

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

## INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA

### INFORME DEL PROYECTO

CLAVE: HC1708.1

### “ESTUDIO DEL NIVEL DEL MAR, EROSIÓN Y SUBSIDENCIA EN LA PLANICIE COSTERA SUR DEL GOLFO DE MÉXICO”



Diciembre 2017

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

## **INSTITUTO MEXICANO DE TECNOLOGÍA DEL AGUA**

### **INFORME DEL PROYECTO**

#### **“ESTUDIO DEL NIVEL DEL MAR, EROSIÓN Y SUBSIDENCIA EN LA PLANICIE COSTERA SUR DEL GOLFO DE MÉXICO”**

**Biol. Rubén I. Huerto Delgadillo**  
**Dr. Carlos E. Mariano Romero**

#### **Participantes por parte de la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo:**

M.I. Vicente Torres Rodríguez  
Dr. Antonio Márquez García  
Dra. Andrea Bolongaro Crevenna Recaséns  
Dr. Javier Aldeco Ramírez  
M.C. Gabriel Origel Gutiérrez  
Ing. Erik Márquez García  
Ing. Oscar Serrano Enríquez  
Biól. Ana Carla Márquez Hernández  
Hidrobiol. Belén Eunice García Díaz  
Pas Geol. Manuel Islas García  
Pas. Geog. Miguel Angel Blancas Reza

Cuernavaca, Morelos, Diciembre 2017

## CONTENIDO

<b>1 ANTECEDENTES.....</b>	<b>5</b>
1.1 ESTRATEGIA.....	5
<b>2 INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>6</b>
2.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	8
<b>3 . CAMBIO DE NIVEL DEL MAR EN LA ZONA SUR DEL GOLFO DE MÉXICO .....</b>	<b>9</b>
3.1 INTRODUCCIÓN. ....	9
3.2 INFORMACIÓN MAREOGRÁFICA: OBSERVACIONES A ESCALA GLOBAL.....	11
3.3 INFORMACIÓN MAREOGRÁFICA: TASAS DE ELEVACIÓN DEL NIVEL DEL MAR EN TABASCO Y CAMPECHE.....	12
3.4 EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO. ....	16
<b>4 TASAS DE EROSIÓN/ACRECIÓN DE SITIOS CRÍTICOS EN LOS ESTADOS DE TABASCO Y CAMPECHE .....</b>	<b>19</b>
4.1 INTRODUCCIÓN .....	19
4.2 METODOLOGÍA .....	20
4.2.1 Obtención de líneas de costa .....	20
4.2.2 Estimación de tasa de erosión .....	22
4.3 SELECCIÓN DE SITIOS DE MONITOREO DE EROSIÓN/ACRECIÓN.....	23
4.4 IMÁGENES SATELITALES DISPONIBLES.....	24
4.5 TASAS DE EROSIÓN/ACRECIÓN DE SITIOS CRÍTICOS DE LOS ESTADOS DE TABASCO Y CAMPECHE .....	25
4.6 TASAS DE EROSIÓN/ACRECIÓN EN EL ESTADO DE TABASCO.....	25
4.7 TASAS DE EROSIÓN/ACRECIÓN EN EL ESTADO DE CAMPECHE .....	27
<b>5 . METODOLOGÍA SAR INTERFEROMÉTRICA PARA LA DETERMINACIÓN Y MONITOREO DE FENÓMENOS DE SUBSIDENCIA/EMERSIÓN EN LA ZONA COSTERA DE LOS ESTADOS DE TABASCO Y CAMPECHE.....</b>	<b>32</b>
5.1 INTRODUCCIÓN. ....	32
5.2 DISPONIBILIDAD ACTUAL DE IMÁGENES EN MODO INTERFEROMÉTRICO DE DISTINTOS SATÉLITES DISPONIBLES. ....	34
5.2.1 Consideraciones sobre el área de estudio .....	34
5.2.2 Satélites SAR disponibles .....	36
5.2.3 Datos SAR disponibles para la zona de estudio.....	37
5.3 MÉTODOS DE APOYO DE CAMPO.....	39
5.4 METODOLOGÍA DE INTERFEROMETRÍA DE RADAR DE APERTURA SINTÉTICA (INSAR) .....	40
5.5 TÉCNICA DE INSAR DIFERENCIAL (DINSAR).....	43
5.6 APLICACIONES DE INSAR EN ZONAS COSTERAS. ....	45
5.7 PROGRAMAS COMPUTACIONALES. ....	46
5.8 PROCESAMIENTO.....	49
5.9 IMPORTANCIA DE LA INVESTIGACIÓN DE LA SUBSIDENCIA EN EL GOLFO DE MÉXICO. ....	51

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

<b>6 METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE MOVIMIENTOS ABSOLUTOS Y/O RELATIVOS DEL BLOQUE YUCATÁN CON RESPECTO A SUS VECINOS .....</b>	<b>56</b>
6.1 INTRODUCCIÓN .....	56
6.2 GENERALIDADES .....	56
6.3 INFORMACIÓN GEODÉSICA DISPONIBLE (INEGI) .....	57
6.4 MÉTODO DE CÁLCULO DE MOVIMIENTOS ABSOLUTOS Y/O RELATIVOS DEL BLOQUE YUCATÁN CON RESPECTO A LOS BLOQUES TECTÓNICOS VECINOS .....	59
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>66</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS .....</b>	<b>77</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>77</b>



## **ESTUDIO DEL NIVEL DEL MAR, EROSIÓN Y SUBSIDENCIA EN LA PLANICIE COSTERA SUR DEL GOLFO DE MÉXICO.**

### **1 Antecedentes**

La zona costera de Tabasco y Campeche ha presentado en los últimos años una exacerbada pérdida de playa, hábitats, humedales y manglares. Esto ha repercutido en impactos sociales, ambientales, económicos y científicos. Entre los aspectos sociales se encuentra la pérdida de zonas habitables costeras. Los ambientales en la pérdida de hábitat, humedales y manglares. Los económicos en daños a la infraestructura costera como son ductos y carreteras. Por lo tanto, es evidente que todo esto representa un reto científico para la mitigación de estos impactos.

la transgresión observada de la línea de costa es principalmente atribuida al incremento del nivel del mar (debido al cambio climático) y a la disminución de la carga sedimentaria de los ríos por la construcción de obras de control y presas. Es indudable que estos procesos son parte de la causa en la transgresión de la línea de costa, sin embargo, es fundamental tomar en cuenta las actividades antropogénicas de la región, como lo es la extracción petrolera y de agua mediante pozos para las ciudades. Se ha demostrado científicamente que estas actividades conllevan a un proceso de subsidencia el cual puede ser significativo. Por tal motivo, es esencial establecer la contribución real del incremento del nivel del mar y de la subsidencia de la planicie costera.

Contar con esta información es fundamental para mitigar los impactos a la población y establecer claramente si gran parte de las inundaciones son atribuibles a eventos extremos o a la subsidencia de la zona.

#### **1.1 Estrategia**

**OBJETIVO 1:** Generar, aplicar y transferir conocimiento para incrementar las capacidades de investigación aplicada, desarrollo tecnológico e innovación del sector agua. • Generar conocimiento, tecnología e innovación para la gestión sustentable del agua.

**OBJETIVO 2:** Formar capital humano especializado para la profesionalización y productividad en el sector hídrico. • Formar y certificar recursos humanos calificados para el sector hídrico.

**OBJETIVO 3:** Proveer servicios científicos y tecnológicos de alto valor agregado para fortalecer las capacidades institucionales del sector agua. • Fortalecer las capacidades de seguridad hídrica en el sector.

**OBJETIVO 4:** Difundir información y conocimiento científico y tecnológico en materia de agua para contribuir a una participación informada de la sociedad mexicana. • Fortalecer la gobernanza del agua por medio de la información y el conocimiento.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

**OBJETIVO 5: Consolidar la cooperación técnica internacional del IMTA en materia de agua • Fortalecer la cooperación técnica internacional.**

Las zonas costeras del mundo están siendo afectadas por el incremento del nivel mar. Uno de los procesos más evidentes es la transgresión de la línea de costa desplazándose tierra adentro. En general el incremento del nivel del mar es atribuido al cambio climático, sin embargo, es evidente que en algunas zonas costeras este proceso es exacerbado por otras actividades antropogénicas tal como la extracción de agua o actividades petroleras. En los últimos años la zona costera de Tabasco y Campeche ha presentado una erosión significativa en sus costas causando pérdida de ecosistemas costeros y daños en la infraestructura. Las causas de la transgresión de la línea de costa se han atribuido al incremento del nivel del mar y a la disminución de los aportes de sedimento debido a construcción de presas, aguas arriba. Sin embargo, no se ha cuantificado el impacto de la actividad petrolera en la zona y la posible subsidencia inducida por esta actividad.

Cuantificar la subsidencia de la planicie costera del sur del Golfo de México es de gran relevancia debido a que es una zona susceptible a inundaciones debido a eventos meteorológicos extremos. Si existe esta subsidencia la vulnerabilidad de la zona costera representa un riesgo mayor el cual debe ser cuantificado para establecer zonas reales de vulnerabilidad, así como, planes de contingencia.

El proyecto está comprendido dentro del Plan Nacional Hídrico. Como se describe en el plan referente a los objetivos, estrategias y líneas de acción: Para el Estado Mexicano el agua es un tema prioritario y asunto de seguridad nacional que requiere una atención integral que le permita transitar de un enfoque reactivo a uno proactivo, contar con el abastecimiento de agua necesario y fortalecer la capacidad de respuesta ante los retos asociados al cambio climático. El proyecto está dentro de la línea de política pública de reducir la vulnerabilidad ante efectos del cambio climático y las contingencias ambientales.

Asimismo, el proyecto se enmarca en el contexto internacional enfocado principalmente en la estrategia nacional de adaptación y mitigación del sector hídrico ante el cambio climático. Como parte del Objetivo 2 se considera la Estrategia 2.2 Reducir la vulnerabilidad a los efectos del cambio climático o variabilidad climática, cuya línea transversal al objetivo es impulsar una política en mares y costas que fomente la competitividad y enfrente los efectos del cambio climático. Como parte del Objetivo 5 se reforzará la participación institucional en foros internacionales, en el intercambio de experiencias, de capacidades, de recursos humanos y de mejores prácticas, así como en la gestión de nuevas fuentes de asistencia técnica y financiación internacionales para el sector.

## **2 Introducción**

La zona litoral se reconoce como una de las áreas más dinámicas, con una morfología que cambia en respuesta a las fuerzas de los procesos marinos y continentales que causan cambios en la morfología de las playas, en su composición sedimentológica y en su mineralogía. Muchos factores intervienen en los procesos dinámicos de las costas como son los factores climáticos, geológicos, físicos, biológicos, químicos y antrópicos, los cuales son responsables de los cambios que sufre esta zona.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

En el contexto de cambio climático, de acuerdo con las conclusiones del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático 2007 y 2014, se tiene una alta probabilidad de aumento en el número y/o intensidad de fenómenos meteorológicos extremos, tales como olas de calor, lluvias intensas, aumento en la intensidad y frecuencia de los ciclones tropicales y aumento en el nivel del mar, entre otros.

Hay evidencia probada de que el cambio climático está afectando a los sistemas biológicos e hidrológicos, a los recursos hídricos y a las zonas costeras. También se estima que se está incrementando la pérdida de biodiversidad y la disminución en muchos de los servicios ecosistémicos, lo cual seguramente repercutirá en los sistemas productivos.

El Golfo de México es una cuenca geológica amplia formada por la fosa de Sigsbee, la cual a su vez está circundada por la plataforma continental rodeada en su margen occidental por una serie de cuencas marginales deltaicas, en la mayoría de las cuales hay evidencias de hundimiento (Ortiz y Méndez, 1999).

Ramos-Reyes *et al.*, (2016) reportan que el 80% de la superficie de los paisajes de Tabasco y Campeche está formada por planicies sobre sedimentos no consolidados, acumulados por procesos fluviales, palustres, eólicos y litorales, de edad Cuaternario Holoceno y su altura varía de 0 a 8 msnm. En la planicie costera prevalecen materiales arenosos acumulados por corrientes litorales con alturas menores a 7 msnm y una pendiente inferior a 3%.

La zona costera del Golfo de México es una zona ampliamente afectada por los procesos de elevación del nivel del mar y por la erosión costera independientemente del origen de estas fenómenos. En efecto, estudios realizados por Ortiz (1999) pusieron de manifiesto zonas muy afectadas por la erosión como es el caso del litoral de Sánchez Magallanes (Tabasco).

Desde 2005 la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo ha desarrollado metodologías para la investigación de la dinámica costera, incluyendo: análisis de la línea de costa por métodos satelitales, cálculo de tasas de erosión y acreción, topobatimetría, clima marino, geodesia, geomorfología de playas, sedimentología, modelado de corrientes, instrumentación (ANIDE, 2013). Los métodos han sido aplicados en el Golfo de México, Mar Caribe, Océano Pacífico y Mar de Cortés.

Desde 2005 se realizan estudios de dinámica costera en en Tabasco: Márquez-García *et al.*, 2010; Ayala-Pérez, 2013; y en Campeche: Torres-Rodríguez *et al.*, 2007; Márquez-García *et al.*, 2008; Torres-Rodríguez *et al.*, 2010; Torres-Rodríguez *et al.*, 2012; Bolongaro-Crevenna *et al.*, 2011; y Bolongaro-Crevenna *et al.*, 2012.

La dilucidación del origen de los procesos de erosión y de cambio en el nivel del mar es un tema en amplio debate y requiere de datos que no están del todo disponibles. A nivel de estudios de batimetría, líneas de costa, morfología, sedimentología y geología de litorales existen abundantes datos, pero a escala de fenómenos de subsidencia (emersión/hundimiento) y de movimientos tectónicos regionales a escala de bloques continentales, (compactación de deltas, giros o movimientos de bloques continentales), prácticamente no existen mediciones en esta parte del Golfo.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

El sur del Golfo de México comprendido por los estados de Campeche y Tabasco son zonas de gran importancia social y económica. A pesar de contener grandes recursos naturales (abundancia de agua, petróleo, pesquería, ganadería, etc.), los niveles de desarrollo social son de los más bajos del país. Además en la zona se asienta la infraestructura económica más importante del país como la Terminal de exportación petrolera de Dos Bocas (Tabasco) y el Centro de Transporte y Procesamiento de Gas de Atasta (Campeche) y la planta de nitrógeno más grande del mundo que mantiene la presión de los yacimientos de la Sonda de Campeche.

Se entiende entonces que la zonas litorales de Campeche y Tabasco sean zonas estratégicas en todos los ámbitos, para el país, y de ahí que el IMTA realice diversos estudios y proyectos en los grandes ambientes hídricos: Hidrología de la vertiente del Golfo de México y caracterización de los procesos de dinámica costera.

## 2.1 Localización del área de estudio

La zona de estudio se localiza al sur del Golfo de México, en los litorales de los Estados de Campeche y Tabasco, México, ubicada dentro de la provincia fisiográfica de la Bahía de Campeche, entre los ríos Tonalá hasta cerca del río Champotón al oriente, el cual comprende un aproximado de 400 kilómetros. Los límites geográficos<sup>1</sup> y las zonas UTM de la zona de estudio se muestran en la Figura 1. Los límites de las coordenadas geográficas se muestran en la Tabla 1.



<sup>1</sup> En este estudio se utilizó la proyección WGS-84, zona UTM N15.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Figura 1. Área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos vectoriales de INEGI.

Tabla 1. Coordenadas de la zona de estudio.

Coordenadas de la zona de estudio			
Norte	Sur	Este	Oeste
20° 8'31.88"N	18°32'40.50"N	20° 1'13.26"N	18°35'54.74"N
91°58'5.63"O	90°46'56.60"O	90°35'18.41"O	92°23'24.34"O

### 3 . Cambio de nivel del mar en la zona sur del Golfo de México

#### 3.1 Introducción.

El aumento de nivel del mar a nivel global es evidente, continuo y real. Es un hecho comprobado en los registros de innumerables estaciones mareográficas del mundo y de los registros de altímetros satelitales. Si bien este hecho es innegable, el origen del aumento del nivel del mar en el mundo conlleva debates acerca de las aportaciones de los fenómenos naturales y de los antrópicos.

La superficie del nivel del mar no es constante. La superficie del mar tiene una “topografía” cuyos rasgos están definidos por las condiciones de la propia topografía submarina, por el valor de la gravedad en cada punto de la Tierra, por la forma y dimensiones del geoide de la propia Tierra (Figura 2), por el efecto de las mareas astronómicas gobernadas por la Luna, y por los procesos oceánicos mayores como las grandes corrientes marinas y los procesos climáticos-oceánicos.

