



UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



**VULNERABILIDAD FÍSICA DE LA ZONA COSTERA
DE TABASCO Y CAMPECHE, MÉXICO**

T E S I S

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE
DOCTORADO EN CIENCIAS EN ECOLOGÍA Y
MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES**

PRESENTA

RODIMIRO RAMOS REYES

ASESORA

Lilia María Gama Campillo

Villahermosa, Tabasco. Julio de 2016



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN



JUNIO 07 DE 2016

**C. RODIMIRO RAMOS REYES
PAS. DEL DOCTORADO EN ECOLOGÍA Y MANEJO DE
SISTEMAS TROPICALES
P R E S E N T E.**

En virtud de haber cumplido con lo establecido en los Arts. 80 al 85 del Cap. III del Reglamento de titulación de esta Universidad, tengo a bien comunicarle que se le autoriza la impresión de su Trabajo Recepcional, en la Modalidad de Tesis de Doctorado en Ecología y Manejo de Sistemas Tropicales titulado: **"VULNERABILIDAD FÍSICA DE LA ZONA COSTERA DE TABASCO Y CAMPECHE, MÉXICO"**, asesorado por la Dra. Lilia María Gama Campillo sobre el cual sustentará su Examen de Grado, cuyo jurado está integrado por el Dr. Humberto Hernández Trejo, Dr. Joel Zavala Cruz, Dra. Lilia María Gama Campillo, Dr. Daniel Pech Pool, Dr. Rufo Sánchez Hernández, Dr. Everardo Barba Macías y Dr. Alfonso Castillo Domínguez.

Por lo cual puede proceder a concluir con los trámites finales para fijar la fecha de examen.

Sin otro particular, me es grato enviarle un cordial saludo.

ATENTAMENTE
ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE

**M. EN C. ROSA MARTHA PADRON LOPEZ
DIRECTORA**

C.c.p.- Expediente del Alumno.
C.c.p.- Archivo

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

Miembro CUMEX desde 2008
**Consortio de
Universidades
Mexicanas**
UNA ALIANZA DE CALIDAD POR LA EDUCACIÓN SUPERIOR

KM. 0.5 CARR. VILLAHERMOSA-CÁRDENAS ENTRONQUE A BOSQUES DE SALOYA
Tel. (993) 358-1500 Ext. 6400, Fax (993) 354-4308 y 358-1579 E-mail: dirección.dacbiol@ujat.mx
Usar papel reciclado economiza energía, evita contaminación y despilfarro de agua y ayuda a conservar los bosques



**UNIVERSIDAD JUÁREZ
AUTÓNOMA DE TABASCO**

"ESTUDIO EN LA DUDA. ACCIÓN EN LA FE"

**DIVISIÓN ACADÉMICA DE CIENCIAS BIOLÓGICAS
DIRECCIÓN**



Villahermosa, Tab., a 07 de Junio de 2016

ASUNTO: Autorización de Modalidad de Titulación

**C. LIC. MARIBEL VALENCIA THOMPSON
JEFE DEL DEPTO. DE CERTIFICACIÓN Y TITULACION
DIRECCIÓN DE SERVICIOS ESCOLARES
P R E S E N T E**

Por este conducto y de acuerdo a la solicitud correspondiente por parte del interesado, informo a usted, que en base al reglamento de titulación vigente en esta Universidad, ésta Dirección a mi cargo, autoriza al: **C. RODIMIRO RAMOS REYES** egresado del Doctorado en **ECOLOGÍA Y MANEJO DE SISTEMAS TROPICALES** de la División Académica de **CIENCIAS BIOLÓGICAS** la opción de titularse bajo la modalidad de Tesis de Doctorado denominado: **"VULNERABILIDAD FÍSICA DE LA ZONA COSTERA DE TABASCO Y CAMPECHE, MÉXICO"**.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para saludarle afectuosamente.

A T E N T A M E N T E

**M. EN C. ROSA MARTHA PÁDRON LOPEZ
DIRECTORA DE LA DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS**

C.c.p.- Expediente Alumno de la División Académica
C.c.p.- Interesado

UJAT
DIVISIÓN ACADÉMICA
DE CIENCIAS BIOLÓGICAS



DIRECCIÓN

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco

CARTA AUTORIZACIÓN

El que suscribe, autoriza por medio del presente escrito a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco para que utilice tanto física como digitalmente el Trabajo Recepcional en la modalidad de Tesis de doctorado denominado: **“VULNERABILIDAD FÍSICA DE LA ZONA COSTERA DE TABASCO Y CAMPECHE, MÉXICO”**, de la cual soy autor y titular de los Derechos de Autor.

La finalidad del uso por parte de la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco el Trabajo Recepcional antes mencionada, será única y exclusivamente para difusión, educación y sin fines de lucro; autorización que se hace de manera enunciativa más no limitativa para subirla a la Red Abierta de Bibliotecas Digitales (RABID) y a cualquier otra red académica con las que la Universidad tenga relación institucional.

Por lo antes manifestado, libero a la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco de cualquier reclamación legal que pudiera ejercer respecto al uso y manipulación de la tesis mencionada y para los fines estipulados en éste documento.

Se firma la presente autorización en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a los 07 Días del mes de Junio de 2016.

AUTORIZO



RODIMIRO RAMOS REYES

Dedicatoria

A Dios por ser tan paciente conmigo.

A mis padres Tomás Ramos Gómez† y Soledad Reyes Mollinedo, que son y serán siempre mi guía impulsando mi formación.

A la que me ha acompañado todo este tiempo, ha tenido plena confianza en mí, presente en cada momento de este proyecto, porque cuando la he necesitado siempre está dispuesta a escucharme, tal vez la he cansado con mis pláticas sobre el tema, pero aun así sigue a mi lado incondicionalmente, es poco decirte a ti esposa Leydi Diana Mena de la Rosa.

A mi banda formada por mis hijos Bella Lizet, Brillante y Tomás que forman la familia Ramos-Mena, gracias porque me han dado el amor necesario para salir victorioso en este reto de mi vida, que sin saberlo han aportado con su paciencia, con momentos felices y porque igual les he robado tiempo que no les he dedicado, por eso esto es también su logro hijos.

A todos mis hermanos y sobrinos, en verdad los quiero mucho y gracias por compartir momentos que me han dado mucha felicidad y me han permitido ser mejor persona.

A los hermanos de la Cruzada, por dejarme ser parte de ellos. Que por el hecho de estar presentes, han servido de mucho en mi vida.

Agradecimientos

A la División Académica de Ciencias Biológicas (DACBIOL) de la UJAT, por darme la oportunidad de realizar el Doctorado en Ciencias, me ha aportado mucho a mi vida profesional.

Al proyecto FOMIX del Estado de Yucatán “*Sensibilidad de la vulnerabilidad de los ecosistemas costeros del sureste de México ante el cambio climático global*”, con clave TUC-2008-C06-108929, por darme una beca de un año en el estudio de posgrado.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por su apoyo financiero brindado en los últimos tres años de mis estudios de posgrado.

A la Universidad Juárez Autónoma de Tabasco (UJAT), que por medio del Programa Institucional de Superación Académica (PISA), nos brindó financiamiento.

A la Universidad Popular de la Chontalpa (UPCH) por darme su apoyo para realizar mi estudio de posgrado, una institución noble y con mucho futuro.

Al ECOSUR unidad Villahermosa, por ser parte importante de este logro.

Al Consejo de Ciencia y Tecnología del Estado de Tabasco (CCYTET), por ser representante de la ciencia y la tecnología en Tabasco.

También al Colegio de Postgraduados Campus Tabasco, que siempre ha estado presente en mi crecimiento académico.

A mi asesora Lilia María Gama Campillo, por todo su apoyo cuando lo requerí y además por confiar en mí para salir adelante en este reto académico.

Al comité tutorial los doctores Humberto Hernández Trejo, Mario Arturo Ortiz Pérez† y Daniel Pech Pool, por su paciencia y recomendaciones en cada uno de las evaluaciones durante mi formación académica de esta etapa de mi vida.

Al comité sinodal doctores Joel Zavala Cruz, Rufo Sánchez Hernández, Everardo Barba Macías y Alfonso Castillo Domínguez, por sus recomendaciones aportadas al escrito y ser parte de colaboraciones en experiencias.

Quiero expresar sinceramente mi reconocimiento al Dr. Joel Zavala Cruz, quien además de ser parte de mis sinodales, es una persona muy dedicada y ha estado siempre presente en mi formación académica y mucho de lo que soy profesionalmente, se lo debo a él. Además por ser un gran amigo.

A mi amigo y casi hermano Irael Camposeco Pardo, por estar aquí en la jugada.

A mi generación 2012-2016, gracias mis estimados Miguel, Francisco, Carlos y Raúl.

RESUMEN

Las zonas costeras de los estados de Tabasco y Campeche enfrentan el efecto del cambio climático (CC), debido a su ubicación geográfica, son propensas a erosión e inundación, afectando tierras de cultivos cercanos a la costa, reduciendo la diversidad biológica, paisajísticas y sus ecosistemas hidrológicos. Otro aspecto ocasionado por el CC es el incremento del nivel del mar (INM), que aumenta la vulnerabilidad de las comunidades costeras provocando pérdida de superficie de los manglares. Los propósitos de esta investigación son 1) Estudiar la adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático; 2) Analizar los cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México y, 3) Aplicar los indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México. Para tal medición se utilizó el índice de vulnerabilidad costera (IVC) como adaptabilidad, dinámica de cambio de uso de suelo e indicadores geomorfológicos. Donde la dinámica de usos, consistió en la comparación de dos periodos del 2000-2010. Por otra parte se zonificaron los paisajes geomorfológicos y relieves indicadores de vulnerabilidad. Se identificó la disminución del pastizal en 4.06%, el cual se utilizó para uso agrícola y urbano. En cuanto a la geomorfología se encontraron ocho paisajes en una superficie de 22 322.3 km², el 48% de la planicie costera contienen los relieves con vulnerabilidad muy extrema y muy alta ante el ascenso del nivel del mar, debido al CC. Se concluye que el enfoque del IVC es posible aplicarlo considerando variables que contribuyen a la adaptación de la costa, como es la geomorfología costera, pendiente costera, aumento del nivel del mar, cambio en la línea de costa, oleaje y rango mareal. En el caso particular del litoral tabasqueño, las variables sedimentación y subsidencia puede robustecer la predicción de los impactos del INM. Los cambios de uso del suelo ocurridos no se recomiendan, ya que podría afectar negativamente la fertilidad de los suelos. La zona más vulnerable incluye varias ciudades portuarias que involucran 437 836 habitantes, y las reservas ecológicas Laguna de Términos, Petenes y Pantanos de Centla.

Palabras clave: costa, vulnerabilidad, usos del suelo, geomorfología, erosión costera, inundación, incremento del nivel del mar y cambio climático.

ABSTRACT

The coast zone of the states of Tabasco and Campeche are facing the effect of the climate change (CC); due to their geographic location, they are prone to erosions and flooding, affecting farming lands near to the coast and reducing the bio-diversity landscape and its hydrologic ecosystem. Other aspect provoked by CC is the increase of the sea level (ISL), that increase the vulnerability of those coast communities provoking some loss in the mangrove surface. The main goals of this research are 1) to study the adaptation of the coast vulnerability model in the Tabasco coast in front of the climate change; 2) To analyze the change in the land use in the coast municipality of Comalcalco, Tabasco, México and 3) To apply the geomorphological indicators to evaluate the vulnerability by flooding in front of the increase of the sea level due to the climate change in the coast of Tabasco and Campeche, México. For this measurement it was used the coastal vulnerability index (IVC) as dynamic adaptability of change in the land use and the geomorphological indicators where the dynamic of uses consisted in the comparison of two periods from 2000 to 2010. In the other hand it was zoned the geomorphological landscape and the vulnerability reliefs indicators. It was identified the decrease of the grassland in 4.06% which was used for farming lands and urban. Regarding the geomorphology it was found 8 different landscapes in a 22 322.3 km² surface, 48% coastal plains has the relief with vulnerability very extreme and very high due to the increase of the sea level because of the CC. It was concluded that the perspective of the IVC is possible to the apply it, considering variable that contribute to the coast adaptation as the coast geomorphology, coast slope, the increase of the sea level, changes in the coast's line, waves and tidal range. In the particular case of the tabasco's littoral the sedimentation variables and subsidence can identify the prediction of the impacts of the ISL. The change of the land use occurred it is not recommended because this could affect in a negative way on the soil fertility. The highest vulnerable zone includes several ports cities that involves 437,836 inhabitants and the ecological reserves of Laguna de Términos, Petenes and Los Pantanos de Centla.

Keywords: coast, vulnerability, land use, geomorphology, coastal erosion, flooding, sea level rise and climate change.

ÍNDICE GENERAL

	Página
Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
RESUMEN.....	iv
ABSTRACT.....	v
CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN.....	2
1.1 En el contexto.....	2
1.2 Objetivos.....	6
1.3 Hipótesis.....	6
1.4 Estructura de la investigación.....	7
1.5 Antecedentes.....	7
1.5.1 Vulnerabilidad de las costas a nivel mundial.....	7
1.5.2 Vulnerabilidad de las costas en el sureste mexicano.....	9
1.5.3 Métodos de medición de vulnerabilidad en costas.....	11
1.6 Conclusiones.....	13
1.7 Literatura citada.....	14
CAPITULO 2. ARTÍCULOS.....	19
2.1 Artículo 1. Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático.....	19

2.2 Artículo 2. Análisis de cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México.....	33
2.3 Artículo 3. Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México	44
CAPITULO 3. CONCLUSIONES GENERALES	83
ANEXOS: PRODUCTIVIDAD GENERADA DURANTE EL DOCTORADO	85

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO 2. ARTÍCULOS

Artículo 1. Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático	
Figura 1. Zonas vulnerables al incremento del nivel del mar.....	22
Figura 2. Impacto producido por el INM. Sánchez Magallanes, Cárdenas, Tabasco.....	23
Figura 3. Componentes de la vulnerabilidad. Con base en Ojeda <i>et al.</i> (2011) y Klein y Nicholls (1999).....	23
Figura 4. Componentes para evaluar vulnerabilidad por exposición en las costas de Tabasco. Con base en Gornitz <i>et al.</i> (1992), Shaw <i>et al.</i> (1998), Thieler y Hammar (1999) y Ojeda <i>et al.</i> (2009).....	26

Artículo 2. Análisis de cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México

Figura 1. Usos de suelo, identificados en el municipio de Comalcalco, Tabasco en el año 2000.....37

Figura 2. Usos de suelo, identificados en el municipio de Comalcalco, Tabasco en el año 2010.....37

Figura 3. Cambios de usos de suelo registrados en el periodo 2000-2010 en el municipio de Comalcalco, Tabasco.....38

Figura 4. Cambios de uso según grupos de suelo identificados en el municipio de Comalcalco, Tabasco.....39

Artículo 3. Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México

Figura 1. Localización del área de estudio en los estados de Tabasco y Campeche, México.....51

Figura 2. Paisajes geomorfológicos de la costa de Tabasco y Campeche, México.....55

Figura 3. Relieve/modelado de la costa de Tabasco y Campeche, México.....57

Figura 4. Vulnerabilidad geomorfológica de la costa de Tabasco y Campeche, México.....63

ÍNDICE DE CUADROS

CAPITULO 2. ARTÍCULOS

Artículo 1. Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático

Cuadro 1. Variables consideradas en cada uno de los países evaluados.....25

Cuadro 2. Ambientes considerados en la variable Geología-Geomorfología.....28

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO 2. ARTÍCULOS

Artículo 2. Análisis de cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México

Tabla 1. Superficie de suelo según su uso, en el municipio de Comalcalco Tabasco, durante el periodo 2000-2010.....36

Artículo 3. Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México.....

Tabla 1. Clases de vulnerabilidad a la inundación ante el ascenso del nivel del mar asociada a tipos de relieve/modelado costero con base en Thieler y Hammar (1999) y Ojeda *et al.* (2009), modificadas en el presente estudio.....52

Tabla 2. Relieve/modelado indicador de vulnerabilidad geomorfológica en la zona costera de Tabasco y Campeche, México.....62

CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN

1.1 En el contexto.

Se habla mucho en todo el mundo sobre los problemas en las costas, principalmente porque los panoramas o escenarios pronosticados no se ven nada alentadores, son resultados absolutamente negativos, donde muestran la recuperación de las orillas por el agua, es decir como el mar irá ganando terreno y consumiendo la línea costera, esta situación por consiguiente es algo muy alarmante sobre todo para la población ubicada en zonas del litoral, aunado a esto, las localidades más cercanas al mar se enfrentan a problemas de vulnerabilidad por diversos factores tanto naturales como antrópicos.

Por tal situación es relevante el análisis de las zonas costeras, ya que tienen un grado de importancia superior a las demás zonas y son un foco de atención en relación al cambio climático, que como ya sabemos es uno de los temas que más preocupa a todas las disciplinas por sus efectos repetidos en los últimos años, como son los desastres naturales.

El estudio de la vulnerabilidad física en la costa de Tabasco y Campeche, es importante además de valiosa porque pretende focalizar y generar información espacial actualizada y en algunas partes a mucho detalle, sobre la situación de la geomorfología, erosión costera, variaciones del nivel del mar, cambios de usos, entre otras, siendo de mucha utilidad para poder generar modelos de vulnerabilidad a escalas más locales y además recursos de vital importancia para los ordenamientos costeros que están en manos de gobiernos, personal experto y tomadores de decisión.

En la actualidad un sin número de instituciones académicas, así como organizaciones no gubernamentales han reconocido que los problemas derivados de fenómenos climáticos extremos, afectan directamente a los ecosistemas costeros. México no es la excepción, pues ha enfrentado en los últimos años el efecto de varios huracanes (Roxana y Opal en 1995, Paulina en 1997, Isidoro en 2002, Wilma en 2005 y Dean en el 2007), siendo cada vez más intensos, provocando el desgaste de costa por erosión, la introducción del mar a tierra firme y la salinidad de las localidades costeras, además de pérdida de infraestructura que afecta el desarrollo turístico.

En los últimos años los huracanes, sequías y lluvias intensas se han incrementado, provocando que sea más vulnerable la costa (Botello y Villanueva-Fragoso, 2010; Carranza-Edwards, 2010; Jacob, 2010; Martínez-Arroyo, 2010; Yáñez-Arancibia y Day, 2010; Yáñez-Arancibia *et al.* 2010) argumentan que dichos cambios son generados y atribuidos al Cambio Climático (CC), pues la acción conjunta de estos factores inducen a una mayor vulnerabilidad (Sánchez, 2010).

La ocurrencia de estos fenómenos de manera inesperada ha ocasionado pérdidas incuantificables, las cuales son muy difíciles de recuperar. Sin embargo, los avances científicos y tecnológicos, han facilitado la implementación de herramientas efectivas como la teledetección y los sistemas de información geográfica (SIG), que permiten hacer análisis geográficos, comparaciones entre dos periodos y generar posibles estrategias a la zona costera.

Adicionalmente, el cambio de uso del suelo que es frecuente en la zona costera, magnifica los impactos inducidos por el cambio climático (Yáñez-Arancibia y Day, 2010). Los cambios de uso del suelo con fines agropecuarios (Kundzewicz *et al.* 2007) y de desarrollo urbano e industrial provocan pérdida de hábitats de las principales especies (Magaña *et al.*, 2011).

En este contexto, con el análisis histórico espacial de la línea de costa es posible diferenciar la forma antigua del litoral y el deterioro sufrido en los últimos años, con problemas de pérdidas de barreras físicas y retroceso de un promedio de hasta 3 metros por año de algunas zonas costeras (Hernández-Santana *et al.* 2008; Ortiz-Pérez *et al.* 2010), trayendo como consecuencia afectaciones sociales en las orillas o bordes de playas en Tabasco y Campeche.

Por otra parte, las causas de la erosión de playas son múltiples y se relacionan directamente con el crecimiento de la población (Carranza-Edwards, 2010). Por lo tanto, debemos aumentar la resiliencia en los ecosistemas humanos y ecológicos, esto es la mejor manera de hacer frente al riesgo de desbordamiento, porque la disminución de la barrera vegetal agravaría los eventos de inundación en la parte urbana y podrían volverse más extremos bajo el cambio climático (Magaña *et al.*, 2011). Sin embargo, cabe resaltar que las barreras tanto naturales como hechas por el humano, son de una ayuda importante porque impiden o limitan la entrada del agua del mar continente adentro.

Por otro lado, no es nada nuevo que la temperatura esté aumentando, las proyecciones dadas por diversos modelos auguran un aumento que va de 1 a 4 °C para Latinoamérica hacia el final de este siglo (Magrin *et al.* 2007), siendo una de las consecuencias esperadas por fenómenos como el climático, el aumento del

nivel del mar que afectará las zonas costeras, dónde Tabasco (T) y Campeche (C) son más susceptibles, debido a su ubicación y características físicas muy regionales como el bajo relieve; lo que está provocando pérdida de tierra firme e infraestructura de las ciudades costeras, además de ser un riesgo latente para las poblaciones asentadas en la costa.

Hoy en día el espacio costero está inmerso en una encrucijada, al estar atrapadas entre el desarrollo urbano costero y el aumento del nivel del mar (Kundzewicz *et al.* 2007). Por otro lado, la erosión costera es una evidente situación que se agudiza al asociarlo con el alto crecimiento poblacional (Carranza-Edwards, 2010).

El presente trabajo se realizará usando el enfoque de vulnerabilidad costera ante el cambio climático, asociando datos de patrones de erosión, geomorfología, pendiente, cambios de usos del suelo, variaciones del nivel del mar y olas que pueden ser medidos, mediante variables cuantitativas manipuladas con los SIG, para generar mapas que representen lo más apegado a la realidad y para poder visualizar zonas denominadas foco rojos o de mucha prioridad de las áreas más vulnerables, para que las autoridades puedan buscar soluciones o alternativas viables particulares a cada sitio.

1.2 Objetivos.

- a) Estudiar la adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático.
- b) Analizar los cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México.
- c) Aplicar los indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México.

1.3 Hipótesis.

La costa de Tabasco y Campeche ha perdido extensión territorial, debido al ascenso del nivel del mar, erosión costera, cambios de usos del suelo y vulnerabilidad geomorfológica a lo largo del litoral. Estas causas se pueden presentar de manera diferenciada a lo largo de la costa, existiendo zonas con mayor vulnerabilidad física, que reflejan la pérdida del territorio a mediano o largo plazo.

1.4 Estructura de la investigación.

La organización de la tesis está diseñada por capítulos, los cuales se describen a continuación:

Capítulo 1. Se muestra la introducción, dando un contexto general de lo que engloba la investigación.

Capítulo 2. Se encuentra compuesto por tres artículos (dos publicados y otro aceptado), cubriendo los objetivos planteados en la investigación. Artículo 1 (publicado). Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático. Artículo 2 (publicado). Análisis de cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México. Artículo 3 (Aceptado en mayo de 2016, para su publicación). Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México.

Capítulo 3. Es el último de los apartados y se publican las conclusiones generales de la tesis.

1.5 Antecedentes.

1.5.1 Vulnerabilidad de las costas a nivel mundial

Si nos ponemos a visualizar a nivel mundial, los países que enfrentan mayores complicaciones de vulnerabilidad en sus costas son Vietnam, India, Indonesia, China y Bangladesh. En México destaca el Golfo de México y el Mar Caribe, por lo que se realizó una búsqueda exhaustiva de trabajos relacionados a la costa, con vulnerabilidad.

En el continente Asiático Gui-Shan, *et al.* (2001) delimitó zonas vulnerables mediante observaciones y toma de muestras en campo aplicando SIG con una proyección al año 2050, en la costa de Jiangsu, China; estimaron pérdidas de 7.9% de la tierra cultivada, 2.0% de la población, 3.2% del producto interno bruto (PIB), 40.3% de la industria de la sal y 5.8% acuicultura.

Por su parte entre el continente Asiático y Oceanía Aris-Marfaí y King (2008) evaluaron los riesgos a la población, el uso del suelo y las pérdidas económicas por inundaciones costeras ante la subida del mar para dos escenarios posibles. Utilizando datos de profundidad de la inundación se obtuvieron modelos con GIS-Technology, en dos escenarios en Indonesia donde se encontró que 20 localidades costeras son las más vulnerables y pérdidas en agricultura entre 500 y 700 hectáreas (ha).

De igual manera Arun y Kunte (2012) para el territorio Asiático creó índice de vulnerabilidad costera, específicamente para la costa Chennai, India con ocho variables de riesgo relativo para conocer las zonas altas y bajas vulnerables con SIG. Los datos mostraron baja vulnerabilidad para 11.01 km, 16.66 km vulnerabilidad media y 27.79 km es altamente vulnerable.

Tal como lo menciona Boateng (2012) igual dentro del continente Asiático evaluó las políticas y planes de acción frente a la vulnerabilidad por el cambio climático en Vietnam, observó un escenario de aumento del nivel del mar de 1 metro, siendo la principal amenaza en la ciudad, donde el desarrollo económico está asentado en la costa.

Más recientemente Islam *et al.* (2015) usando la teledetección y los SIG aplicados a un índice de vulnerabilidad costera, encontraron que en Bangladés, Asia, el 51% (132.5 km) tienen de muy alta a alta vulnerabilidad, debido a que las costas están sometidas a situaciones indeseables, asociado al cambio climático y el aumento del nivel del mar.

Por su parte Pikelj y Juracic (2013) en el continente Europeo en particular en la costa del Adriático oriental, donde los entornos son rápidamente cambiantes a causa de las actividades antropogénicas (industria, la urbanización, el turismo y la producción de alimentos), provocando vulnerabilidad a la erosión causada por cambios costeros humanos cada vez más frecuentes y significativos.

Estudios similares pero para las costas de Accra, Ghana del continente Africano, Addo (2013) encontró que las zonas costeras son moderadamente vulnerable al cambio climático, asociado al aumento del nivel del mar, trayendo inundaciones y causando desplazamientos de la población local.

Un trabajo más reciente de Ellison (2015) e igual para el continente Africano avala que el cambio climático y en particular el aumento del nivel del mar es un importante efecto sobre la vulnerabilidad de los manglares costeros.

1.5.2 Vulnerabilidad de las costas en el sureste mexicano

Tapia-Cerino (2007) realizó una evaluación del impacto de la subida del nivel del mar asociada a los sistemas naturales y humanos en la planicie costera

tabasqueña, obteniendo el mayor efecto en el sistema lagunar, Carmen-Pajonal-Machona y el delta Usumacinta-Grijalva.

Hernández-Santana *et al.* (2008) realizaron un trabajo que expuso las tendencias morfodinámicas (retroceso-acreción) del margen costero estatal en puntos estratégicos, correspondientes a los años, 1943, 1972, 1984 y 1995 apoyado con observaciones y mediciones geomorfológicas de campo (2003-2004). Obteniendo para Sánchez Magallanes un retroceso costero alarmante de -3 a -5 metros por año.

