreat Estimator, donde la ecuación que se muestra en la gráfica define el retroceso promedio estimado en la línea de playa para la zona de estudio

Conclusiones

De conformidad con los resultados que se obtuvieron en el desarrollo de la investigación que se planteó, se establecieron las siguientes conclusiones:

- Derivado de la investigación realizada en el estado del arte y de la aplicación de la metodología RiVAMP, se concluye que para los escenarios con los que se aplicaron las modelaciones numéricas, los principales efectos del incremento del nivel medio del mar por efecto de cambio climático en la zona de estudio son el retroceso de la línea de playa, y debido a que la mayor parte de la zona de estudio no tiene zonas habitacionales o desarrollos inmobiliarios, comerciales o turísticos, la afectación en estos sectores es de bajo impacto, sin embargo en la zona Norte del rompeolas Poniente del nuevo puerto de Veracruz, si tiene afectación en parte de la infraestructura portuaria.
- Los retrocesos de la línea de playa que se calcularon tienen un tiempo esperado para que se presenten tomando en cuenta que la tendencia del incremento del nivel medio del mar pronosticado para el puerto de Veracruz es de 1.89 mm/año, por ello es necesario monitorear si dicha proyección corresponde al incremento real que se presenta en la zona de estudio y comparar si dicho valor corresponde a las proyecciones.
- La gestión de las zonas costeras depende de la interconexión y la interdependencia que existe entre los sectores social, económico, político, normativo, turismo, construcción, transporte, energía, los ecosistemas, el medio ambiente, etc., por esta razón los resultados del presente estudio se acotaron exclusivamente a identificar los impactos de los diferentes escenarios de incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático en la línea de costa.
- También los resultados sirvieron para identificar zonas de vulnerabilidad donde el ecosistema resulta afectado por los efectos del cambio climático, pero sobre todo se hace énfasis en identificar zonas de vulnerabilidad en la infraestructura portuaria, lo que de acuerdo a los resultados y al sistema de información donde se plasmaron las proyecciones de los impactos así se hizo.
- Así observamos el grado de sensibilidad del sistema que existe en la zona de estudio a los incrementos del nivel medio del mar por efecto del cambio climático y es necesario investigar acerca de la capacidad para adaptarse a dichos cambios.

- El sistema de información construido con los resultados obtenidos, permitió realizar una evaluación de zonas expuestas a la vulnerabilidad de los impactos debidos a los escenarios planteados para el incremento del nivel medio del mar por efecto del cambio climático.
- La información que se generó en el presente estudio es un primer acercamiento para tener una herramienta que permita de forma práctica obtener datos para el apoyo a la toma de decisiones y aportar una ayuda en el diseño de políticas públicas para la adaptación de zonas de infraestructura portuaria y costeras ante los efectos del incremento del nivel medio del mar debidos al cambio climático, dicha información es una aportación para que las zonas con infraestructura portuario y costera puedan tomar en cuenta el grado de afectación y el grado de vulnerabilidad al que están expuestas debido a los efectos del cambios climático y con ello tener un mayor soporte en la toma de decisiones.

De la investigación realizada en la publicación, se considera que es necesario determinar la variabilidad de las condiciones oceanográficas en México y abundar más en el tema de las tendencias locales y globales de las variables que afectan el retroceso en la línea de playa debidas al incremento del nivel medio del mar por efecto de cambio climático.

Se considera recomendable la identificación de cambios significativos en las variables que afectan la morfología costera y verificar si corresponden a las proyecciones realizadas por las diversas fuentes de información.