De todos los fenómenos enlistados anteriormente, el de interacción atmósfera-océano tiene fuertes implicaciones por el efecto del calentamiento global de origen antrópico, generado por el aumento de gases de efecto invernadero en la atmósfera. El calentamiento de la atmósfera y de las capas oceánicas tienen efectos conocidos y bien documentados; el calentamiento del océano representa más del 93% de la energía acumulada en el periodo 1971-2010 y el calentamiento de la capa superior de los océanos (0 a 700 m) cerca del 64% del total. (IPCC, 2013). Así, entre los principales efectos del calentamiento global se tienen: el derretimiento de los glaciares continentales; el derretimiento de los hielos de Groenlandia y la Antártida; el aumento de la expansión térmica del agua de mar; la modificación de las grandes corrientes oceánicas por intrusión profunda de la capa oceánica caliente; las modificaciones de las oscilaciones de El Niño Oscilación del Sur (ENOS); la acidificación general del océano por la adición de HCO<sub>3</sub> derivado a su vez del CO<sub>2</sub> atmosférico en incremento. El denominador común de todos estos efectos (excepto el del pH) es el aumento del volumen de agua en los océanos y por consiguiente el aumento del nivel del mar global, así como una mayor reactividad del mar por su acidificación.

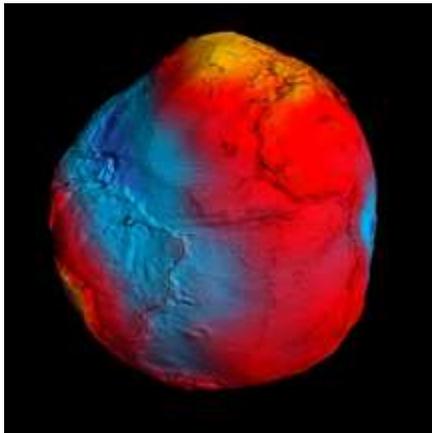
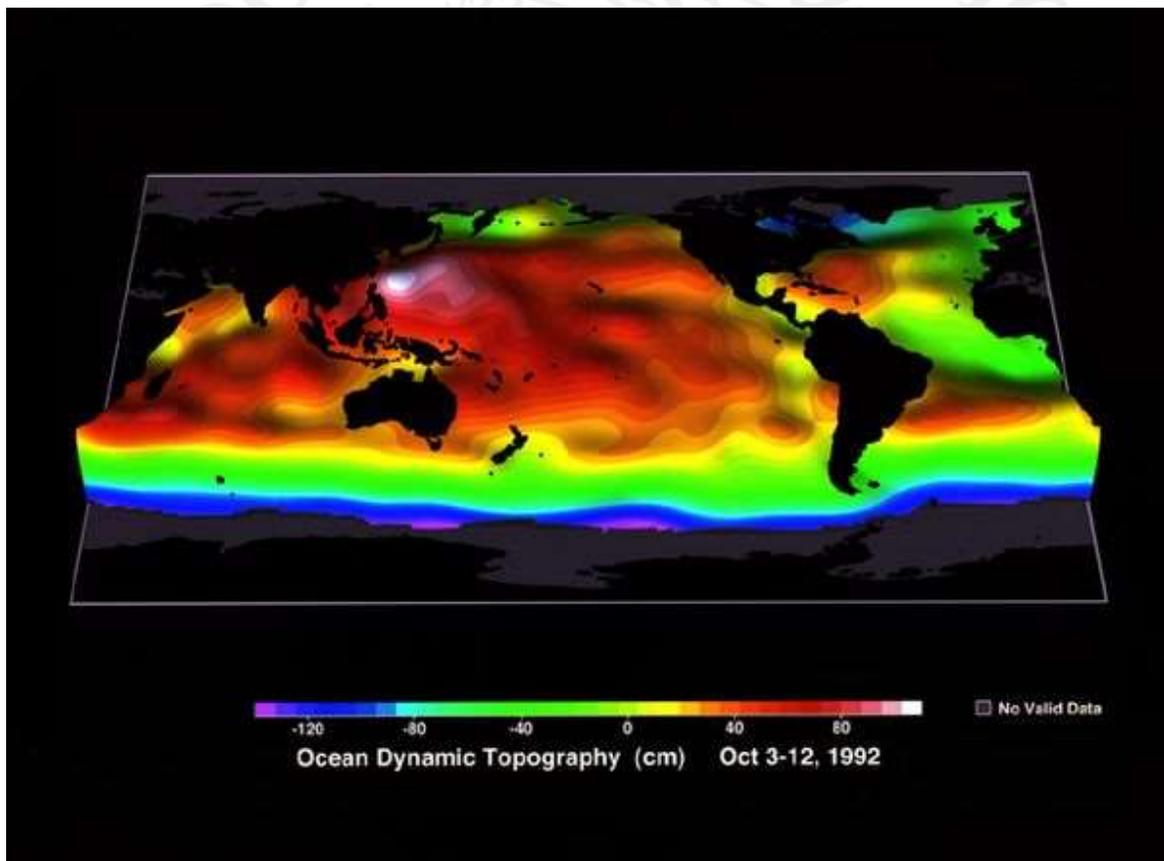


Figura 2. Forma y dimensiones del geoide de la Tierra.

Izquierda: Geoide de la Tierra obtenido del satélite gravitacional GOCE (“Gravity field and steady-state Ocean Circulation Explorer”). Fuente: ESA, 2011.

Abajo: Topografía de la superficie del mar obtenida mediante el satélite Topex/Poseidon en el periodo 3-12 de Octubre de 1992. Fuente: Imagen NASA: <https://sealevel.jpl.nasa.gov/images/P42106-br.jpg>



De acuerdo con la Quinta Comunicación del IPCC (2013, 2014) entre 1961 y 2003 el nivel del mar ha aumentado a una tasa promedio de  $1.8 \pm 0.5$  mm/año con intensificación en los años recientes. El propio reporte del IPCC (2013) señala que en el período 1993-2003 la tasa de incremento de ascenso del nivel del mar global fue de  $3.1 \pm 0.7$  mm/año. De tal manera que el ascenso nivel del mar global para finales del siglo 21 se sitúe entre 52 a 98 cm.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

### 3.2 Información mareográfica: observaciones a escala global.

El aumento del nivel del mar tiene variadas expresiones a escalas globales y locales es una de las principales consecuencias del calentamiento global

El aumento en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), conducirán según las proyecciones, a cambios globales y regionales de temperatura, precipitación y otras variables climáticas, dando así origen a cambios en la humedad del suelo a escala mundial, a un aumento del nivel del mar, valores más extremos de temperatura, crecidas de ríos y sequías prolongadas en algunos lugares del planeta (IPCC, 2007). La elevación del nivel del mar es probablemente el impacto antropogénico más importante del cambio climático en este siglo (Grinsted *et al.*, 2009).

El aumento relativo del nivel del mar, tiene una gran variedad de efectos sobre los procesos costeros que operan en torno al nivel promedio del mar (mareas, oleajes). Los efectos a más largo plazo incluyen cambios morfológicos, particularmente erosión de las playas y disminución de las dunas, a medida que la costa se ajusta a las nuevas condiciones ambientales (Botello *et al.*, 2008).

La Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA, en inglés) ha monitoreado desde el año 1993 hasta el presente el aumento de nivel del mar a nivel global, a través de satélites altimétricos (TOPEX/Poseidon Jason-1 and OSTM/Jason-2) reportando una tendencia positiva de aumento del nivel del mar (Beckley *et al.*, 2017) (Figura 3 inciso a).

De igual manera, la Agencia Espacial Europea (ESA, inglés) como parte del Proyecto de Iniciativa de Cambio Climático, posee registros de las variaciones del nivel del mar a lo largo de 25 años (1993-2017). Sus resultados coinciden con la tendencia positiva de aumento del nivel del mar que reporta la NASA y el IPCC, señalando que a nivel global el incremento ha sido de 3 mm al año en promedio, con clara evidencia de incrementarse en años futuros (Figura 3 inciso b).

Los cambios en la morfología de las zonas costeras son el resultado de la influencia de muchos procesos, siendo uno de ellos el aumento en el nivel del mar. Entre estos procesos, los más importantes son el balance entre el aporte y la remoción de sedimentos, el transporte litoral de sedimentos, la incidencia de eventos extremos y los movimientos verticales de la corteza terrestre (Botello *et al.*, 2008). Uno de los efectos del ascenso del nivel del mar sobre las costas es el comportamiento transgresivo del espacio litoral (avance de la línea de costa en dirección tierra adentro). Esta migración se refleja de tres maneras: a) la inundación de la planicie, b) la intrusión de la cuña salina a través de bocas y esteros, y c) la erosión de la línea de costa (Wayne *et al.*, 1993). 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.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

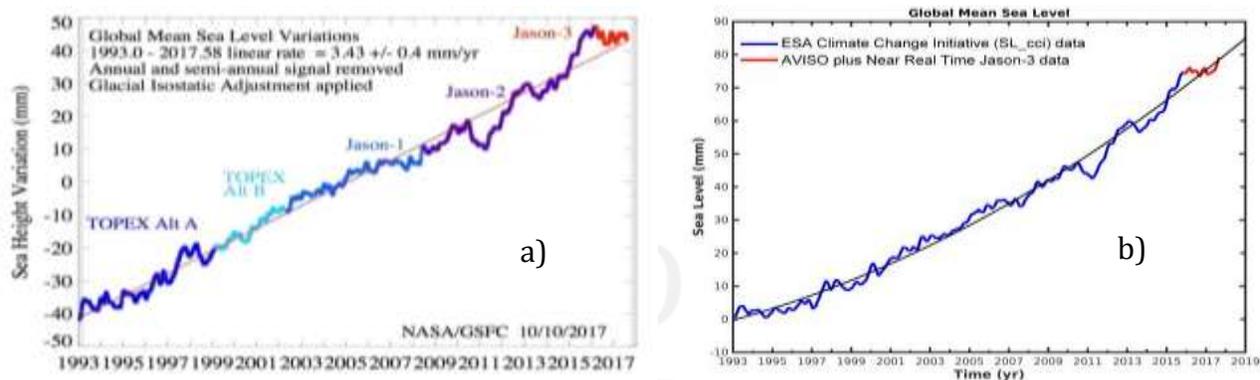


Figura 3. Tendencia de incremento del nivel del mar de acuerdo a la NASA (a) y ESA (b) de acuerdo a datos obtenidos por satélites altimétricos. Fuente: Beckley *et al.*, 2017.

### 3.3 Información mareográfica: tasas de elevación del nivel del mar en Tabasco y Campeche.

Para este trabajo se analizó la serie de datos del Servicio Mareográfico Nacional, disponibles vía red en el sitio <http://www.mareografico.unam.mx>, de las estaciones mareográficas ubicadas en Cd. del Carmen, Campeche, y Coatzacoalcos, Veracruz. Lamentablemente el SMN tiene un retraso considerable en la emisión de datos revisados, la mayoría de los cuales terminan en 1990. Con la información obtenida, se determinó una tendencia, considerando que se tienen datos en todos los meses del año.

Las series históricas contienen datos registrados cada hora, por lo que inicialmente se realizó el filtrado de los datos, eliminando aquellos que salen de proporción en los valores obtenidos; para ello se realizó una media móvil, para eliminar el ruido inherente de los datos, se obtuvo una media mensual y se realizó un análisis estadístico básico. Para el cálculo de tendencia se utilizó el método de mínimos cuadrados, considerando la pendiente de la línea como la tendencia del incremento para el periodo de tiempo estudiado. El método de mínimos cuadrados es sencillo y eficaz, ya que dadas las observaciones y las funciones de ajuste, calcula los parámetros que minimizan los residuos (Ripa, 2002).

El estudio de Zavala *et al.*, (2010) registra que los datos de nivel del mar en México muestran tendencias similares a las globales. Los datos disponibles del SMN muestran tendencias también positivas en la elevación del nivel del mar. En las Figura 4 y Figura 5 se muestran los registros revisados de las estaciones mareográficas ya mencionadas. Podrá observarse que la Estación Coatzacoalcos presenta una tasa de elevación del nivel del mar de 2.9 mm/año para el periodo 1952-1988, mientras que para la Estación Cd. Del Carmen, la tasa de elevación del nivel del mar es de 3.38 mm/año para el periodo 1956-1990.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”



Figura 4. Tendencia del aumento del nivel del mar en la Estación Coatzacoalcos, Veracruz. Fuente: Zavala *et al.*, 2010.

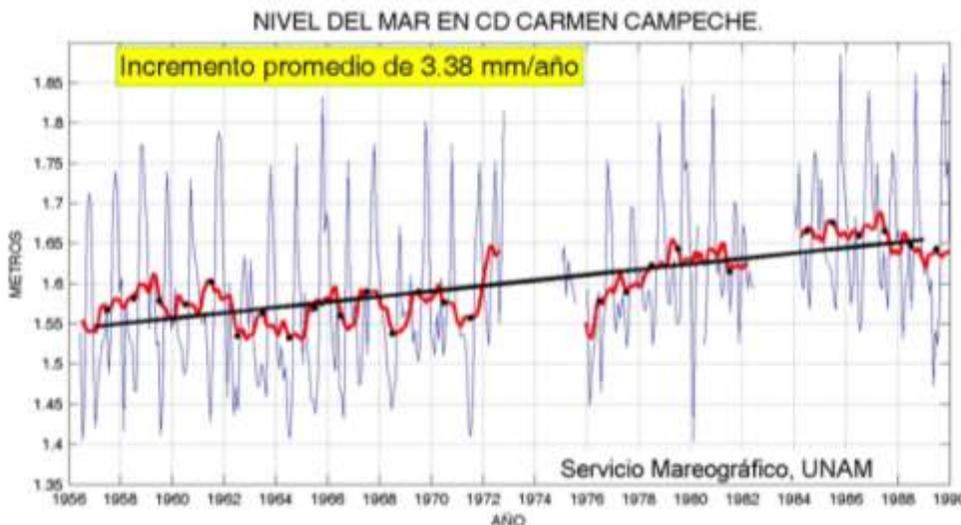


Figura 5. Tendencia del aumento del nivel del mar en Cd. del Carmen, Campeche. Fuente: Zavala *et al.*, 2010.

Es importante mencionar que los promedios mensuales de nivel del mar muestran que las mareas bajas ocurren en los meses de Junio a Agosto, mientras que las mareas altas se presentan de Septiembre a Noviembre (Figura 6).

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

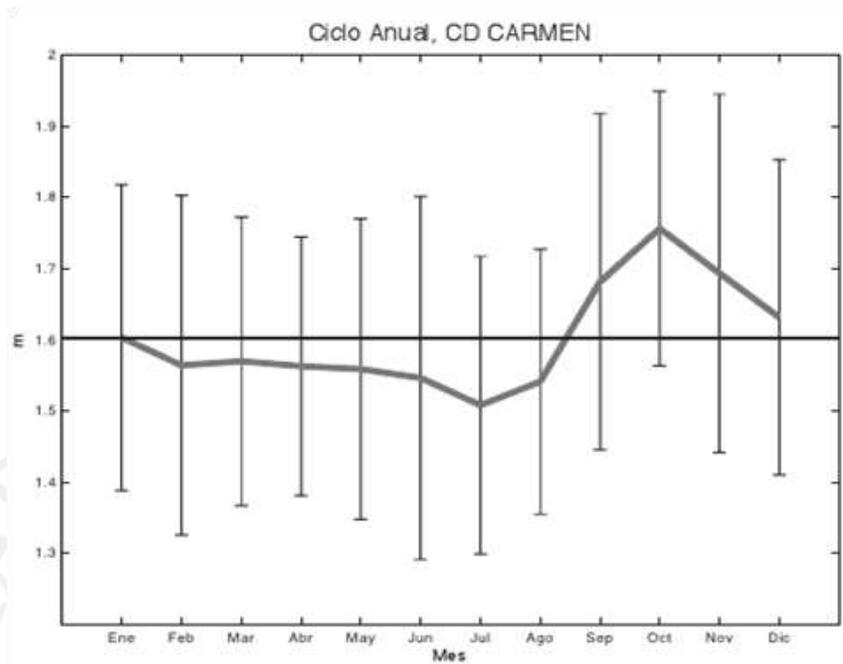


Figura 6. Ciclo anual del nivel del mar en la estación de Cd. del Carmen, Campeche. Fuente: Zavala *et al.*, 2010.

La tasa de cambio del nivel del mar en el sur del Golfo de México ha venido cambiando. Por ejemplo, para la Estación Cd. Del Carmen, el análisis fino de los datos del periodo 1957-1972 mostró un aumento del nivel del mar de 2.65 mm, dando una tasa de 0.17 mm/año (Figura 7), mientras que para el lapso 1957-1990 el aumento total fue de 11.42 mm, lo que dio la tasa de 3.38 mm/año (Figura 5).