Ortiz-Pérez *et al.* (2010) analizaron las modificaciones de la línea de costa del año 1995 y 2008, calcularon las tasas de retroceso *versus* avance, encontrando un ascenso del nivel del mar en el delta del Mezcalapa, seguido por el tramo que cubre la desembocadura del río San Pedro y San Pablo y un retroceso de la línea costera hacia el mar de 3 metros por año.

La principal amenaza para la región de Tabasco está en el aumento del nivel del mar, que amplifica el impacto de los eventos de lluvias extremas con un gran transporte de azolves alterando la geomorfología de la región (Magaña *et al.*, 2011).

Algunas zonas tropicales montañosas, tendrán mayor incremento en precipitación y en el caso del trópico, asociado con mayor frecuencia e intensidad de huracanes, menos salidas hacia el norte y condiciones más salinas en latitudes tropicales-subtropicales, pero el impacto más significativo es el acelerado ascenso del nivel medio del mar. Villahermosa y Ciudad del Carmen, estas ciudades costeras están vinculadas con lagunas costeras y estuarios, altamente vulnerables al cambio climático (Yáñez-Arancibia y Day, 2010).

1.5.3 Métodos de medición de vulnerabilidad en costas

La forma de medir vulnerabilidad es indefinida actualmente, esto se debe a los múltiples parámetros implicados.

La primer metodología aplicada en la evaluación de vulnerabilidad fue propuesta por el IPCC en 1992 (The Common Methodology), esta evaluación marcó una era en el contexto de las evaluaciones ambientales a nivel mundial (Green y McFadden, 2007).

A partir del 2001 el Servicio Geológico de Estados Unidos inició evaluaciones científicas de vulnerabilidad en las costas, incluyeron una variedad de ambientes geológicos y físicos en el Atlántico y Pacífico de Estados Unidos, Golfo de México, Golfo de Alaska y El mar Caribe (Pendleton, Thieler y Williams, 2010).

Entre los trabajos en los últimos 20 años realizados para evaluar la vulnerabilidad de los litorales se pueden referir los de Gornitz (1990), Thieler y Hammer-Klose (1999), Kokot *et al.* (2004), Diez *et al.* (2007) y Ojeda *et al.* (2009). Una estrategia común en todos ellos es el cálculo de un índice de vulnerabilidad en donde se agrupa y combina una serie de variables para obtener un valor único que permita jerarquizar los tramos de costa de interés, con base en su mayor a menor vulnerabilidad física.

Si bien hay 25 formas de evaluar la vulnerabilidad (ONU & CEPAL, 2012), esto permite múltiples maneras y enfoques de trabajarla.

Debido a las múltiples facetas que presenta, la vulnerabilidad es muy difícil de medir por lo que no existe una metodología universal para su determinación y su

análisis se debe adaptar a objetivos específicos y escalas adecuadas al contexto de la zona de estudio. La vulnerabilidad debe tener en cuenta tres aspectos: medio físico, medio ecológico y medio socioeconómico. Se enfocará al aspecto físico (ONU & CEPAL, 2012) donde se involucra el medio natural (Ojeda, *et al.* 2009). Estos últimos autores sugieren que para la correcta comprensión de los resultados del mismo, es esencial enfatizar que se trata de un índice relativo de la vulnerabilidad de la costa ante la potencial subida del nivel del mar.

Se trata de un “índice” o valor integrado”, calculado a partir de 6 variables (geomorfología, pendiente, tasas de erosión costera, altura del oleaje significativo, cambios del nivel relativo del mar y rango mareal medio). Metodología usada por el servicio geológico de Estados Unidos y probada igual en Canadá, Indonesia y España (Ojeda, *et al.* 2009).

Recientemente se han realizado evaluaciones de vulnerabilidad en todo los países con litorales costeros. En México solo se han realizado trabajos para medir comportamiento de la línea de costa, no se han realizado evaluaciones que permitan saber los niveles de vulnerabilidad donde se incluyan una integración de variables.

1.6 Conclusiones.

Los diversos estudios relacionados con vulnerabilidad en las costas de muchos países debido a los efectos de cambio climático, han servido para determinar la línea a seguir en esta investigación. De acuerdo a la revisión de la bibliografía se definieron los objetivos, hipótesis y estructura para la evaluación y ponderación de los indicadores de vulnerabilidad en la costa tabasqueña y parte de Campeche.

La investigación se fue orientando sobre la importancia de tener un modelo de vulnerabilidad aplicable a la zona de estudio, pues debido a las diferentes variables de cada zona costera sabemos no se puede dar un modelo estático para todas las áreas en los diferentes países.

En este capítulo se discutieron las bases bibliográficas identificadas para llevar a cabo cada uno de los artículos que engloban los estudios, descubrimientos y propuestas que conforma el presente documento de investigación. Haber revisado cada uno de los autores y propuestas que se mencionan, propició la búsqueda y aplicación de las técnicas para encontrar respuestas sobre el problema de vulnerabilidad costera, así como la preparación de cada uno de los artículos como resultado de la investigación.

1.7 Literatura citada.

- Addo, K., 2013, Assessing coastal vulnerability index to climate change: the case of Accra – Ghana: *Journal of Coastal Research*, 1892-1897, doi:10.2112/SI65-320.1
- Aris-Marfai, M y King L. 2008. *Journal Environmental Geology*. [e-journal]. Volume 54, Issue 6 (1235-1245). Disponible a través de: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00254-007-0906-4.pdf>
- Arun, K. A; Kunte P.D. 2012. Coastal vulnerability assessment for Chennai, east coast of India using geospatial techniques. *Journal Natural Hazards*. Volume 64, Issue 1 (853-872) <http://link.springer.com/article/10.1007/s11069-012-0276-4#page-1>
- Botello, A.V. y Villanueva-Fragoso S. 2010. Introducción, p. 1-14. En: Botello, A. V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de la zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Gobierno del Estado de Tabasco. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyI, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- Carranza-Edwards, A. 2010. Causas y Consecuencias de la Erosión de Playas. En: A. Yáñez-Arancibia (eds.). *Impactos del cambio Climático sobre la Zona Costera*. Instituto Nacional A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México.
- Diez, P. G. Perillo, G. M. E. y Piccolo, E. S. 2007. Vulnerability to Sea- Level Rise on the coast of the Buenos Aires. *Journal of Coastal Research* 23 (1): 119-126.
- Ellison, J., 2015, Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts: *Wetlands Ecology and Management*, 23(2), 115-137, doi:10.1007/s11273-014-9397-8
- Gornitz, V. 1990. Vulnerability of the East Coast, U.S.A. to future sea level rise. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 9:201-237.

- Green C. y McFadden L. 2007: Coastal Vulnerability as Discourse About Meanings and Values. *Journal of Risk Research* [e-journal] 10:8, (1027-1045). Disponible a través de: <http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/13669870701566557>. Ultimo Acceso: 24 de Abril de 2013.
- Gui-Shan, Y. Ya-Feng S. Chen S. and Hai-Tang L. 2001. Assessment of coastal vulnerability to environmental change in Jiangsucoastal plain. *Journal of Geographical Sciences* [e-journal]. Vol. 11 No.1. (24-33). Disponible a través de: <http://link.springer.com/article/10.1007/BF02837373#page-1>
- Hernández-Santana, J. R. Ortiz-Pérez, M. A. Méndez-Linares A. P. y Gama-Campillo L. 2008. Reconocimiento morfodinámico de la línea de costa del Estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Investigaciones Geográficas*, 65: 7-21. Instituto de Geografía, México.
- IPCC, 2007. Intergovernmental Panel on Climate Change. [En línea] Disponible en: http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/syr/ar4_syr_sp.pdf [Último acceso: 25 Marzo 25].
- McFadden, L; Nicholls R.J; Vafeidis A y Tol S, J.R. 2007. A Methodology for Modeling Coastal Space for Global Assessment. *Journal of Coastal Research* [e-journal] 261(176-183). Disponible a través de: <http://www.bioone.org/doi/full/10.2112/08-1102.1>. Ultimo Acceso: 25 de Abril de 2013.
- Islam, M.A., Hossain, M.S., Murshed, S., 2015, Assessment of coastal vulnerability due to sea level change at Bhola island, Bangladesh: Using geospatial techniques: *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 43(3), 625-637, doi: 10.1007/s12524-014-0426-0
- Jacob S. J. 2010. Urbanización Resiliente – Primera respuesta al Cambio Climático en las Costas del Golfo de México. En: A. Yáñez-Arancibia (ed.) *Impactos del cambio Climático sobre la Zona Costera*. Instituto Nacional A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México.

- Kokot, R.R. Codignotto J.O. and Elissondo M. 2004. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia del Río Negro. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 59(3):477-487.
- Kundzewicz, Z.W. Mata, L.J. Arnell, N.W. Döll, P. Kabat, P. Jiménez, B. Miller, K.A. Oki, T. Sen, Z and Shiklomanov I.A. 2007. Freshwater resources and their management. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 173-210.
- Magaña, V. Gómez, L., Neri, C. Landa, R. León, C. y Ávila, B. 2011. Medidas de adaptación al cambio climático en humedales del Golfo de México: México, INE, SEMARNAT, WB, Gobierno de Japón, UNAM, UAM, CEGAM, S. C. 92 p.
- Magrin, G., Gay-García, C., Cruz-Choque, D., Giménez, J.C., Moreno, A.R., Nagy, G.J., Nobre, C., and Villamizar, A. 2007. *Latín América. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, 581-615.
- Martínez-Arroyo, A. 2010. *Cambio Climático y Políticas Públicas Ambientales en Zonas Costeras y Marinas*. En: A. Yáñez-Arancibia (ed.). *Impactos del cambio Climático sobre la Zona Costera*. Instituto Nacional A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México.
- Ojeda, Z. J. J. Álvarez F. J. I. Cajaraville D. M y Fraile-Jurado P. 2009. El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España), *GeoFocus (Artículos)*, nº 9, p. 83-100. ISSN: 1578-5157

- Organización de las Naciones Unidas (ONU) y Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) 2012. *Efectos de cambio climático en las costas de América Latina y el Caribe: Vulnerabilidad y Exposición*. (p. 174). Recuperado 11 de marzo del 2013, de http://www.eclac.org/publicaciones/xml/0/46750/2011-786W.460_Vulnerabilidad_y_exposicion_WEB.pdf
- Ortiz-Pérez M.A. Hernández-Santana, J.R. Figueroa-Mah Eng, J.M. y Gama-Campillo L. 2010. Tasas del avance transgresivo y regresivo en el frente deltaico tabasqueño: en el periodo comprendido del año 1995 al 2008, p. 305-324. En: Botello A.V., Villanueva-Fragoso S., Gutiérrez J. y Rojas Galaviz J.L. (eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el Cambio Climático*. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- Pendleton, E.A. Thieler, E.R. y Williams S.J. 2010. Importance of Coastal Change Variables in Determining Vulnerability to Sea- and Lake-Level Change. *Journal of Coastal Research*, [e-journal] 261 (176-183). Disponible a través de: <http://www.bioone.org/doi/full/10.2112/08-1102.1>. Ultimo acceso: 23 de Abril de 2013.
- Pikelj, K., Juracic, M., 2013, Eastern Adriatic coast (EAC): geomorphology and coastal vulnerability of a karstic coast: *Journal of Coastal Research*, 29(4), 944-957.
- Sanchez, M. O. 2010. Elementos oceánicos que impactan la hidrología costera, p. 23-32. En: E. Rivera-Arriaga, I. Azuz-Adeath, L. Alpuche Gual y G. J. Villalobos-Zapata (eds.). *Cambio Climático en México un Enfoque Costero-Marino*. Universidad Autónoma de Campeche CetyS-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche. 944 p.
- Tapia-Cerino, M. A. 2007. Análisis del impacto de la elevación del mar en la planicie costera tabasqueña. Tesis de Licenciatura. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. División Académica de Ciencias Biológicas. 116 p.

- Thieler, E. R. and E.S. Hammer-Klose. 1999. National Assessment of Coastal Variability to Sea Level Rise. Preliminary Results for the US Atlantic Coast. Woods Hole, M. A: United States Geological Survey (UGGS) Open File Report 99-593.
- Yáñez-Arancibia A. y W.-Day J. 2010. La Zona Costera Frente al Cambio Climático: Vulnerabilidad de un Sistema Biocomplejo e Implicaciones en Manejo Costero. En: A. Yáñez-Arancibia (ed.). *Impactos del Cambio Climático sobre la Zona Costera*. Instituto de Ecología A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México.
- Yáñez-Arancibia A. Day W.J. Twilley R. R. Day H. R. 2010. Los Manglares frente al Cambio Climático ¿Tropicalización Global del Golfo de México?. En: A. Yáñez-Arancibia (ed.). *Impactos del cambio Climático sobre la Zona Costera*. Instituto Nacional A. C. (INECOL), Texas Sea Grant Program, Instituto Nacional de Ecología (INE-SEMARNAT), México.

CAPITULO 2. ARTÍCULOS

2.1 Artículo 1. Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático.

Publicado en la Revista Mexicana en Ciencias Agrícolas (REMEXCA), en Publicación Especial Número 13, en Febrero del 2016.
<http://cienciasagricolas.inifap.gob.mx/editorial/index.php/Agricolas/article/view/4763/3927>



Texcoco, Estado de México, 11 de febrero de 2016
Ref.: 077-15

Dr. Rodimiro Ramos Reyes
El Colegio de la Frontera Sur-LAIGE
Presente

Por medio de la presente se hace constar que el manuscrito titulado: "**Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático**", del cual son autores(as): **Rodimiro Ramos Reyes, Lilia María Gama Campillo, Juan Carlos Núñez Gómez, Rufo Sánchez Hernández, Humberto Hernández Trejo y Osías Ruíz Álvarez**, fue **aceptado** en la Pub. Esp. Núm. (13) 2016, de la Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Publicación que saldrá editada en el mes de febrero de este año.

Sin otro particular, le envío un cordial saludo.

Atentamente

DRA. DORA MA. SANGERMAN-JARQUÍN
EDITORA EN JEFA DE LA REVISTA
MEXICANA DE CIENCIAS AGRÍCOLAS

c.c.p. * Archivo
DRS.J/gfg

Carretera Los Reyes- Texcoco, km 13.5. Coatlincán, Texcoco, Estado de México, México. C. P. 56250
E-mail: revista_atm@yahoo.com.mx. Tel. y Fax: 01 595 9212681

Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático*

Adaptation of coastal vulnerability model in the coast of Tabasco to climate change

Rodimiro Ramos Reyes^{1§,2}, Lilia María Gama Campillo³, Juan Carlos Núñez Gómez¹, Rufo Sánchez Hernández⁴, Humberto Hernández Trejo³ y Osías Ruíz Álvarez⁵

¹El Colegio de la Frontera Sur-LAIGE. Carretera Villahermosa-Reforma, km 15.5 s/n. Ranchería Guineo, 2 Sección, C.P. 86280, Villahermosa, Tabasco. Tel: 52 993 313 6110. (rramos@ecosur.mx; jnunez@ecosur.edu.mx) ²División Académica de Ciencias Biológicas- Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Cárdenas, km 0.5 s/n. C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. ³División de Académica de Ciencias Biológicas-Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Cárdenas, km 0.5 s/n. C.P. 86040, Villahermosa, Tabasco, México. Tel. +52 993 3544308. (lilygama@yahoo.com; hhtrejo@gmail.com). ⁴Universidad Juárez Autónoma de Tabasco- División de Académica de Ciencias Agropecuarias. Carretera Villahermosa-Teapa, km 25, Ranchería La huasteca, Municipio del Centro, Tabasco, C. P. 86040, México. (rusaher@hotmail.com). ⁵Campo Experimental Pabellón-INIFAP. Carretera Aguascalientes-Zacatecas, km. 32.5. 20660. Pabellón de Arteaga, Aguascalientes. (ruiz.osias@inifap.gob.mx). §Autor para correspondencia: rreyes73@hotmail.com.

Resumen

Las zonas costeras enfrentan drásticamente el efecto del cambio climático (CC), por su ubicación geográfica son propensas a erosión e inundación, provocando pérdida de tierras y cultivos agrícolas cercanos a la costa, reduciendo la distribución de especies naturales y cultivadas. El incremento del nivel del mar (INM) es un efecto provocado por el CC, que incrementa la vulnerabilidad de las comunidades costeras en el mundo. El índice de vulnerabilidad costera (IVC), es una metodología basada en un complejo conjunto de factores costeros que identifican el riesgo de un peligro en específico. El objetivo fue analizar la compatibilidad y adaptabilidad del IVC en el litoral tabasqueño, ante los efectos del cambio climático. Con base en una revisión bibliográfica, se obtienen datos precisos sobre los impactos potenciales del INM en el estado de Tabasco. Se concluye que el enfoque del IVC es posible aplicarlo considerando variables que contribuyen a la adaptación de la costa, como es la geomorfología costera, pendiente costera, aumento del nivel del mar, cambio en la línea de costa, oleaje y rango mareal. En el caso particular del litoral tabasqueño, las variables sedimentación y subsidencia puede robustecer la predicción de los impactos del INM. La

Abstract

Coastal areas face drastically the effect of climate change (CC), for its geographical location are prone to erosion and flooding, causing loss of land and crops near to the coast, reducing the distribution of natural and cultivated species. The sea level rise (INM) is caused by CC, which increases the vulnerability of coastal community's worldwide. Coastal vulnerability index (IVC) is a methodology based on a complex set of coastal factors that identify the risk of a specific danger. The objective was to analyze the compatibility and adaptability of IVC in the coast of Tabasco, to the effects of climate change. Based on a literature review, accurate data on the potential impacts of INM in the state of Tabasco are obtained. It is concluded that the approach of IVC is possible to apply considering variables that contribute to the adaptation of the coast, such as coastal geomorphology, coastal slope, sea level rise, changes in the coastline, waves and tidal range. In the particular case of Tabasco coast, sedimentation and subsidence variables can strengthen the prediction of the impacts from INM. The lack of information on some variables is a limitation on the application of IVC on the coast of Tabasco, although it is feasible to make

* Recibido: noviembre de 2015
Aceptado: febrero de 2016

falta de información de algunas variables, es una limitación en la aplicación del IVC en la costa de Tabasco, aunque es factible realizar adaptaciones al modelo, debido a que dependiendo de las características costeras locales, algunas variables influyen en mayor o menor grado en la precisión de la información obtenida.

Palabras clave: erosión costera, inundación, incremento del nivel del mar y costa.

Introducción

Las zonas costeras representan la primera porción terrestre en afrontar eventos extremos atribuidos al cambio climático (CC) tales como, intensos huracanes, inundaciones severas (tanto temporales como permanentes) y el incremento del nivel del mar (INM) (Bijlsma *et al.*, 1996; Sheik y Chandrasekar, 2011). La ocurrencia de estos eventos climáticos provocará la pérdida de tierras costeras al ser erosionadas e inundadas (Nicholls, 2002), causando cambios irreversibles en la ecología de los manglares (Finlayson *et al.*, 2013; Junk *et al.*, 2013) y pérdidas en los cultivos agrícolas cercanos al litoral (Turner *et al.*, 1996). Bajo este contexto, las implicaciones del CC son de preocupación, sobre todo porque en México, las zonas costeras son de relevancia económica para el país (Lara *et al.*, 2008).

Existe una alta probabilidad que la cantidad y magnitud de eventos climáticos extremos incrementen en el futuro, pero a la par se espera que los métodos y herramientas ofrezcan alternativas para la adaptación y mitigación al CC (ONU/EIRD, 2008). El INM afectará las zonas costeras del país, siendo las más vulnerables las del Golfo de México y el mar Caribe, donde sobresalen las costas tabasqueñas por su alta vulnerabilidad (SEMARNAP, 1997), sufriendo grandes impactos en la agricultura (IPCC, 2007).

La vulnerabilidad y su impacto en la economía de los países con litorales costeros, hacen necesario evaluar los INM y a la vez formular estrategias de respuesta que vayan acoplados a los cambios (Vafeidis *et al.*, 2008). Por otro lado se propone que la atención de problemas ambientales debe hacerse desde perspectivas holísticas, ello ayudará a alcanzar respuestas concretas (Reyes *et al.*, 2004). Sin embargo, hasta ahora no existe una metodología estándar para medir vulnerabilidad en las costas, por lo que existen múltiples enfoques, cada uno con ventajas y limitaciones.

adaptations to the model, because depending on local coastal features, some variables influence more or less in the accuracy of the information obtained.

Keywords: coastal erosion, flooding, sea level rise and coast.

Introduction

Coastal zones are the first land portion facing extreme events attributed to climate change (CC) such as, intense hurricanes, severe flooding (both temporary and permanent) and sea level rise (INM) (Bijlsma *et al.*, 1996; Sheik and Chandrasekar, 2011). The occurrence of these weather events will cause loss of coast being eroded and flooded (Nicholls, 2002), causing irreversible changes in mangrove ecology (Finlayson *et al.*, 2013; Junk *et al.*, 2013) and losses of agricultural crops near the coast (Turner *et al.*, 1996). In this context, the implications of CC are of concern, especially because in Mexico, coastal areas are of economic importance for the country (Lara *et al.*, 2008).

There is a high probability that the number and magnitude of extreme weather events will increase in the future, but at the same time it is expected that the methods and tools provide alternatives for adaptation and mitigation to CC (ONU/EIRD, 2008). The INM will affect coastal areas from the country, being the most vulnerable the Gulf of Mexico and Caribbean Sea, where the coast of Tabasco stands for its high vulnerability (SEMARNAP, 1997), suffering great impacts on agriculture (IPCC, 2007).

Vulnerability and its impact on the economy of the countries with coastlines make necessary to assess INM and at the same time to formulate response strategies that are coupled with changes (Vafeidis *et al.*, 2008); on the other hand it is proposed that approach to environmental problems must be made from holistic perspectives, this will help achieve concrete answers (Reyes *et al.*, 2004). However, so far there is no standard methodology to measure vulnerability on the coast, so there are multiple approaches, each with advantages and limitations.

Based on the current concern for CC and the effects that it will bring to the coastal region, a literature review is necessary, to know the adaptation of the vulnerability model applied to date in the coast of Tabasco. The objective of this study is to analyze the compatibility and adaptability of the IVC methodology for the coast of Tabasco, taking into account local features and information available.

Con base en la actual preocupación del CC, y las afectaciones que traerá a la región costera, se hace necesaria una revisión bibliográfica a fin de conocer la adaptación del modelo de vulnerabilidad aplicado hasta la fecha en el litoral tabasqueño. En ese sentido este estudio tiene como objetivo analizar la compatibilidad y adaptabilidad de la metodología IVC para el litoral tabasqueño, considerando las características locales y la información disponible.

El área de estudio y características vulnerables

La zona costera de Tabasco se ubica entre los 92° 28' y los 94° 10' de longitud oeste, y los 17° 15' y los 18° 39' de latitud Norte (Hernández *et al.*, 2008), con un litoral costero de 200 km repartido en los municipios de Huimanguillo, Cárdenas, Paraíso y Frontera, que en su conjunto albergan cerca de 616 500 habitantes (INEGI, 2010). El mar adyacente a su línea de costa es el Golfo de México, una de las aguas más complejas y productivas del mundo (Tunnell *et al.*, 2004).

La costa tabasqueña es resultado de importantes procesos aluviales (West *et al.*, 1985) originados por la dinámica fluvial ejercida por la cuenca Grijalva-Usumacinta, Río González y Tonalá. Debido a su génesis dominada por la acumulación de sedimentos, las costas de Tabasco son bajas arenosas ubicadas a menos de un metro sobre el nivel del mar, lo que las hace vulnerables a pequeñas variaciones (Ortiz y Linares, 1999).

En este contexto de vulnerabilidad el litoral tabasqueño (Figura 1), alberga recursos naturales de gran importancia como la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla (RBPC), considerada la unidad de almacenamiento energético más importantes de Norteamérica (Toledo, 2003) así como zonas de cultivos agropecuarios como pastizales, cacao, maíz, huertos familiares y sistemas lagunares Carmen-Pajonal-Machona y Mecoacán; dando lugar a especies pesqueras de importancia comercial, de donde se obtiene el 90% de la pesca del estado (Contreras y Castañeda, 2004). Asociados a estos cuerpos lagunares costeros de Tabasco se encuentran las especies de mangle *Rhizophora mangle* (mangle rojo), *Avicennia germinans* (mangle negro), *Laguncularia racemosa* (mangle blanco) y *Conocarpus erectus* (mangle botoncillo) (Villanueva *et al.*, 2010), condicionadas a diferentes gradientes de salinidad y periodos de inundación.

De acuerdo con estaciones mareográficas de la región, la marea es de tipo mixta con influencia diurna. El oleaje es moderado en dirección E-W con alturas máximas de 2 m en

Study area and vulnerable features

The coastal area of Tabasco is located between 92° 28' and 94° 10' west longitude and 17° 15' and 18° 39' north latitude (Hernández *et al.*, 2008), with a coastline of 200 km distributed in the municipalities of Huimanguillo, Cardenas, Paraíso and Frontera, which together are home to about 616 500 inhabitants (INEGI, 2010). Adjacent to its coastline is the Gulf of Mexico, one of the most complex and productive waters in the world (Tunnell *et al.*, 2004).

The coast of Tabasco is the result of significant alluvial processes (West *et al.*, 1985) caused by the river dynamics exerted by the Grijalva-Usumacinta basin, Gonzalez and Tonalá River. Due to its genesis dominated by the accumulation of sediments, the coasts from Tabasco are sandy low located less than one meter above sea level, making them vulnerable to small variations (Ortiz and Linares, 1999).

In this context of vulnerability the coast from Tabasco (Figure 1), host important natural resources such as the biosphere reserve Pantanos de Centla (RBPC), considered the most important unit of energy storage in North America (Toledo, 2003) as well as areas for agricultural crops like pastures, cocoa, corn, family orchards and lake systems Carmen-Pajonal-Machona and Mecoacán; giving place to commercially important fish species, of which 90% of the state fishing (Contreras and Castañeda, 2004) is obtained. Associated to these coastal lagoons from Tabasco are mangrove species *Rhizophora mangle* (red mangrove), *Avicennia germinans* (black mangrove), *Laguncularia racemosa* (white mangrove) and *Conocarpus erectus* (Buttonwood mangrove) (Villanueva *et al.*, 2010) conditioned to different salinity gradients and flooding periods.

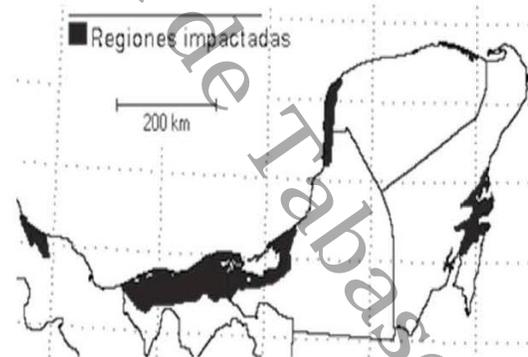


Figura 1. Zonas vulnerables al incremento del nivel del mar. SEMARNAP (1997).

Figure 1. Vulnerable areas to rising sea level. SEMARNAP (1997).

condiciones normales; sin embargo los vientos provenientes del norte aumentan considerablemente el oleaje con alturas de hasta 5 metros (SEMAR, s/f; Lankford, 1976).