Bibliografía

- Toamil, A., Lozada, I., Camus, P., y Diaz, P. (2016). *Managing coastal erosion under climate change at regional scale*. Coastal Engineering, US.
- Bruun, P. (1988). *The Bruun rule of erosion by sea-level rise: A discussion on large-scale two and three-dimensional usages*. Journal of Coastal Research, US.
- Comisión Económica para América Latina (2007). *Presentación Regional del Reporte, Cambio Climático 2007: Impactos, Adaptación y Vulnerabilidad*. Por autores del Grupo de Trabajo II del IPCC de México, Costa Rica y Venezuela.
- Chatenoux, B., Peduzzi, P., y Velegrakis, V. (2012). *RIVAMP training on the role of Coastal and Marine ecosystems for mitigating beach erosion: The case of Negril Jamaica*. UNEP/GRID-Geneva, Geneva, Switzerland.
- Climate change 2007 (2007). *Climate change and its impacts in the near and long term under different scenarios*. Synthesis report, US.
- Conde, C. (2003). *Cambios y variabilidad climáticos, Dos estudios de casos en México*. Universidad Veracruzana. Tesis de Doctorado en Ciencias de la Tierra, UNAM, México.
- Conde, C., y Grayeb, B. (2005). *Escenarios de riesgo para el territorio veracruzano ante un posible cambio climático*. Universidad Veracruzana, México.
- González, J. (2017). *Metodología de análisis geoespacial para estudios de hidráulica marítima-costera mediante la aplicación de Vehículos Aéreos No Tripulados y equipos topográficos de última generación*. Instituto Mexicano del Transporte, México.
- Instituto Nacional, de Ecología (2008). *Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos*. INE, México.
- Instituto Nacional de Ecología (2012). *“Guía Metodológica para la Evaluación de la Vulnerabilidad ante Cambio Climático” (INE/PNUD, 2012)*. México.

- Intergovernmental Panel on Climate Change (2007). *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Allenbach, K., Garonna, I., Herold, C., Monioudi, I., Giuliani, G., Lehmann, A., y Velegrakis, A. (2014). *Black sea beaches vulnerability to sea level rise*. Environmental Science and Policy, US.
- Larson, M., y Kraus, N. (1998). *SBEACH: Numerical model for simulating storm-induced beach change*. US Army Corps of Engineers, US.
- Stive, M., y Vriend, H. (1995). *Modelling shoreface profile evolution*. International Journal of Marine Geology. Geochemistry and Geophysics, US.
- Marcomini, S. C., y López, R. A. (2008). *Erosión y manejo costero en Villa Gesell, Departamento de Geología*. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, Argentina.
- Ocaña, K. (2016). *Metodología para la caracterización de zonas costeras*. Tesis de doctorado, Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, España.
- Nunn, P. (1998). *Sea-Level over the past 1000 years in the Pacific*. Journal of Coastal Research, US.
- Dean, R. (1991). *Equilibrium beach profiles: characteristics and applications*. Journal of Coastal Research, US.
- Tejeda, A. (1993). *Los cambios climáticos actuales*. Gaceta 62; U.S.
- Tsanakas, K., Poulos, S., y Monioudi, I. (2017). *Sea level rise impact on the beach zone of Katerini región NW Aegean sea*. 15th International Conference on Environmental Science and Technology, US.
- Universidad Nacional Autónoma de México (2001). *“Potencial de la investigación científica y tecnológica en materia de cambio climático en México”*. Secretaría de Investigación y Desarrollo de la UNAM. México.
- United Nations Environment Programme (2010). *Linking Ecosystems to Risk and Vulnerability Reduction. The Case of Jamaica. Results of the Pilot Assessment*. Genova, Suiza.
- Varillas, A. (2007). *Artículo: Prevenir debacle turística por el cambio climático*. El Universal, Jueves 25 de enero de 2007 y Climate Change and International Tourism: A Simulation Study, Jacqueline Hamilton.



COMUNICACIONES

SECRETARÍA DE COMUNICACIONES Y TRANSPORTES



Km 12+000 Carretera Estatal 431 “El Colorado Galindo”
Parque Tecnológico San Fandila, Mpio. Pedro Escobedo,
Querétaro, México. C.P. 76703
Tel: +52 (442) 216 97 77 ext. 2610
Fax: +52 (442) 216 9671

publicaciones@imt.mx

<http://www.imt.mx/>