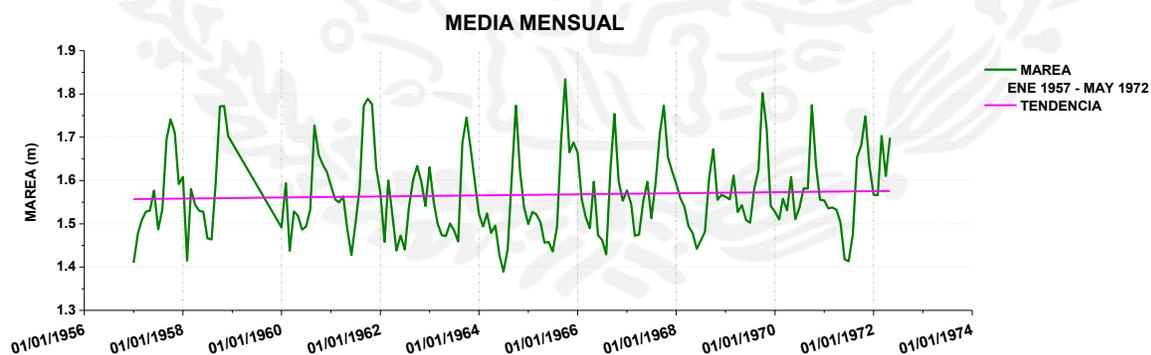


Figura 7. Tendencia de elevación del nivel del mar para los años 1957 a 1972. Fuente: Zavala *et al.*, 2010.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

La cifra de 3.38 mm/año calculada para la Estación Cd. Del Carmen coincide bastante bien con la estimada mediante el modelo Maggic (2009) para escenario de cambio climático B2, el cual dio un valor de 3.5 mm/año (Figura 8). El incremento de nivel del mar reportado por Zavala *et al.*, (2010) es similar al mencionado por Maul (1993), quien encontró que el nivel del mar aumenta en promedio alrededor de 36 mm/año.

Es bueno recalcar que estos valores se han obtenido de mediciones y modelos mareográficos, sin considerar otros procesos que inciden el nivel medio del mar, como el hundimiento/emersión del terreno, la actividad tectónica y la subsidencia por la extracción de petróleo. Estos fenómenos podrían aportar  $\pm 10$  mm/año como ocurre en zonas de Texas.

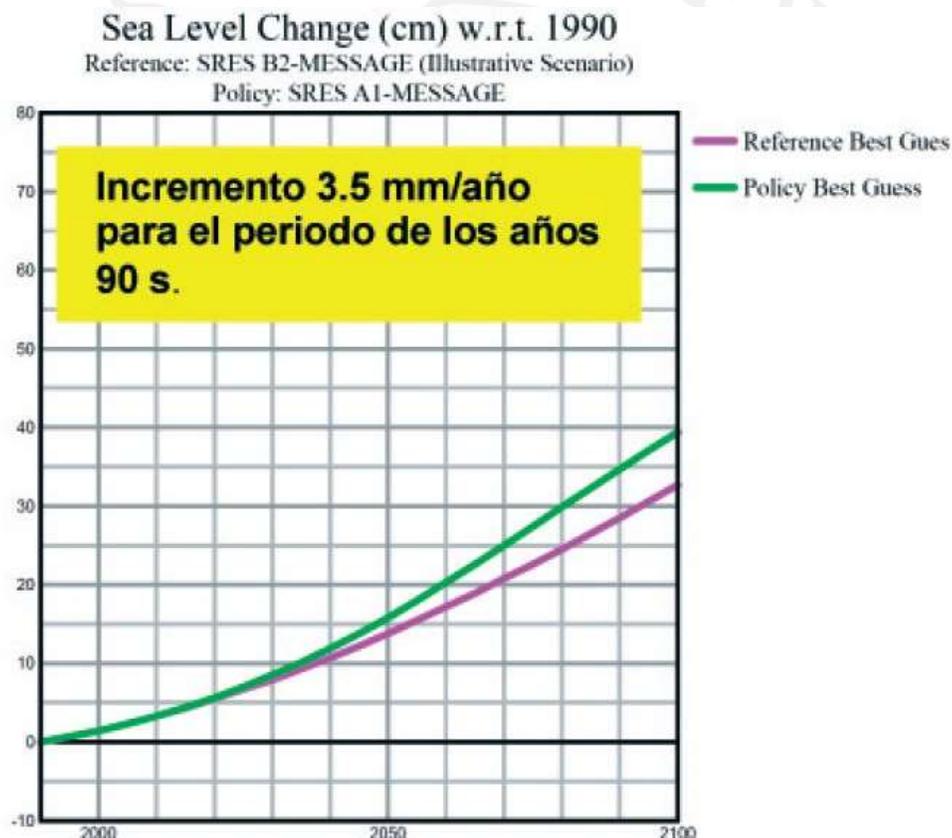


Figura 8. Modelado de la elevación del nivel medio del mar mediante el simulador Maggic. Fuente: Procesada por ANIDE en el simulador Maggic.

Dado que la mayoría de las costas del Golfo de México son costas amplias sobre una extensa plataforma continental, de composición arenosa y con extensos humedales adyacentes, la franja de afectación en casos de elevación del nivel del mar, por pequeñas que sean, son altas. Es decir, cambios muy pequeños en el nivel del mar inundan grandes extensiones de terreno, caso contrario a lo que ocurre en el Océano Pacífico cuya plataforma continental es muy estrecha. Desde 1999 Ortiz y Méndez, 1999 ya habían notado esto.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

En México se ha identificado al delta del Río Grijalva como una zona de alta vulnerabilidad ante el incremento del nivel del mar. Las zonas críticas serán la Laguna de Términos en Campeche, el Complejo Deltaico Grijalva -Usumacinta y el Sistema Lagunar Carmen-Pajonal Machona en Tabasco.

### 3.4 Efecto del cambio climático.

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

Utilizando los escenarios A1 y B2 (de la Cuarta Comunicación IPCC) del programa Maggic, se calcularon las elevaciones posibles del nivel del mar para los años 2030, 2050 y 2100 (Tabla 2). Se observó que, se tengan o no políticas para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, el nivel del mar continuará incrementándose, en valores de 8 cm para el año 2030, 13.5 cm para el 2050 y 33 cm para el 2100, tratándose de un escenario optimista. No obstante, estas modelaciones con datos de la Cuarta Comunicación, ya han sido rebasadas en la actualidad.

Tabla 2. Elevación del nivel medio del mar en cm. Modelada con Maggic, 2009. Fuente: Elaboración propia ANIDE.

Año	Escenario A1 MESSAGE	Escenario B2 MESSAGE
2030	8.5 cm	8 cm
2050	15.7 cm	13.5 cm
2100	39.2 cm	33 cm

En 2012, Bolongaro *et al.*, obtuvieron isolíneas de las elevaciones de 40 cm, 60 cm, 80 cm y 100 cm correspondientes a casos de elevación del nivel del mar de dichas magnitudes. El estudio fue para el Fondo SEMARNAT-CONACYT. El modelo de terreno se calculó a partir de interpolaciones de los datos de elevación del nivel del mar obtenidos por Weiss y Overpeck (2005), de los datos de radar del levantamiento de la topografía mundial realizado por la NASA en 2001, de los datos geodésicos del INEGI y de bancos de nivel disponibles para la zona de trabajo, aplicando un algoritmo de curvatura por mínimos cuadrados. El resultado se muestra en la Figura 9. Configuración de las posibles líneas de costa en el área de estudio por elevación del nivel del mar, en intervalos de 40 cm, 60 cm y 80 cm, y 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m y 14 m. Fuente: Bolongaro-Crevenna *et al.*, 2012 donde aparecen las diferentes franjas de inundación en la zona de Sabancuy (Campeche).



“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”



Figura 10. Modelo de elevación del nivel del mar para los años 2030, 2050 y 2100. Fuente: Bolongaro-Crevenna *et al.* (2012).

La zona más vulnerable es la península de Atasta, la cual, en un lapso de 20 años presentará las primeras inundaciones; le sigue el borde interior de la Laguna de Términos, comprendiendo todos los cuerpos lagunares mayores como la Laguna de Pom y otras, los cuales quedarán cubiertos por agua hacia el 2050. Por último, las zonas de Isla del Carmen, Isla Aguada y Sabancuy presentarán inundaciones cerca del año 2100.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

## 4 TASAS DE EROSIÓN/ACRECIÓN DE SITIOS CRÍTICOS EN LOS ESTADOS DE TABASCO Y CAMPECHE

### 4.1 Introducción

La zona de estudio está comprendida fisiográficamente bajo la dominancia del Río Grijalva-Usumacinta y la presencia de ríos de menor caudal como el Río Tonalá Río González y Río San Pedro y San Pablo.

Si bien la estructura más importante de la zona es la desembocadura del Río Grijalva-Usumacinta con un importante delta de crecimiento, el proceso dominante es el de erosión. Este proceso se observa claramente en la imagen satelital (Figura 11) donde se aparecen el delta del Río Grijalva-Usumacinta y la desembocadura del Río San Pedro y San Pablo (al Este), donde este último río está destruyendo el delta antiguo y actual del Río Grijalva-Usumacinta. Véanse las trazas de los cordones litorales erosionados.



Figura 11. Delta del Río Grijalva-Usumacinta y desembocadura del Río San Pedro y San Pablo. En tonalidades rojas el contenido de clorofilas especialmente de manglares. Véanse los cordones litorales erosionados por el Río San Pedro y San Pablo. Fuente: Imagen Landsat 8 del 02/20/2014.

## 4.2 Metodología

La estimación de tasas de erosión se basa en una metodología creada por ANIDE (Anide, 2013) y consta de dos grandes pasos:

- Obtención de líneas de costa históricas mediante el procesamiento digital de imágenes satelitales ortorrectificadas.
- Cálculo de las tasas de erosión mediante la adaptación del programa “Digital Shoreline Analysis System” –DSAS del USGS (2017).

### 4.2.1 Obtención de líneas de costa

Las imágenes satelitales, fotografías aéreas y cartografía publicada tienen diversos marcos de referencia y de calidad cartográfica. Para que sean útiles como fuente de información sobre la conformación de la línea de costa en una fecha determinada es necesaria la unificación de las proyecciones cartográficas.

Para tal fin se establecieron como marco regulatorio los procedimientos del Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática (INEGI) para la creación de ortofotografías, que en el presente estudio son escala 1:20,000 y una resolución de 2 metros. Por lo anterior, la cobertura ortofotogramétrica de INEGI se tomó como marco de referencia geográfico para la georreferenciación de todo el material cartográfico generado, como imágenes de satélite, fotografías aéreas y mapas impresos, entre otros. Cabe mencionar que los vuelos empleados por el INEGI para la obtención de ortofotografías corresponden al año de 1995, a partir de las cuales se obtuvieron las coberturas vectoriales también proporcionadas por el INEGI.

Se señala también que en caso de encontrar algún error geodésico en el proceso de la georreferenciación del material generado con respecto al del INEGI, esto no afectará la detección de los cambios que se presentan en la zona costera, ya que se trata de una operación de diferenciales entre áreas. En todo caso, se tendrá un error sistemático de origen que se elimina automáticamente, toda vez que se está comparando la misma zona geográfica en diferentes fechas, tomando como base la cartografía elaborada por el mismo INEGI.

Partiendo del marco geográfico de referencia, todo el material cartográfico y digital utilizado se convirtió a la proyección Universal Transversa de Mercator para la Zona 15 sobre un esferoide definido por el DATUM WGS84. La información vectorial consistente de curvas de nivel, vías de comunicación, hidrografía, rasgos culturales, cuerpos de agua, etc., fue adquirida a través del INEGI en formatos shape y dxf a escala 1:50,000. También las coberturas vectoriales se transformaron a la proyección WGS84 a partir de los formatos originales (ITRF92 y NAD27). Cabe mencionar que la información vectorial en formato dxf se cambió a un formato compatible con el Sistema de Información Geográfico (SIG) utilizado (ArcGis 9.3 ®), particularmente al formato shp (shape file), el cual contiene además una base de datos asociada a los vectores con datos de longitud, perímetro, área, etc, según la característica espacial del objeto cartográfico en cuestión. Adicionalmente se introdujeron coberturas tales como límites estatales y municipales. Las ortofotografías a color utilizadas, cubren más del 95% de la zona de trabajo. Estas son un producto cartográfico que corrige

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

la fotografía aérea convirtiéndola en un documento georreferenciado, que se pasa de una proyección central a una ortogonal.

Por otra parte, mediante el procesamiento digital de imágenes (PDI) se re proyectaron todas las ortofotografías al sistema WGS84, en el cual como ya se mencionó, se trabajó toda la información. Esta tarea se realizó con ayuda del módulo “*Wizard Change Datum Projection/Cell Size*” del programa Ermapper® (7.1). Cada ortofotografía fue re proyectada individualmente cuidando todos los parámetros cartográficos, asegurando así, que cada una de estas sea re proyectada correctamente y al armar el mosaico con toda la cobertura geográfica, su traslape sea exacto. Si en alguna re proyección hubiera existido error durante el proceso, éste se detecta en el armado del ortomosaico.

A partir de las imágenes georreferenciadas se obtuvieron las líneas de costa por interpretación directa y vectorización en pantalla. No se emplearon métodos automáticos de detección de bordes dada la precisión que se deseaba obtener y la posible extracción de objetos geomorfológicos no deseables de las imágenes.

Con la finalidad de homologar el criterio de cuál es la línea de costa en una imagen se optó por trazar la de la máxima marea y no la de la interface agua-costa ya que la ubicación de esta interface depende de la hora de la toma de la imagen y de la marea astronómica local. Ambos datos son siempre están disponibles para cada imagen. (Figura 12).



“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Figura 12. Líneas de costa de varias fechas en la desembocadura del Río Grijalva-Usumacinta.. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales ortorrectificadas.

#### 4.2.2 Estimación de tasa de erosión

Para este proceso se realizaron transectos perpendiculares a la línea de costa utilizando la extensión denominada “Digital Shoreline Analysis System” –DSAS– disponible en su versión 4.3.4730 para ArcGIS 10.2.

DSAS computa las tasas de cambio de líneas de costa utilizando cuatro técnicas diferentes: (1) tasa de punto final, (2) regresión lineal simple, (3) regresión lineal ponderada y (4) mínimos cuadrados. Adicionalmente, para los métodos de regresión simple y regresión lineal ponderada, también son calculados parámetros como: el error estándar, el coeficiente de correlación y el intervalo de confianza. En este estudio el intervalo de confianza fue del 95%. Los resultados de los cálculos de la tasa se almacenan en una tabla que es vinculada a los transectos por medio de un campo de atributos en común. Para este estudio, la tasa que reportamos en nuestros resultados corresponde a la técnica de mínimos cuadrados.

Para realizar el cálculo de la tasa de erosión DSAS utiliza líneas base que se trazan en forma paralela a las líneas de costa históricas, estas líneas son auxiliares para el cálculo y se pueden trazar al interior del área marina, al interior del continente, o en ambas posiciones. A partir de dichas líneas, DSAS traza en forma automática transectos perpendiculares a las líneas de costa, los cuales son ubicados a cierta equidistancia definida por el usuario. En este estudio para todos los destinos, la equidistancia aplicada fue de 20 metros entre cada transecto (Figura 13).

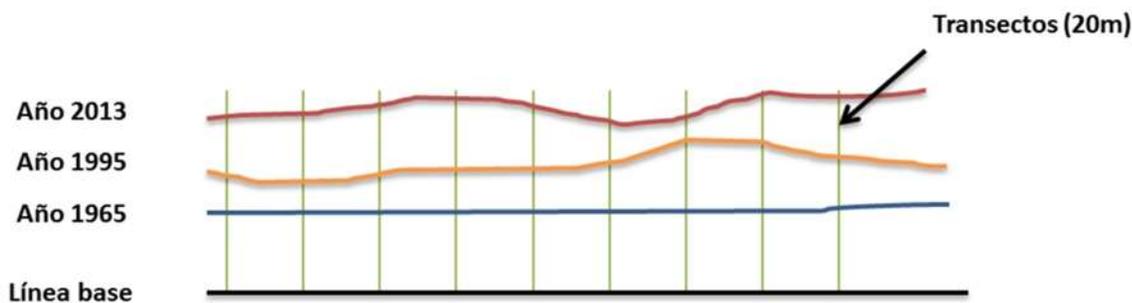


Figura 13. Ejemplo del trazo de una línea base y transectos utilizados por el sistema DSAS.

Posteriormente, el sistema mide las distancias que existen de las líneas base a la intersección con cada línea de costa histórica. El cálculo de cada método considera la fecha de la línea de costa como la variable independiente y la distancia desde la línea base como la variable dependiente.