Algunos estudios realizados en la costa de Tabasco evidencian la vulnerabilidad frente al INM (Hernández *et al.*, 2008; Ortiz *et al.*, 2010), el principal impacto es la erosión costera, que en algunos sitios ha sido alarmante (-3 a -5 m/año en Sánchez Magallanes, Figura 2).



Figura 2. Impactos producidos por el INM. Sánchez Magallanes, Cárdenas, Tabasco.

Figure 2. Impacts produced by INM. Magallanes Sanchez Cardenas, Tabasco.

Modelo de vulnerabilidad: la inserción del término en el contexto costero

Para el IPCC (2007) la vulnerabilidad refleja la capacidad de un sistema o subsistema para afrontar la variabilidad climática y eventos extremos. Esta conceptualización conlleva a esperar una respuesta ya sea positiva o negativa, en la medida de las condiciones que se encuentre la costa (CEPAL, 2012). Sin embargo, la exposición, resistencia y resiliencia son quienes determinan en el contexto físico, de la vulnerabilidad de la zona costera (Figura 3). Por lo tanto cualquier estudio de vulnerabilidad, parte de la evaluación de impactos físicos en el medio natural (Klein y Nicholls, 1999).

De acuerdo al modelo adoptado, los primeros tres componentes indican la vulnerabilidad natural (o relativa); es decir, los impactos sufridos en el medio físico. No obstante, la capacidad de adaptación además de complementar el modelo, se convierte en el factor determinante de la vulnerabilidad real (o neta) del sistema. Por lo tanto, muchos sistemas tendrán vulnerabilidad natural alta, pero vulnerabilidad socioeconómica baja (Ojeda *et al.*, 2011) si cuentan con elementos o estrategias eficientes de adaptación. Por lo cual, los efectos del INM pueden impactar los recursos costeros, pero estos serán mayores en regiones con capacidad de adaptación reducida (Bijlsma *et al.*, 1996).

According to tidal stations in the region, the tide is mixed with diurnal influence. The waves are moderate in E-W direction with maximum heights of 2m under normal conditions; however the winds from the north significantly increase wave heights up to 5 meters (SEMAR, s/f; Lankford, 1976).

Some studies performed in the coast of Tabasco show the vulnerability to INM (Hernandez *et al.*, 2008; Ortiz *et al.*, 2010), the main impact is coastal erosion, which in some places has been alarming (-3 to -5 m/year in Sanchez Magallanes, Figure 2).

Vulnerability model: the inclusion of the term in the coastal context

For the IPCC (2007) vulnerability reflects the ability of a system or subsystem to cope with climate variability and extreme events. This conceptualization leads to expect an answer either positive or negative, to the extent in which are the coasts conditions (CEPAL, 2012). However, exposure, resistance and resilience are who determined in the physical context, the vulnerability of the coastal zone (Figure 3); therefore any vulnerability study, parts from the assessment of physical impacts on the environment (Klein and Nicholls, 1999).

According to the adopted model, the first three components indicate natural vulnerability (or relative); i.e. the impacts suffered in the physical environment. However, the ability to adapt, besides to complement the model, become the determinant factor of real vulnerability (or net) of the system. Therefore, many systems will have high natural vulnerability, but low socio-economic vulnerability (Ojeda *et al.*, 2011) if it counts with the elements or efficient adaptation strategies. Therefore, the effects of INM can impact coastal resources, but these will be higher in regions with reduced capacity of adaptation (Bijlsma *et al.*, 1996).

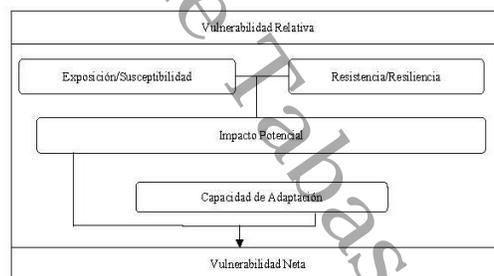


Figura 3. Componentes de la vulnerabilidad. Con base en Klein y Nicholls (1999) y Ojeda *et al.* (2011).

Figure 3. Vulnerability components. Based on Klein and Nicholls (1999) and Ojeda *et al.* (2011).

En Tabasco, el área de costa juega un papel importante en la economía de la entidad, en particular la de los municipios de Cárdenas, Paraíso y Centla, así como de otros cercanos a la franja del litoral (Huimanguillo, Comalcalco y Jalpa de Méndez); dicho borde costero se extiende a lo largo de 200 km, incluyendo una extensa red de escurrimientos, llanuras deltaicas, sistemas lagunares, esteros y marismas (Rodríguez-Rodríguez, 2002). La superficie de esta zona, asciende a 80 000 hectáreas aproximadamente, lo que representa 3.2% con respecto al total de la entidad; el uso potencial del área costera se ha restringido a las actividades agropecuarias, específicamente al cultivo de cocotero, ganadería extensiva, cultivos hortícolas en pequeñas áreas, y más recientemente a la explotación forestal del mangle (Palma-López *et al.*, 2007).

Los efectos del CC pueden generar diferentes niveles de vulnerabilidad, según la manera de cómo los enfrenten las comunidades, así como a las condiciones del espacio geográfico. De acuerdo a De la lanza *et al.* (1993), los cambios ambientales y la intervención del hombre han provocado una disminución en la superficie y cambios en la biodiversidad de los manglares, en el área de la laguna de Términos, Campeche. En Tabasco se observa una situación contraria; la subsidencia del complejo deltaico favorece el avance de la línea de costa hacia el continente y los efectos se observan a través de la erosión de playas y bocas, así como por la intrusión de agua marina hacia el continente, lo que contribuye a ampliar las áreas inundadas (Ortiz *et al.*, 2005), condición que favorece el crecimiento de áreas de manglar.

Una evidencia de la adaptación de algunas especies a los cambios ambientales, son las modificaciones en los patrones de distribución de éstas. Según Guerra y Ochoa (2006), a pesar de que en 1992 los pantanos de Centla fueron declarados como área protegida, la variación por pérdida en los tipos de vegetación y uso del suelo no se ha detenido; solamente el manglar ha sido capaz de mantener la superficie ocupada e inclusive en otras partes de la costa de Tabasco, dicha superficie se ha incrementado.

El modelo de medición adoptado: índice de vulnerabilidad costera

Determinar con precisión la respuesta de la costa ante el INM es complejo, debido a las múltiples variables que entran en juego. Las zonas costeras son sistemas no lineales, donde las actividades humanas, los procesos naturales y

In Tabasco, the coastal area plays an important role in the economy of the entity, in particular in the municipalities of Cardenas, Paraíso and Centla, thus other nearby to the shoreline (Huimanguillo, Comalcalco and Jalpa de Méndez); the coastline stretches over 200 km, including an extensive network of runoff, deltaic plains, lagoon systems, marshes and swamps (Rodríguez-Rodríguez, 2002). The surface of this area is approximately of 80 000 hectares, representing 3.2% from the total surface of the entity; the potential use of the coastal area has been restricted to agricultural activities, specifically coconut, ranching, vegetable crops in small areas, and more recently to logging of mangrove (Palma-López *et al.*, 2007).

The effects of climate change can generate different levels of vulnerability, in the manner of how communities face them and the conditions of geographical space. According to De la lanza *et al.* (1993), environmental changes and human intervention has led to a decrease in surface and changes in mangrove biodiversity in the lagoon area from Terminos, Campeche. In Tabasco the contrary situation is observed; the deltaic complex subsidence favors the advance of the coastline to the continent and the effects are seen through beaches and ports erosion, as well as the intrusion of sea water into the continent, contributing to expand flooded areas (Ortiz *et al.*, 2005), condition that favors the growth of mangrove areas.

Evidence of the adaptation of some species to environmental changes, are modifications in the distribution patterns of these. According to Guerra and Ochoa (2006), although in 1992 the pantanos de Centla were declared as protected area, the variation by loss in the types of vegetation and land use has not stopped; only mangrove has been able to maintain the area occupied and even in other parts of the coast of Tabasco, such surface has increased.

The measurement model adopted: coastal vulnerability index

Accurately determine the response of the coast to INM is complex due to many variables that come into play. Coastal areas are non-linear systems, where human activities, natural processes and policies regulations determine their ability to address and mitigate adverse events; however, these play an important role in INM (Pendleton *et al.*, 2010).

The methodological framework from IVC prepared by Gornitz *et al.* (1992) and proposed to assess the vulnerability of the Atlantic coast of the United States of America (USA)

las regulaciones políticas determinan su capacidad para enfrentar y mitigar los eventos adversos, sin embargo, juegan un papel preponderante al INM (Pendleton *et al.*, 2010).

El marco metodológico del IVC, elaborado por Gornitz *et al.* (1992) y propuesto para evaluar la vulnerabilidad de la costa atlántica de Estados Unidos de América (EE.UU.) consideró indicadores que influyen en los riesgos de inundación y erosión costera, por lo tanto prioriza las condiciones físicas de la costa en los potenciales impactos por INM. Este modelo también fue aplicado para medir la sensibilidad de las costas canadienses (Shaw *et al.*, 1998), en este caso, por sensibilidad se entiende, la magnitud del cambio en la costa producido por un aumento en el nivel del mar. Sin embargo, Thieler y Hammar (1999) ajustaron la propuesta de Gornitz (1992) para evaluar vulnerabilidad en parques costeros regionales y nacionales de EE.UU., considerando solo seis variables (Cuadro 1). Más recientemente, Ojeda *et al.* (2011) aplicó el modelo ya ajustado, aunque hizo adecuaciones en una de las variables (sustituyó pendiente costera por índice topográfico) de acuerdo a las exigencias de la costa andaluza en España.

considered indicators that influence in risks of flooding and coastal erosion, thus prioritizing the physical conditions of the coast in potential impacts by INM. This model was also applied to measure the sensitivity of Canadian waters (Shaw *et al.*, 1998), in this case, by sensitivity understand, the magnitude of change in the coast produced by sea level rise. However, Thieler and Hammar (1999) adjusted Gornitz (1992) proposal to assess vulnerability in regional and national coastal parks from USA, considering six variables (Table 1). More recently, Ojeda *et al.* (2011) applied the model already fit, but made adjustments in one of the variables (replacing coastal slope for topographic index) according to the requirements of the Andalusian coast in Spain.

This methodology uses a weighting system of 1 (very low) to 5 (very high vulnerability), for each of the variables. The combination of six variables gives the degree of vulnerability of the coast (Ojeda *et al.*, 2011) as follows:

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

Cuadro 1. Variables consideradas en cada uno de los países evaluados.

Table 1. Variables considered in each of the countries evaluated.

Variables	USA ^a	Canadá ^b	USA ^c	España ^d
Relieve (altitud del terreno)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Tipo de roca (resistencia a erosión)*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>		
Forma costera*	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ¹	<input type="checkbox"/> ¹
Pendiente costera	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/> ²
Cambio relativo del nivel del mar	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Cambio en la línea de costa (erosión-acreción)	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Rango mareal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Altura de oleaje medio significante	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Incluye tipo de roca (litología); ¹sustituida por índice topográfico ²variables descriptivas. ^aGornitz *et al.* (1992), ^bShaw *et al.* (1998), ^cThieler y Hammar (1999) y ^dOjeda *et al.* (2009).

Esta metodología utiliza un sistema de ponderación de 1 (muy baja) a 5 (muy alta vulnerabilidad), para cada una de las variables. La combinación de las seis variables resulta el grado de vulnerabilidad de la costa (Ojeda *et al.*, 2011)

quedando de la siguiente manera: $IVC = \sqrt{\frac{a*b*c*d*e*f}{6}}$

Variables geológicas/geomorfológicas: geomorfología costera, tasa de cambio de la línea de costa a largo plazo y pendiente costera.

Geological / geomorphological variables: coastal geomorphology, change rate of the coastline long-term and coastal slope.

Physical / hydrodynamic variables: change rate for relative sea level, average significant wave height and average tidal range. The six variables are integrated into an equation that gives as result the IVC and consequently different degrees of vulnerability along the coast; already applied in different countries (Table 1).

VARIABLES FÍSICAS/HIDRODINÁMICAS: tasas de cambio del nivel relativo del mar, altura media del oleaje significativo y rango mareal medio. Las seis variables se integran en una ecuación que da como resultado el IVC y por consecuencia diferentes grados de vulnerabilidad a lo largo del litoral. Ya aplicada en diferentes países (Cuadro 1).

Los resultados del índice permiten anticiparse a los impactos que experimentará la costa por el INM. Sin embargo, este modelo solo indica la vulnerabilidad relativa de cada tramo costero en función de su exposición (medio físico) frente al INM. Esto representa la base para realizar estudios con mayor detalle y permite estimar los riesgos y tomar las medidas necesarias, para salvaguardar los bienes en las costas.

Aunque hay plena confianza que este modelo es aplicable a cualquier entorno costero (Gornitz, 1992; Thieler y Hammar, 1999), se analiza cada una de las variables consideradas, dado que el modelo ha sido aplicado en regiones amplias (costa andaluza española, costas atlánticas de EE.UU., costas de Canadá). Lo anterior se argumenta debido a que un litoral de mayor extensión permite tener paisajes más diversos; sin embargo, en un litoral "corto" como el de Tabasco (200 km) existen menor número de ambientes, lo que conlleva a reducir las clasificaciones de vulnerabilidad. Por otro lado, los procesos oceánicos costeros que inciden pueden darse en menor o mayor intensidad, lo que también influye en los indicadores de vulnerabilidad. Al final con este análisis se pretende asegurar que la metodología sea aplicable para la costa tabasqueña y sino, incluir nuevas variables o modificar las que sean necesarias.

La metodología adoptada y su pertinencia para las costas de Tabasco

La metodología propuesta se ha aplicado en el mundo a diversos litorales costeros, por lo tanto, alimentar el modelo requiere considerar aspectos fundamentales, como las características propias de la costa en estudio, las presiones del entorno, su capacidad de adaptación y los datos disponibles (Figura 4).

VARIABLES PROPUESTAS VS CONDICIONES LOCALES

El bajo relieve, el origen de su formación, la influencia anual de frentes fríos y la presión excesiva de actividades antrópicas, ubican a la costa tabasqueña en condiciones de alta vulnerabilidad ante el INM. Sin embargo, todos los sistemas naturales poseen capacidad para resistir y recuperarse del daño, lo que en ecología es conocido como

Index results allow anticipating the impacts that the coast will experience by INM. However, this model only indicates the relative vulnerability of each coastal stretch in terms of their exposure (physical environment) against INM. This represents the basis to perform studies with greater detail and allows estimating the risk and taking the necessary measures to safeguard the assets on the coasts.

Although there is plenty confidence that this model is applicable to any coastal environment (Gornitz, 1992; Thieler and Hammar, 1999), analyze each of the variables considered, since the model has been applied in large regions (Spanish Andalusian coast, Atlantic coast from US, Canadian coasts). This is argued because a more extensive coastline allows more diverse landscapes; however, in a "short" coastline like Tabasco (200 km) there are fewer environments, leading to reduce vulnerability classifications. On the other hand, coastal ocean processes influencing may be of greater or lesser intensity, which also affects vulnerability indicators. At the end the objective of this analysis is to ensure that the methodology is applicable to the coast of Tabasco and if not to include new variables or modify as necessary.

Methodology adopted and its relevance to the coast of Tabasco

The proposed methodology has been applied in the world to different coastal areas, therefore, to feed the model requires considering key aspects such as own characteristics of the coast under study, environmental pressures, its adaptability and available data (Figure 4).

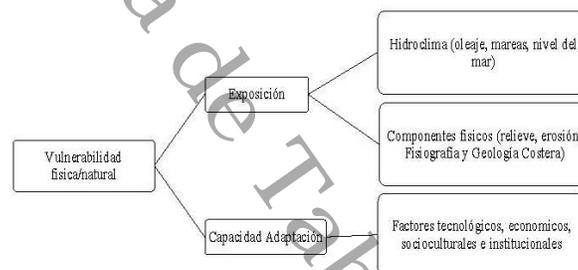


Figura 4. Componentes para evaluar vulnerabilidad por exposición en las costas de Tabasco. Con base en Gornitz *et al.* (1992), Shaw *et al.* (1998), Thieler y Hammar (1999) y Ojeda *et al.* (2009).

Figure 4. Components to assess vulnerability by exposure on the coast of Tabasco. Based on Gornitz *et al.* (1992), Shaw *et al.* (1998), and Hammar Thieler (1999) and Ojeda *et al.* (2009).

resistencia y resiliencia (Klein y Nicholls, 1999), estas cualidades limitan el impacto mediante la adaptación para responder a la elevación del nivel del mar. La metodología plantea confrontar los efectos propiciados por fenómenos marinos como el oleaje, las mareas y el nivel del mar y las cualidades de la costa para mitigar esos efectos, tales como la altitud sobre el nivel del mar y la resistencia de la costa, de acuerdo a su forma y origen geológico.

1. Geomorfología costera

Esta variable refleja la resistencia de la costa a la erosión, por lo tanto considera características que se atribuyen al origen geológico. Entre las geoformas costeras se pueden diferenciar los acantilados, playas extensas adosadas, flechas litorales, deltas, pantanos, depósitos glaciales, estuarios, lagunas costeras, cordones litorales, entre otros (West *et al.*, 1985).

Para el caso de Tabasco, la combinación de entrada fuerte de sedimentos y una densa vegetación de manglar pueden significar la estabilidad a largo plazo de una costa donde el mar está creciendo a tasas similares a las globales (Syvitski *et al.*, 2005). Aunque la variable geología/geomorfología en los estudios realizados hasta ahora ha considerado los manglares como un tipo de geoforma costera, el grado de vulnerabilidad asignado ha sido de moderada a muy alta vulnerabilidad (Cuadro 2). Sin embargo, por la menor diversidad de paisaje y la poca diferenciación geológica de los ambientes costeros de Tabasco, los manglares pueden tener un grado de vulnerabilidad menor (entre baja y moderada).

2. Pendiente costera

Tabasco forma parte de la región Golfo de México, donde predominan los terrenos bajos y llanos, dado que el litoral tabasqueño se extiende dentro de una llanura baja inundable ésta podría quedar fuera. Sin embargo, existen mínimas diferencias en la topografía, misma que mediante un modelo digital LIDAR, permitirá obtener mediciones de gran valor para hacer una diferenciación del relieve a lo largo del litoral.

3. Aumento del nivel del mar

Las tendencias en el Golfo de México van desde 1.8 ± 9.2 mm/año (Zavala *et al.*, 2010). El peligro se hace mayor en la costa de Tabasco debido a su ubicación geográfica y los procesos de formación a los que ha estado sujeta. Sin embargo, los impactos pueden no ser uniformes en todo

Variables proposed vs local conditions

Low relief, the origin of its formation, the annual influence of cold fronts and excessive pressure from human activities, locate the coast of Tabasco in high vulnerability to INM. However, all natural systems have the capacity to withstand and recover from damage, which in ecology is known as resistance and resilience (Klein and Nicholls, 1999) these qualities limit the impact through adaptation to meet the sea level rise. The methodology proposes to confront the effects favored by marine phenomena such as waves, tides and sea level and qualities of the coast to mitigate those effects, such as the altitude above sea level and coast resistance, according to its shape and geological origin.

1. Coastal geomorphology

This variable reflects coast resilience to erosion, therefore takes into account characteristics attributed to geological origin. Between coastal landforms it can be distinguished cliffs, long beaches, spits, deltas, swamps, glacial deposits, estuaries, coastal lagoons, offshore bars, among others (West *et al.*, 1985).

In Tabasco's case, the combining of strong inflow of sediments and dense mangrove vegetation can mean long-term stability of a coast where the sea is growing at similar rates to global (Syvitski *et al.*, 2005). Although geology / geomorphology variable in studies performed to date has considered mangroves as a type of coastal landform, the vulnerability degree assigned is moderate to very high vulnerability (Table 2). However, due to the lower diversity of landscape and little geologic differentiation of coastal environments of Tabasco, mangroves could have a lower degree of vulnerability (low to moderate).

2. Coastal slope

Tabasco is part of the Gulf of Mexico region, where lowlands and plains predominate, since the Tabasco coast extends into a low flood plain, this could be left out. However, there are minor differences in topography same that through a LIDAR digital model will allow to obtain measurements of great value to perform a relief differentiation along the coast.

3. Sea level rise

Trends in the Gulf of Mexico range from 1.8 ± 9.2 mm/year (Zavala *et al.*, 2010). The danger becomes greater on the coast of Tabasco due to its geographical location and formation processes to which has been subject. However, the impacts

el litoral de Tabasco, ya que hay zonas de hundimientos naturales, otras que reciben aportes sedimentarios, unas más de alta presión humana principalmente por la extracción de hidrocarburos y las últimas protegidas con infraestructura costeras como geotubos, escolleras y espigones.

cannot be uniform throughout the coast of Tabasco, as there are natural subsidence areas, other receiving sedimentary contributions, some with higher human pressure mainly by the extraction of hydrocarbons and the last protected with coastal infrastructure as geotubes, jetties and breakwaters.

Cuadro 2. Ambientes considerados en la variable geología-geomorfología.

Table 2. Environments considered in geology-geomorphology variable.

	Geología/geomorfología				
	Muy baja (1)	Baja (2)	Moderada (3)	Alta (4)	Muy alta (5)
Gornitz <i>et al.</i> (1992)	Playa Rocosa, Acantilados, Fiordos	Acantilados medianos, costas abruptas	Acantilados bajos, depósitos glaciales, marismas, arrecifes de coral, manglares	Estuarios, lagunas, planicies aluviales	Playas de barrera, playas arenosas, fangales, deltas
Shaw <i>et al.</i> (1998)	Fiordos, Acantilados rocosos altos	Acantilados rocosos bajos y medianos	Playa de sedimentos no consolidados sobre lecho rocoso	Playa de barrera, turba, fangales, deltas	Sedimento de hielo, plataformas de hielo, glaciares de marea
Thieler y Hammar (1999)	Playas rocosas, acantilados, Fiordos	Acantilados medianos, costas abruptas	Acantilados bajos, Depósitos glaciales, planicie aluvial	Playas de cantos rodados, Lagunas, Estuarios	Playas de barrera y arenosas, marismas, pantanos, deltas, manglares, arrecifes de coral
Ojeda <i>et al.</i> (2009)	Acantilados altos sobre rocas coherentes	Acantilados medios con rocas de resistencia media	Acantilados medio/bajos sobre sedimentos muy erosionables	Playas extensas adosadas a planicies sedimentarias poco elevadas	Playas adosadas, islas de barrera, flechas litorales, deltas, tómbolos.

4. Cambio en la línea de costa

Se considera que conocer el presente y pasado de la costa es vital para detectar peligros por elevaciones del nivel del mar en las costas. En Tabasco, se han realizado estudios para evaluar esta variable (Hernández *et al.*, 2008; Ortiz *et al.*, 2010); los datos encontrados muestran un retroceso costero alarmante, en el delta del Río San Pedro y San Pablo y en la zona de Sánchez Magallanes, de acuerdo a ello la costa tabasqueña da indicios de alta vulnerabilidad.

5. Oleaje

El oleaje es un fenómeno que contribuye a las condiciones del clima marítimo, conocerlo y predecir su comportamiento es fundamental, dado que su ocurrencia modifica la línea costera (Pérez *et al.*, 2008).

4. Change in shoreline

It is considered that knowing the present and past of the coast is vital to detect risks by sea level rise on the coasts. In Tabasco, have been performed studies to evaluate this variable (Hernandez *et al.*, 2008; Ortiz *et al.*, 2010); data found show an alarming coastal retreat, in the delta from Río San Pedro and San Pablo and in the area from Sanchez Magallanes, according to this the coast of Tabasco is showing signs of high vulnerability.

5. Swell

Swell is a phenomenon that contributes to the conditions of maritime climate, to know and predict their behavior is critical, since its occurrence modifies the coastline (Pérez *et al.*, 2008).

La variable oleaje juega un papel primordial en la vulnerabilidad de la costa tabasqueña, en el entendido, que es de origen acumulativa. La dinámica del oleaje en Tabasco cambia dependiendo de las condiciones climáticas (tormentas, frentes fríos y los vientos). West *et al.* (1985) describían olas que oscilan entre 30 a 70 cm en condiciones climáticas tranquilas; sin embargo, en la época de nortes el oleaje se presenta con mayor energía que rebasan los 5 m (Lankford, 1976; SEMAR s/f). Esta combinación de relativa calma y agresiva tormenta provoca la migración de sedimentos con mayor fuerza, especialmente importante para una costa de origen acumulativo y con serias amenazas de impactos ante el INM, por ello debe considerarse seriamente en las evaluaciones de impactos (Hernández *et al.*, 2008).

6. Rango mareal

Normalmente los litorales costeros están sujetos a las mareas. Las costas de Tabasco son micromareales; es decir, la amplitud es pequeña. Gornitz *et al.* (1994) considera que un rango de mareas grande disipa la energía del oleaje, lo que limita la erosión activa a los períodos de marea alta pero a su vez puede provocar fuertes corrientes que pueden transportar sedimentos no consolidados. Cabe señalar, que esta variable no es relevante para la costa tabasqueña, y en cierto momento podría ser omitida o bien reemplazada por otra.

VARIABLES ADICIONALES A LAS DEL MODELO

Sedimentación

Las cuencas hidrológicas continentales son responsables de la estabilidad de las zonas costeras, producen, transportan y depositan los insumos para los ambientes costeros (Toledo, 2003). El aporte anual de los ríos del mundo se calcula entre 20 billones de toneladas métricas de sedimentos que llegarían en condiciones naturales (Milliman y Syvitski 1992). Sin embargo, más de 100 millones de toneladas de sedimento están siendo atrapadas en diques y presas construidos en los últimos 50 años (Syvitski *et al.*, 2005).

Esto es importante, dado que las costas de Tabasco son resultado de "poderosos procesos aluviales" (West *et al.*, 1985), como han sido la cuenca Grijalva-Usumacinta, la más grande y caudalosa de México. Sin embargo, en el

The variable swell plays an important role in the vulnerability of the coast of Tabasco, on the understanding, which is of cumulative origin. The swell dynamics in Tabasco changes depending on weather conditions (storms, cold fronts and wind). West *et al.* (1985) described waves ranging from 30 to 70 cm in calm weather; however, in the windy season the waves have more energy exceeding 5 m (Lankford, 1976; SEMAR s/f). This combination of relative calm and aggressive storm causes the migration of sediment, especially important for a cumulative cost of origin and serious threats to INM impacts, therefore it should be considered in impact assessments (Hernandez *et al.*, 2008).

6. Tidal range

Normally coastlines are subject to tides. The coasts of Tabasco are microtidal; that is, the amplitude is small. Gornitz *et al.* (1994) found that a large tidal range dissipates wave energy, limiting active erosion to high tide periods but in turn can cause strong currents that can carry unconsolidated sediments. It should be noted that this variable is not relevant to the Tabasco coast, and at one point could be omitted or replaced by another.

ADDITIONAL VARIABLES TO THE MODEL

Sedimentation

Inland watersheds are responsible for the stability of coastal areas, produce, transports and deposit the inputs for coastal environments (Toledo, 2003). The annual contribution of the world's rivers is estimated between 20 billion metric tons of sediment that come under natural conditions (Milliman and Syvitski 1992). However, over 100 million tons of sediment being trapped in dikes and dams built in the last 50 years (Syvitski *et al.*, 2005).

This is important, since the coast of Tabasco are the result of "powerful alluvial processes" (West *et al.*, 1985), as has been the Grijalva-Usumacinta basin, the largest and mighty of Mexico. However, in the affluent from Grijalva by the construction of the largest dams systems in the country (Angostura, Chicoasén, Malpaso and Peñitas) and more recently at the bottom of the basin a control gate, and there is a relationship between changes of land use and the supply of sediment (Geyer *et al.*, 2004).

afluente del Grijalva por la construcción de sistema de presas más grandes en el país (Angostura, Chicoasén, Malpaso y Peñitas) y más recientemente en la parte baja de la cuenca una compuerta de regulación, existiendo una relación entre los cambios de uso del suelo y la oferta de sedimentos (Geyer *et al.*, 2004).

Subsidencia

Los efectos de la presión humana en las costas contribuyen a mayores grados de vulnerabilidad. El asentamiento de centros urbanos importantes conlleva a la sobreexplotación de acuíferos, y construcciones en zonas propensas a inundación. La costa de Tabasco es una planicie con pendientes inferiores a 10.5%; sin embargo, el delta Grijalva-Usumacinta por condiciones naturales presenta subsidencia de descenso que se traduce en mayor erosión de la playa y retroceso de la línea costera (Ortiz y Linares, 1999). Por otro lado se considera que la subsidencia provocada por la extracción de fluidos del suelo (gas, petróleo y agua (Gornitz, 1994), favorecerá una mayor extensión de área inundable en la costa tabasqueña.

Conclusiones

El modelo de vulnerabilidad que resulta de la revisión realizada en los diferentes escenarios costeros, arroja que para tener un mejor y más acertado índice de efectos de vulnerabilidad del cambio climático sobre el litoral tabasqueño, es necesario tomar en cuenta para su estudio las seis variables base, que son: geomorfología costera, pendiente costera, cambio en la línea costera, aumento en el nivel del mar, oleaje y rango mareal, contemplando que para Tabasco, esta última puede ser o no indispensable; pero agregando dos variables necesarias como lo son la sedimentación y subsidencia.

Para obtener resultados certeros es necesaria la correcta aplicación del modelo de índice de vulnerabilidad costera. Debido a la poca disponibilidad de datos, tendrían que realizarse monitoreos continuos, principalmente en sitios donde hay serias amenazas de erosión como Sánchez Magallanes y el delta de Grijalva-Usumacinta, lo anterior servirá para evaluar el potencial de impactos futuros.

Subsidence

The effects of human pressure on the coast contribute to higher levels of vulnerability. The settlement of major urban centers leads to overexploitation of aquifers, and construction in flood-prone areas. The coast of Tabasco is a plain with slopes lower than 10.5%; however, Grijalva-Usumacinta delta for natural conditions has a decreased subsidence resulting in higher beach erosion and shoreline retreat (Ortiz Linares, 1999). On the other hand it considers that the subsidence caused by the extraction of ground fluid (gas, oil and water) (Gornitz, 1994), favor a more extensive flooding area in the Tabasco coast.

Conclusions

The vulnerability model resulting from the review made in the different coastal scenarios, reveals that for better and more accurate vulnerability index from the effects of climate change on the Tabasco coast, it is necessary to taken into account for its study the six base variables, which are: coastal geomorphology, coastal slope, change in the coastline, sea level rise, swell and tidal range, considering that for Tabasco, the latter may or may not be essential; but adding two necessary variables such as sedimentation and subsidence.

For accurate results the correct application of the model of coastal vulnerability index is necessary. Due to the limited availability of data, continuous monitoring should be done, especially in places where there are serious threats of erosion like Sánchez Magallanes and the delta Grijalva-Usumacinta, the above will help to assess the potential future impacts.

The vulnerability of the Tabasco coast to sea level rise is evident; the application of this methodology with their respective adjustments will provide more accurate data on projected impacts and will be the basis to understand the changes on Tabasco coast and thus to plan strategies and make decisions in the medium and long term.

End of the English version



La vulnerabilidad de la costa tabasqueña ante el incremento del nivel del mar es evidente; la aplicación de esta metodología con sus respectivas adecuaciones, proporcionará datos más precisos de los impactos proyectados y será la base para entender las modificaciones del litoral tabasqueño y de esa manera planificar estrategias y tomar decisiones en el mediano y largo plazo.

Literatura citada

- Bijlsma, L.; Ehler, C. N.; Klein, R. J. T.; Kulshrestha, S. M.; McLean, R. F.; Mimura, N. and Warrick, R. A. 1996. Coastal zones and small islands. *Climate Change 1995: impacts, adaptations, and mitigation of climate change: scientific-technical analyses. Contribution of working group II to the second assessment report of the IPCC.* 289-324 pp.
- CEPAL (Comisión Económica para América Latina y el Caribe). 2012. Efectos de cambio climático en las costas de América Latina y el Caribe: vulnerabilidad y exposición (consultado febrero, 2012). http://www.eclac.org/publicaciones/xml/0/46750/2011786w.460_vulnerabilidad_y_exposicion_web.pdf.
- Contreras, F. E. y Castañeda, O. 2004. Las lagunas costeras y estuarios del Golfo de México: hacia el establecimiento de índices ecológicos. *In: diagnóstico ambiental del Golfo de México.* Caso, M.; Pisanty, I. y Ezcurra, E. (Comps.). Instituto Nacional de Ecología. México, D.F., 373-416 pp.
- Finlayson, C. M.; Davis, J. A.; Kingsford, R. T. and Parton, K. A. 2013. The status of wetlands and the predicted effects of global climate change: the situation in Australia. *Aquatic Sciences.* 75(1):73-93.
- Geyer, W. R.; Hill, P. S. and Kineke, G. C. 2004. The transport, transformation and dispersal of sediment by buoyant coastal flows. *Continental Shelf Research.* 24:927-949.
- Gornitz, V.; White, T. W. and Cushman, R. M. 1992. Vulnerability of the U.S. to future sea level rise. conf-910780-i de 91 007853.
- Gornitz, V. M.; Daniels, R. C.; White, T. W. and Birdwell, K. R. 1994. The development of a coastal risk assessment database: vulnerability to sea-level rise in the U.S. Southeast. *Journal of Coastal Research. Coastal hazards: perception, susceptibility and mitigation. Special Issue No. 12.* 327-338.
- Guerra, M. V. y Ochoa, G. S. 2006. Evaluación espacio-temporal de la vegetación y uso del suelo en la Reserva de la Biosfera Pantanos de Centla, Tabasco (1990-2000). *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).* 59:7-25.
- Hernández, J. R.; Ortiz, P. M. A.; Méndez, A. P. y Gama, C. L. M. 2008. Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).* 65:7-21.
- INEGI (Instituto Nacional de Estadística y Geografía). 2010 (consultado diciembre, 2010). <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?e=27>.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2007. *Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution of working group II to the fourth assessment report of the IPCC.* Parry, M. L.; Canziani, O. F.; Palutikof, J. P.; van der Linden P. J. and Hanson, C. E. (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, UK. 976 p.
- Junk, W. J.; An, S.; Finlayson, C. M.; Gopal, B.; Květ, J.; Mitchell, S. A.; Mitsch, W. J. and Roberts, R. D. 2013. Current state of knowledge regarding the world's wetlands and their future under global climate change: a synthesis. *Aquatic Sciences.* 75(1):151-167.
- Klein, R. J. T. and Nicholls, R. J. 1999. Assessment of coastal vulnerability to climate change. 2(28):182-187.
- Lankford, R. R. 1976. Coastal lagoons of Mexico: their origin and classification. *In: Wiley, M. (Ed.) Estuarine Processes.* Academic Press. New York. (2):182-215.
- Lara, J. R.; Arreola, J. A.; Calderón, L. E.; Camacho, V. F.; De la Lanza, G.; Escofet, A.; Ileana, M.; Guzmán, M. B. L.; López, M.; Meling, E. A.; Moreno, P.; Reyes, H.; Ríos, E. y Zertuche, J. A. 2008. Los ecosistemas costeros, insulares y epicontinentales. *In: capital natural de México. Conocimiento actual de la biodiversidad. Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).* México, D. F., 1:109-134.
- Mazda, Y.; Magi, M.; Kogo, M. and Hong, N. 1997. Mangroves as a coastal protection from waves in the Tong King delta, Vietnam. *Mangroves and salt marshes.* 1:127-135.
- Milliman, J. D. and Syvitski, J. P. M. 1992. Geomorphic/tectonic control of sediment discharge to the ocean: the importance of small mountainous rivers. *J. Geology.* 100:525-544.
- Nicholls, R. 2002. Analysis of global impacts of sea-level rise: a case study of flooding. *Physics and Chemistry of the Earth.* 27:1455-1466.
- Ojeda, J.; Álvarez, J. I.; Cajaraville, D. M.; Fraile, P.; Vallejo, I. y Márquez, J. 2011. Análisis preliminar de la vulnerabilidad de la costa de Andalucía a la potencial subida del nivel del mar asociado al Cambio Climático. *Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía. Unión Europea. Fondo Europeo de Desarrollo Regional.* 154 p.
- ONU/EIRD (Naciones Unidas- Estrategia Internacional para la Reducción de los Desastres). 2008. *El cambio climático y la reducción del riesgo de desastres.* Ginebra (consultado mayo, 2008). <http://eird.org/publicaciones/rrd-cambio-climatico.pdf>. Nota informativa Núm. 1.
- Ortiz, P. M. A. y Linares, A. P. 1999. Escenarios por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo y el Mar Caribe. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).* 39:68-81.
- Ortiz, P. M. A.; Hernández, J. R.; Figueroa, M. E. J. M. y Gama, C. L. M. 2010. Tasas del avance transgresivo y regresivo en el frente deltaico tabasqueño: en el periodo comprendido del año 1995 al 2008. *In: vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el Cambio Climático.* Botello, A. V.; Villanueva-Fragoso, S.; Gutiérrez, J. y Rojas-Galaviz, J. L. (Eds.). SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 305-324 pp.
- Palma-López, D. J.; Cisneros, D. F.; Moreno, C. E. y Rincón, R. J. A. 2007. *Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable.* Villahermosa, Tabasco, México. Colegio de Postgraduados en Ciencias Agrícolas. ISPROTAB-FUPROTAB. 195 p.

- Pendleton, E. A.; Thieler, E. R. and Williams, S. J. 2010. Importance of coastal change variables in determining vulnerability to sea- and lake-level change. *Journal of Coastal Research*. 261:176-183.
- Pérez, D. M.; Bolaños, R. y Silva, R. 2008. Predicción del oleaje generado por dos huracanes en las costas del Golfo de México. *Ingeniería Hidráulica en México*. 2(23):5-20.
- Reyes, E.; Day, J. W.; Lara, A. L.; Sánchez, P.; Zarate, D. and Yañez, A. 2004. Assessing coastal management plans using watershed spatial model for the Mississippi delta, USA, and the Usumacinta-Grijalva delta, México. *Ocean & Coastal Management*. 47:693-708.
- Rodríguez-Rodríguez, E. 2002. Las lagunas continentales de Tabasco. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. México. 264 p.
- SEMAR (Secretaría de Marina) s/f (consultado junio, 2010). <http://digaohm.semar.gob.mx/cuestionarios/cnarioFrontera.pdf>.
- SEMARNAP (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales). 1997. Primera comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas. Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales y Pesca. 139 p.
- Shaw, J.; Taylor, R. B.; Forbes, D. L.; Ruz, M. H. and Solomon, S. 1998. Sensitivity of the Canadian coast to sea-level rise. *Geological Survey of Canada*. 505:1-90.
- Sheik, M. P. and Chandrasekar, N. 2011. Coastal erosion hazard and vulnerability assessment for southern coastal Tamil Nadu of India by using remote sensing and GIS. *Natural Hazards*, 1-11.
- Syvitski, J. P. M.; Vörösmarty, C. J.; Kether, A. J. and Green, P. 2005. Impact of humans on the flux of terrestrial sediment to the global coastal ocean. *Science* 308:376-380 DOI: 10.1126/science.1109454.
- Thieler, R. and Hammar, E. 1999. National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise: preliminary results for the U.S. Atlantic Coast. U.S. Geological survey. Woods hole, Massachusetts. Open-file report. 99-593.
- Toledo, A. 2003. Ríos, costas y mares. Hacia un análisis integrado de las regiones hidrológicas de México. INE-SEMARNAT. 117p.
- Tunnell, J. W. Jr.; Felder, D. L. y Earle, S. A. 2004. El Golfo de México: pasado, presente y futuro. Una colaboración entre Estados Unidos de América, México, Cuba. *In: diagnóstico ambiental del Golfo de México*. Caso, M.; Pisanty, I. y Ezcurra, E. (Comps). Instituto Nacional de Ecología, México, D.F., 361-371 pp.
- Turner, R. K.; Subak, S. and Adger, W. N. 1996. Pressures, trends, and impacts in coastal zones: interactions between socioeconomic and natural systems. *Environmental Management*. 20(2):159-173.
- Vafeidis, A.; Nicholls, R. J.; McFadden, L.; Tol, R.; Hinkel, J.; Spencer, T.; Grashoff, P. S.; Boot, G. and Klein, R. 2008. A new global coastal database for impact and vulnerability analysis to sea-level rise. *Journal of Coastal Research*. 4(24):917-924.
- Villanueva, S.; Ponce, G.; García, C. y Presa, J. 2010. Vulnerabilidad de la zona costera. Ecosistemas costeros. *In: vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el Cambio Climático*. Botello, A. V.; Villanueva-Fragoso, S.; Gutiérrez, J. y Rojas-Galaviz, J. L. (Eds.). SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 37-72 pp.
- West, R.; Psuty, N. P. y Thom, B. 1985. Las tierras bajas de Tabasco en el sureste de México. Villahermosa, Tabasco. Instituto de Cultura de Tabasco. 416 p.
- Zavala, H. J.; De Buen, R.; Romero, R. y Hernández, F. 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas. *In: vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el Cambio Climático*. Botello A. V.; Villanueva-Fragoso S.; Gutiérrez J. y Rojas-Galaviz J. L. (Eds.). SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 249-368 pp.

2.2 Artículo 2. Análisis de cambios de uso del suelo en el municipio costero de Comalcalco, Tabasco, México.

Publicado en la Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios (ERA), en Abril del 2016. <http://132.248.10.25/era/index.php/rera/article/view/746/709>

	UNIVERSIDAD JUÁREZ AUTÓNOMA DE TABASCO "Estudio en la Duda. Acción en la Fe" Secretaría de Investigación, Posgrado y Vinculación Dirección de Difusión y Divulgación Científica y Tecnológica	REVISIÓN N° 01		
		AÑO	MES	DÍA
	DICTAMEN	2015	01	08
		F-DDCT-18		

Ecosistemas y Recursos Agropecuarios
era@ujat.mx
Teléfono/fax 01.993.3 58 15 00 Ext. 5041

Villahermosa, Tab., 2 de marzo de 2016

Autores. – Rodimiro Ramos-Reyes, Rufo Sánchez-Hernández, Lilia Gama-Campillo

El artículo

746 --- ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USO DEL SUELO EN EL MUNICIPIO COSTERO DE COMALCALCO, TABASCO, MÉXICO.

ha sido aceptado para su publicación con fecha 28 de octubre de 2015. En un tiempo breve remitiré la prueba de galera y los documentos anexos. Agradeciendo su interés por publicar en la revista, envío un saludo respetuoso.

Atentamente



Dr. Efraín de la Cruz Lázaro
Editor

C.c.p. Archivo

ESTE DOCUMENTO ES PROPIEDAD DEL SISTEMA DE GESTIÓN DE CALIDAD DEL DEPARTAMENTO EDITORIAL DE REVISTAS UNIVERSITARIAS DE LA SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN, POSGRADO Y VINCULACIÓN DE LA UJAT

Secretaría de Investigación, Posgrado y Vinculación, Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera a Villahermosa, km. 1.5, Villahermosa, Tabasco, México. Teléfono: 993 358 1500. Fax: 993 358 1501. E-mail: era@ujat.mx. www.era.ujat.mx. www.ujat.mx. www.ujat.mx/era. www.ujat.mx/era/index.php/rera. www.ujat.mx/era/index.php/rera/article/view/746/709. Villahermosa, Tabasco, México, 2 de marzo de 2016.

ANÁLISIS DE CAMBIOS DE USO DEL SUELO EN EL MUNICIPIO COSTERO DE COMALCALCO, TABASCO, MÉXICO

Analysis of land use changes in the municipality coastal Comalcalco, Tabasco, Mexico

Rodimiro Ramos-Reyes^{1,2*}, Rufo Sánchez-Hernández³, Lilia María Gama-Campillo²

^{1*} El Colegio de la Frontera Sur, LAIGE, Carretera Villahermosa-Reforma Km 15.5 s/n. Ranchería Guineo, 2 Sección, C.P. 86280, Villahermosa, Tabasco, México.

² División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Cárdenas Km. 0.5 s/n, Entronque a Bosques de Saloya, CP. 86150, Villahermosa, Tabasco, México.

³ División de Académica de Ciencias Agropecuarias. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, Carretera Villahermosa-Teapa Km 25, C.P. 86800, Villahermosa, Tabasco, México
Autor de correspondencia: rreyes73@hotmail.com

Artículo recibido: 24 de febrero de 2015, **aceptado:** 28 de octubre de 2015

RESUMEN. El objetivo fue identificar la dinámica del cambio de uso de suelo del 2000 al 2010 en el municipio de Comalcalco, Tabasco, México. Se observa disminución del pastizal en 4.06 %, al disminuir de 36 595 a 33 448 ha, para uso agrícola y urbano. El incremento en el uso agrícola, fue alentado por programas gubernamentales, mientras que el uso urbano responde al incremento del 23.33 % de la población en los 10 años de estudio. Por causas antrópicas, se observó la pérdida de vegetación hidrófila en un 0.81 %, la cual fue sustituida por pastizales; mientras que por causas naturales, la superficie del manglar creció en 1.32 %. Los suelos Vertisoles, Gleysoles y Solonchacks tienen propiedades físico y químicas deficientes, pero representan el 87.6 % de la superficie; lo contrario son los Fluvisoles y Cambisoles los cuales tienen buena fertilidad y representan el 12.4 % de la superficie. Los cambios de uso del suelo ocurridos no se recomiendan, ya que podría afectar de forma negativa la fertilidad de los suelos.

Palabras clave: Agricultura, manglar, pastizal, Trópico húmedo, uso urbano, vegetación hidrófila

ABSTRACT. The objective was to identify the dynamic of the changes in land use from 2000 to 2010 in the municipality of Comalcalco, Tabasco, Mexico. There was a 4.06 % decrease in pastures for agricultural and urban use, decreasing from 36,595 to 33,448 ha. The increase in agricultural use was encouraged by governmental programs, whereas the urban use responded to the 23.33 % increase in population in the 10 year study. Due to anthropogenic causes, a 0.81 % loss of hydrophytic vegetation was observed, which was substituted by grasslands; whereas the mangrove surface grew by 1.32 % due to natural causes. Vertisol, Gleysol, and Solonchak soils have deficient physical and chemical properties, but represent 87.6 % of the surface; on the other hand, Fluvisol and Cambisol soils have good fertility and represent 12.4 % of the surface. The changes in land use that occurred are not recommended, given that they could negatively affect the fertility of the soil.

Key words: Agriculture, mangrove, pasture, humid tropics, urban use, hydrophytic vegetation

INTRODUCCIÓN

El acelerado crecimiento poblacional, aunado a las crecientes expectativas de desarrollo, constituye una enorme presión de uso sobre los recursos naturales. Esto no solo se traduce en una intensificación de cultivos en zonas agrícolas, sino que además estimula el sobrepastoreo, la extrac-

ción de leña y la deforestación (Goudie 2013). De acuerdo con Klanderud et al. (2010), la agricultura es una de las principales causas de deforestación y de la pérdida biodiversidad en países tropicales (Day-Rubenstein et al. 2000). Al respecto Mitchell et al. (2013) mencionan que no existe un vínculo universal de causa y efecto en el fenómeno de la deforestación tropical y el cambio de uso de suelo.

Aunque a nivel mundial, las principales causas apuntan al crecimiento de la población y al aumento de la frontera agrícola; sin dejar de considerar, otros factores locales, decisiones de política ambiental, así como los modos particulares de la expansión agrícola, extracción de madera y la ampliación de la infraestructura. Mientras que Pielke *et al.* (2002) mencionan que el análisis del cambio de uso de suelo puede ofrecer información importante, para generar un modelo más incluyente en el estudio del cambio climático global (CCG), ya que, en la actualidad no se ha considerado el efecto protector de la vegetación, contra la tasa de radiación que llega a la superficie terrestre, la cual causa un efecto similar a las emisiones de gases de efecto invernadero, sumándose las denominadas islas de calor sobre el CCG (Fuentes 2015). Lo que ha provocado que, hasta ahora, los análisis de este fenómeno se centren en la composición de los gases en la atmósfera. Al respecto, Foley *et al.* (2005) mencionan que en el cambio de uso de suelo se considera como un problema ambiental local. Sin embargo, en la actualidad es un tema de importancia mundial, por la creciente demanda de alimentos, fibras, agua y refugio, lo que provoca múltiples transformaciones a los bosques, tierras de cultivo, cursos de agua y el aire. Como resultado se ha observado una expansión en las áreas cultivadas y urbanas, acompañada de un aumento en el consumo de energía, agua, fertilizantes y pérdida de biodiversidad (De la Fuente y Suarez 2008).

Una forma de evaluación del cambio en el uso del suelo, es por medio de la medición de los cambios en la cobertura vegetal y no vegetal; tradicionalmente, dicha medición y uso del suelo, se realizan sobre documentos generados por percepción remota o cartografía temática de cobertura (Bocco *et al.* 2001). En forma pragmática, el concepto de cobertura describe los objetos que se distribuyen sobre un territorio determinado; mientras que el concepto de uso del suelo, se refiere al resultado de las actividades socioeconómicas que se desarrollan sobre una cobertura (Anderson *et al.* 1976). Con este enfoque, Goldewijk *et al.* (2010) reportó un cambio de uso de suelo a nivel mundial de 136 a 658 millones

de ha del 1700 al 2000, destacando la conversión a pasturas de 418 millones de hectáreas.

En el ámbito específico de la teledetección, los equipos de observación disponible han mejorado, con los satélites LANDSAT, SPOT, Meteosat o NOAA, además de las misiones con enfoque ambiental, debido al interés en la investigación sobre temas de CCG (Chuvieco 2007). Antes los métodos tradicionales de evaluación de los recursos naturales, eran caros y consumían grandes cantidades de tiempo, debido al alto número de observaciones. Sin embargo, los avances en computación y tecnologías de la información, han introducido un nuevo grupo de herramientas, métodos, instrumentos y sistemas (Ordoñez y Martínez-Alegría 2003), como los sensores remotos y los sistemas de información geográfica (SIG), para satisfacer la demanda de recursos para modelación. Los SIG proporcionan el medio para la integración y brindan una poderosa herramienta para el análisis cuantitativo de los cambios de uso de suelo (Treitz y Rogan 2004). Por lo anterior, el objetivo de este estudio fue identificar la dinámica del cambio de uso de suelo del 2000 al 2010 en el municipio de Comalcalco, Tabasco, México.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo se desarrolló en el municipio de Comalcalco, Tabasco; ubicado entre las coordenadas 18° 09' LN y 92° 32' LO; con superficie de 723.19 km²; clima cálido húmedo con abundantes lluvias en verano; temperatura media anual entre 24 y 28 °C; y precipitación media anual entre 1500 y 3000 mm (INEGI, 2006).

Como fuente digital de información, se utilizaron mapas del Inventario Nacional Forestal del 2000 y del Plan de Ordenamiento Territorial del Estado de Tabasco, México del 2007. Con los programas Quantum GIS, ArcView 3.2 y ArcGIS 9.2, se delimitó el polígono del área de estudio. El mapa del 2000 se generó con imagen de satélite LANDSAT 5 TM (Thematic Mapper) del mismo año, con un despliegue del falso color (RGB 4,3,2); mientras que el mapa del 2010 se creó con imagen SPOT

Tabla 1. Superficie de suelo según su uso, en el municipio de Comalcalco Tabasco de 2000 a 2010.

Uso del Suelo	2000		2010		Variación (%)
	has	(%)	has	(%)	
Pastizales	36,595	47.18	33,448	43.13	-4.06
Agricultura	23,622	30.46	26,122	33.68	+3.22
Manglar	3,786	4.88	4,811	6.20	+1.32
Vegetación hidrófila	5,706	7.36	5,074	6.54	-0.81
Cuerpos de agua	7,040	9.08	6,585	8.49	-0.59
Urbano	808	1.04	1,518	1.96	+0.92
Total	77, 557	100	77, 557	100	-

del 2010, con un falso color (RGB 1, 2, 3). En ambos años la identificación de los usos del suelo se llevó a cabo por interpretación visual en pantalla (Ordoñez y Martínez-Alegria 2003), aplicando los criterios de tono, forma, tamaño y textura (Chuvieco 2008), además de recorridos de verificación en campo en el 2012, con GPS. Los usos del suelo se poligonizaron, para obtener las superficies para realizar las bases de datos compatibles con los SIG para su análisis geográfico.

En relación al mapa base de suelos, se consideró el elaborado por Palma-López et al. (2007), el cual fue actualizado mediante herramientas de SIG. Dicho mapa clasifica los suelos del área de estudio, de acuerdo al sistema WRB (IUSS Grupo de Trabajo WRB 2007). Este sistema genera un mapa, a partir de la realización de descripciones de perfiles de suelo, del relieve, cobertura/uso y actualización de los topónimos en puntos de muestreos seleccionados. A cada punto, se asocia la coordenada geográfica y la información de las descripciones realizadas. Con dicha información se ubica a los suelos dentro de sus correspondientes grupos de acuerdo al sistema WRB, y mediante SIG, se aplica el método de interpolación para generar isolíneas, de acuerdo a los rasgos característicos determinados por teledetección. Para agregar o corregir grupos de suelos en el mapa resultante, se realizan perforaciones con barreno para determinar horizontes y propiedades de diagnóstico, que permitan redefinir los linderos de cada grupo de suelo en el mapa.

RESULTADOS

En el 2000, se identificaron seis usos de suelo: pastizales, agrícola, vegetación hidrófila, manglares, cuerpos de agua y áreas urbanas. Fisiográficamente las áreas más bajas del municipio se localizan en la parte norte; donde se hallan los usos más tolerantes a condiciones de inundación prolongada, específicamente manglares y cuerpos lagunares, en la parte noreste se distribuye una pequeña porción de vegetación hidrófila, en tanto que uso agrícola y pastizales se ubican en menor superficie. La porción central y sur es la menos diversa en cuantos usos de suelo, se restringe a pastizales, agrícola y áreas urbanas. Los usos que figuran con la mayor extensión son el de pastizal y agrícola (Figura 1).