La Figura 14 muestra la forma en que el programa DSAS realiza el cálculo de la tasa de erosión por los métodos de regresión lineal y mínimos cuadrados.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

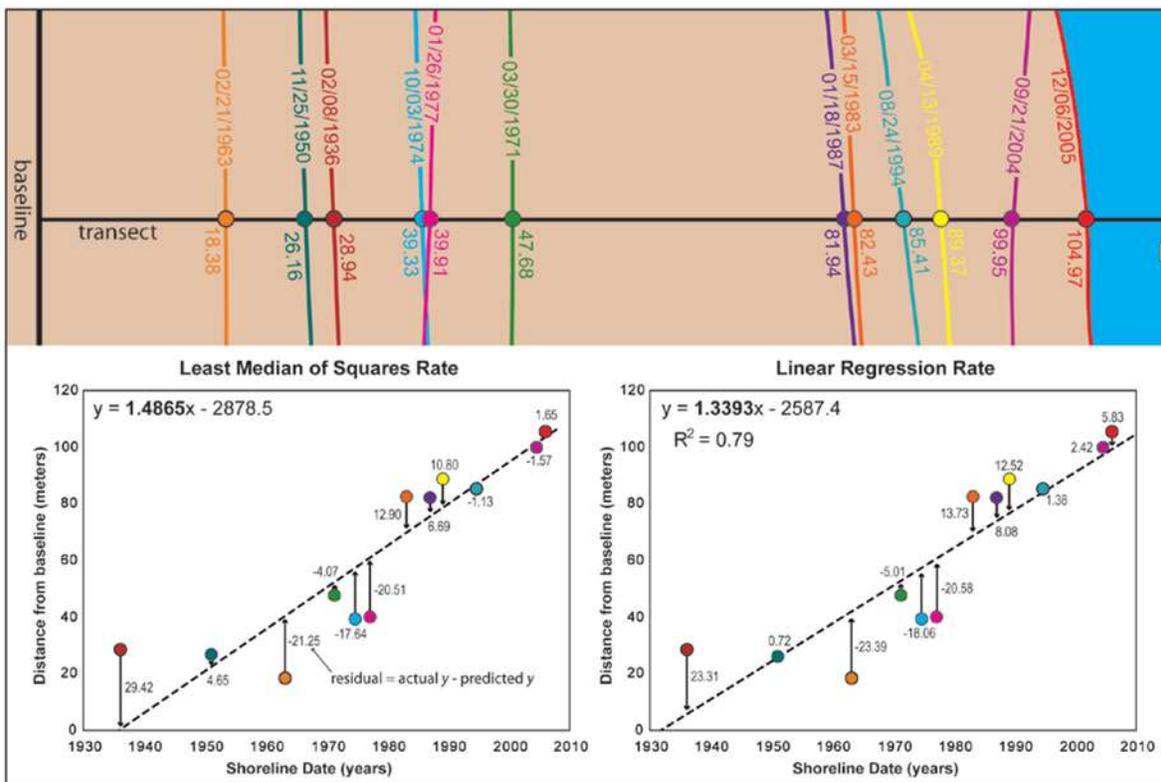


Figura 14. Cálculo de la tasa de erosión por las técnicas de regresión lineal y mínimos cuadrados en el programa DSAS (Fuente: Himmelstoss, 2009).

### 4.3 SELECCIÓN DE SITIOS DE MONITOREO DE EROSIÓN/ACRECIÓN

Desde 2005 la Academia Nacional de Investigación y Desarrollo realiza estudios de dinámica costera en en Tabasco: Márquez-García et al., 2010; Ayala-Pérez, 2013; y en Campeche: Torres-Rodríguez et al., 2007; Márquez-García et al., 2008; Torres-Rodríguez et al., 2010; Torres-Rodríguez et al., 2012; Bolongaro-Crevenna et al., 2011; y Bolongaro-Crevenna et al., 2012.

Con base en los estudios anteriores se seleccionaron sitios en los que los procesos de erosión y acreción son “críticos” y se realizó una vista “prospectiva” con personal de IMTA, durante el mes de Diciembre de 2017. En la Tabla 1 se muestra el listado de los sitios y sus coordenadas geográficas. Durante el recorrido de campo se seleccionaron dos sitios adicionales para ser incorporado al listado de “sitios críticos”.

Tabla 3. Coordenadas de los sitios evaluados durante el trabajo de campo prospectivo en diciembre del 2017.

Sitio Tabasco-Campeche	Coordenadas UTM		Cota (m)
	X	Y	Z
Boca Sánchez Magallanes	409859	2023507	1.7
Barra Pajonal (*)	429655	2030722	0
Barra Tupilco	454372	2037598	2.9

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Sitio Tabasco-Campeche	Coordenadas UTM		Cota (m)
	X	Y	Z
Tajón	466310	2038601	2.3
Playa Varadero (*)	476360	2038907	0
Pozo Tizón	529782	2052750	2.5
Rio Grijalva	532813	2058514	2.1
Campo Costero	538553	2058026	0.7
Nuevo Campechito	556255	2062247	1.93
CPTG-Atasta	588053	2066085	1.93
Club de Playa	634527	2066576	2.29
Bahamita	641405	2070211	1.79
CASES	641405	2070211	1.79
San Nicolasito	649855	2074253	1.79
CONANP 2	663269	2082667	1.79
Las Bombas	669888	2090017	1.93
Sabancuy	690330	2100664	1.93
El Hueso	714754	2117894	2.29

\* Sitios nuevos con cota en 0 msnm propuesta como referencia local inicial del perfil prospectivo. En trabajos futuros se definirá su elevación formal.

#### 4.4 IMÁGENES SATELITALES DISPONIBLES

La reconstrucción histórica de la línea de costa se realizó a escala regional (1:50,000). El periodo de observación fue de 1967 a 2010, a partir de documentos cartográficos de diversa índole: fotografías aéreas, mapas topográficos de INEGI en formato vectorial, ortofotografías de INEGI en formato raster e imágenes de los satélites Landsat (5 y 7), Quickbird y Corona, todas ellas en formato raster. En el Tabla 4 se muestra una lista de documentos cartográficos e imágenes utilizadas. Cabe mencionar que para el presente proyecto se adicionaron imágenes del satélite Corona de 1967, las cuales tienen una resolución de 1.8 m. Estas son imágenes que desclasificó la CIA y sorprende la resolución de esa época en comparación con las imágenes LANDAST de 1986 que tenían una resolución de 56 m.

Tabla 4. Descripción de la información recopilada.

Material	Formato	Año	Fuente	Tipo de datos
Cartografía del área	Digital	1995	INEGI	Vectorial
Imágenes de Satélite Corona, Landsat TM; QuickBird	Digital	1967, 1988, 2000, 2003, 2006, 2008, 2010	Diversas	Imagen Raster
Ortofotografías	Digital	1995, 1996, 2008	INEGI	Imagen Raster

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

#### 4.5 Tasas de erosión/acreción de sitios críticos de los estados de Tabasco y Campeche

#### 4.6 Tasas de erosión/acreción en el Estado de Tabasco

Los resultados de tasas de erosión de los sitios críticos del Estado de Tabasco durante el periodo 1967-2010 se muestran en la Tabla 5 y Figura 15.

Tabla 5. Tasas de erosión/acreción y desplazamiento neto de la línea de costa de sitios críticos del Estado de Tabasco durante el periodo 1967-2010. Fuente: ANIDE, elaboración propia.

TABASCO 1967-2010			
Sitio	Tasa de erosión (m/año)	Tasa de acreción (m/año)	Desplazamiento total /m)
Boca Sánchez Magallanes	-1.39		-20.68
Barra Pajonal		1.33	57.62
Barra Tupilco		0.47	20.46
Tajón		0.56	24.18
Playa Varadero	-1.09		-47.21
Campo Tizón	-6.6		-284.88
Rio Grijalva		4.05	174.76
Campo Costero		1.74	75.23

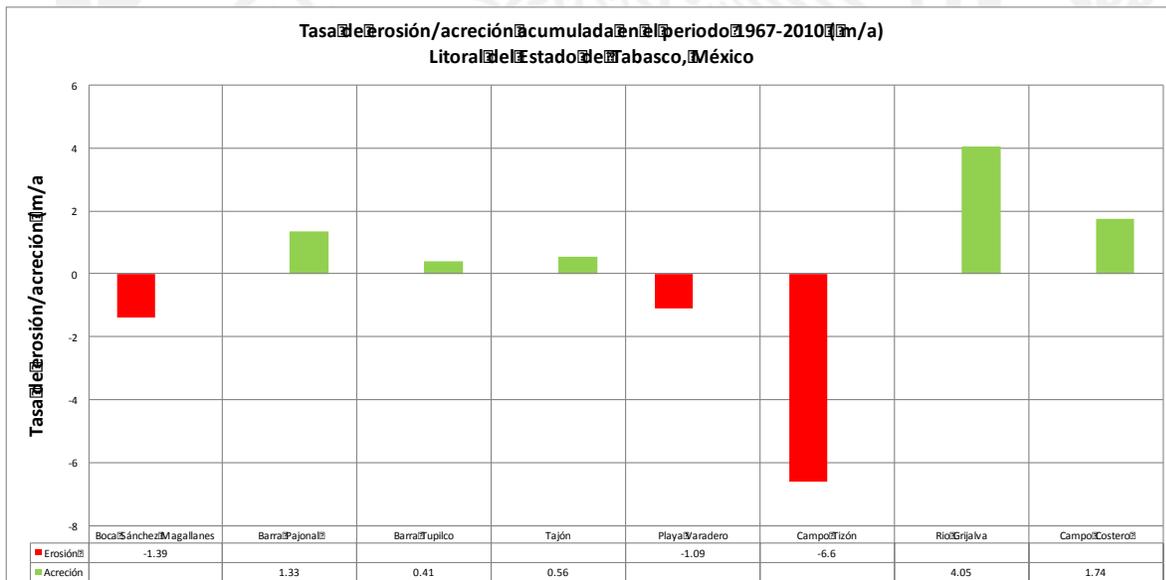


Figura 15. Tasas de erosión de ocho playas del Estado de Tabasco, para el periodo 1967-2010. Fuente: ANIDE, Elaboración propia.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Los resultados se han dispuesto en sentido Oeste a Este, coincidiendo con la geografía de la línea de costa. Podrá conservarse que la zona de Sánchez Magallanes es la que presenta los mayores niveles de erosión costera con una tasa de  $-1,39$  m/año. En el año 2013 se colocaron geotubos rellenos de sedimento y su efecto no está evaluado en este estudio.

Continuando hacia el Este, la zona de mayor erosión de Tabasco es la zona del campo petrolero Tizón el cual tiene una tasa de erosión de  $-6.6$  m/año. La costa de este campo ha sido intervenida por Pemex con diversas metodologías de protección, incluyendo geotubos rellenos de lodo, que no funcionaron pues el lodo se escapó de los mismos, barreras metálicas hincadas, almohadillas de concreto, bloques de concreto (matatenas) y enrocamiento (Figura 16). La erosión se ha logrado contener pero el sitio continúa en erosión y debe darse mantenimiento continuo. Las almohadillas de concreto se han degradado y solo los bloques están protegiendo al sitio.



Figura 16. Estructuras de protección Campo Tizón Tabasco, 2017.

Un punto crítico al que no se tuvo acceso es la terminal de Dos Bocas donde se ubican los tanques de almacenamiento de Pemex para la exportación. Esta terminal tiene aciagos problemas de erosión. Contiguo a esta instalación se ubicó la playa El Varadero, en la cual se determinó una erosión de  $1.09$  m/año.

Los demás sitios del Estado de Tabasco se encuentran en acreción (crecimiento de playa) siendo el sitio denominado como Río Grijalva (ver mapa de localización) el de mayor crecimiento, con una tasa de  $4.05$  m/año, lo cual es consistente con la aportación pluvial del mencionado río (Figura 17).

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”



Figura 17. Playa Río Grijalva, Tabasco 2017

#### 4.7 Tasas de erosión/acreción en el Estado de Campeche

Por otra parte, los resultados de tasas de erosión de los sitios críticos del Estado de Campeche durante el periodo 1967-2010 se muestran en la Tabla 6 y Figura 18.

Tabla 6. Tasas de erosión/acreción y desplazamiento neto de la línea de costa de sitios críticos del Estado de Campeche durante el periodo 1967-2010. Fuente: ANIDE, elaboración propia.

CAMPECHE 1967-2010			
Sitio	Tasa de erosión (m/año)	Tasa de acreción (m/año)	Desplazamiento total /m)
Nuevo Campechito	-5.1		-209.77
CPTG-Atasta	-8.66		-356.15
Punta Disciplina	-20.6		-850.11
Club de Playa		0.64	26.27
Bahamita	-6.84		-234.93
CASES	-1.93		-66.39
San Nicolasito	-1.56		-53.51
CONANP 2	-4.64		-159.25
Las Bombas	-9.21		-316.41
Sabancuy	-5.03		-172.9
El Hueso (Puente Chenkán 1)	-2.61		-89.52

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

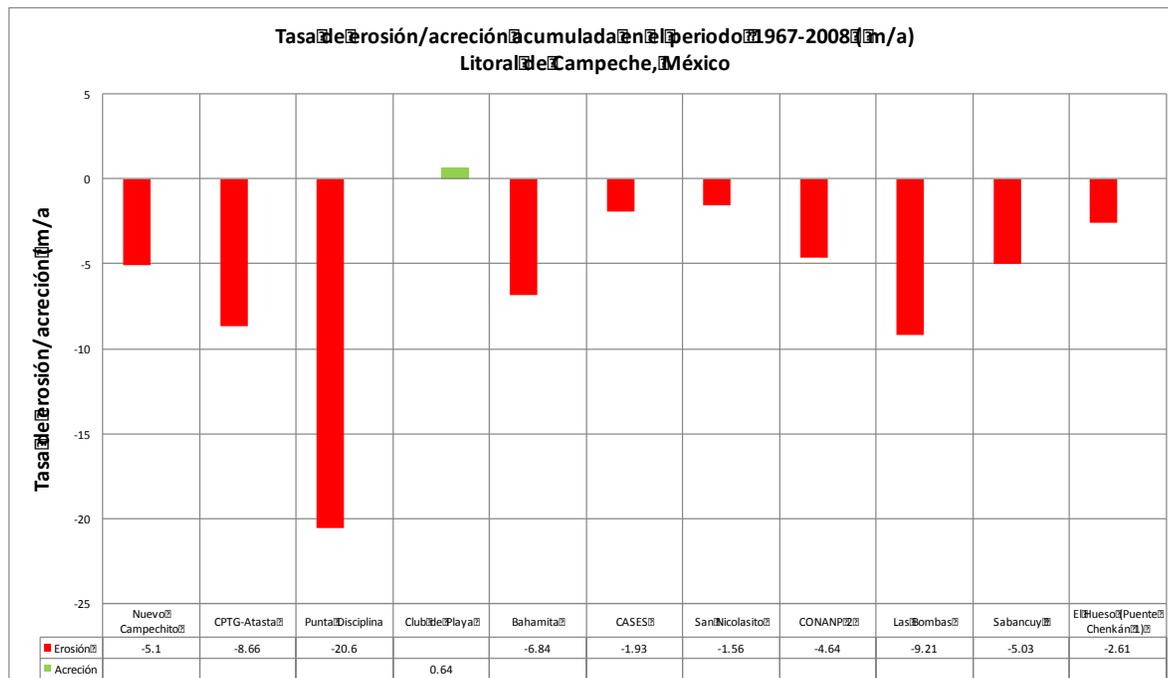


Figura 18. Tasas de erosión de playas del Estado de Campeche, para el periodo 1967-2010. Fuente: ANIDE, Elaboración propia.

En contraste con los problemas erosivos del Estado de Tabasco, Campeche tiene un proceso erosivo en casi todo su costa, desde Champotón hasta el Río San Pedro y San Pablo.

El caso de Nuevo Campechito también es importante de reseñar, ya que presenta tasas de erosión de -5.1 m/año y un pérdida total de 209 m en un periodo de 43 años. (Figura 19).

Campeche presenta el sitio más erosionado del país. Durante el periodo 1967 a 2010 la tasa de erosión en la llamada Punta Disciplina fue de -20.6 m/año, con un desplazamiento neto de -850 metros de pérdida de playa. Las demás playas estudiadas presenta tasas de erosión de -1.5 a -9.21 m/año.

Por su parte la zona costera de la CTPG Atasta, la cual es un sitio estratégico para la producción de la Sonda de Campeche, tiene una tasa de erosión de -8.66 m/año, con una pérdida de playa de -356 m durante el periodo de 1967 a 2010. La playa fue intervenida en 2013 mediante la colocación de dos escolleras de protección conformadas por bloques de concreto y “matatenas”. Los resultados de esta obra aún no están evaluados. La visita prospectiva confirmó la presencia de la obra y la acumulación de sedimentos muy finos a su interior. A nivel regional no se conocen los efectos de la misma. (Figura 20).

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”



Figura 19. Playa Nuevo Campechito, presencia de materia orgánica y acumulación de sedimento, Campeche,



2017.

Figura 20. Playa CPTG (Atasta), Obras de protección formadas por escolleras de bloques de concreto y matatenas. Fotografía de 2017.

Los sitios CASES y San Nicolasito presentan tasas de erosión moderadas, de 1.93 y 1.56 m/año, respectivamente (Figura 21 y Figura 22). En el sitio San Nicolasito se han realizado obras de protección con enrocamiento para protección de las líneas de alta tensión de CFE. No obstante estas obras presentan importantes socavaciones al bajo de algunas de las torres de alta tensión, las cuales se encuentran en riesgo.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

El único sitio con crecimiento de playa es el Club de playa, con una tasa de 0.64 m/año, producto de diversas intervenciones en el sitio para lograr su equilibrio (Figura 23). Ambos sitios son importantes porque alojan infraestructura de Pemex y de transmisión de energía eléctrica (Figura xx y xx).