En el 2010, se identificaron los mismos seis usos de suelos del 2000 y un mayor número de núcleos urbanos, destacando la ampliación de la cabecera municipal en lugares correspondían a uso agrícola y ganadero. También se observa un crecimiento de núcleos urbanos en los límites de los municipios de Cárdenas y Jalpa de Méndez. En el 2000, se observaron cinco núcleos poblacionales compactos (Figura 1), en tanto que en el 2010 se identificaron 10 núcleos poblacionales (Figura 2). Además, de un incremento de las áreas agrícolas, y reducción de las áreas de pastizal y vegetación hidrófila (Figura 2). La suma de los distintos usos de suelo en el municipio, es de 77 557 ha. De ésta, el pastizal figura como la de mayor cobertura en ambos años de evaluación (Tabla 1).

En la Figura 3 se observa de manera general,

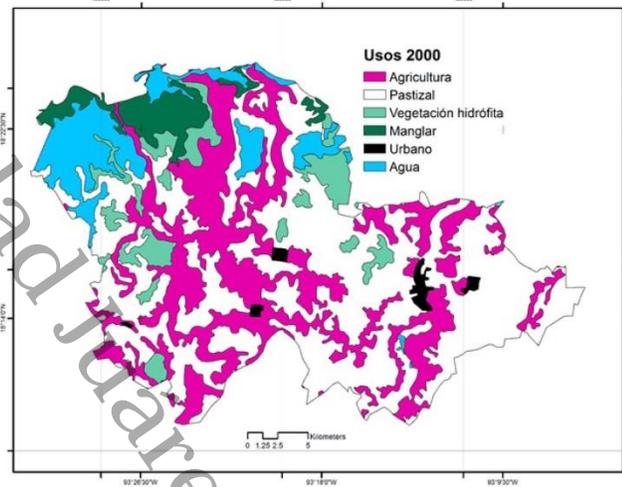


Figura 1. Usos de suelo, identificados en el municipio de Comalcalco, Tabasco en el 2000.

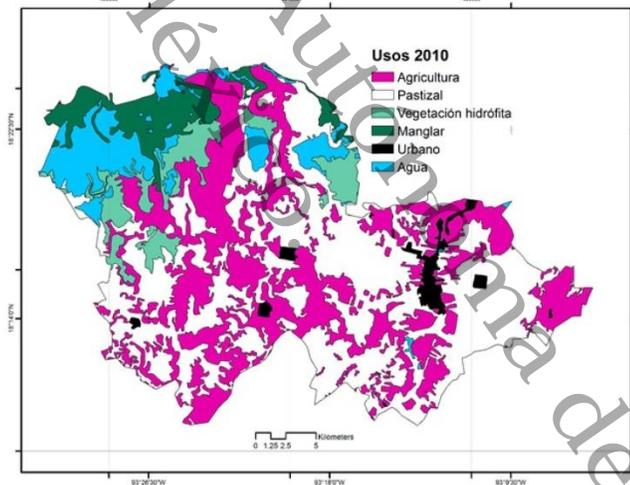


Figura 2. Usos de suelo, identificados en el municipio de Comalcalco, Tabasco en el 2010.

que los principales usos de suelo se conservaron, tanto en número como en superficie, aunque destaca el cambio de uso de pastizales en agricultura y zonas urbanas, y de vegetación hidrófila a pastizales. Cabe

señalar que en la parte sur del municipio, se han dado la mayoría de los cambios de uso, debido a intervenciones antrópicas, mientras que en menor medida en la parte norte, por causas naturales, como

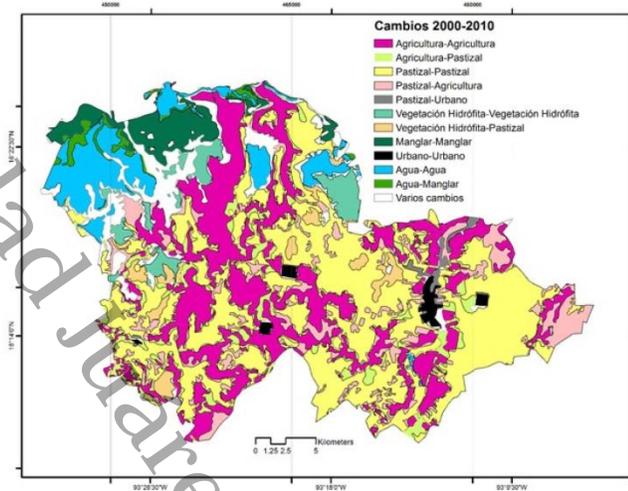


Figura 3. Cambios de usos de suelo registrados del 2000 al 2010 en el municipio de Comalcalco, Tabasco.

la recuperación de áreas de manglares en cuerpos de agua.

En cuanto a la distribución de los suelos, se identificaron cinco grupos. En orden de importancia se encuentran los Vertisoles eútricos, Gleysoles mólicos, Fluvisoles eútricos, Cambisoles gléyicos y Solonchaks gléyicos. Presentando la mayor superficie los Vertisoles eútricos con 55 058 ha, lo que equivale al 71 % del total de la superficie del municipio. Mientras que los suelos con menores área fueron los Cambisoles gléyicos y Solonchaks gléyicos, con 3 456 y 3 036 ha, con porcentajes de cambio de 30 y 22 %, respectivamente (Figura 4).

Por su amplia distribución, los Vertisoles eútricos son los suelos con más cambios de uso, ya que 15 428.96 ha (29 %) de estos suelos, han tenido cambios de uso, particularmente de tipo agrícola. Otros suelos que también presentan cambios de uso fueron los Gleysoles mólicos de los que cambiaron de uso 3 018.52 ha, lo que equivale al 31 % de su superficie total, seguido de los Fluvisoles eútricos cuyo cambio ocurrió en 1 856.72 ha, que equivalen al 30 % del total de la superficie.

DISCUSIÓN

En las últimas décadas las áreas forestales del sur de México, cedieron sus espacios para ser ocupadas por pastizales; las causas que provocaron este crecimiento de la superficie del pastizal, fue el aumento de la demanda de carne a nivel mundial y el bajo nivel tecnológico de los sistemas de producción, por lo que se requerían grandes superficies de terreno, para sostener el hato ganadero de forma extensiva (Castro *et al.* 2002). A esta situación, el municipio de Comalcalco no fue ajeno, ya que en el 2000, el pastizal era el uso de suelo de mayor cobertura en el municipio con 36 595 ha. No obstante, la superficie destinada a la actividad pecuaria se ha tenido que ajustar a las realidades económicas del país, así como a las políticas de gobierno en materia de apoyos al sector agropecuario. A pesar de que el pastizal tuvo una ligera disminución a principio de los 70, en la siguiente década recuperó su superficie, por lo que fue el uso de suelo más importante (Ramos *et al.* 2004).

En el caso del municipio de Comalcalco, la dinámica de cambio de uso de suelo, es un reflejo de

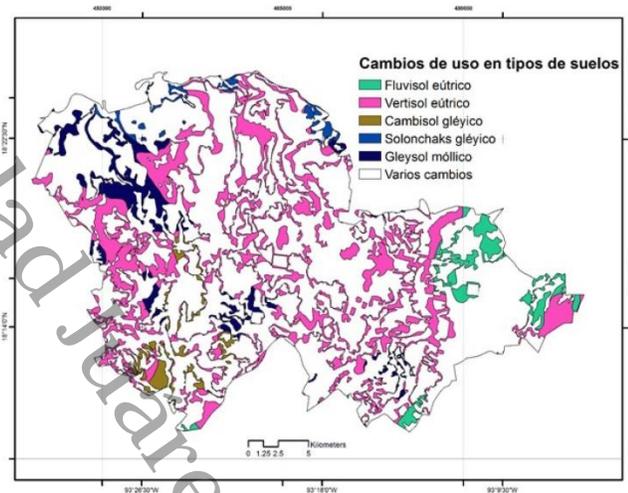


Figura 4. Cambios de uso según grupos de suelo identificados en el municipio de Comalcalco, Tabasco.

lo acontecido en otras regiones del estado (Ramos *et al.* 2004, Geissen *et al.* 2009) y del país (Rosete *et al.* 2008). La superficie de los pastizales, paso de 36 595 000 a 33 448 ha del 2000 al 2010, lo que representa una reducción del 4.06 % (Tabla 1). Esta reducción de la superficie es una muestra de la contracción de la actividad en el estado de Tabasco, debido a múltiples factores entre los que destacan la ganadería extensiva, bajo nivel de tecnificación, estacionalidad, impacto del estiaje; que en conjunto provocan una baja rentabilidad, afectando a los pequeños productores (Castro *et al.* 2002). La reducción de los canales de comercialización de la carne en el estado y de la apertura del mercado de ganado en pie hacia el norte del país y los Estados Unidos (Ramos *et al.* 2004).

La disminución de la actividad ganadera en el área de estudio, explica el incremento observado en la superficie agrícola del municipio de Comalcalco en el 2010, donde en un lapso de 10 años, recuperó una superficie equivalente al 3.22 %, al pasar de 23 622 ha en el 2000 a 26 122 ha en el 2010, lo que coincide con Ramírez-Martínez (2007), debido entre otros factores a la creación de programas de Apoyo a la

Cadena Productiva de Productores de Maíz y Frijol (PROMAF), y al Proyecto Estratégico de seguridad Alimentaria (PESA), los cuales impulsaron la producción de cultivos de maíz y frijol (Cuéllar 2011, Baca del Moral 2014). En el municipio de Comalcalco, Tabasco, se siembra cacao, naranja, mango, coco, plátano, papaya, caña de azúcar, maíz y otros de ciclo corto como frijol, pepino y calabaza; de los cuales el cacao y el maíz se establecen en áreas compactas, mientras que los demás cultivos se distribuyen de forma dispersa en huertos familiares o en asociación con otros usos como el pastizal (Ramos *et al.* 2004). Cabe destacar que el cacao es el principal cultivo y la fuente de ingreso más importante del sector agrícola, por lo que a pesar de los múltiples problemas que enfrenta el sector, la dinámica de uso de suelo que se observa se explica por el comportamiento de este cultivo, el cual en el 2000 representaba el 30 % de la superficie de la región en la que se ubica el municipio de Comalcalco (Ramos *et al.* 2004). Al respecto, José *et al.* (2013) reportaron que del 2000 al 2011, el cultivo de cacao en México tuvo una disminución de 43.7 %, debido a problemas fitosanitarios. Pese a la importancia

que juega el cultivo de cacao para el municipio, la siembra que mayor crecimiento registró en superficie cultivada fue el maíz, ya que de 962 ha reportadas para la región de la Chontalpa en el 2000 (Ramos *et al.* 2004), incrementó a 15 572 ha en el 2010 (SIAP 2014).

Destaca el crecimiento del uso urbano en el municipio de Comalcalco en el 2010, aunque dicho crecimiento fue del 0.92 % con respecto a la superficie del municipio, por lo que la superficie urbana se duplicó al pasar de 808 a 1 518 ha del 2000 al 2010, por el incremento de la población en un 23.33 %. Al respecto, Bonilla *et al.* (2012) mencionan que a mediados de la última década en México, tanto las políticas como de las instituciones orientadas al fomento de la vivienda tuvieron reestructuraciones que han permitido incrementar el acceso al crédito. Cabe señalar que de acuerdo a los resultados obtenidos, el uso de suelo de pastizal fue el que mayor cambió a uso urbano, lo que explica la reducción del área de pastizal en el área de estudio. Al respecto, Galindo y Delgado (2006) señalan que los conceptos urbanos y rural, han empezado a presentar un agotamiento y se ha empezado a explorar nuevos paradigmas emergentes de interfase rural-urbana. Mientras que Ávila (2004) reconoce que desde el punto de vista geográfico, es necesario generar nuevas metodologías para la comprensión de una nueva realidad, en la que el espacio rural se transforma a espacios urbanos, cuyo valor no solo consiste en la creación de núcleos urbanos, sino que, además continúan ofreciendo importantes servicios ambientales, e inclusive siguen siendo espacios productivos. No obstante que el cambio de uso de suelo a urbano genera fragmentación de los hábitats, es necesario reconocer que estas nuevas áreas periurbanas, continúan manteniendo una gran riqueza de la biodiversidad (Pineda-López *et al.* 2010).

La vegetación hidrófila tuvo otro uso, que durante el periodo de estudio se redujo en superficie, que en 2010 se transformo en pastizales, esta situación se relaciona con la implementación de obras de infraestructura de drenaje parcelario, así como en aprovechamiento temporal del pastizal en épocas de secas. Al respecto Maimone-Celorio *et*

al. (2006) señalan que el aprovechamiento como pastizales de las áreas de humedales, es una práctica común en Tabasco. En lo referente al área de manglares se observa un incremento, lo que se puede considerar como un cambio de uso de suelo favorable desde el punto de vista ambiental, ya que este ecosistema se caracteriza por su gran riqueza en biodiversidad, además que sirve como protección para evitar la intrusión salina a los suelos aledaños a la costa y protege a la población de los embates de tormentas y huracanes (Calderón *et al.* 2009). Al respecto Moreno *et al.* (2002) señalan que la vegetación de manglar está distribuida en la parte posterior del cordón litoral tabasqueño, bordeando las lagunas que se extienden paralelas a la costa y que tienen conexión con el mar. Lo que influye en los procesos de acreción y los retrocesos de línea de costa que se han observado en la entidad durante los últimos años (Hernández *et al.* 2008), lo que puede ocasionar erosión, inundaciones, salinización de tierras, aguas superficiales y del manto freático cercano (Pannier 1992).

Los suelos que predominan en el área de estudio se caracterizan por ser de origen fluvial y altos contenidos de arcillas, los cuales están influenciados por el agua, en los casos de los Vertisoles y Gleysoles, aunque químicamente tienen vocación productiva, presentan serias dificultades de drenaje y anegamiento, por lo que su uso recomendado es pastizal. Por su parte, los Solonchack están demeritados químicamente debido al elevado contenido de sales, siendo recomendado para la vida silvestre o para alguna vegetación tolerante a la salinidad. Los suelos más fértiles del municipio, son los Fluvisoles y los Cambisoles, ambos considerados como suelos genéticamente jóvenes, formados por depósitos aluviales, de buena fertilidad y atractivos para cultivarse (IUSS Working Group WRB 2014). La suma de la superficie de suelos de buena fertilidad como Fluvisoles y Cambisoles representa el 12.4 %, mientras que los Vertisoles, Gleysoles y Solonchacks, en conjunto ocupan el 87.6 %. Esta situación hace evidente que el cambio de uso que se registró en el periodo de 2000 a 2010, va en sentido opuesto a la capacidad de uso de los Vertisoles, Gleysoles

y Solonchacks, ya que por sus restricciones físicas y químicas, el uso recomendado en general es para pastizales, y no hacía la agricultura como ha ocurrido en los últimos años. Se debe considerar que el cambio de uso de suelo provoca modificaciones de la propiedades químicas y físicas, particularmente en Potasio, Nitrógeno Total, Carbono Orgánico, Materia Orgánica, Fosforo, Textura, pH, Capacidad de Intercambio de Cationes, en la capa de 0 a 15 cm de profundidad (Worku *et al.* 2014), por lo que se requiere evaluar los impactos que ocurren sobre el recurso edáfico cuando se da un cambio de uso de suelo, como los que se presentaron en el municipio. Al respecto, Seto *et al.* (2012) menciona que el crecimiento de las áreas urbanas, amenaza la biodiversidad y la productividad de los ecosistemas, debido a la pérdida de hábitat, la biomasa y el almacenamiento de carbono. Sin embargo, algunas proyecciones señalan que es inminente que para el 2030, las poblaciones urbanas mundiales aumentarán a casi 5 mil millones, lo que representará emisiones de carbono (C) de 1.38 Pg C (0.05 Pg C año⁻¹).

CONCLUSIONES

Los usos de suelo de agricultura, pastizal, vegetación hidrófita, manglar, urbano y cuerpos de agua que fueron observados en el año 2010 son idénticos a los encontrados en el 2000. Del 2000 al 2010, se observó una reconfiguración del uso de suelo, debido al crecimiento del uso agrícola, urbano y manglares; así como una reducción de la superficie de pastizales y vegetación hidrófita. En la parte norte del municipio de Comalcalco se encontraron cuerpos lagunares y manglares, los cuales se ubicaron sobre suelos inundables; mientras que en la parte sur se distribuyen las áreas agrícolas y pastizales. Se observa un proceso de desganaderización, sustituida por un crecimiento en el uso agrícola y urbano. Se identificaron repercusiones favorables del cambio de uso de suelo y crecimiento de las áreas de manglar, así como la reducción de áreas de vegetación hidrófita que recientemente se han abierto al uso de pastizal.

LITERATURA CITADA

- Anderson JR, Hardy EE, Roach JT, Witmer RE (1976) A land use and land cover classification system for use with remote sensor data. Geological Survey Professional Paper 964. Geological Survey Circular 671. US Government Printing Office, Washington. <http://landcover.usgs.gov/pdf/anderson.pdf>. Fecha de consulta 26 de enero de 2015.
- Ávila SH (2004) La agricultura en las ciudades y su periferia: un enfoque desde la Geografía. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM 53: 98-121.
- Baca del Moral J (2014) El Programa Especial para la Seguridad Alimentaria (PESA), nueva forma de extensionismo, en México. Spanish Journal of Rural Development 5: 33-42.
- Bocco G, Mendoza M, Masera OR (2001) La dinámica del cambio del uso del suelo en Michoacán. Una propuesta metodológica para el estudio de los procesos de deforestación. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de geografía, UNAM 44: 18-38
- Bonilla C, Villasana M, Cantú M (2012) El sector de la vivienda. Revista Estudiantil de Economía 4: 165-188.
- Calderón C, Aburto O, Escurra EE (2009) El valor de los manglares. Comisión Nacional para el uso de la Biodiversidad. Biodiversitas 82: 1-6.
- Castro HG, Tewolde AM, Toral JN (2002) Análisis de los sistemas ganaderos de doble propósito en el centro de Chiapas, México. Archivos Latinoamericanos de Producción Animal 10: 175-183.
- Chuvieco E (2007) Mirar desde el espacio o mirar hacia otro lado: tendencias en teledetección y su situación en la geografía española. Documents d'Anàlisi Geogràfica 50: 75-85.

- Chuvieco E. (2008) Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el Espacio. 3ra. Edición. Ariel, Madrid, España. 594p.
- Cuéllar JA (2011) Programa de seguridad alimentaria: Experiencias en México y otros países. NU. CEPAL, Sede Subregional en México. México. 58p.
- Day-Rubenstein K, Stuart M, Frisvold GB (2000) Agricultural land use in tropical countries: Patterns, determinants, and implications for biodiversity loss. *Global Warming Science and Policy* 12: 621-650.
- De la Fuente EB, Suárez SA (2008) Problemas ambientales asociados a la actividad humana: la agricultura. *Ecología Austral* 18: 139-252.
- Foley JA, Defries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, et al. (2005) Global consequences of land use. *Science* 309: 570-574.
- Fuentes PCA (2015) Islas de calor urbano en Tampico, México: Impacto del microclima a la calidad del hábitat. *Nova Scientia* 13: 495-515.
- Galindo C, Delgado J (2006) Los espacios emergentes de la dinámica rural-urbana. *Problemas del Desarrollo* 37: 187-216.
- Geissen V, Sánchez-Hernández R, Kampichler C, Ramos-Reyes R, Sepulveda-Lozada A, Ochoa-Goana S, et al. (2009) Effects of land-use change on some properties of tropical soils - An example from Southeast Mexico. *Geoderma* 151: 87-97.
- Goldewijk KK, Beusen A, Dreht GV, de Vos M (2011) The HYDE 3.1 spatially explicit database of human-induced global land-use change over the past 12,000 years. *Global Ecology and Biogeography* 20: 73-86.
- Goudie A (2013) The human impact on the natural environment. Past, present and future. Séptima edición. Wiley Blackwell and sons. Oxford, UK. 424p.
- Hernández S JR, Ortiz P MA, Méndez L AP, Gama CL (2008) Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco, México: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 65: 7-21.
- INEGI (2006) Síntesis Geográfica y anexo Cartográfico del Estado de Tabasco. Instituto Nacional de Estadísticas, Geografía e Informática. Aguascalientes, México. <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/productos/>. Fecha de consulta 24 de septiembre de 2014.
- IUSS Grupo de Trabajo WRB (2007) Base Referencial Mundial del Recurso Suelo. Primera actualización 2007. *Informes sobre Recursos Mundiales de Suelos No. 103*. FAO, Roma. 130p.
- José OD, Ávila JA, Medel RR, Cortés VHS (2013) Current state of and perspectives on cocoa production in Mexico. *Ciencia e Investigación Agraria* 40: 279-289.
- Klanderud K, Mbolatiana HZH, Vololomboahangy MN, Radimbison MA, Roger E, Totland O, Rajeriarison C (2010) Recovery of plant species richness and composition after slash-and-burn agriculture in a tropical rainforest in Madagascar. *Biodiversity and Conservation* 19: 187-204.
- Maimone-Celorio MR, Aliphath M, Martínez-Carrera D, Ramírez-Valverde B, Valdéz-Hernández JI, Macías-Laylle A (2006) Traditional management of tropical wetlands and its analysis using geographic information systems (GISs): the case of the Chontal-Maya community from Quintín Arauz, Centla, Tabasco. *Universidad y Ciencia* 22: 27-49.

- Mitchell AT, Matthew LC, Ricardo GH, López-Carr D, Levy AM, Redo D, et al. (2013) Deforestation and reforestation of Latin America and the Caribbean (2001-2010). *Biotropica* 45: 262-271.
- Moreno CE, Guerrero PA, Gutiérrez CMC, Ortiz S CA, Palma L DJ (2002) Los manglares de Tabasco, una reserva natural de carbono. *Madera y Bosques* 8: 115-128.
- Ordoñez GC, Martínez-Alegría LR (2003) *Sistemas de Información Geográfica*. Alfaomega. México. 227p.
- Palma-López DJ, Cisneros DF, Moreno CE, Rincón-Ramírez JA (2007) *Suelos de Tabasco: su uso y manejo sustentable*. Villahermosa, Tabasco, México. Colegio de Postgraduados, ISPROTAB-FUPROTAB, México. 195p.
- Pannier F (1992) El ecosistema de manglar como indicador de cambios globales en la zona costera tropical. *Ciencia* 43:111-113.
- Pielke SRRA, Gregg M, Betts RA, Chase TN, Eastman JL, Niles JO, et al. (2002) The influence of land-use change and landscape dynamics on the climate system: relevance to climate-change policy beyond the radiative effect of greenhouse gases. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Academy* 360: 1705-1719.
- Pineda-López R, Febvre Nadia, Martínez Mahinda (2010) Importancia de proteger pequeñas áreas periurbanas por su riqueza avifaunística: el caso de Mompaní, Querétaro, México. *Huitzil, Revista Mexicana de Ornitología* 11: 69-80.
- Ramírez-Martínez MA (2007) Los productores de cacao de pequeña escala en el contexto de la globalización. *Hitos de Ciencias Económico Administrativas* 13: 103-112.
- Ramos RR, Palma-López DJ, Ortiz-Solorio CA, Ortiz-García CF, Padilla GD (2004) Change of land use by means of geographical information systems in a cacao region. *Terra Latinoamericana* 22: 267-278.
- Rosete VFA, Pérez DJL, Bocco G (2008). Cambio de uso del suelo y vegetación en la Península de Baja California, México. *Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía, UNAM* 67: 39-58.
- Seto KC, Güneralp B, Hutyra LR (2012) Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: 16083-16088.
- SIAP (2014) Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. <http://www.siap.gob.mx/agricultura-produccion-anual/>. Fecha de consulta 24 de septiembre de 2014.
- Treitz P, Rogan J (2004) Remote-sensing for mapping and monitoring land-cover and land-use change-an introduction. *Progress in Planning* 61: 269-279.
- Worku G, Bantider A, Temesgen H (2014) Effects of land use/land cover change on some soil physical and chemical properties in ameleke micro-watershed, Gedeo and Borena zones, south Ethiopia. *Journal of Environment and Earth Science* 4: 13-24.

2.3 Artículo 3. Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México

Enviado al Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. Aceptado el 12 de Mayo de 2016.

Boletín
de la Sociedad Geológica Mexicana

A geological journal included in: Science Citation Index-Expanded • Web of Science • Current Contents / Physical, Chemical and Earth Sciences • ISI Alerting Services • SCIELO Citation Index • Scopus • Scientific Electronic Library Online (SCIELO) • Índice Mexicano de Revistas Científicas (IMRC) • EBSCOhost • Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal (REDALYC) • Ulrich's • GeoRef • Latindex • SCImago • Petalica • Directory of Open Access Journals (DOAJ) • Dialnet • Zoological Record • IFCameroon • Open J-Gate • Geobase e-Journals

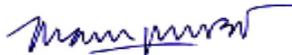
Ciudad de México, 12 de Mayo de 2016

A QUIEN PUEDA INTERESAR

En mi calidad de editor en jefe del *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, me complace hacer constar que el manuscrito intitulado "*Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México*", sometido por Rodimiro Ramos Reyes, Joel Zavala Cruz, Lilia María Gama Campillo, Daniel Pech Pool y Mario Arturo Ortiz Pérez ha sido aceptado para su publicación en un número futuro de nuestra revista tras su revisión por tres árbitros expertos independientes y un editor a cargo.

Dichos manuscrito serán publicado a la mayor brevedad posible en uno de nuestros próximos números.

Saludos cordiales,



Dr. Antoni Camprubí
Editor en jefe, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana

Indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad por inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático en la costa de Tabasco y Campeche, México

Geomorphological indicators to assess vulnerability to climate change on the coast of Tabasco and Campeche, Mexico

Rodimiro Ramos Reyes^{1,2}, Joel Zavala Cruz^{3*}, Lilia María Gama Campillo⁴, Daniel Pech Pool⁵,
Mario Arturo Ortiz Pérez⁶

¹El Colegio de la Frontera Sur, LAIGE, Carretera Villahermosa-Reforma Km 15.5 S/N. Ranchería Guineo, 2 Sección, C.P. 86280, Villahermosa, Tabasco. ²Estudiante de Doctorado de la División Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Cárdenas km. 0.5 S/N, entronque a Bosques de Saloya. CP. 86150, Villahermosa, Tabasco, México.

³Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. Periférico Carlos A. Molina S/N, H. CP 86500, Cárdenas, Tabasco. México.

⁴División de Académica de Ciencias Biológicas. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco. Carretera Villahermosa-Cárdenas km. 0.5 S/N, entronque a Bosques de Saloya. CP. 86150, Villahermosa, Tabasco, México.

⁵ El Colegio de la Frontera Sur, Av. Rancho Polígono 2-A, Ciudad Industrial, CP. 24500, Lerma Campeche, Campeche, México.