Figura 21. Playa CASES, Campeche 2017. Nótese los intentos de protección de la playa con rocas dispuestas en la playa.



Figura 22. Playa San Nicolasito, procesos erosivos en la zona de supraplaya, Campeche 2017. Nótese manchas de aceite provenientes de una plataforma.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”



Figura 23. Club de playa en 2017. Playa protegida artificialmente.

## **5 . Metodología SAR interferométrica para la determinación y monitoreo de fenómenos de subsidencia/emersión en la zona costera de los estados de Tabasco y Campeche**

### **5.1 Introducción.**

La subsidencia es un término geológico para definir el movimiento descendente y diferencial del terreno, dicho movimiento es relativo a un datum y representa el asentamiento o hundimiento paulatino de la superficie terrestre, sus causas son diversas, y pueden ser tanto naturales como antropogénicas. En general, implican la compactación (que reduce el volumen de sedimentos y aumenta la densidad), los procesos y movimientos tectónicos, los ajustes térmicos, así como el acortamiento o el estiramiento de la litosfera. Además, existen otros factores que ocasionan subsidencia en el terreno, los más comunes son por la acción individual o conjunta de colapso de minas, construcciones subterráneas, drenado de suelos orgánicos, disolución de carbonatos en rocas cársticas y humificación de suelos secos. La subsidencia causada por compactación de sedimentos se origina a su vez por la extracción de fluidos confinados en el subsuelo, tales como el agua subterránea, los hidrocarburos (petróleo y gas) y la explotación de los recursos geotérmicos (Chen *et al.*, 2000; Strozzi *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2009). Todas estas causas se manifiestan en la superficie del terreno mediante deformaciones verticales cuyas variaciones abarcan desde pocos milímetros hasta varios metros, durante períodos que comprenden desde algunos minutos hasta muchos años.

La principal causa de la subsidencia en zonas urbanas está relacionada con la extracción acelerada de agua de los mantos acuíferos (Poland, 1984), la cual ocasiona una deformación inelástica permanente del acuitardo (Amelung *et al.*, 1999). Un caso muy conocido es el de la Ciudad de México, donde se han estimado hundimientos de hasta 2.5 mm/mes, mediante técnicas de interferometría de imágenes de radar. (Figura 24).

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

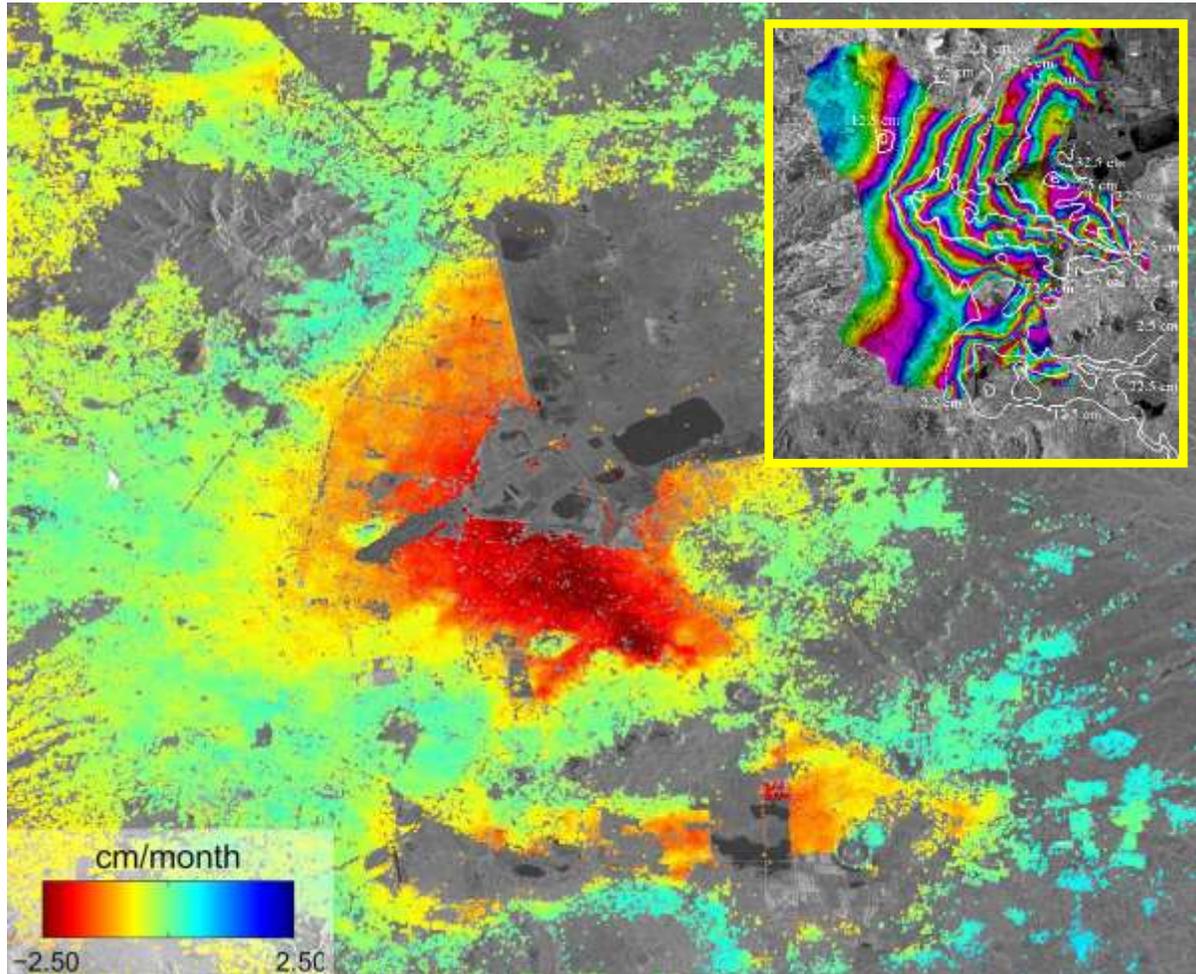


Figura 24. Subsistencia de la ciudad de México ocasionada por la extracción de agua. A partir del procesamiento InSAR de cinco imágenes Sentinel 1-A adquiridas entre el 3 de Octubre y el 5 de Diciembre de 2014. Fuente: ESA, 2014. En el recuadro se muestra un mapa de interferometría de imágenes adquiridas en 1996; cada ciclo de color representa 5cm/año de subsistencia. Fuente: ESA, 2002.

La subsistencia representa un serio problema debido a los riesgos y daños ocasionados en construcciones y a sus habitantes (Hernández-Jaramillo, 2012). Las afectaciones pueden presentarse como daños en edificios, vías de comunicación, puentes, líneas de vida, daños ambientales y pérdidas humanas (Arzate *et al.* 2006; Marfai y King, 2007).

En general, para el monitoreo de la subsistencia se han utilizado métodos como la nivelación convencional, el uso de sistemas GPS y la Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR) (Cabral-Cano *et al.*, 2008; Díaz-Salmerón, 2010; López-Quiroz *et al.*, 2009; Osmanoglu *et al.*, 2011; Chaussard. *et al.* 2014). Los estudios topográficos de nivelación en el terreno son el método tradicional con el cual se puede calcular con precisión la subsistencia del terreno, sin embargo, para cubrir áreas muy grandes resultan muy costosos y consumen una gran cantidad de tiempo (Strozzi *et al.*, 2001). Por otra parte, el uso de GPS aunque es muy preciso, tiene como desventaja principal que su cobertura espacial está limitada por el número de GPS instalados y el costo del equipo. Por lo

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

anterior, debido a su precisión y gran potencial, las técnicas InSAR, se han posicionado en los últimos años como las más utilizadas debido a su precisión para detectar deformaciones milimétricas, además de ofrecer una amplia cobertura espacial y temporal (Galloway *et al.*, 1998).

InSAR es una técnica de percepción remota activa, para la cual se requieren dos imágenes SAR de una misma zona. A partir de la diferencia de fase de estas imágenes se obtiene una nueva imagen denominada interferograma. La adquisición de las escenas puede ser simultánea, por un satélite con dos antenas separadas perpendicularmente en la dirección del azimut (InSAR de un solo paso), o pueden ser dos imágenes adquiridas por la misma antena, recorriendo el mismo trayecto en diferentes tiempos; a esto último llamamos interferometría de pase repetido. La diferencia de fase se observa como cambios en el patrón de franjas del interferograma, que pueden deberse a factores como desplazamientos en la superficie, topografía, hundimientos o levantamientos del terreno, cambios de humedad en el suelo, cambio del nivel de agua, etc. (López-Castillo, 2015).

En el presente documento se establecen los términos metodológicos y técnicos que se deben tomar como referencia para abordar el análisis de la subsidencia en los Estados de Tabasco y Campeche, México, en particular por medio del uso de técnicas InSAR para obtener series de tiempo de la subsidencia, a partir de interferogramas corregidos por errores atmosféricos, topográficos, orbitales y de desdoblado de fase.

## **5.2 Disponibilidad actual de imágenes en modo interferométrico de distintos satélites disponibles.**

### **5.2.1 Consideraciones sobre el área de estudio**

La delimitación particular del área de estudio deberá tener en consideración los siguientes criterios:

1. Adecuado cubrimiento de la zona costera para vincular el estudio con el cambio climático en particular con la erosión costera y los efectos del incremento del nivel del mar.
2. Incluir superficies contiguas a la costa con una altitud menor a 12 metros sobre el nivel medio del mar (msnmm).
3. Incluir también las áreas mayores a 12 msnmm, siempre que en la cartografía geomorfológica de la zona formen parte de sistemas costeros o fluviales.
4. Incluir las principales áreas urbanas costeras y priorizarlas de acuerdo a su distribución espacial.
5. Integrar zonas con extracción de hidrocarburos e infraestructura asociada a dicha industria.
6. Integrar al análisis el área de influencia de la desembocadura de los principales ríos.
7. Ajustar las áreas finales de acuerdo a la disponibilidad espacio-temporal de imágenes.
8. Elegir preferiblemente zonas con cubrimiento de Modelos Digitales de Elevación del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI), elaborados con tecnología lidar y disponibles a resolución espacial de 5 metros.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

De acuerdo con lo anterior se propone como área de estudio la región comprendida en la Figura 25.



Figura 25. Localización del área propuesta y de las localidades urbanas prioritarias.

El área de estudio propuesta comprende 42,264 km<sup>2</sup> que representan el 51% de la superficie de ambos estados. La cobertura para Tabasco es del 78% y para Campeche del 40%. La población de esta zona fue de 2,680,007 habitantes para el 2010, es decir, concentró el 87.5%, de la población total de ambas entidades. En forma local se propone estudiar las áreas urbanas la Tabla 7. Localidades urbanas propuestas para análisis InSAR en Tabasco y Campeche, que en conjunto suman 1,169,161 habitantes.

Tabla 7. Localidades urbanas propuestas para análisis InSAR en Tabasco y Campeche

Municipio	Nombre de localidad	Habitantes
Champotón	Champotón	30,881
Carmen	Ciudad del Carmen	169,466
Escárcega	Escárcega	29,477
Campeche	San Francisco de Campeche	220,389
Calkiní	Calkiní	14,934
<b>Subtotal de Población en Campeche</b>		<b>465,147</b>
Cárdenas	Cárdenas	91,558
Comalcalco	Comalcalco	41,458
Emiliano Zapata	Emiliano Zapata	20,030
Centla	Frontera	22,795
Huimanguillo	Huimanguillo	27,344
Huimanguillo	La Venta	8,821

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Municipio	Nombre de localidad	Habitantes
Macuspana	Macuspana	32,225
Paraíso	Paraíso	25,186
Centro	Playas del Rosario (Subteniente García)	21,893
Teapa	Teapa	26,548
Tenosique	Tenosique de Pino Suárez	32,579
Centro	Villahermosa	353,577
<b>Subtotal de Población en Tabasco</b>		<b>704,014</b>

### 5.2.2 Satélites SAR disponibles

Ya que el tipo de estudio considerado es retrospectivo para conocer la evolución de la subsidencia, se recomienda el uso de las imágenes de archivo de ERS-1 y ERS-2, los cuales conformaron la primera constelación de satélites de monitoreo terrestre con sistema SAR que tuvo la “European Space Agency” (Agencia Espacial Europea, **ESA**), operando en un periodo de 20 años a lo largo del cual aportaron una importante cantidad de datos, a los que se sumó Envisat en 2002. Actualmente, la ESA se encarga del control de la misión Sentinel, con los satélites Sentinel 1A y 1B en órbita dando continuidad a la colección de datos en banda C-SAR (Covarrubias-Calderón, 2016). La Tabla 8 muestra algunos otros satélites con sistema SAR incorporado que permiten realizar InSAR.

Tabla 8. Satélites usados en InSAR (Fuente: Modificada de Covarrubias-Calderón, 2016).

SATÉLITE	AÑO	CICLO (DÍAS)	BANDA
ERS1	1991 - 2000	35	C, Ku
ERS2	1995 - 2011	35	C, Ku
Radarsat-1	1995 - 2013	24	C
Radarsat-2	2007 - actual	24	C
Envisat	2002 - 2012	35	C
ALOS PALSAR	2006 - 2011	46	L
ALOS 2 PALSAR 2	2014 - actual	46	L
ALOS 3	2015+	46	L
TerraSAR-X	2007 - actual	11	X
COSMO/SkyMed 1	2007 - actual	16	X
COSMO/SkyMed 2	2007 - actual	16	X
COSMO/SkyMed 3	2008 - actual	16	X
COSMO/SkyMed 4	2010 - actual	16	X
SeaSat	1978: 28/06 - 10/10	17/3	L
JERS-1	1992 - 1998	44	L
SIR-C	1994	1	X, C, L
Sentinel-1A	2014 - actual	12	C
Sentinel-1B	2016 - actual	12	C
CryoSat-2	2010 - actual	30	X
KOMPSat-5	2014 - actual		X

### 5.2.3 Datos SAR disponibles para la zona de estudio

Para documentar la disponibilidad de imágenes, se adjunta el resultado de una búsqueda de imágenes SAR libres de costo (ESA, 2017b). Dicha búsqueda no fue exhaustiva y se limitó a las imágenes que fueron capturadas por el satélite Sentinel 1A que pertenecen a la Agencia Espacial Europea (ESA). (Tabla 9).

Tabla 9. Imágenes SAR en modo interferométrico disponibles para la zona de Tabasco-Campeche, del periodo 2014 a 2017. Fuente: elaboración propia a partir de la plataforma Copérnico (ESA, 2017b).

Localidad	Misión	Banda [cm]	Propietario	Modo de adquisición	Resol. espacial [m]	Periodo de muestreo [días]	Fecha de operación	No. Img	Fecha de inicio	Fecha de término (*)	Órbita	Fra me	Path/ Track
Tabasco 1	Sentinel-1A	C	European Space Agency	Interferometric Wide (IW)	5x20	12	2014-actualmente	44	25/4/15	28/11/17	Ascendente	53	136
Tabasco 2	Sentinel-1A	C	European Space Agency	Interferometric Wide (IW)	5x20	12	2014-actualmente	24	7/12/14	6/2/17	Ascendente	54	34
Campeche 1	Sentinel-1A	C	European Space Agency	Interferometric Wide (IW)	5x20	12	2014-actualmente	45	22/10/14	5/12/17	Ascendente	57	63
Campeche 2	Sentinel-1A	C	European Space Agency	Interferometric Wide (IW)	5x20	12	2014-actualmente	37	9/1/16	5/12/17	Ascendente	62	63

Como resultado se encontraron en total cuatro delimitaciones de escenas o *frames* de dicho satélite, que cubren toda el área de interés (Figura 26). Respecto a la disponibilidad de imágenes resultaron 151 de paso ascendente (Yague-Martínez et al., 2016). Para la misión Sentinel 1A las imágenes a utilizar se adquieren en modo “Interferometric Wide” (con una amplitud de muestreo de 250 km por lado), cada “subfranja” está en modo TOPS (Terrain Observation by Progressive Scans) y cuenta con una resolución espacial de 5 x 20 m, en rango y azimut, respectivamente (Prats-Iraola, et al. 2015).