⁶Instituto de Geografía, UNAM, Investigación Científica, Coyoacán, CP. 04510, Ciudad de México, D.F.

* Email: joel_zavala@colpos.mx

Resumen

El incremento del nivel del mar puede afectar el 50 % de la población mundial que habita las costas, incluyendo superficies amplias de los estados de Tabasco y Campeche, México. El objetivo del estudio fue identificar la vulnerabilidad de la costa de Tabasco y Campeche a la inundación ante el ascenso del nivel del mar, con base en indicadores geomorfológicos. Con un enfoque geopedológico se zonificaron los paisajes geomorfológicos y relieves, y se utilizaron como indicadores de vulnerabilidad en una franja costera con anchura media de 20 km, y se clasificaron de muy baja a muy extrema vulnerabilidad. Las variables medidas fueron forma del relieve, altura, tipo de roca, proceso geomorfológico y distancia al mar. Se encontraron ocho paisajes geomorfológicos en una superficie de 22322.3 km², el 67 % del área corresponde a planicies formadas por procesos de acumulación de sedimentos recientes no consolidados, y la superficie restante tiene paisajes de terrazas y lomeríos donde prevalecen procesos denudativos y de kársificación. Los paisajes geomorfológicos planicie costera, planicie baja de inundación lagunar y planicie palustre contienen los relieves con vulnerabilidad muy extrema y muy alta ante el ascenso del nivel del mar asociado al cambio climático, sobresalen por su mayor exposición los relieves de cordones de playa, llanura fluvio-marina, depresión de turba, petenes con turba, llanura salina, delta de marea, dunas costeras y depresión de resurgencias, que cubren el 48 % de la costa. La zona más vulnerable incluye varias ciudades portuarias que involucran 437836 habitantes, así como las reservas ecológicas Laguna de Términos, Los Petenes y Pantanos de Centla.

Palabras clave: Costa, incremento del nivel del mar, vulnerabilidad y geomorfología costera.

Abstract

The rise in sea level may affect 50 % of the world population that lives on the seashores, including vast areas of the states of Tabasco and Campeche, Mexico. The objective of the study was to identify the vulnerability of the coast of Tabasco and Campeche to flooding before the rise of sea level, based on geomorphologic indicators. With a geopedological approach geomorphological landscapes and reliefs were differentiated, and used like indicators of vulnerability on a coastal strip with a average width of 20 km, the indicators were classified from very low to very extreme vulnerability. Variables measured were a form of relief, height, type of rock, geomorphologic process, and distance from the shore. Eight geomorphologic landscapes were found in a surface of 22322.3 km², plains constitute 67 % of the area and were created through a process of accumulation of recent unconsolidated sediments, and the remaining area has landscapes of terraces and sets of hills where denudation and karstification processes prevail. The geomorphologic landscapes coastal plains, low plains of lagoon flooding and marsh plains hold the reliefs with very extreme and very high vulnerability before the consent sea levels associated with climate change, stand out for their greater exposure the reliefs of beach ridges, fluvial-marine plains, depression peats, petenes with peat, salt plains, delta tide, coastal dunes and slump of resurgences that cover 48 % of the coast. The most vulnerable zone includes various coastal cities that house 437836 habitants, as well as the ecological reserves Laguna de Terminos, Los Petenes and Pantanos de Centla.

Key words: Coast, sea level rise, vulnerability and coastal geomorphology.

I. Introducción

El aumento del nivel del mar es cada vez mayor y pone en peligro a regiones tanto desarrolladas como en vías de desarrollo (Zhang *et al.*, 2004; Nicholls, 2007; Harvey y Nicholls, 2008; Ellison, 2015). Las zonas costeras destacan entre las más vulnerables a la erosión e inundaciones (Bernatchez *et al.*, 2011; Brammer, 2014), por su topografía baja (IPCC, 2012) y mayor densidad de población (Islam *et al.*, 2015), en comparación con el interior de los continentes (Andrade *et al.*, 2004; Marcominii y López, 2010).

La costa es una zona amplia que abarca relieves de litoral, acantilados, terrazas marinas y planicies costeras, están en constante transformación por la acción de las olas, corrientes litorales, mareas, movimientos tectónicos, oscilaciones del nivel del mar, erosión, acumulación fluvial y la actividad humana (Kokot y Chomnalez, 2012; Torresan *et al.*, 2012). Los litorales se pueden dividir en rocosos y no rocosos, erosivos y acumulativos, de acuerdo a la dinámica de los procesos exógenos, tectónicos y el tipo de roca (Ortiz-Pérez *et al.*, 2011). En las costas de México ha aumentado la frecuencia e intensidad de fenómenos climáticos y meteorológicos, provocando, erosión litoral, transformación de ecosistemas, aumento en el nivel promedio del mar e intrusión de agua salina (Magaña *et al.*, 2011). Con frecuencia han sido ocupadas por sus paisajes atractivos (Liquete *et al.*, 2013; Pikelj y Juracic, 2013), resultando entre las más perturbadas del planeta (Islam *et al.*, 2015). Aunque se han implementado algunas infraestructuras para prevenir la erosión, con efectos positivos y negativos (Olivo-Garrido *et al.*, 2012), es recomendable adoptar una mezcla de acciones de adaptación y políticas de mitigación en zonas costeras (Nicholls, 2004), ya que sus características varían en cada país (Farhan y Lim,

2011; Addo, 2013), igual que las variaciones del nivel del mar, como ocurre en el Golfo de México (Zavala-Hidalgo *et al.*, 2011).

El conocimiento de la geomorfología costera es fundamental para cuantificar la vulnerabilidad (Thieler y Hammar, 1999; Islam *et al.*, 2015), establecer en forma precisa su evolución ante la elevación del nivel del mar y plantear alternativas de protección (ONU y CEPAL, 2012; Torresan *et al.*, 2012). La geomorfología proporciona información valiosa para la toma de decisiones en la evaluación de ordenamientos territoriales, protección, infraestructura costera y políticas públicas (Farhan y Lim, 2011; Pikelj y Juracic, 2013), buscando alternativas de protección (ONU y CEPAL, 2012; Torresan *et al.*, 2012) para minimizar los escenarios de vulnerabilidad (IPCC, 2012).

Los paisajes geomorfológicos costeros son la base fundamental para cuantificar la vulnerabilidad de los ambientes (Torresan *et al.*, 2012; Addo, 2013), utilizando indicadores como la erosión, facilitando la cuantificación de acciones de impactos y estrategias implementadas para reducirla y mitigarla (Palacio-Aponte, 2010). Ayudan a visualizar cambios e identificar aspectos que requieren mayor atención (Buch y Turcios, 2003), focalizar las zonas con muy baja a muy alta vulnerabilidad (Thieler y Hammar, 1999; Ojeda *et al.*, 2009; Marcominii y López, 2010), y brindar atención a sitios que resulten como focos rojos y prevenir posibles impactos. El tipo de relieve es uno de los indicadores geomorfológicos que contribuye a estructurar el nivel de vulnerabilidad (Buch y Turcios, 2003) y es de utilidad como antecedente para la elaboración de instrumentos de regulación del territorio (Pikelj y Juracic, 2013). En Europa los estudios de vulnerabilidad costera son usados para coadyuvar a la planificación espacial terrestre y marina (Liquete *et al.*, 2013).

En este estudio, se zonificaron las geformas aplicando el enfoque geopedológico (Zinck, 2012), y se analizan variables geomorfológicas como indicadores para conocer la vulnerabilidad de la zona costera de Tabasco y Campeche ante el cambio climático. El enfoque geopedológico es un sistema de clasificación jerárquico fácilmente reconocible, que auxilia en la delimitación de unidades en una regionalización natural del terreno, en la cual los aspectos morfológico y edáfico tienen relevancia significativa. Los niveles de geformas aplicables a estudios regionales y locales son: paisaje geomorfológico, relieve/modelado y litología/facies. El paisaje geomorfológico consiste en una gran porción del terreno caracterizada por una repetición de tipos de relieve/modelado similares (planicie, valle, lomerío); las unidades se presentan a escala 1:250000. El relieve/modelado es un tipo de relieve originado por una combinación de topografía y estructura geológica, y por las condiciones morfoclimáticas (mesa, loma, depresión, llanura de inundación, delta, polje); aplica a estudios a escala 1:50000. La litología/facies se refiere a la naturaleza petrográfica de la roca dura (caliza, basalto) y a las facies de las formaciones superficiales (lacustre, aluvial, costero); las unidades se presentan a escala 1:25000. El enfoque geopedológico tiene aplicación en estudios de recursos naturales, zonificación de peligros y vulnerabilidad, evaluación de tierras y ordenamiento territorial (Bocco *et al.*, 1999; Bocco *et al.*, 2010; Zinck, 2012).

2. Área de estudio

La zona costera del estado de Tabasco y Campeche se localiza entre los 17°15' y 20° 51' de latitud Norte, y los 89° 06' y 94° 17' de longitud Oeste, cubriendo una superficie de 22322.3 km² en la costa sur del Golfo de México (Figura 1). Esta porción costera se reporta como Litoral Sur-

Oriental (Tabasco hasta Laguna de Términos en Campeche), Litoral Occidental y Norte de la Península de Yucatán (de Isla Aguada en Campeche hasta Yucatán) (De la Lanza *et al.*, 2013).

La delimitación de la zona de estudio consideró dos criterios: el primero fue una franja de 20 km de la zona costera a partir del litoral, y el segundo integró las planicies palustres con anchura mayor a 20 km, más una franja interior de 5 km (Figura 1).

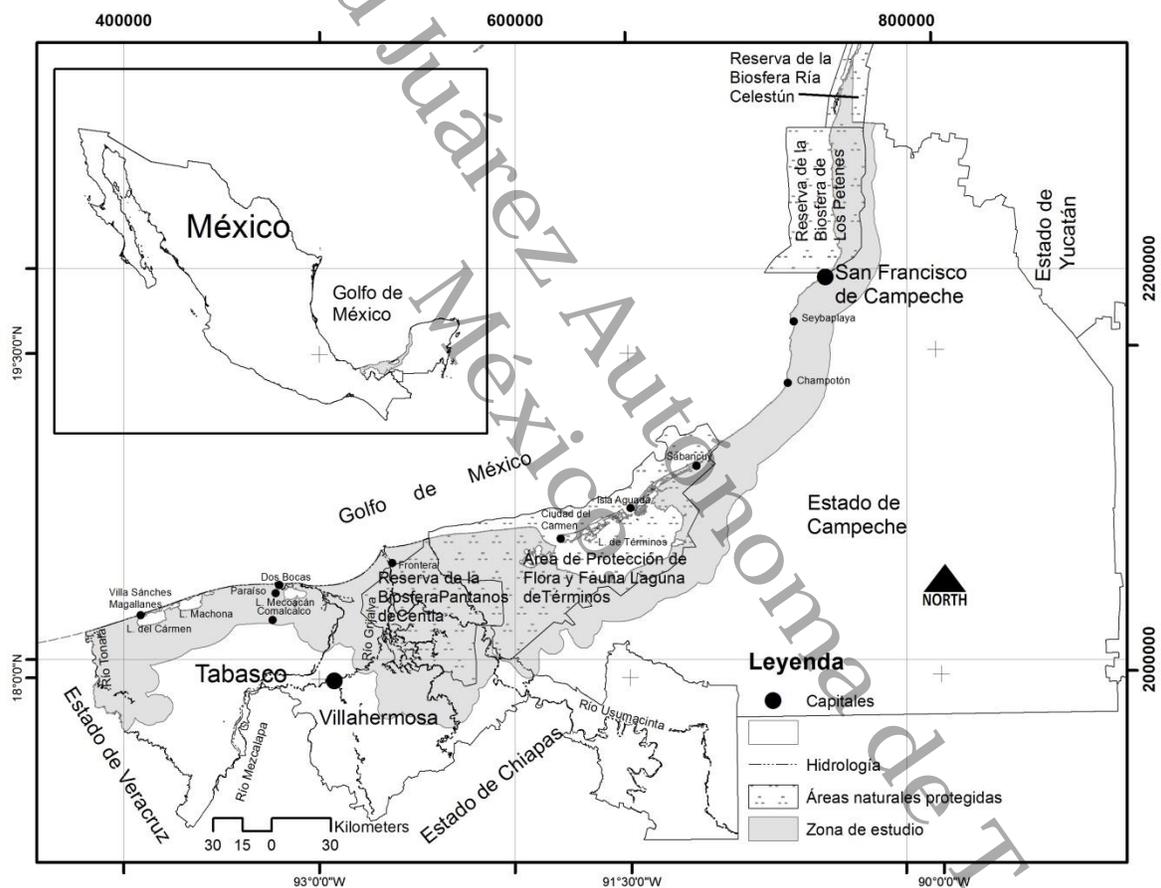


Figura 1. Localización del área de estudio en los estados de Tabasco y Campeche, México.

3. Métodos y materiales estudiados

3.1 Selección de indicadores geomorfológicos de la vulnerabilidad costera

Se revisó literatura para seleccionar los indicadores de vulnerabilidad costera con base en el relieve y se adaptaron las clasificaciones propuestas por Thieler y Hammar (1999) y Ojeda *et al.* (2009), con modificaciones propias acorde a las características específicas de la costa de Tabasco y Campeche (Tabla 1).

Tabla 1. Clases de vulnerabilidad a la inundación ante el ascenso del nivel del mar asociada a tipos de relieve/modelado costero con base en Thieler y Hammar (1999) y Ojeda *et al.* (2009), modificadas en el presente estudio.

Clase	Valor	Indicador geomorfológico
Muy bajo	1	Relieve modelado positivo de terrazas onduladas y lomeríos, topografía elevada (2 a 95 msnm), pendiente suave a fuerte (2-40 %), roca consolidada a moderadamente consolidada, expuesta a procesos exógenos climáticos, contiguo o alejado de la línea de costa.
Bajo	2	Relieve modelado de planicies y terrazas ligeramente onduladas, topografía elevada (2 a 30 msnm), pendiente suave (1-6 %), roca consolidada a moderadamente consolidada, expuesta a procesos exógenos climáticos, alejado de la línea de costa.
Medio	3	Relieve modelado en planicies, terrazas y valles acumulativos, con topografía baja a intermedia (2 a 15 msnm), pendiente plana (1-3 %), roca no consolidada, procesos acumulativos de sedimentos aluviales y deluviales, alejado de la línea de costa.
Alto	4	Relieve modelado en planicies, depresiones y formas cóncavas, con topografía baja (1 a 7 msnm) y pendiente plana (1-2 %), sedimentos no consolidados, procesos acumulativos de sedimentos aluviales y palustres, no contiguo a la línea de costa.
Muy alto	5	Relieve modelado en planicies y depresiones, con topografía baja (1 a 7 msnm) y pendiente plana (1-3 %), sedimentos no consolidados, expuesto a erosión y acumulación por procesos litorales, eólicos, palustres y fluviales, contiguo a la línea de costa y en conexión con superficies amplias hacia al interior de la zona costera.
Muy extremo	6	Relieve modelado en planicies y depresiones, con topografía muy baja (0 a 1 msnm) y pendiente plana (< 1 %), sedimentos no consolidados, expuesto a erosión y acumulación por procesos litorales, fluviales y palustres, contiguo a la línea de costa y en conexión con el mar.

3.2 Cartografía de paisajes geomorfológicos y relieve/modelado

Se diferenciaron los niveles de geformas denominados paisaje geomorfológico y relieve/modelado con base en el enfoque geopedológico (Zinck, 2012); en la unidad relieve/modelado se conjuntó información de litología/facies como lo proponen Bocco *et al.* (1999). Los linderos de paisajes geomorfológicos escala 1:250000 se basaron en la cartografía generada por Ortiz-Pérez *et al.* (2005), Palacio-Aponte *et al.* (2005), Jiménez (2014) y Bautista *et al.* (2015), y los de relieve/modelado escala 1:50000 se mejoraron a partir de levantamientos geomorfológicos y geopedológicos en la región (Domínguez *et al.*, 2011; Palma-López *et al.*, 2012; Zavala *et al.*, 2012; Jiménez, 2014). La cartografía geomorfológica se elaboró mediante la integración de las bases utilizando los sistemas de información geográfica ARC GIS y QGIS.

La caracterización de los paisajes y relieves se basó en información morfométrica sobre: a) forma y procesos geomorfológicos, sintetizados de estudios geomorfológicos y geopedológicos en la región (Ortiz-Pérez *et al.*, 2005; Palacio-Aponte *et al.*, 2005; Hernández-Santana *et al.*, 2008; Domínguez *et al.*, 2011; Ortiz-Pérez *et al.*, 2011; Palma-López *et al.*, 2012; Zavala *et al.*, 2012; Jiménez, 2014; Bautista *et al.*, 2015; Zavala-Cruz *et al.*, 2016); b) altura sobre el nivel del mar (asnm) y pendiente (%), se obtuvieron de mapas topográficos de INEGI, fuentes bibliográficas y verificación de campo con GPS y brújula Brunton; c) tipo de roca y edad, se recopiló de cartografía geológico-minera Esc. 1:250000 (Aguilera *et al.*, 2004; Cardoso *et al.*, 2005; Miranda *et al.*, 2005) y fuentes bibliográficas (Ortiz-Pérez *et al.*, 2005; Bautista *et al.*, 2015).

3.3 Análisis de la vulnerabilidad costera

En esta etapa se aplicaron los criterios indicadores de vulnerabilidad geomorfológica (Tabla 1) para conocer la vulnerabilidad de la zona costera de Tabasco y Campeche ante la inundación por

el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático, considerando un incremento del nivel del mar que puede variar de 59 cm (IPCC, 2007) a más de un metro para el año 2100, asociado a un deshielo glaciar más rápido por un mayor incremento de temperatura (Rahmstorf, 2012). El análisis de la vulnerabilidad geomorfológica se basó en los mapas de paisajes geomorfológicos, relieve/modelado y en la información morfométrica generada para la zona de estudio. El mapa de vulnerabilidad costera se diseñó mediante interpolación y análisis geográfico con un software especializado, utilizando versiones actualizadas de información geográfica de ARC GIS, ERDAS IMAGINE y QGIS.

4. Resultados

4.1 Paisajes geomorfológicos y relieve/modelado

La costa de Tabasco y Campeche tiene ocho paisajes geomorfológicos (Figura 2), destacan por su extensión las planicies palustre (26 %) y fluviodeltaica (19 %). El 80 % de la superficie de los paisajes está formada por planicies sobre sedimentos no consolidados, acumulados por procesos fluviales, palustres, eólicos y litorales, de edad Cuaternario Holoceno; su altura varía de 0 a 8 msnm. El 20 % de la región corresponde a paisajes de terrazas y lomeríos, modelados por procesos de erosión, denudación y karsificación, con basamento de rocas sedimentarias detríticas, calizas y margas del Terciario Eoceno al Cuaternario Pleistoceno; la altura varía de 1 a 95 msnm.

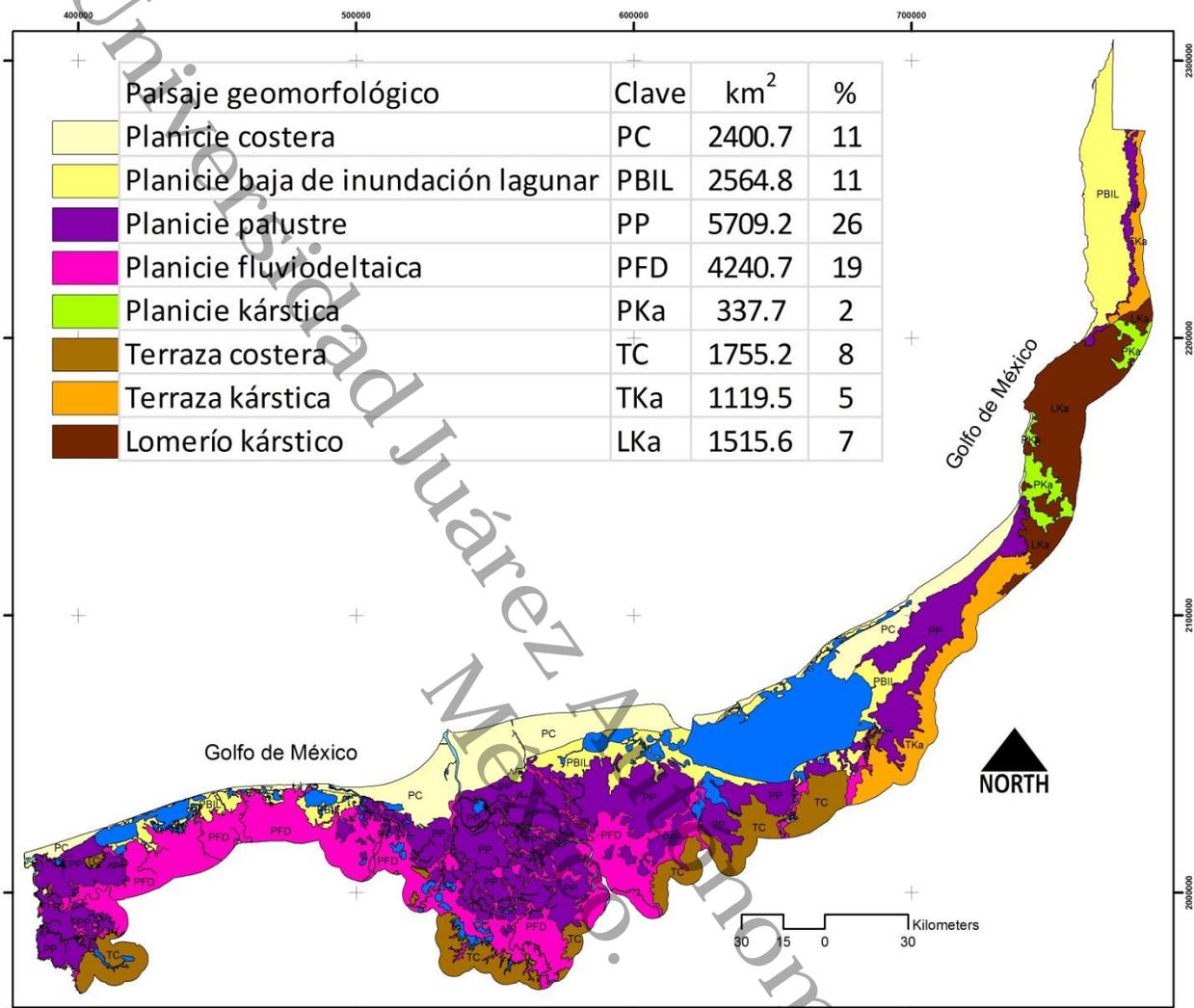


Figura 2. Paisajes geomorfológicos de la costa de Tabasco y Campeche, México.

En la planicie costera prevalecen materiales arenosos acumulados por corrientes litorales, tiene alturas menores a 7 msnm y pendiente inferior a 3 %. Su mayor anchura (7 a 30 km) se ubica a ambos lados de la desembocadura del Río Usumacinta, en Tabasco y Campeche, indicando la mayor acumulación de sedimentos que favorece el desarrollo de la costa hacia el mar. Una planicie costera de anchura media (5 a 14 km) se sitúa entre la laguna de Términos y Champotón,

Campeche, y en la desembocadura del Río Tonalá. En ambas costas prevalecen relieves de cordones de playa arenosos paralelos a la costa, altos bien drenados y bajos sujetos a inundación, estos pueden presentar capas de turba superficial (Figuras 2 y 3); indican procesos acumulativos, y solo se truncan en la desembocadura del río San Pedro y San Pablo debido al retroceso local de la costa. La planicie costera de menor anchura (0.1 a 4 km) se sitúa entre las desembocaduras de los ríos González y Tonalá, en Tabasco, donde se alternan cordones de playa y dunas costeras (Figuras 2 y 3) paralelos a la costa, indicando procesos de acumulación y erosión; en tramos discontinuos, en la época de nortes, tormentas y ciclones, se forman bermas de tormenta por erosión litoral, siendo más evidentes en un tramo de 50 km entre las bocas de Tupilco y Sánchez Magallanes, donde la costa tiene menos de 300 m de ancho (Figuras 2 y 3). Esta planicie se interrumpe al norte de la ciudad de Campeche. La ausencia o escasa anchura de la planicie costera, y las formas erosivas, indican baja intensidad de acumulación de sedimentos marinos.

La planicie baja de inundación lagunar es una franja cóncava situada entre los paisajes de planicie costera, fluviodeltaica y palustre, alrededor de lagunas costeras conectadas con el Golfo de México a través de bocas o esteros, por su escasa altura y pendiente (menor a 2 msnm y 1 %) funciona como nivel de base de corrientes fluviales y de marea, y permanece inundada con agua salobre la mayor parte del año. El sustrato es de sedimentos palustres, marinos y fluviales de textura fina a media en llanuras fluvio-marinas, arenosa en cordones de playa inundados, con capas de turba en depresiones del suroeste y noreste de la laguna de Términos en Campeche, y turba sobre sedimentos calcáreos en llanuras salinas y petenes al norte de Campeche (Figuras 2 y 3).

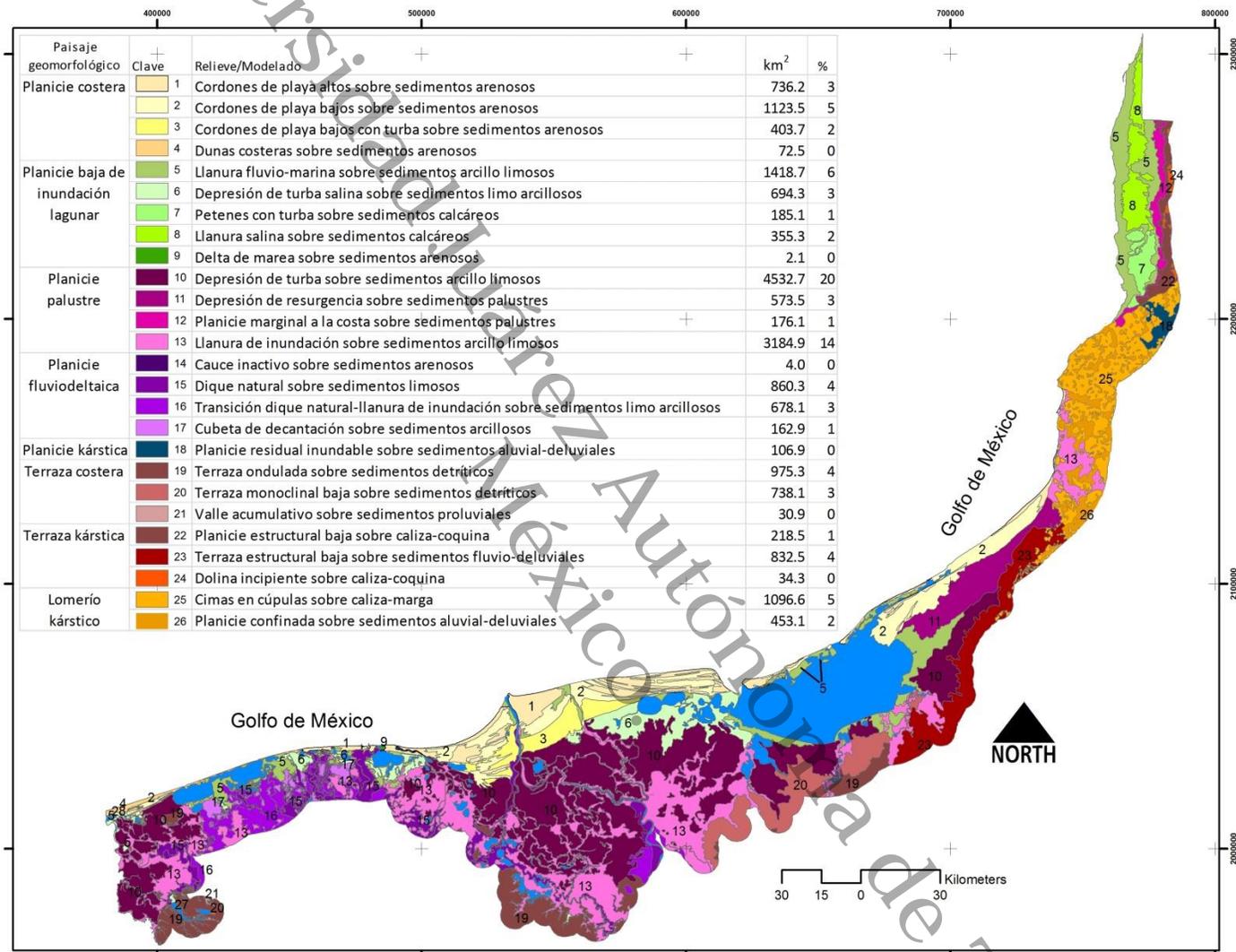


Figura 3. Relieve/modelado de la costa de Tabasco y Campeche, México.