El sensor SAR de Sentinel 1A, opera bajo la banda C del espectro de microondas, con una longitud de onda de 5.6 cm, con un ángulo de incidencia que varía entre los 33 y 43 grados, y cuenta con un periodo de re-visita entre cada imagen de 12 días, esta misión es operada por el programa “Copernicus” de la ESA (ESA, 2017b; Yague-Martínez et al., 2016). En la Figura 27 se muestran los modos de adquisición de imágenes del satélite Sentinel 1-A.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

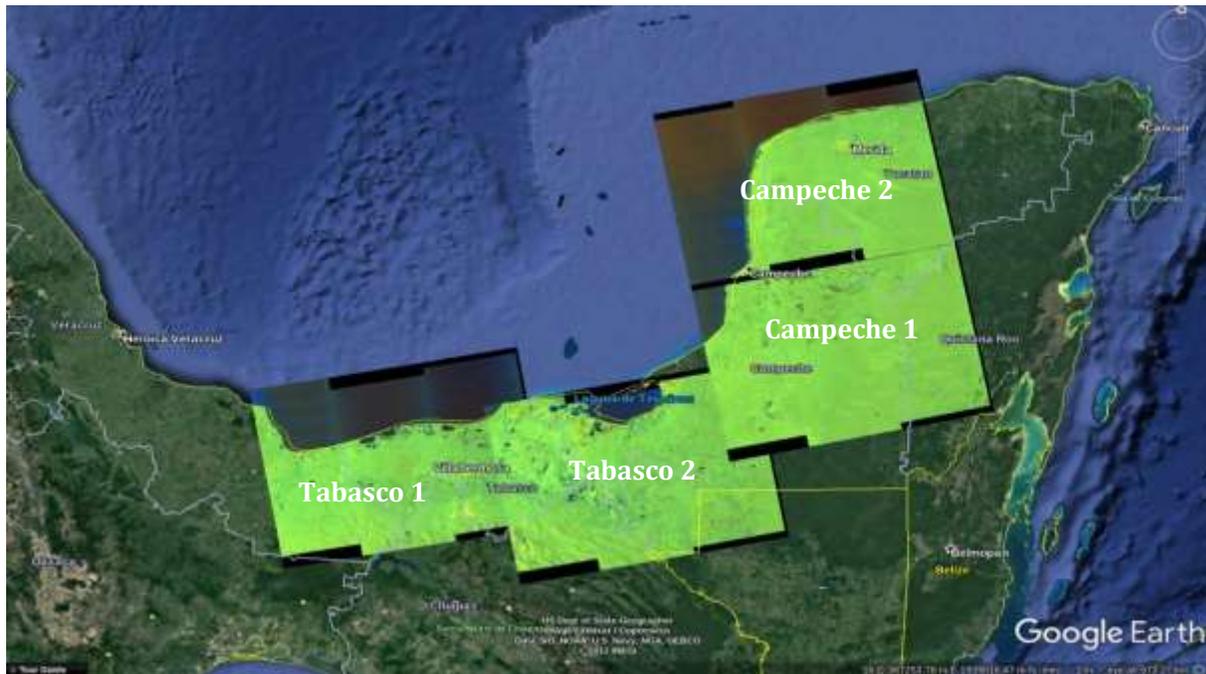
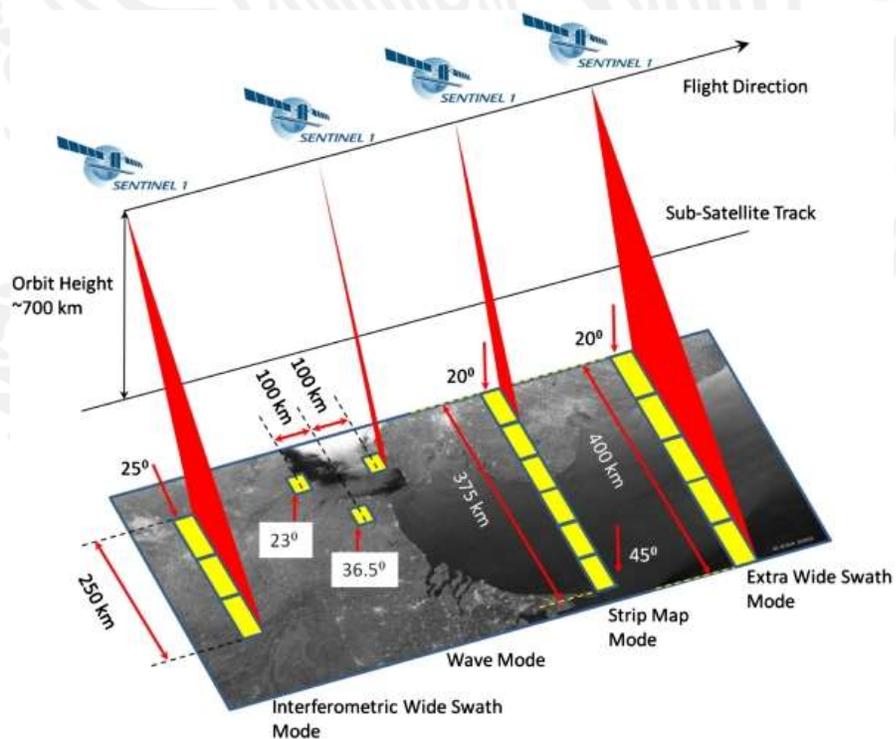


Figura 26. Disponibilidad de imágenes Sentinel 1A para la zona de Tabasco-Campeche, periodo 2014-2017.



Fuente: Elaboración propia a partir de la plataforma Copérnico (ESA, 2017b).

Figura 27. Modos de adquisición de imágenes por el satélite Sentinel 1-A Fuente: ESA, 2017.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Por otra parte, entre los datos de libre acceso, es importante destacar las imágenes del satélite ALOS (tabla 2), el cual operó del 2006 al 2011, dicho satélite incluía el sensor PALSAR-1, un radar SAR en banda L con una longitud de onda de 24 cm, su órbita era en sincronía solar a una altitud de 691.65 km y su ciclo de revisita fue de 46 días. PALSAR-1 tenía hasta 132 modos de observación, debido a las diferentes combinaciones que se podían realizar con ángulos de inclinación variable y con las opciones que brinda la polarización completa, aunque el modo de polarización HH fue el de referencia al favorecer la alta penetración (Furuta, 2005). Por tales características se requiere considerar en el análisis las mejores imágenes ALOS PALSAR 1 que estén disponibles para el análisis interferométrico.

### 5.3 Métodos de apoyo de campo.

Se recomienda utilizar datos DEM de 5 metros de resolución espacial del INEGI, siempre que estén disponibles, así como apoyar el estudio con levantamientos y mediciones GPS de alta precisión, particularmente en puntos y perfiles, tanto para correcciones así como para evaluación de resultados. De igual forma se recomienda apoyar el estudio con los datos de alta precisión de la red geodésica nacional del INEGI.

Una de los requerimientos más importantes para el procesamiento de imágenes de radar es la rectificación en el sistema de proyección adecuado. Esta operación se realiza después que las imágenes de radar que se emplearán hayan sido co registradas. Para ello se requiere del apoyo de puntos externos geo localizados con la mayor precisión posible. A estos puntos se les denomina “GCP (Ground Control Points)”.

La obtención de puntos externos puede hacerse mediante levantamiento de campo de objetos altamente reflectores permanentes y fijos tales como las esquinas de edificaciones, infraestructura presente, cruces de carretera, entre otros. Estos levantamientos se pueden realizar con sistemas GPS de alta precisión, estáticos o dinámicos. De igual forma se recomienda apoyar el estudio con los datos de alta precisión de la red geodésica nacional del INEGI.

En tareas de orto rectificación pueden emplearse modelos digitales de elevación (DEM) de alta resolución (5 metros o menos) donde se puedan obtener las coordenadas de objetos comunes. Para algunas regiones del país el INEGI ha realizado levantamientos con LIDAR, con resoluciones de 5 y 15 metros y generación de orto mapas.

La zona de Tabasco-Campeche se caracteriza por la abundancia de humedales, manglares y cuerpos de agua de diversa índole, existiendo áreas donde no es posible ubicar objetos fijos permanentes. Esta es una dificultad logística cualquiera que sea el tipo de objeto a localizar, o construir.

Existe la opción de instalar paneles reflectores orientados en dirección lateral de la trayectoria de los satélites, que deben quedar fijos sobre la superficie. En ocasiones se requerirán cimentaciones para lograr la estabilidad y permanencia del reflector.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

En el capítulo 4 “Metodología para la determinación de movimientos absolutos y/o relativos del Bloque Yucatán con respecto a sus vecinos” se amplían las metodologías de geo posicionamiento espacial por medio de GPS y técnicas geodésicas.

#### **5.4 Metodología de interferometría de radar de apertura sintética (INSAR)**

El radar de apertura sintética (SAR, por sus siglas en inglés) es un sistema de radar avanzado que utiliza técnicas de procesamiento de imágenes para sintetizar o simular una antena virtualmente más grande, esto se obtiene mediante la simulación de una tomografía (desplazamiento de la fuente y el receptor, en este caso la antena del radar). Dicho procesamiento también se conoce como "enfocamiento"; con esto se provee una mayor resolución espacial comparada con la de un sistema de Radar de Apertura Real convencional. Este sistema opera mediante un señal coherente (en fase), por lo que la fase y la amplitud son registradas por el sensor de radar. Una antena grande de mayor longitud puede ser creada sintéticamente usando un movimiento de la antena, combinando la información del tren de pulsos recibidos de retorno dentro de la longitud de la antena sintética (Hanssen, 2001).

La geometría de una imagen de un sistema SAR, es totalmente diferente a la de un sistema de una imagen óptica, para la mayoría de las imágenes ópticas, la configuración de la adquisición de dicha imagen es con un ángulo de visión tipo nadir, es decir, casi vertical; mientras que una imagen de radar tendrá un ángulo de visión tipo lateral, esto con la intención de recuperar cada eco emitido por cada elemento que conforma la escena ya que se mide el tiempo de ida y vuelta de la señal. Debido al tipo de ángulo de visión de la adquisición de una imagen de radar, ésta presenta claras distorsiones geométricas que con post-procesamiento puede ser retirado (Ferretti *et al.*, 2007).

Consideremos una plataforma satelital, cuya altura está definida, además de tener una órbita o dirección de viaje definida y con una velocidad constante. Con lo anterior podemos obtener la configuración de un sistema SAR. El satélite tiene montado un sensor SAR capaz de enviar pulsos electromagnéticos que impactarán al terreno y retornarán al mismo sensor. La línea en que se mide la distancia, entre la antena del radar y el objetivo, es conocida como "Línea de Visión/Vista" o LOS (Line Of Sight) del sensor SAR. Mientras que el ángulo que se forma con la vertical al LOS, es conocido como ángulo de incidencia o de observación. La dirección en rango es perpendicular a la dirección del vuelo o de la órbita del satélite, aunque también es conocida como across-track. La dirección azimut es paralela a la dirección del vuelo o de la órbita, y es conocida también como along-track. Finalmente, al terminar el barrido, el sensor conforma una imagen o arreglo de valores de números complejos. El tamaño total de la imagen o el área de cobertura, dependerá del ancho de barrido (swath) de cada misión y el ángulo de incidencia del sensor (Agudo *et al.*, 2003) (Figura 28).

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

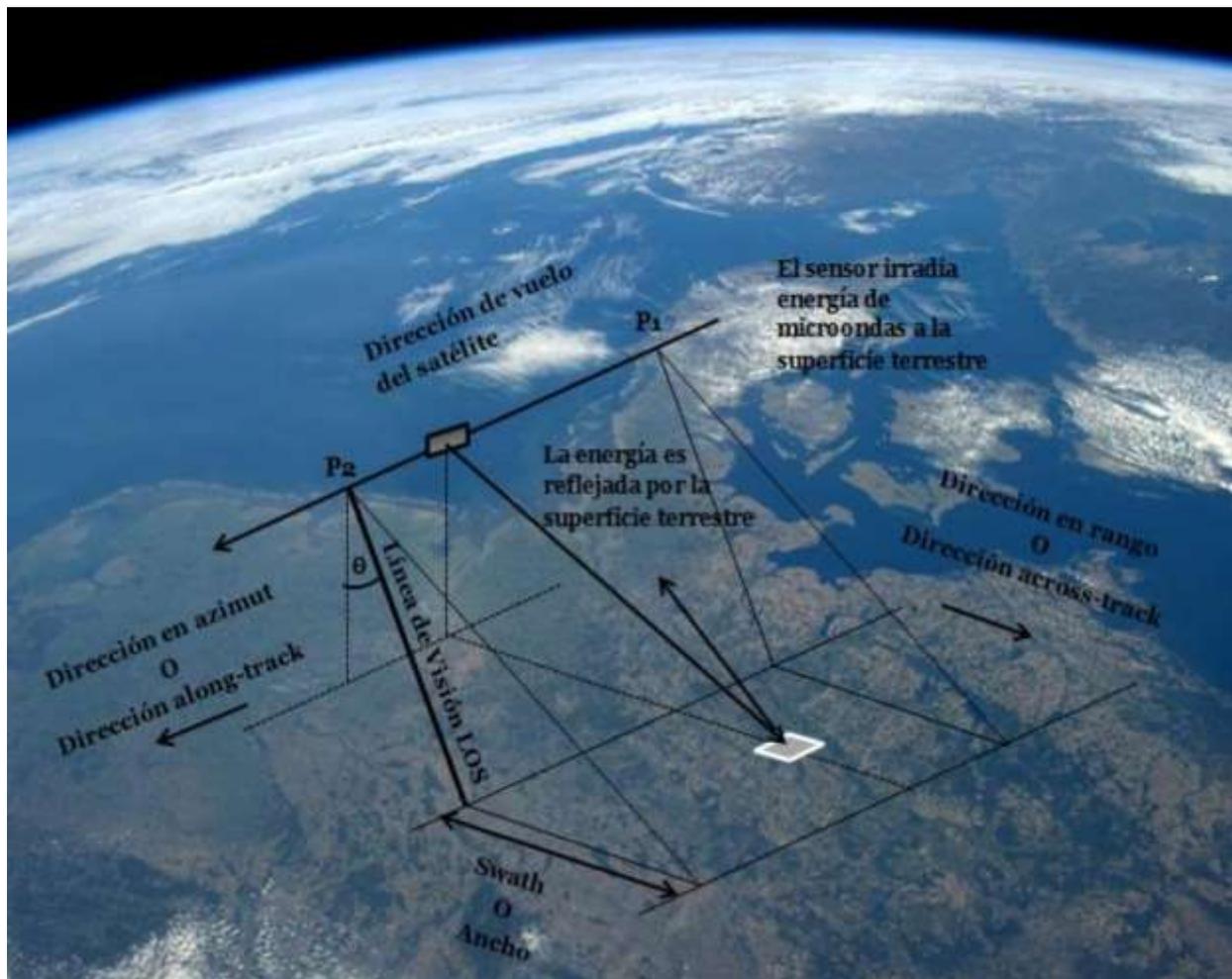


Figura 28. Representación de la geometría de adquisición de imágenes SAR (tomado y modificado de Richards, 2009).

La plataforma antes mencionada, tendrá un periodo de muestreo definido para la adquisición periódica de la misma escena. Para calcular un interferograma, se requiere un par de imágenes; la primera adquisición de la imagen SAR será nombrada como imagen "master" y será la imagen de referencia, mientras que la segunda adquisición será nombrada como imagen "slave"; el valor del periodo de muestreo entre la primera y la segunda imagen es conocida como línea de base temporal ( $B_t$ ), por lo general se expresa en días. La separación de la posición del satélite, entre la primera y la segunda adquisición, o diferencia entre órbitas, es conocida como línea de base ( $B$ ) y su proyección perpendicular a la dirección de la LOS (Line Of Sight) es conocida como línea de base perpendicular ( $B_{\perp}$ ); este parámetro se expresa en metros (Figura 29).

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

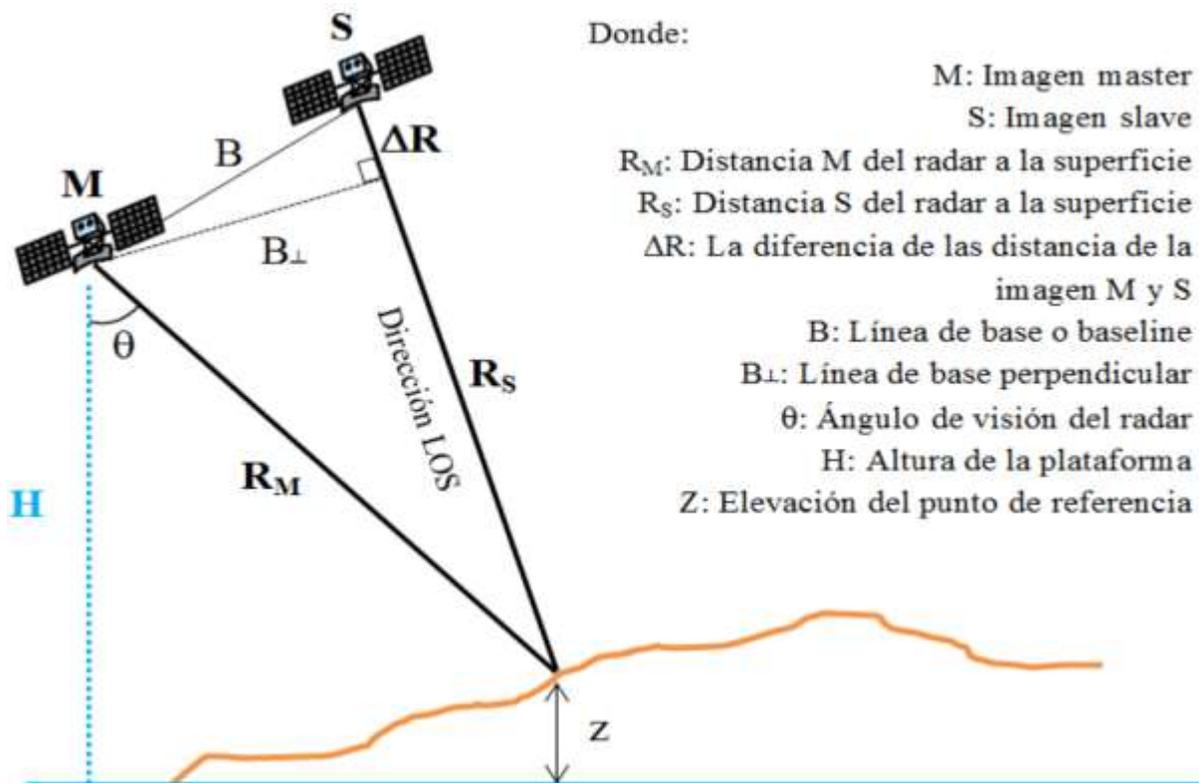


Figura 29. Esquema de configuración de un sistema SAR y geometría de adquisición de una imagen SAR. La dirección en azimut corresponde a la dirección del vuelo del satélite, mientras que el rango es perpendicular al azimut. La Línea de Visión o LOS (Line Of Sight), corresponde a la dirección en la que son enviados los pulsos de microondas que después regresarán al sensor. El ángulo que se forma con la vertical y el LOS, es conocido como el ángulo de incidencia o de observación  $\theta$ . La posición P1, es donde comienza el barrido de la imagen SAR y la posición P2, corresponde al final del barrido de la imagen (tomado y modificado de Richards, 2009).

El principio de la Interferometría SAR se basa en la comparación de dos o más imágenes SAR (se forma el interferograma), a través de la cual se explota la información contenida en la fase, relacionada con los desplazamientos del terreno y el tiempo de viaje completo de la señal (ida y vuelta). Mientras que la amplitud sólo contiene información de la cantidad de energía retrodispersada, la cual depende de las propiedades del terreno como la rugosidad y la constante dieléctrica. La InSAR consiste, de manera general, en hacer interferir dos señales de dos imágenes SAR tomadas en diferentes fechas pero que corresponden a la misma escena y con la misma geometría de la órbita (ascendente o descendente). Hacerlas interferir, significa realizar la diferencia entre los valores de fase de cada imagen. El resultado o la diferencia de fase es conocida como fase interferométrica y su representación gráfica es conocida como interferograma (Hanssen, 2001).

Las imágenes "master" y "slave", serán expresadas como números complejos en las ecuaciones (1) y (2), respectivamente. Mientras que el contenido de cada fase es expresada por (3) y (4), respectivamente.

$$Z_m = A_m e^{j\phi} \quad (1)$$

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

$$Z_s = A_s e^{j\phi^2} \quad (2)$$

$$\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} R_1 + \phi_{scat} \quad (3)$$

$$\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} R_2 + \phi_{scat} \quad (4)$$

Para obtener la fase interferométrica, denotada como  $\phi_{int}$ , diferencia de fase, se debe multiplicar la imagen SAR “master” por el complejo conjugado de la imagen SAR “slave” (Hanssen, 2011; Rosen *et al.*, 2000). La obtención de la fase interferométrica está expresada en la ecuación (5). Al hacer la diferencia entre las ecuaciones (3) y (4), la componente que hace referencia a la distribución de los patrones de los dispersores,  $\phi_{scat}$ , se hará nulo si se mantienen las mismas propiedades de distribución de los objetos retrodispersores en la escena. Por lo que, el resultado de dicha diferencia es el interferograma, compuesto por la imagen de amplitud y la imagen de fase interferométrica. En este punto la imagen de fase interferométrica está compuesta por varias contribuciones de fase, las cuales corresponden a: la geometría de cada adquisición, la morfología de la topografía, los valores de desplazamiento de la superficie referidos a la línea de visión del sensor, los retrasos de la señal al atravesar la atmósfera (cambios atmosféricos en cada adquisición) y debidos al ruido inherente en la señal (Hanssen, 2001; Hooper *et al.*, 2007).

$$Z_m \overline{Z_s} = |A_m| e^{j\phi^1} |A_s| e^{-j\phi^2} = |A_m| |A_s| e^{j(\phi^1 - \phi^2)} = |A_m| |A_s| e^{j(\phi_{int})} \quad (5)$$

Finalmente, el contenido de la fase interferométrica es expresada en la ecuación (6); donde la primera componente es la fase orbital, la segunda componente es la fase topográfica, la tercera componente es la fase de deformación, la cuarta componente es la fase atmosférica y la quinta componente el ruido de fase o decorrelación. Cuando el interés se concentra en conocer la componente relacionada con la deformación, es necesario deshacerse del resto de las contribuciones o disminuirlas al máximo, esto dependerá en gran medida de los insumos y de la precisión de los algoritmos utilizados.

$$\phi_{int} = \phi_{orb} + \phi_{top} + \phi_{def} + \phi_{atm} + \phi_{noise} \quad (6)$$

## 5.5 Técnica de INSAR diferencial (DINSAR)

Una vez obtenida la fase interferométrica o fase del interferograma, los valores de la deformación están dadas en valores de radianes, y se dice que la fase está envuelta (fase relativa) ya que esta varía sólo entre  $-\pi$  a  $\pi$ , para eliminar esta ambigüedad y recuperar la fase absoluta se realiza un proceso llamado desenvolvimiento o *unwrapping*. Dicho proceso de desenvolvimiento, consiste en extraer los valores absolutos de fase a partir de los valores disponibles de fase envuelta, esto quiere decir que se elimina la ambigüedad del módulo de  $2\pi$  ( $-\pi$  a  $+\pi$ ) de la fase, donde se sustraen o agregan múltiplos de valores de  $2\pi$  para estimar el valor absoluto de la fase contenida en cada pixel (Ferreti *et al.*, 2007).

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

En el momento que se sustrae la contribución de fase topográfica, se dice que se realiza InSAR Diferencial o de doble pasada y se recupera la señal o la contribución de fase de deformación. Donde la deformación está en dirección de la Línea de Vista del radar (LOS) y que está en unidades centimétricas (Figura 30).

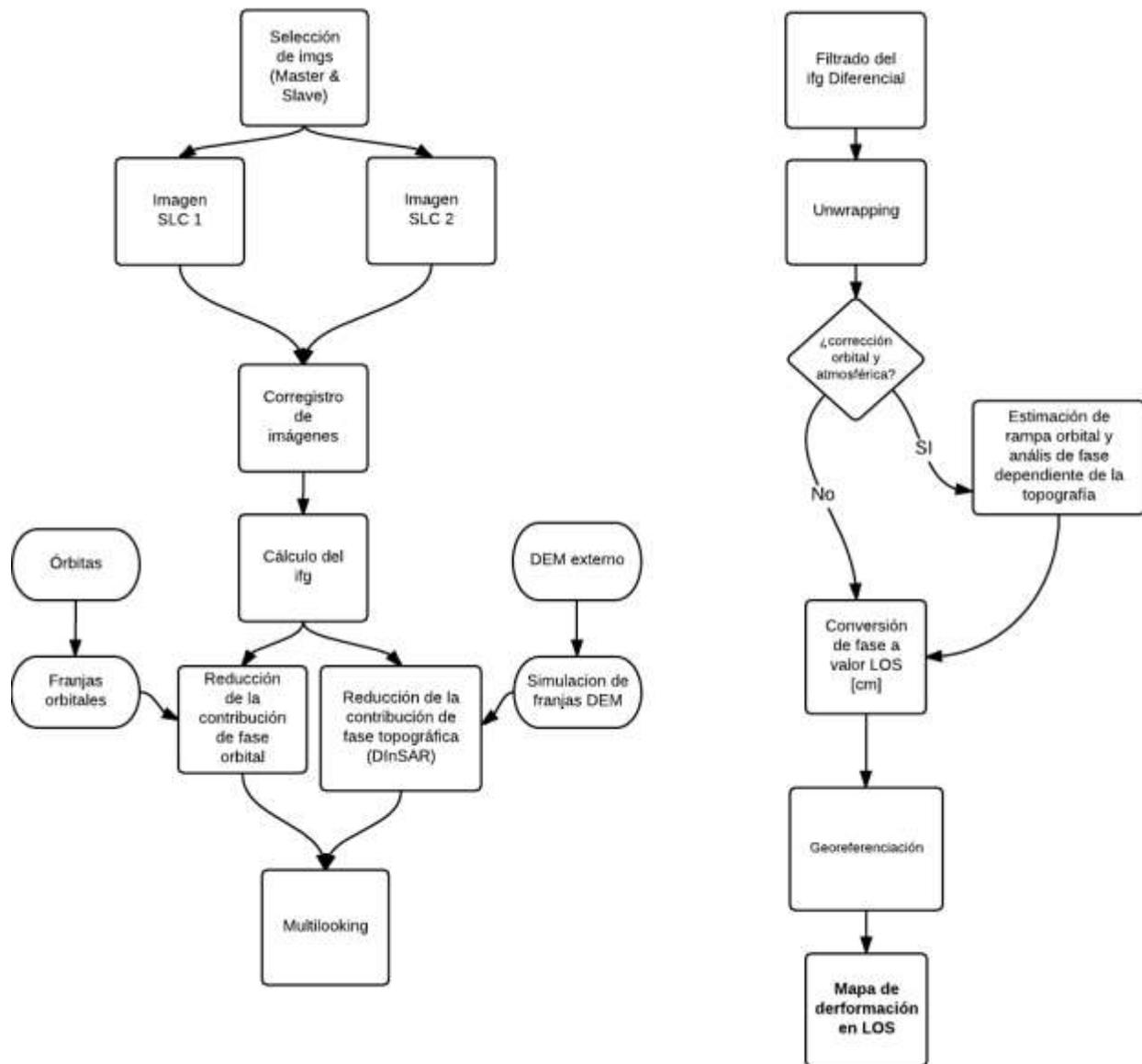


Figura 30. Diagrama de flujo para el procesamiento de un par interferométrico (interferograma) mediante la técnica InSAR Diferencial.

La técnica DInSAR no deja de tener desventajas, tales como la limitada cantidad de imágenes disponibles para su análisis, el lapso entre adquisiciones y la distancia orbital entre imágenes, lo cual puede generar falta de correlación, en particular conforme se incrementa el tiempo (línea de base

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

temporal) y aumentan las diferencias en la geometría de cada adquisición, factores que finalmente limitan los datos a usar.

Para solventar estos problemas, se han propuesto varias técnicas para maximizar el número de adquisiciones que son posibles utilizar. Entre las que más destacan son Permanent Scatterers Interferometry (PSI) y la aproximación Small BaseLine (SBAS) mediante series temporales.

PSI es una técnica basada en radar que pertenece al grupo de Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar (DInSAR) (Crosetto *et al.*, 2016). De acuerdo con Hernández-Jaramillo (2012), en la técnica de PSI se utilizan todas las imágenes disponibles para construir interferogramas con respecto a una imagen maestra y generar un apilado de interferogramas sin limitar las líneas de base temporal y perpendicular. La amplitud de las imágenes de radar es utilizada para seleccionar pixeles que no estén afectados por la decorrelación espacial y temporal, y de esta manera extraer información confiable para medir la deformación. La ventaja de utilizar PSI supera los problemas de decorrelación temporal y geométrica usando una gran cantidad de datos SAR. Sin embargo, la densidad de reflectores permanentes (PS) en interferogramas de periodos cortos de tiempo es mucho mayor que los obtenidos en periodos largos. Además, otra consideración es que en ocasiones la componente no lineal de la deformación es difícil de extraer.

El segundo grupo de métodos caracterizado por Hernández-Jaramillo (2012) “es el de la aproximación SBAS (Berardino *et al.*, 2002) y sus diferentes versiones (Schmidt y Bürgamnn, 2003; Usai, 2003; Cavalié *et al.*, 2007; López-Quiroz *et al.*, 2009), cuyo objetivo es incrementar la cobertura espacial y permitir monitorear la evolución de la deformación, al extraer la información de los cambios de fase de una serie de interferogramas calculados a partir de imágenes con valores de líneas base temporal y perpendicular pequeñas entre ellas. De esta manera se incrementa la coherencia y se disminuye la decorrelación temporal y espacial (Berardino *et al.*, 2002; Yan *et al.*, 2009). La información de la fase del grupo completo de interferogramas se liga para formar una red redundante de información que, permite también minimizar errores remanentes de fase relativos a la estimación de la línea base perpendicular, la topografía y la atmósfera”.

## 5.6 Aplicaciones de INSAR en zonas costeras.

La Tabla 10 muestra un resumen de los estudios que han aplicado técnicas InSAR en el análisis y el monitoreo de la subsidencia en zonas costeras, con énfasis en las especificaciones de los análisis realizados.

Tabla 10. Estudios InSAR aplicados para el análisis y el monitoreo de zonas costeras

Localidad	País	Periodo	Técnica	Satélite(s)	Imágenes	Programa	lfg	Tasa (mm/a)	Referencia
-----------	------	---------	---------	-------------	----------	----------	-----	-------------	------------

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

	Egipto	1992– 1999	PSI	ERS 1 ERS2	14	DORIS, ROI_PAC, StaMPS	Múltiple (3 pass)	--8	Becker, <i>et al.</i> , 2009
Trondheim	Noruega	2012 2016	SBAS	31 TerraSAR- X, 49 Radarsat-2, 18 Sentinel 1	98	StaMPS	Diferenciales (82 TerraSAR-X 280 Radarsat-2 y 67 Sentinel- 1)	-15	Shamshiri, <i>et al.</i> , 2016
Macao	China	2006 2009	IPTA	ENVISAT ASAR VV	22	GAMMA Remote Sensing	60	-2.8	Jiang <i>et al.</i> 2010
Manila	Filipinas	1993 2000 2003- 2010	(DInSA R con apilamiento adaptado	ERS ENVISAT	?	GAMMA Remote Sensing	?	-150	Raucoules, <i>et al.</i> , 2013
Bevano River mouth (Adriático Norte)	Italia	1992 2000 2003 2010	SBAS- DInSAR / PSI	ERS-1 y 2 / ERS 1 ERS 2 ENVISAT	36/90	?	85 / ?	-5 a-8	Taramelli, <i>et al.</i> , 2015
Planicie Liaohe	China	2007 2011	multi- track PSI	ALOS / PALSAR	17 / 23	StaMPS	22/	-50 a -236	Sun, <i>et al.</i> , 2017

## 5.7 Programas computacionales.

Para el procesamiento InSAR existen diferentes programas computacionales. En general sus procesos para la generación de interferogramas son muy similares, pero cada uno presenta ciertos atributos o herramientas que lo diferencian. Por ejemplo, que los interferogramas calculados puedan estar afectados por otro tipo de señal (ruido o residuales de contribución de otras fases) y sólo algunos sistemas cuentan con herramientas para realizar las correcciones.

A continuación se mencionan los programas computacionales más importantes de acuerdo con Covarrubias-Calderón (2016), los programas son:

**ROI PAC.** Repeat Orbit Interferometry Package (Rosen *et al.*, 2004), es un programa computacional de código abierto, desarrollado y mantenido por el equipo de Caltech/JPL, fue creado principalmente para trabajar con datos ERS; puede procesar: ERS-1, ERS-2, JERS, Envisat, ALOS PALSAR, COSMO-SkyMed, TerraSAR-X, TanDEM-X (TSX & TDX), Radarsat-1, Radarsat-2, Sentinel-1, y se puede configurar para trabajar con datos "strip-mode" de todos los instrumentos de radar por satélite existentes. Está sujeto a un acuerdo de licencia, sin costo a la comunidad internacional para propósitos de investigación. El procesamiento para este sistema se muestra en la Figura 31.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”



Figura 31. Diagrama de flujo que sigue ROI PAC para generar mapas interferométricos (Fuente: Fielding, 2009, p. 4, modificado por Covarrubias-Calderón, 2016, p. 11).

**ISCE.** InSAR Scientific Computing Environment (Rosen *et. al* 2012). ISCE es un sistema modular de licencia libre, fue generado por el Jet Propulsion Laboratory (JPL), con la intención de mejorar y corregir errores y problemas existentes en el programa ROI PAC. Con respecto a este mejoró la eficiencia de tiempo de cómputo, la compatibilidad con diferentes plataformas (Linux, MacOS y Unix), e integró una eficiente implementación en servidores. De igual forma, corrigió errores de geolocalización al utilizar ahora un sistema de coordenadas geodésicas con compensación de movimiento, en lugar del sistema de coordenadas de rango Doppler. Finalmente incorporó bibliotecas para facilitar análisis posteriores, tales como el cálculo de Series de Tiempo (Agram *et. al* 2012).