La planicie palustre consiste de amplias depresiones inundables, situadas entre planicies de cordones de playa, de inundación lagunar, fluviodeltaica y terrazas. Capas de turba, con promedio de 1 m de espesor, yacen sobre sedimentos aluviales; su altura varía de 1 a 3 msnm y la pendiente es menor a 1 %; la ubicación en zonas topográficas muy bajas favorece las inundaciones con agua dulce durante 10 meses. Al noreste de la Laguna de Términos, los sedimentos calcáreos acumulados por resurgencias de agua subyacen a capas de turba. La mayor superficie se ubica en la reserva Pantanos de Centla, en el delta del Río Usumacinta, caracterizada por numerosos ríos con llanuras de inundación de escasa anchura (Figuras 2 y 3).

La planicie fluviodeltaica es una superficie plana a cóncava, ubicada al sur de las planicies de inundación lagunar y palustre, en los deltas de los ríos Mezcalapa y Usumacinta; prevalecen sedimentos aluviales, su altura y pendiente varían de 1 a 15 msnm y menor a 2 %. Los cauces de los ríos se sobreelevan en el plano fluvial, y en sentido perpendicular a estos se desarrollan diques naturales bien drenados, con sedimentos limosos a arenosos depositados durante las inundaciones extraordinarias; en zonas posteriores a los diques, se ubican amplias llanuras de inundación sobre sedimentos arcillo limosos acumulados por avenidas de aguas tranquilas; las cubetas de decantación y lagunas de agua dulce ocupan depresiones situadas 3 a 6 m abajo de los diques naturales (Figuras 2 y 3), las inundaciones prevalecen casi todo el año.

La planicie kárstica es una superficie plana, con sedimentos aluviales y deluviales arcillosos del Holoceno, se sitúa entre 2 y 10 msnm, en pendientes menores a 2 %, rodeadas de lomeríos kársticos, en la planicie de inundación del río Champotón y el Valle de Edzná, en el estado de Campeche (Figuras 2 y 3).

Terrazas costeras corresponden a superficies ligeramente disectadas, con sedimentos detríticos de areniscas, conglomerado, lutitas, arena y limo, su altura y pendiente varían de 2 a 30 msnm y de 1 a 10 %. Prevalecen geoformas de terrazas ligeramente onduladas modeladas por denudación y erosión, planicies monoclinales inactivas y valles erosivo-acumulativos (Figuras 2 y 3).

Terraza kárstica es una superficie ligeramente ondulada asociada mayormente a terrazas estructurales bajas (Figuras 2 y 3), con sedimentos aluvial-deluviales, derivados de lomeríos kársticos; algunas planicies estructurales sobre caliza-coquina se ubican al noreste de Campeche, junto a superficies de dolinas incipientes. La altura y pendiente varía de 2 a 30 msnm y 1 a 6 %.

Lomerío kárstico consiste de lomas en cúpulas sobre caliza-marga, originadas por procesos tectónicos, denudativos y karsificación; entre las lomas se localizan varias planicies confinadas asociadas a dolinas y poljes (Figuras 2 y 3), tienen fondo plano con sedimentos eluvial-deluvial. La altura y pendiente varían de 1 a 95 msnm y 2 a 40 %; se localiza al sur de la ciudad de Campeche.

4.2 Vulnerabilidad geomorfológica de la costa de Tabasco y Campeche ante el cambio climático

La zona costera de Tabasco y Campeche presenta muy extrema vulnerabilidad geomorfológica por inundación ante el posible ascenso del nivel del mar debido al cambio climático (13 %), sobresaliendo el estado de Campeche. Coincide con relieves de los paisajes planicie baja de inundación lagunar y costera, situados a menos de 1 msnm, en conexión con el Golfo de México, tienen sedimentos no consolidados y amplias superficies con capas de turba suprayacentes. El 32 % de la zona costera presenta muy alta vulnerabilidad ante el cambio climático, agrupa extensas

depressiones de turba del paisaje planicie palustre, contiguas a la planicie baja de inundación lagunar, y la mayoría de las geoformas de la planicie costera, ubicadas en posición frontal a los procesos litorales; prevalecen superficies con altura menor a 3 msnm, sobre sedimentos no consolidados. La zona de alta vulnerabilidad geomorfológica (16 %) concuerda con llanuras de inundación y cubetas de decantación sobre sedimentos arcillo limosos de las planicies palustre y fluviodeltaica, adyacentes a paisajes de planicie costera e inundación lagunar; la altura es escasa (1 a 7 msnm) y se ubica relativamente alejada de la línea de costa. La superficie de media vulnerabilidad (13 %) corresponde a diques naturales y de transición diques naturales-llanura de inundación del paisaje planicie fluviodeltaica, y a llanuras aluviales, deluviales y proluviales de los paisajes planicie kárstica, terrazas y lomerío kárstico; la altura es mayor a 2 msnm y no está expuesta directamente a procesos litorales. La zona de baja vulnerabilidad (5 %) se sitúa en el paisaje de planicie kárstica, sobre rocas calcáreas consolidadas, en alturas mayores a 2 msnm, alejada de la línea de costa. El área de muy baja vulnerabilidad (9 %), concuerda con terrazas onduladas y lomeríos con cimas en cúpulas sobre sedimentos moderadamente consolidados y consolidados, en los paisajes terraza costera y lomerío kárstico; casi el total de la superficie supera 2 msnm y está alejada de la línea de costa (Tabla 2 y Figura 4).

Tabla 2. Relieve/modelado indicador de vulnerabilidad geomorfológica en la zona costera de Tabasco y Campeche, México.

Clase de vulnerabilidad	Indicadores geomorfológicos de vulnerabilidad costera							Superficie	
	Paisaje geomorfológico	Relieve/modelado	Altura (msnm)	Pendiente (%)	Tipo de roca	Proceso geomorfológico	Distancia al mar (km)	km ²	%
1	TC, LK	Terraza ondulada, cimas en cúpulas	2-95	2-40	Sedimentos detríticos moderadamente consolidados del Terciario Mioceno al Cuaternario Pleistoceno, y calizas y margas consolidadas del Terciario Eoceno	Denudación, erosión, karsificación	0-92	2072.0	9
2	TKa	Planicie estructural baja, terraza estructural baja, dolina incipiente	2-30	1-6	Caliza, marga y coquina consolidadas del Terciario Eoceno-Mioceno-Plioceno	Karsificación	8-55	1085.4	5
3	PFD, PKa, TC, LK	Dique natural, transición de dique natural-llanura de inundación, planicie residual inundable, terraza monoclinial baja, valle acumulativo, planicie confinada	2-15	1-3	Sedimentos aluviales y deluviales no consolidados del Cuaternario Holoceno	Acumulación	2-45	2867.4	13
4	PP, PFD	Planicie marginal a la costa, llanura de inundación, cauce inactivo, cubeta de decantación	1-7	1-2	Sedimentos aluviales y palustres no consolidados del Cuaternario Holoceno	Acumulación	2-90	3628.8	16
5	PC, PP	Cordones de playa altos y bajos, dunas costeras, depresión de turba, depresión de resurgencias	1-7	1-3	Sedimentos litorales, eólicos, palustres y aluviales no consolidados del Cuaternario	Acumulación	0-70	7038.4	32

					Holoceno				
6	PC, PBIL	Cordones de playa bajos con turba, llanura fluvio-marina, depresión de turba salina, petenes con turba, llanura salina, delta de marea	0-1	<1	Sedimentos litorales, eólicos, palustres y aluviales no consolidados del Cuaternario Holoceno	Acumulación. Erosión en costas lejanas a bocas fluviales	0-35	2958.3	13
		Laguna						2521.4	11
		Río						157.4	1
		Total						22322.3	100

Simbología: PC (Planicie costera), PBIL (Planicie baja de inundación lagunar), PP (Planicie palustre), PFD (Planicie fluviodeltaica), PKa (Planicie kárstica), TC (Terraza costera), TKa (Terraza kárstica) y LK (Lomerío kárstico)

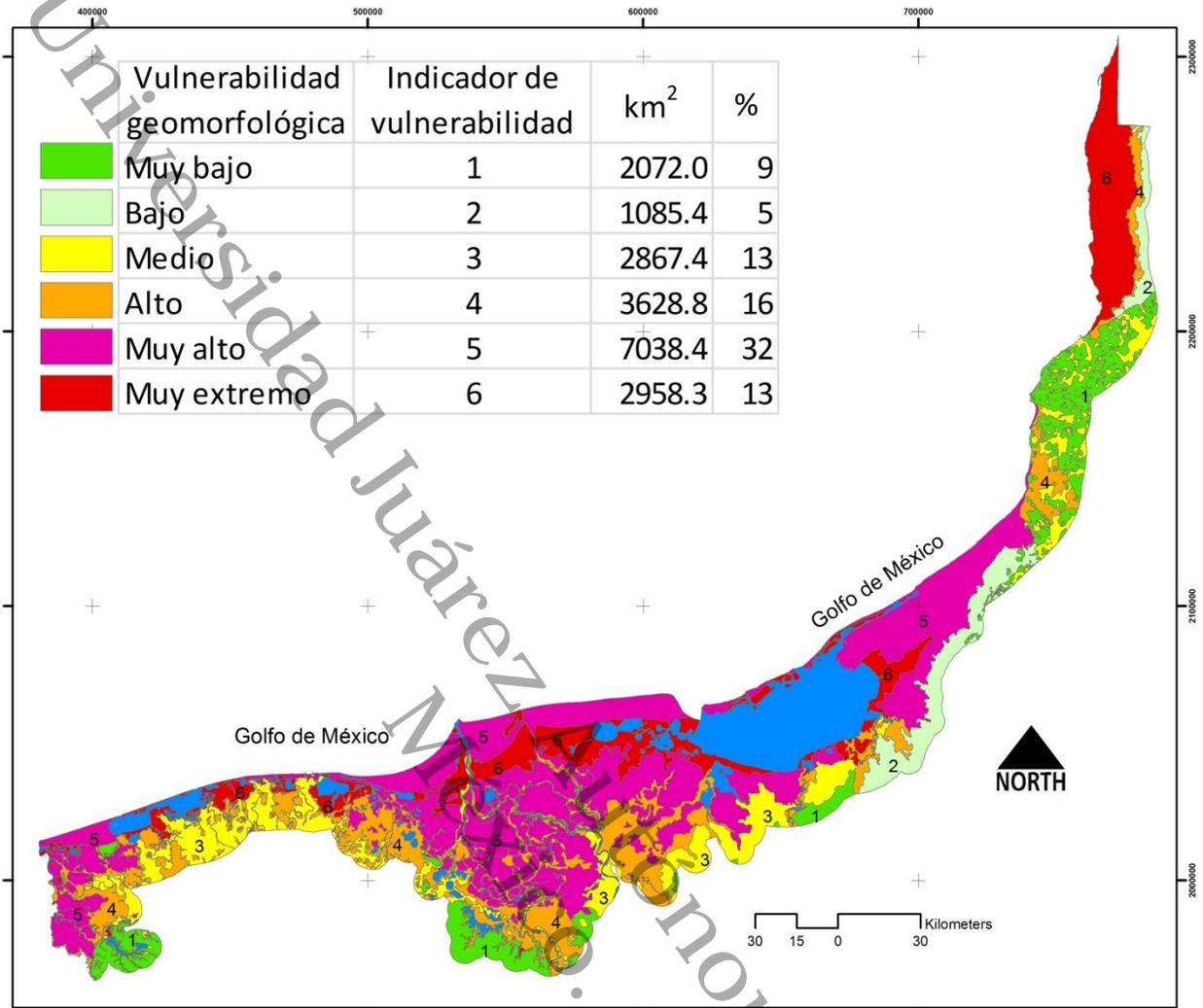


Figura 4. Vulnerabilidad geomorfológica de la costa de Tabasco y Campeche, México.

5. Discusión

5.1 Paisajes geomorfológicos en zonas costeras de Tabasco y Campeche, México

El 67 % de la superficie de la zona costera de Tabasco y Campeche tiene paisajes geomorfológicos integrados por relieves planos a cóncavos con escasa altura y pendiente, donde prevalecen sedimentos no consolidados fluviales, litorales, palustres y lagunares acumulados en el Cuaternario Holoceno (Figura 3); estas geformas concuerdan con las

reportadas en zonas costeras de topografía plana (Ortiz-Pérez *et al.*, 2005; Geissert-Kientz y Enríquez-Fernández, 2011; IPCC, 2012; Addo, 2013; Bautista *et al.*, 2015; Zavala-Cruz *et al.*, 2016).

El paisaje de planicie costera funciona como barrera natural de contención (Olivo-Garrido *et al.*, 2012; Liquefe *et al.*, 2013; Pikelj y Juracic, 2013) y protección de los paisajes geomorfológicos interiores contra la intrusión salina, especialmente las planicies baja de inundación lagunar y palustre, como se ha verificado en otras zonas costeras (Andréfouët *et al.*, 2015; Islam *et al.*, 2015). Sobresale la dinámica de los procesos geomorfológicos de la planicie costera, por un lado la amplitud de los bordos de playa indican progradación en el delta del Río Grijalva, en la desembocadura del Río Usumacinta (Figura 3), coincidiendo con tasas positivas de crecimiento de la costa registradas por Ortiz-Pérez *et al.* (2011); y por el otro, la reducida anchura de los bordos de playa y dunas con recurrentes tramos en proceso de erosión ubicados en zonas alejadas de las desembocaduras de los ríos (Figura 3), lo que provoca pérdida de carreteras y reducción de playas, como se ha documentado en otros estudios (Ortiz-Pérez *et al.*, 2011; Torres-Rodríguez *et al.*, 2011; Kokot y Chomnalez, 2012; Sheik y Chandrasekar, 2013; Brammer, 2014). La erosión se acentúa en el puerto de Sánchez Magallanes, Tabasco, y la desembocadura del río San Pedro y San Pablo con tasas de pérdida de costa de -3 a -9 m/año (Hernández-Santana *et al.* 2008); en el puerto citado, la erosión por acción del oleaje ha destruido viviendas, similar a lo registrado en otras costas erosivas (Bernatchez *et al.*, 2011; Kokot y Chomnalez, 2012; Brammer, 2014; Islam *et al.*, 2015). El retroceso de sectores de la costa en los deltas de Tabasco y Campeche se explica por la disminución de la actividad fluvial (Ortiz-Pérez y De la Lanza-Espino, 2006; Hernández-Santana *et al.* 2008), y además por hundimientos que provocan un efecto de

elevación del mar e incremento en las inundaciones, erosión de la línea de costa y salinización (Ortiz-Pérez y De la Lanza-Espino, 2006), similar a lo reportado para otros litorales (Nicholls y Cazenave, 2010; Brammer, 2014; Ellison, 2015; Islam *et al.*, 2015).

El paisaje geomorfológico de planicie baja de inundación lagunar (Figura 3), está expuesto a impactos severos por aumento del nivel del mar (Flores-Verdugo *et al.*, 2011), seguido de las depresiones de turba de la planicie palustre, así como las cubetas de decantación y las llanuras de inundación de la planicie fluviodeltaica, contiguas a las planicies baja de inundación lagunar y palustre (Figura 3), cuya forma cóncava a plana, topografía muy baja y posición cercana a la línea de costa, pueden favorecer la intrusión e inundación con agua marina; los ecosistemas inundables de estas geoformas estarán expuestos a la desaparición por elevación del nivel del mar, como se ha pronosticado para zonas costeras de África (Addo, 2013; Ellison, 2015), el norte del Adriático, Italia (Torresan *et al.*, 2012), y otros humedales similares (Olivo-Garrido *et al.*, 2012). Varios relieves pueden funcionar como vía de ingreso de agua marina hacia los paisajes mencionados, por ejemplo los cauces activos e inactivos que conectan las lagunas costeras con el mar y con las planicies palustres y las cubetas de decantación fluviales (Torresan *et al.*, 2012; Andréfouët *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015).

En los paisajes geomorfológicos interiores, los procesos de intemperismo y karsificación (Tabla 2 y Figura 2) coinciden con los reportados por Ortiz-Pérez *et al.* (2005), Geissert-Kientz y Enríquez-Fernández (2011), Pikelj y Juracic (2013) y Zavala-Cruz *et al.* (2016). Por tener relieves de topografía elevada (mayor a 3 msnm), como las terrazas onduladas y lomeríos con cimas en cúpulas (Tabla 2, Figura 3), no serán impactados por elevación del nivel del mar (Ojeda *et al.*, 2009; Rahmstorf, 2012).

5.2 Indicadores de vulnerabilidad geomorfológica en zonas costeras de Tabasco y Campeche, México

La cartografía de los paisajes geomorfológicos a nivel de reconocimiento (escala 1:250000) y de los relieve modelados a nivel semidetallado (escala 1:50000), basados en el enfoque geopedológico, permitió generar indicadores geomorfológicos para evaluar la vulnerabilidad de la costa de Tabasco y Campeche a la inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático. De acuerdo a incrementos del nivel del mar del orden de 1.7 ± 0.3 mm/año (IPCC, 2007), los paisajes geomorfológicos más vulnerables ante el cambio climático serían las planicies costera, baja de inundación lagunar y palustre, y dentro de estas los relieves indicadores son cordones de playa, llanura fluvio-marina, depresión de turba, petenes con turba, llanura salina, delta de marea, dunas costeras y depresión de resurgencias, sumando una superficie de muy alta a muy extrema vulnerabilidad de 9996.7 km², que representa el 45 % de la zona de estudio, donde el agua podría entrar de 42 a 68 km tierra adentro (Tabla 2 y Figura 4); esta área es 0.8 a 1.7 veces mayor a la reportada por Flores-Verdugo *et al.* (2011) y Caetano *et al.* (2011) para Tabasco y Campeche. En general, concuerda con la zona costera altamente susceptible a ser inundada por los fenómenos extremos que se preven como consecuencia del cambio climático global, en particular la llanura deltaica del sistema Grijalva-Usumacinta en Tabasco, así como la mayor parte de la zona costera de Campeche (Caetano *et al.*, 2011; Roseete-Vergés *et al.*, 2013), en razón de su topografía plana donde cualquier incremento en el nivel del mar afectaría amplias superficies (Addo, 2013). Zonas costeras con geoformas similares han sido reportadas como vulnerables a inundación por elevación del nivel del mar ante el cambio climático (Ortiz-Pérez *et al.*, 2010; Zavala-Hidalgo *et al.*,

2011; Addo, 2013; French y Burningham, 2013; Andréfouët *et al.*, 2015; Islam *et al.*, 2015).

Entre los relieve/modelados más vulnerables ante la inundación por elevación del nivel del mar, sobresalen las depresiones de turba y los petenes con turba, que cubren el 24% de la zona costera de Tabasco y Campeche, al formar parte de los paisajes de planicie baja de inundación lagunar y planicie palustre, situadas en zonas circundantes a las lagunas costeras y en conexión o próximas al Golfo de México; típicamente presentan características como forma cóncava, altura cercana al nivel del mar, pendiente menor a 1% y suelos Histosoles con una capa orgánica suave de un metro de espesor sobre sedimentos fluvio marinos, estas condiciones las hacen susceptibles a procesos de salinización y erosión en respuesta a la elevación del nivel del mar (Zavala *et al.*, 2012; Jiménez, 2014; Zavala-Cruz *et al.*, 2016).

La vulnerabilidad geomorfológica muy alta a muy extrema, coincide con la zona más extensa de humedales de agua dulce de México, donde sobresalen los de tipo costero, ribereño, lacustre y palustre o pantano de agua dulce (Barba-Macías *et al.*, 2006). Estos humedales representan valores ecológicos que contienen las áreas naturales protegidas de la Laguna de Términos, Los Petenes (Caetano *et al.*, 2011; Flores-Verdugo *et al.*, 2011) y Ría Celestún, en Campeche, y los Pantanos de Centla en Tabasco (Tabla 2 y Figura 4), ubicándose entre los ecosistemas costeros y marinos que estarían expuestos a la pérdida de biodiversidad (Andréfouët *et al.*, 2015; Ellison, 2015). Los manglares de la planicie baja de inundación lagunar (Tabla 2 y Figura 6, 4), también sobresalen por la vulnerabilidad muy extrema por incremento del nivel del mar (Ellison, 2015; Islam *et al.*, 2015; Li *et al.*, 2015);

actualmente, se reportan como los ecosistemas más impactados de Tabasco y Campeche (Palacio-Aponte, 2001).

La superficie de muy alta a muy extrema vulnerabilidad por elevación del nivel del mar, incluye ciudades portuarias donde viven 437836 habitantes (INEGI, 2010), similar a lo reportado para zonas urbanas costeras de la India (Sheik y Chandrasekar, 2013). Actualmente los asentamientos humanos de San Francisco de Campeche, del Carmen, Champotón y Villahermosa, tienen amplias superficies expuestas a inundaciones con grado medio a alto (Palacio-Aponte *et al.*, 2006; Galindo-Alcántara, 2009; CGASI, 2011; CENECAM, 2013), como consecuencia del desarrollo sobre relieves asociados a las inundaciones, como las planicies fluviales, cauces inactivos, cordones de playa bajos, planicies salinas y valles acumulativos.

Otros estudios concuerdan con la situación vulnerable de la zona costera en estudio ante las inundaciones por fenómenos hidrometeorológicos actuales. La forma plana a cóncava del relieve de la cuenca baja de los ríos Grijalva y Usumacinta, tiende a acumular las precipitaciones de agua provenientes de las cuencas altas, lo que contribuye a que las costas de Tabasco y Campeche se ubiquen entre las más susceptibles a las inundaciones (Silva *et al.*, 2011). La aplicación de modelos digitales de elevación, complementados con datos de campo, evidencian algunas zonas expuestas a inundaciones severas, entre las que sobresalen: a) la planicie del Dren Victoria, Río González y Laguna Mecoacán, por incapacidad de los ríos para transitar los sobre flujos de agua hacia el mar (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2012a); b) el curso bajo del Río Tonalá, sobre todo por reducción de la capacidad de drenaje del río durante una marejada de tormenta en la boca del río (Pedrozo-Acuña *et al.*, 2012b); c) La planicie fluvial donde se asienta la ciudad de Villahermosa, por precipitación

extraordinaria con periodo de retorno de 100 años (Ramos *et al.*, 2009). En esta planicie, la inundación extraordinaria de 2007 exhibió la vulnerabilidad del estado de Tabasco al afectar el 62% de su territorio, damnificando a 1200000 habitantes y ocasionando pérdidas económicas de distinta magnitud (Ramos *et al.*, 2009; Álvarez-Gordillo y Tuñón-Pablos, 2016).

En este contexto, la posible elevación del nivel del mar asociada al cambio climático contribuirá a agravar el problema de las inundaciones en los paisajes geomorfológicos de planicie baja de inundación lagunar, planicie palustre, planicie costera y en las zonas más bajas de la planicie fluviodeltaica de la planicie costera de Tabasco y Campeche. Y los posibles impactos ambientales y sociales hacen prever la necesidad de incluir el riesgo en la ordenación ecológica territorial integral de la zona costera, para plantear acciones de adaptación que disminuyan la vulnerabilidad de la población, la infraestructura, las actividades productivas y de los ecosistemas (Roseete-Vergés *et al.*, 2013).

6. Conclusiones

La cartografía de los paisajes geomorfológicos y de los relieve/modelados, basada en el enfoque geopedológico, permitió generar información espacial con suficiente detalle de las geoformas indicadoras para evaluar la vulnerabilidad de la costa de Tabasco y Campeche a la inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático. Se zonificaron ocho paisajes geomorfológicos, de los cuales las planicies costera, baja de inundación lagunar y palustre, contienen relieves indicadores de vulnerabilidad ante el posible ascenso del nivel del mar. El 67 % de la superficie en estudio se caracteriza por presentar forma plana a cóncava, procesos de acumulación de sedimentos no consolidados, pendiente menor a 2 %, altura dominante menor a 2 msnm, colindancia con el Golfo de México y por ser la

zona receptora de agua y sedimentos terrígenos provenientes de la cuenca alta de los ríos Grijalva y Usumacinta.

Las zonas con muy extrema a muy alta vulnerabilidad geomorfológica a la inundación ante el ascenso del nivel del mar, corresponde a relieves de cordones de playa, llanura fluvio-marina, llanura salina, depresión de turba, petenes con turba, blanquizal, delta de marea, dunas costeras y depresión de resurgencias, que cubren el 45 % de la costa de Tabasco y Campeche. Varios asentamientos humanos situados en la zona de estudio tienen usos urbanos sobre o en colindancia con estos relieves y sufren inundaciones recurrentes, por lo que el ascenso del nivel del mar contribuirá a agravar el problema. Dentro de las zonas de muy alta a extrema vulnerabilidad ante el ascenso del nivel del mar sobresalen los valores ecológicos contenidos en las reservas de la biósfera Pantanos de Centla, Los Petenes y Ría Celestún, así como el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, que conforman los humedales más extensos de México.

7. Referencias Bibliográficas

Addo, K., 2013, Assessing coastal vulnerability index to climate change: the case of Accra – Ghana: *Journal of Coastal Research*, 65, 1892-1897, doi:10.2112/SI65-320.1

Aguilera, M.M.A., Zárate, L.J., Barrios, R.F., Jiménez H. A., 2004, Carta geológico minera, Frontera E15-5, 1:250000: Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano, Coordinación General de Minería y Secretaría de Economía, 1 mapa con texto.

Álvarez-Gordillo, C. del G., Tuñón-Pablos, E., 2016, Vulnerabilidad social de la población desplazada ambiental por las inundaciones de 2007 en Tabasco (México):

- Cuadernos de geografía, Revista Colombiana de Geografía, 25(1) 123-138, doi: dx.doi.org/10.15446/rcdg.v25n1.52591.
- Andrade, J.B., Lagos, L.M., Arenas, V.F., 2004, Cuantificación de procesos morfogénicos actuales como indicador de la fragilidad de unidades fisiográficas en la costa de la región de O'Higgins: Revista de Geografía Norte Grande, 31, 63-72.
- Andréfouët, S., Dutheil, C., Menkes, C.E., Bador, M., Lengaigne, M., 2015, Mass mortality events in atoll lagoons: Environmental control and increased future vulnerability: Global Change Biology, 21(1), 195-205, doi:10.1111/gcb.12699.
- Barba-Macías, E., Rangel-Mendoza, J., Ramos-Reyes, R., 2006, Clasificación de los humedales de Tabasco mediante sistemas de información geográfica: Universidad y Ciencia 22(2) 101-110.
- Bautista, F., Frausto, O., Ihl, T., Aguilar, Y., 2015, Actualización del mapa de suelos del estado de Yucatán México: Enfoque geomorfopedológico y WRB: Ecosistemas y recursos agropecuarios, 2(6), 303-315.
- Bernatchez, P., Fraser, C., Lefavre, D., Dugas, S., 2011, Integrating anthropogenic factors, geomorphological indicators and local knowledge in the analysis of coastal flooding and erosion hazards: Ocean & Coastal Management, 54, 621-632.
- Bocco, G., Mendoza, M.E., Velázquez, A., Torres A., 1999, La regionalización geomorfológica como una alternativa de regionalización ecológica en México. El caso de Michoacán de Ocampo: Investigaciones Geográficas, 40, 7-22.

- Bocco, G., Mendoza, M.E., A. Priego, A., Burgos, A., 2010, La cartografía de los sistemas naturales como base geográfica para la planeación territorial: México D.F., SEMARNAT, 71 p.
- Brammer, H., 2014, Bangladesh's dynamic coastal regions and sea-level rise: Climate Risk Management, 1, 51-62.
- Buch, M., Turcios, M., 2003, Vulnerabilidad socioambiental: aplicaciones para Guatemala, Serie de documentos técnicos número 9: Guatemala, Universidad Rafael Landívar, Facultad de Ciencias Ambientales y Agrícolas e Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente, 23 p.
<http://biblio3.url.edu.gt/IARNA/SERIETECNINCA/9.pdf>
- Caetano, E., Innocentini, V., Maga, V., Martins, S., Méndez, B., 2011, Cambio climático y el aumento del nivel del mar, en Botello, A.V., Villanueva-Fragoso, S., Gutiérrez, J., Rojas- Galaviz, J.L., (eds.), Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición): México, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche, 283-304.
- Cardoso, V.E.A., Sánchez, G.E., Rafael, F.J.A., Mata H.L. 2005, Carta geológico minera, Campeche E15-3, 1:250000: Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano, Coordinación General de Minería y Secretaría de Economía, 1 mapa con texto.

- Centro Estatal de Emergencias de Campeche (CENECAM), 2013, Plan estatal de contingencias para fenómenos hidrometeorológicos 2013: San Francisco de Campeche, México, Gobierno del Estado de Campeche, reporte técnico, 139 p.
- Consultoría Gestión Ambiental y Seguridad Ambiental (CGASI), 2011, Atlas de peligros naturales del municipio de Carmen 2011: Ciudad del Carmen, México, SEDESOL, H. Ayuntamiento de Carmen, reporte técnico, 139 p.
- De la Lanza, E.G., Ortiz-Pérez M.A., Carbajal-Pérez J.L., 2013, Diferenciación hidrogeomorfológica de los ambientes costeros del Pacífico, del Golfo de México y del Mar Caribe, Investigaciones Geográficas: Boletín del Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 81, 33–50.
- Domínguez, D.M., Zavala, C. J., Martínez-Zurimendi, P., 2011, Manejo forestal sustentable de los manglares de Tabasco: Villahermosa, Tabasco, México, Secretaría de Recursos Naturales y Protección Ambiental, Colegio de Postgraduados, 137 p.
- Ellison, J., 2015, Vulnerability assessment of mangroves to climate change and sea-level rise impacts: Wetlands Ecology and Management, 23(2), 115-137, doi:10.1007/s11273-014-9397-8
- Farhan, A.R., Lim, S., 2011, Resilience assessment on coastline changes and urban settlements: a case study in Seribu Islands, Indonesia: Ocean & Coastal Management, 54, 391-400.
- Flores-Verdugo, F.J., Casasola, P., De la Lanza-Espino, G., Agraz-Hernández, C., 2011, El manglar, otros humedales costeros y el cambio climático, en Botello, A.V., Villanueva-Fragoso, S., Gutiérrez, J., Rojas- Galaviz, J.L., (eds.), Vulnerabilidad de

- las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición): México, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche, 205-228.
- French, J.R., Burningham, H., 2013, Coasts and climate: Insights from geomorphology: *Progress in Physical Geography*, 37(4), 550-561, doi:10.1177/0309133313494962.
- Galindo-Alcántara, A., Ruiz-Acosta., S. del C., Morales-Hernández, A., Gómez-Cordero, C.M., Salcedo-Meza, M.A., Aguilar-Aguilar M., Valencia-Martínez, J., Rodríguez-Córdova, M., 2009, Atlas de riesgos del municipio Centro 2009: Villahermosa, México, Ayuntamiento Municipal de Centro y SEDESOL, reporte técnico, 109 p.
- Geissert-Kientz, D., Enríquez-Fernández E., 2011, Geomorfología, en Cruz A.A., (coord y ed.), *La biodiversidad en Veracruz: estudio de estado: México D.F, México, Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO), Gobierno del Estado de Veracruz, Universidad Veracruzana, Instituto de Ecología, A.C., Vol. 1, 53-98 y Apéndice I.1.*
- Harvey, N., Nicholls, R., 2008, Global sea-level rise and coastal vulnerability: *Sustainable Science*, 3, 5-7.
- Hernández-Santana, J.R., Ortiz-Pérez, M.A., Méndez-Linares, A.P., Gama-Campillo, L., 2008, Morfodinámica de la línea de costa del estado de Tabasco: tendencias desde la segunda mitad del siglo XX hasta el presente: *Investigaciones Geográficas*, 65, 7–21.
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), 2010, Censo de población y vivienda (en línea): México, Dirección General de Estadística Sociodemográfica,

disponible en <http://www3.inegi.org.mx/sistemas/widget/default.aspx>, consultado 09 de mayo de 2016.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2007, Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability (en línea): Cambridge, UK, Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E., (eds.), contribution of working group II to the fourth assessment report of the IPCC, Cambridge University Press, disponible en https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4_wg2_full_report.pdf, consultado 12 de noviembre de 2015.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 2012, Resumen para responsables de políticas “en el Informe especial sobre la gestión de los riesgos de fenómenos meteorológicos extremos y desastres para mejorar la adaptación al cambio climático (en línea): Nueva York, Estados Unidos de América, Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley P.M., (eds.), informe especial de los grupos de trabajo I y II del grupo IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, disponible en https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srex/IPCC_SREX_ES_web.pdf, consultado 12 de noviembre de 2015.

Islam, M.A., Hossain, M.S., Murshed, S., 2015, Assessment of coastal vulnerability due to sea level change at Bhola island, Bangladesh: Using geospatial techniques: Journal of the Indian Society of Remote Sensing, 43(3), 625-637, doi:10.1007/s12524-014-0426-0

- Jiménez, R.R., 2014, Clasificación y caracterización de suelos de Tabasco con base en el enfoque geomorfopedológico: H. Cárdenas, Tabasco, México, Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco, tesis de maestría, 143 p.
- Kokot, R.R., Chomnalez, F., 2012, Retroceso de la línea de costa en las Grútas, provincia de Río Negro: Revista Asociación Geológica Argentina, 69, 88-96.
- Li, S., Meng, X., Ge, Z., Zhang, L., 2015, Vulnerability assessment of the coastal mangrove ecosystems in Guangxi, China, to sea-level rise: Regional Environmental Change, 15(2), 265-275, doi:10.1007/s10113-014-0639-3
- Liquete, C., Zulian, G., Delgado, L., Stips, A., Maes, J., 2013, Assessment of coastal protection as an ecosystem service in Europe: Ecological Indicators, 30, 205–217.
- Magaña, V., Gómez, L., Neri, C., Landa, R., León, C., Ávila, B., 2011, Medidas de adaptación al cambio climático en humedales del Golfo de México: México, INE, SEMARNAT, WB, Gobierno de Japón, UNAM, UAM, CEGAM, S. C. 92 p.
- Marcominii, S.C., López, R.A., 2010, Erosión y manejo costero en Las Toninas, Partido de La Costa, provincia de Buenos Aires: Revista Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires, 66(4), 490-498.
- Miranda, H.A., Escamilla, D.R., Gama, L.J., 2005, Carta geológico minera, Ciudad del Carmen E15-6, 1:250000: Pachuca, Hidalgo, México, Servicio Geológico Mexicano, Coordinación General de Minería y Secretaría de Economía, 1 mapa con texto.

- Nicholls, R.J., 2004, Coastal flooding and wetland loss in the 21st century: changes under the SRES climate and socio-economic scenarios: *Global Environmental Change*, 14, 69-86.
- Nicholls, R., 2007, Adaptation options for coastal areas and infrastructure: an analysis for 2030, Technical Report to the UNFCCC, Bonn, Alemania, 35 p.
- Nicholls, R.J., Cazenave, A., 2010, Sea-level rise and its impact on coastal zones: *Science*, 328, 1517-1520.
- Ojeda, Z. J.J., Álvarez F. J. I., Cajaraville, D. M. y Fraile-Jurado P., 2009, El uso de las TIG para el cálculo del índice de vulnerabilidad costera (CVI) ante una potencial subida del nivel del mar en la costa andaluza (España): *GeoFocus*, 9, 83-100.
- Olivo-Garrido, M.L., Sáez-Sáez, V., Martín-Zazo, A., Soto-Olivo, A., 2012, Vulnerabilidad al incremento del nivel del mar: estrategias de adaptación en el área Cabo Codera-Laguna de Tacarigua, estado Miranda, Venezuela: *Terra Nueva Etapa*, XVIII, 43, 45-70
- Organización de las Naciones Unidas (ONU) y Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2012, Efectos de cambio climático en las costas de América Latina y el Caribe: Vulnerabilidad y Exposición: Santiago de Chile, 176 p.
- Ortiz-Pérez, M.A., Siebe C. y Cram S., 2005, Diferenciación ecogeográfica de Tabasco, en Bueno, J., Álvarez F. y Santiago S., (eds.), *Biodiversidad del Estado de Tabasco: México*, CONABIO e Instituto de Biología de la UNAM, 305-322.

- Ortiz-Pérez, M.A., De la Lanza-Espino, E.G., 2006, Diferenciación del espacio costero de México: Un inventario regional: México, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, 138 p.
- Ortiz-Pérez, M.A., Sommer-Cervantes, I., Oropeza-Orozco, O., 2010, Criterios para estimar la vulnerabilidad física de las costas de barrera ante los impactos hidrometeorológicos, en Rivera-Arriaga, E., Azuz-Adeth, I., Alpuche-Gual, L., Villalobos-Zapata, G.J., (eds.), Cambio climático en México un enfoque costero-marino, Universidad Autónoma de Campeche Cety-Universidad, Gobierno del Estado de Campeche, 101-119.
- Ortiz-Pérez, M.A., Hernández-Santana, J.R., Figueroa-Mah Eng, J.M., Gama-Campillo, L.M., 2011, Tasas del avance transgresivo y regresivo en el frente deltaico tabasqueño: en el periodo comprendido del año 1995 al 2008, en Botello, A.V., Villanueva-Fragoso, S., Gutiérrez, J., Rojas-Galaviz, J.L., (eds.), Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático: México, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche, 393-412.
- Palacio-Aponte, G., 2001, Detección de cambios en la morfología litoral de Punta Zacatal y parte occidental de Isla del Carmen, Campeche, mediante el análisis multitemporal de imágenes de satélite: Investigaciones Geográficas, 46, 7-14.
- Palacio-Aponte, A.G., Medina-Medina, V., Bautista, F., 2005, Diagnóstico ambiental de la costa del estado de Campeche: Enfoques geomorfológico y geopedológico, en Bautista-Zúñiga, F., Palacio A.G. (eds.), Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán: implicaciones agropecuarias, forestales y ambientales,

- México D.F., Universidad Autónoma de Campeche, Universidad Autónoma de Yucatán, Instituto Nacional de Ecología, 59-72.
- Palacio-Aponté, G., Silva-Casarín, R., Bautista-Godínez, E.G., Posada-Vanegas, G., Ruiz-Martínez, G., 2006, Atlas de peligros naturales de la ciudad de Campeche, San Francisco de Campeche, México, SEDESOL, H. Ayuntamiento de Campeche, reporte técnico, 96 p.
- Palacio-Aponte, G., 2010, La morfología costera posthuracán como indicador de la intensidad de la amenaza por huracanes: *Interciencia*, 35(6), 400-406.
- Palma-López, D.J., Zavala, C.J., Bautista, Z.F., Morales, G.M.A., López, C. A., Shirma, T.E.D., Gallegos T.J.L., 2012, Estudio sobre el plan de uso sustentable de los suelos del estado de Campeche: San Francisco de Campeche, Campeche, México, Colegio de Postgraduados-Secretaría de Desarrollo Rural de Campeche, reporte técnico, 141 p.
- Pedrozo-Acuña, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., Medellín-Mayoral, G., González-Villareal, F.J., 2012a, Evaluation of inundation areas resulting from the diversion of an extreme discharge towards the sea: case study in Tabasco, Mexico: *Hydrological Processes*, 26, 687-704, doi: DOI: 10.1002/hyp.8175.
- Pedrozo-Acuña, A., Ruiz de Alegria-Arzaburu, A., Mariño-Tapia, I., Enriquez, C., González-Villareal, F.J., 2012b, Factors controlling flooding at the Tonalá river mouth (Mexico): *Journal of Flood Risk Management*, 5, 226-244, doi: 10.1111/j.1753-318X.2012.01142.x.

- Pikelj, K., Juracic, M., 2013, Eastern Adriatic coast (EAC): geomorphology and coastal vulnerability of a karstic coast: *Journal of Coastal Research*, 29(4), 944-957.
- Rahmstorf, S., 2012, Sea-level rise: towards understanding local vulnerability: *Environmental Research Letters*, 7, 1-3, doi:10.1088/1748-9326/7/2/021001.
- Ramos, J., Marrufo L., González F.J., 2009, Use of Lidar data in floodplain risk management planning: the experience of Tabasco 2007 flood, en Jedlovec, G., (ed.), *Advances in Geoscience and Remote Sensing*, INTECH, Rijeka, 659-678.
- Rosete-Vergés, F.A., Enríquez-Hernández, G., Aguirre-von Wobeser, E., 2013, El componente del riesgo en el ordenamiento ecológico del territorio: el caso del ordenamiento ecológico regional y marino del Golfo de México y Mar Caribe: *Investigaciones Geográficas*, 80, 7-20.
- Sheik, M.P., Chandrasekar, N., 2013, Coastal erosion hazard and vulnerability assessment for southern coastal Tamil Nadu of India by using remote sensing and GIS: *Natural Hazards*, 69(3), 1295-1314, doi:10.1007/s11069-011-9962-x.
- Silva, I.H.C., Miranda, F.P., Beisl, C.H., Landaus, L., 2011, System for flooding alert in tropical coastal zones using GIS and remote sensing: a case study in Villahermosa, México: *Journal of Coastal Research*, 57, 1736-1739.
- Thieler, R., Hammar, E., 1999, National assessment of coastal vulnerability to sea-level rise: preliminary results for the U.S. Atlantic coast. U.S: Geological Survey, Woods Hole, Massachusetts, 99-593.
- Torres-Rodríguez, V., Márquez-García, A., Bolongaro-Crevenna, A., Chavarria-Hernández, J., Expósito-Díaz, G., Márquez-García, E., 2011, Tasa de erosión y vulnerabilidad

- costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático, en Botello, A.V., Villanueva-Fragoso, S., Gutiérrez, J., Rojas- Galaviz, J.L., (eds.), Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático: México, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche, 413-432.
- Torresan, S., Critto, A., Rizzi, J., Marcomini, A., 2012, Assessment of coastal vulnerability to climate change hazards at the regional scale: the case study of the north Adriatic Sea: *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(7), 2347-2368, doi:10.5194/nhess-12-2347-2012
- Zavala, C.J., Palma-López, D.J., Morales, G.M.A., 2012, Clasificación de suelos de la cuenca baja del Río Tonalá, Tabasco, en Zavala C.J., García L.E., (eds.) Suelo y vegetación de la cuenca baja del río Tonalá, Tabasco: H. Cárdenas, Tabasco, México, Colegio de Posgraduados, 31-58.
- Zavala-Cruz, J., Jiménez-Ramírez, R., PALMA-López, D.J., Bautista-Zúñiga, F., Gavi-Reyes, F., 2016, Paisajes geomorfológicos: base para el levantamiento de suelos en Tabasco, México: *Ecosistemas y Recursos Agropecuarios*, 3(8) 161-171.
- Zavala-Hidalgo, J., De Buen-Kalman, R., Romero-Centeno, R., Hernández-Maguey, F., 2011, Tendencias el nivel del mar en las costas mexicanas, en Botello, A.V., Villanueva-Fragoso, S., Gutiérrez, J., Rojas- Galaviz, J.L., (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático (segunda edición): México, Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche, 315-334.

Zinck, A.J., 2012, Geopedología: elementos de geomorfología para estudios de suelos y de riesgo naturales, Faculty of Geo-Information Science and Earth Observation, Enschede, The Netherlands, 123 p.

Zhang, K., Douglas, B.C., Leatherman, S.P., 2004, Global warming and coastal erosion: *Climate Change*, 64, 41-58.

Universidad Juárez Autónoma de Tabasco.
México.

CAPITULO 3. CONCLUSIONES GENERALES

El modelo de vulnerabilidad costera ante el cambio climático en los diferentes escenarios, se propone considerando seis variables base, que son: geomorfología costera, pendiente costera, cambio en la línea costera, aumento en el nivel del mar, oleaje y rango mareal, esta última puede ser o no indispensable; sin embargo, para el litoral tabasqueño puede agregarse dos variables más como la sedimentación y subsidencia, útiles para detectar sectores con vulnerabilidad extrema.

La vulnerabilidad de la costa tabasqueña ante el incremento del nivel del mar es evidente; la aplicación del índice de vulnerabilidad costera con sus respectivas adecuaciones, proporcionará datos más precisos de los impactos proyectados y de esa manera planificar estrategias y tomar decisiones en el mediano y largo plazo. Es recomendable realizarse monitoreos continuos, principalmente en sitios donde hay serias amenazas de erosión como Sánchez Magallanes y el delta de Grijalva-Usumacinta, lo anterior servirá para evaluar el potencial de impactos futuros.

En el periodo del año 2000 al 2010, se observó una reconfiguración del uso de suelo, debido al crecimiento del uso agrícola, urbano y manglares; así como una reducción de la superficie de pastizales y vegetación hidrófita. Por su parte, en el

norte del municipio de Comalcalco se encontraron cuerpos lagunares, así como los manglares, los cuales se ubicaron sobre suelos inundables; mientras que en la parte sur se distribuyen principalmente áreas agrícolas y pastizales.

En la costa de Tabasco y Campeche se zonificaron ocho paisajes geomorfológicos, de los cuales las planicies costera, baja de inundación lagunar y palustre, contienen relieves indicadores de vulnerabilidad geomorfológica a la inundación ante el ascenso del nivel del mar debido al cambio climático, en el 67 % de la superficie en estudio, se caracterizan por presentar forma plana, pendiente menor a 2 %, altura dominante menor a 2 msnm y colindancia con el Golfo de México.

Las zonas con muy extrema a muy alta vulnerabilidad geomorfológica corresponde a relieves de cordones de playa, llanura fluvio-marina, depresión de turba, petenes con turba, llanura salina, delta de marea, dunas costeras y depresión de resurgencias, que cubren el 45 % de la costa de Tabasco y Campeche, donde se localizan las Reservas de la Biosfera Pantanos de Centla, Los Petenes y Ría Celestúm, también el Área de Protección de Flora y Fauna Laguna de Términos, humedales de suma importancia y más extensos de México.

ANEXOS: PRODUCTIVIDAD GENERADA DURANTE EL DOCTORADO

a). Ponente en congreso internacional.



Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente
Centro Nacional de Áreas Protegidas de
Cuba

Calle 18 A No. 4114 e/41 y 47. Playa. C.P. 11300
Telf: 707 7920 Fax: 704 1788 Ciudad de La Habana CUBA

La Habana, Cuba, 16 de Febrero 2015

CARTA APROBACIÓN DE PONENCIA IX Congreso Internacional de Áreas Protegidas

Sres. Rodimiro Ramos Reyes, Joel Zavala Cruz y Lilia María Gama Campillo.
Tabasco, Mexico.

Estimado Colega

El Comité Científico del IX Congreso Internacional de Áreas Protegidas, ha revisado su Ponencia titulada:

Vulnerabilidad costera de Tabasco y Campeche, México

Le comunicamos que la misma ha sido aprobada para ser presentada de forma oral en el Congreso. Una vez que sea conformado el programa científico del mismo, le indicaremos en que sesión y día de trabajo deberá ser presentada.

Tal como se le ha indicado en la circular del Congreso, este resumen y el trabajo en extenso serán publicados en las memorias electrónicas de la Convención de Medio Ambiente, las cuales tendrán ISBN. Para ello ud. deberá enviarnos el extenso de dicho trabajo hasta el 20 de Mayo del presente año, después de esta fecha no se garantiza su inclusión en el CD.

Sirva la presente para que pueda realizar todos los trámites asociados para garantizar su participación en el Congreso.

Con saludos afectuosos queda de UD.

Msc. Augusto Martínez Zorrilla,
Presidente Comité Organizador IX Congreso internacional de Áreas Protegidas en
Cuba



CERTIFICADO

A: Rodimiro Ramos Reyes, Joel Zavala Cruz y Lilia María Gama Campillo

Por su participación en las Actividades Científicas de la X Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en el Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba, del 6 al 10 de julio de 2015.

- | | |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> Conferencista | <input type="checkbox"/> Secretario |
| <input checked="" type="checkbox"/> Ponente | <input type="checkbox"/> Expositor |
| <input type="checkbox"/> Participante | <input type="checkbox"/> Comité Organizador |
| <input type="checkbox"/> Panelista | <input type="checkbox"/> Comité Científico |
| <input type="checkbox"/> Presidente | |

IX Congreso sobre Áreas Protegidas

Ponencia: "VULNERABILIDAD COSTERA DE TABASCO Y CAMPECHE, MÉXICO"

Dra. Gisela Alonso Domínguez
Presidenta del Comité Organizador





CERTIFICADO

A: Rodimiro Ramos Reyes

Por su participación en las Actividades Científicas de la X Convención Internacional sobre Medio Ambiente y Desarrollo, celebrada en el Palacio de Convenciones de La Habana, Cuba, del 6 al 10 de julio de 2015.

- | | |
|--|--|
| <input type="checkbox"/> Conferencista | <input checked="" type="checkbox"/> Secretario |
| <input type="checkbox"/> Ponente | <input type="checkbox"/> Expositor |
| <input type="checkbox"/> Participante | <input type="checkbox"/> Comité Organizador |
| <input type="checkbox"/> Panelista | <input type="checkbox"/> Comité Científico |
| <input type="checkbox"/> Presidente | |

IX Congreso sobre Áreas Protegidas

Temática: Monitoreo y manejo de especies, hábitat y ecosistemas en áreas protegidas

Dra. Gisela Alonso Domínguez
Presidenta del Comité Organizador



b). Se formó un estudiante de maestría.



CONSTANCIA

Por este medio hago constar que el
M. EN C. RODIMIRO RAMOS REYES
participó como
DIRECTOR DE TESIS
en el examen de grado del
ING. JUAN CARLOS NÚÑEZ GÓMEZ
(GENERACIÓN 2013-2014)

contra de la Maestría en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural
que se imparte en El Colegio de la Frontera Sur (ECOSUR). Este posgrado está
inscrito en el PNPC de CONACYT.

Con fecha de hoy el Ing. Juan Carlos Núñez Gómez sustentó el grado,
defendiendo la tesis
**"Vulnerabilidad física de la zona costera del Estado de Tabasco ante el
aumento del nivel del mar"**

Se exhibe la presente constancia para los fines que al interesado convengan
en la ciudad de Villahermosa, Tabasco a las treinta días del mes de junio de
dos mil quince.

Atentamente


Dr. Everardo Barba Macías
Coordinador de Posgrado
Ciudad Villahermosa


**ECOSUR
POSGRADO**



El Colegio de la Frontera Sur

Villahermosa, Tabasco. 30 de junio de 2015.

Las personas abajo firmantes, integrantes del jurado examinador de:

Juan Carlos Núñez Gómez

hacemos constar que hemos revisado y aprobado la tesis titulada:

"Vulnerabilidad física de la zona costera del Estado de Tabasco ante el aumento del nivel del mar"

para obtener el grado de **Maestro en Ciencias en Recursos Naturales y Desarrollo Rural**.

	Nombre	Firma
Director	M. en C. Rodimiro Ramos Reyes	
Asesor	Dr. Everardo Barba Macías	
Asesor	Dr. Alejandro Espinoza Tenorio	
Asesora	Dra. Lidia María García Campillo	
Sinodal adicional	Dr. Rufo Sánchez Hernández	
Sinodal adicional	Dr. Alfonso Castillo Domínguez	
Sinodal suplente	M. en C. Armando Hernández de la Cruz	

c). Autor de correspondencia de un artículo científico.



Ciudad Universitaria, México, 13 de mayo de 2016

**Juan Carlos Nuñez Gómez, Rodimiro Ramos Reyes,
Everardo Barba Macías, Alejandro Espinoza Tenorio
y Lilia María Gama Campillo**

El Colegio de la Frontera Sur (Villahermosa)
y Univ. Juárez Autónoma de Tabasco

PRESENTE

Por este conducto le informo con respecto al artículo "Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México", sometido a la revista *Investigaciones Geográficas* del Instituto de Geografía de la Universidad Nacional Autónoma de México, que ha sido aceptado y será publicado en breve en su versión *pre-print*.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un saludo cordial.

Atentamente

Dr. José Luis Palacio Prieto
Editor Académico

Investigaciones Geográficas, Boletín es una publicación incluida en: Índice de Revistas Mexicanas de Investigación Científica y Tecnológica de CONACyT, SciELO-México, SCOPUS de Elsevier y en el SciELO Citation Index de Thomson Reuters.
<http://www.revistas.unam.mx/index.php/rig/index>
http://www.igg.unam.mx/sigg/publicaciones/inves_geo_presenta.php