**GMTSAR.** Es un sistema basado en GMT (Generic Mapping Tools), corre únicamente en un SO Linux, está escrito en lenguaje C. GMT se utiliza para mostrar todos los productos como archivos

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

PostScript e imágenes KML para Google Earth. Se ha desarrollado un set de scripts en C-shell para realizar el procesamiento estándar en sólo dos pasos, así como para la alineación de imágenes para apilamiento y series de tiempo. Código abierto con licencia GNU2 GPL3 del proyecto de software libre GNU/Linux (Sandwell *et al.*, 2011).

GIAnt. Generic InSAR Analysis Toolbox es un conjunto de bibliotecas de Python y scripts que implementan diversos algoritmos publicados de series de tiempo para InSAR, todo en un mismo entorno. GIAnt fue desarrollado para la generación, comparación, calibración y validación (Cal-Val) de series de tiempo de interferogramas. Actualmente incluye implementaciones de algoritmos SBAS, N-SBAS y MInTS.

GAMMA. GAMMA Remote Sensing and Consulting AG es una colección de programas para procesar datos SAR, InSAR y DInSAR de sistemas aéreos y espaciales. El software soporta completamente el procesamiento desde datos crudos hasta productos de alto nivel como modelos de elevación digital, mapas de desplazamiento, análisis y seguimiento de puntos, así como mapas de uso de suelo. Se encuentra organizado en paquetes, cada uno dedicado a un aspecto específico del procesamiento. Este programa está escrito en lenguaje ANSI-C, muchas de sus funciones que demandan alta capacidad computacional han sido optimizadas para operar en paralelo por medio de OPENMP para procesamiento en múltiples núcleos. Su licencia es privada.

ENVI SarScape. Sistema modular desarrollado por la empresa SARMAP como un complemento para el programa ENVI de Harris Geospatial, es distribuido por esta última empresa. En el modo básico cuenta con herramientas de enfoque para generar los archivos SLC a partir de archivos raw. Cuenta con capacidad de realizar el análisis de interferometría de dos pasos (Insar), y de múltiples (DInSAR), con lo cual se pueden generar modelos digitales de elevación, así como mapas de coherencia y de desplazamiento. Adicionalmente se pueden adquirir las licencias para realizar apilamiento interferométrico de series de tiempo para determinar desplazamientos de rasgos individuales por medio de las técnicas SBAS y PS. También puede realizar el análisis de interferometría sobre grandes áreas (400 X 400 km) por medio de la técnica de Interferometría ScanSAR. Finalmente, cuenta con funcionalidad de interferometría polarimétrica. Su licencia es comercial.

El programa de cómputo más reciente es el SNAP (Sentinel Application Platform) (ESA, 2017a) el cual fue desarrollado por la ESA en código abierto y libre de costo. SNAP consta de tres herramientas con aplicaciones para calibración, filtrado de ruido, corregistro, ortorrectificación, mosaico, conversión de datos, polarimetría e interferometría. Cuenta también con herramientas para el procesamiento digital de imágenes ópticas (SPOT, MODIS, Landsat y otros, lo cual es muy conveniente para efectos de visualización multitemática con imágenes de radar. La ESA también está preparando programas de integración para sus futuros satélites Sentinel 3.

## 5.8 Procesamiento.

En general el procesamiento que se requiere seguir en el análisis interferométrico es el descrito por López-Castillo (2015), cuyos pasos generales para el cálculo del interferograma a partir de dos imágenes SAR se reproducen a continuación:

1. Convertir dos imágenes “raw” a imágenes SLC (“*Single-Look Complex*”) SAR. Las imágenes crudas representan la señal retrodispersada por el suelo y recuperada por la antena del satélite, ordenadas en un arreglo bidimensional, el cual incluye información sobre cómo fue adquirida la imagen, plataforma, órbita, altura, satélite y parámetro de adquisición. Estas se transforman a imágenes SLC a partir de un procedimiento denominado enfoque o focalización, en él a partir de las señales retrodispersada y haciendo uso del efecto Doppler, se reconstruye la respuesta de cada dispersor en la superficie del terreno. Como resultado se obtiene un arreglo bidimensional de píxeles los cuales contienen la información de varios dispersores, lo cual se expresa matemáticamente como  $z = n-1$  a  $n$ , donde  $n$  es la contribución de cada dispersor en el valor de cada pixel.
2. Corregistrar las dos imágenes SLC SAR con una precisión de menos de 0.1 de pixel. El corregistro se refiere a sobreponer una imagen en la misma geometría de la otra, teniendo conocimiento del desplazamiento en la dirección de rango y azimut (*offset*); para esto se utiliza la correlación cruzada. En el proceso las imágenes son divididas en fragmentos que consisten en valores de amplitud calculados partir de las imágenes SLC, después de la correlación las imágenes son re-muestreadas por un factor de dos y el proceso de correlación es repetido, después del cual sólo se quedan aquellos fragmentos con alta coherencia. Los desplazamientos en rango y azimut son modelados por medio de funciones polinomiales de la posición del rango y azimut de la imagen que se usa de referencia, los coeficientes de estas funciones son estimadas. Así se puede determinar la posición de un pixel de una imagen en otra. Finalmente se hace una interpolación de los fragmentos en su nueva ubicación y se obtiene una imagen reajustada a la geometría de otra imagen.
3. Cálculo del interferograma. El interferograma se calcula multiplicando la primera imagen por el complejo conjugado de la segunda pixel por pixel.
4. Reducir el ruido en la fase, debido a los errores de alineación y al efecto “*speckle*” (causado por la presencia de varios dispersores dentro de una celda): Para esto se utiliza un proceso de “*multilook*”, en el cual se hace un promedio de varios píxeles adyacentes logrando cancelar amplitudes aleatorias y aumentar la coherencia de señales. Para imágenes ERS y Sentinel 1 se usa un factor de 5 en la dirección del azimut y 1 en la dirección del rango, para así obtener una resolución de 20 m por 20 m.
5. Eliminación de la contribución de la curvatura de la Tierra. En esta etapa se remueve la función de la curvatura de la Tierra relacionada con la separación entre las órbitas durante la adquisición de cada una de las imágenes. Se calcula con base en la geometría de adquisición de la imagen para ello se utilizan las orbitas proporcionadas por la ESA (Agencia Espacial Europea) y por la DEOS (Department of Earth Observation and Space System) de Delft University of Technology.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

6. Eliminación de los efectos topográficos. Se elimina la fase correspondiente a la topografía, usando un modelo digital de elevaciones.
7. Filtrado del interferograma. Los interferogramas se filtraron con un filtro adaptativo (Goldstein y Werner, 1998) el cual incrementa la relación señal/ruido. Se necesita un filtro de este tipo debido a que en el interferograma, la fase local está dominada por la frecuencia de una sola franja, lo que significa que el espectro de potencia local será de una banda estrecha de señal y una grande de ruido, así se consigue evitar discontinuidades en los extremos.
8. Desenvolvimiento de fase. El desdoblado de fase se utiliza para eliminar la ambigüedad de  $2\pi$  del interferograma. En este procedimiento se agregan o sustraen los múltiplos de enteros de  $2\pi$  para estimar el valor absoluto de la fase para cada pixel. Para este proceso se pueden usar dos métodos, el “*branch-cut*” (Goldstein *et. al.* 1988), el cual consiste en desdoblar la fase siguiendo una serie de trayectorias de integración en un campo conservativo. En este método se asume que los pixeles vecinos no tienen cambios mayores a medio ciclo de fase, en caso contrario se genera un residuo; los residuos a su vez también generan trayectos por los cuales no habrá un proceso de integración, cabe agregar que en este método los errores de desenvolvimiento de fase son múltiplos de  $2\pi$ . El segundo método utilizado para desenvolver las fases es el “*Statistical-cost Network-flow Algorithm for Phase Unwrapping*” (SNAPHU) (Chen y Zebker 2002). En dicho algoritmo se desenvuelve la fase como un problema de estimación máxima de probabilidad a posteriori (MAP), calcula la solución de fase desenvuelta más probable para los datos de entrada. Debido a que las estadísticas de los datos de entrada a la solución dependen de la cantidad medida, se plantean tres modelos estadísticos: para la topografía, para los datos de deformación y para los datos genéricos suavizados.

Finalmente, López-Castillo (2015), también recomienda la secuencia de pasos para utilizar GIANt después de obtener los interferogramas y sus archivos de coherencia corregistrados con las mismas dimensiones, las etapas son:

- Generar los siguientes archivos de entrada: una lista que contenga las fechas (imagen maestra y esclava), línea base perpendicular y satélite de adquisición, dos archivos de longitud y latitud; y un archivo extensión .rsc con los datos generales de los interferogramas
- Después hay que generar los archivos de entrada para un apilado de los interferogramas, donde se colocan parámetros tales como el valor de coherencia mínimo, el tipo de corrección atmosférica estratificada y la corrección orbital a utilizar.
- Para terminar se genera un archivo de entrada para la inversión, donde se escoge el interferograma de referencia, el valor del filtro gaussiano, la función de tiempo, entre otros parámetros dependiendo del algoritmo de generación de series de tiempo que se va a utilizar. Además para algunos algoritmos además se puede hacer el cálculo de la incertidumbre.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

## 5.9 Importancia de la investigación de la subsidencia en el Golfo de México.

Para el Golfo de México, en la región de Houston-Galveston en Texas, Qu *et al.* (2015) determinaron que presenta subsidencia debido a los efectos combinados que se relacionan con la extracción de agua subterránea, la extracción de hidrocarburos, el movimiento de domos de sal y el fallamiento. Esta deformación de la superficie del terreno es inducida por la actividad antrópica y, en parte, por la acción de la naturaleza. Por lo cual, dicho fenómeno amenaza gradualmente la estabilidad de la infraestructura urbana y causa la pérdida del hábitat de los humedales a lo largo del Golfo de México. Sharp *et al.* (1990) estimaron tasas de subsidencia de 11.1 mm/a para la Bahía de Galveston de 1958 hasta la mitad de la década de los 1980's, y advirtieron que la producción de petróleo en la región provocó la despresurización regional y el hundimiento concomitante a lo largo de la costa de Texas. Qu *et al.* (2015) detectaron una tasa de subsidencia de hasta 30 mm/a sobre la parte noroccidental de la región de Houston-Galveston entre 2004 y 2011. De igual forma, encontraron que el patrón de deformación del suelo fue casi concéntrico alrededor de lugares de intensa extracción de agua subterránea, identificaron áreas cónicas de hundimiento localizadas sobre campos de exploración de hidrocarburos, que probablemente fueron causadas por la compactación de los yacimientos. También identificaron la deformación del terreno sobre domos de sal, lo que se debió al movimiento diferencial de estructuras salinas individuales. Además, detectaron un hundimiento diferencial de 5-40 mm/a a través de una serie de fallas en la región, las cuales funcionaron como barreras de agua que perturbaban la integridad del flujo de agua subterránea y agravaban los desplazamientos superficiales localizados.

Los estados de Tabasco y Campeche, ubicados en la costa sur del Golfo de México, presentan características similares a la región de Houston-Galveston en Texas, entre ellas: la extracción de hidrocarburos y la extracción de agua subterránea. De igual forma presentan un sustrato geológico caracterizado por rocas carbonatadas, capas sedimentarias y sal (Figura 32), condiciones que favorecen ampliamente la subsidencia.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

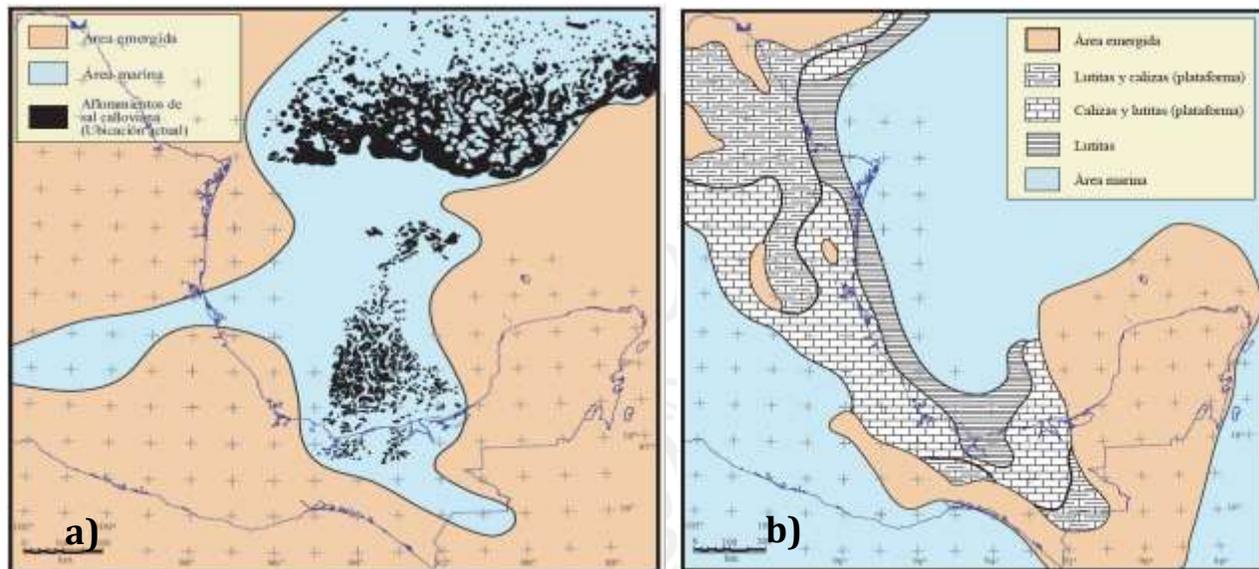


Figura 32. **a)** Paleogeografía del Jurásico Medio en el área del Golfo de México. En negro se muestra la distribución actual de la sal depositada durante el Calloviano. Nótese su emplazamiento dentro del territorio de Tabasco. **b)** Paleogeografía del Tithoniano superior. Nótese la gran extensión de las áreas de plataformas someras, en donde ocurrió el depósito de rocas ricas en materia orgánica que constituyen la principal roca generadora de hidrocarburos en el Golfo de México. En ambas imágenes las costas y las fronteras del país se muestran como referencia. Fuente: Padilla-y-Sánchez, 2007.

Con respecto a la subsidencia en zonas costeras y con de extracción de hidrocarburos, el monitoreo del terreno en la parte sur de la Planicie de Liaohe, China, detectó tres áreas principales de subsidencia, dichas áreas fueron localizadas en campos petroleros, sitios de producción de sal y zonas costeras. Las tasas de subsidencia del terreno variaron de -50 mm/a hasta -236 mm/a, y una subsidencia de tipo no lineal fue claramente detectada en cada una de las tres áreas. Los campos de producción petrolera de Jinzhou, Huanxiling y Shuguang validaron la alta correlación espacial entre las localizaciones de subsidencia del terreno y las localizaciones de extracción de petróleo. Además, los valores de mayor subsidencia fueron detectados en áreas con más pozos instalados. De igual forma, el área con la más alta producción petrolera fue asociada con los valores mayores acumulados de subsidencia del terreno (Sun, 2017).

Por lo anterior, y al existir los estudios documentados en la región de Houston-Galveston, y otras áreas de extracción de hidrocarburos, resulta prioritario realizar el monitoreo de la subsidencia en las costas de Tabasco y Campeche.

Adicionalmente, 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, cuya génesis está dominada por la acumulación de sedimentos, y su carga puede implicar una componente importante para desarrollar hundimientos.

El impacto de la subsidencia antropogénica en relación al incremento del nivel del mar en otras zonas deltaicas ya ha sido evaluado en algunos estudios. Mazzotti *et al.* (2009) reportaron para el

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

delta del río Frazer, al oeste de Canadá, tasas de subsidencia lenta (-1 a -2 mm/a) debidas a carga natural, así como tasas de subsidencia rápida de -3 a -8 mm/a asociadas a cargas artificiales recientes, por lo cual consideran que la subsidencia antropogénica intensificará el incremento del nivel del mar relativo, en particular hasta un 130% para el 2100, lo que puede representar localmente hasta 2 metros. Estos autores concluyen que en ambientes aluviales, lacustres y deltaicos, la consolidación de sedimentos antropogénicos puede resultar en una amplificación significativa y con variaciones espaciales fuertes en el incremento relativo del nivel del mar, lo cual requiere ser considerado en la planeación local. De igual forma, la subsidencia moderna en el delta del río Nilo, Egipto, se ha reportado que está altamente influenciada por la compactación de los sedimentos más recientes (Becker *et al.*, 2009).

En particular, en la cuenca del Grijalva-Usumacinta la existencia de presas retiene sedimentos cuenca arriba y ha evitado su descarga, con lo cual se alteran ciclos y balances, en particular con el incremento de la erosión costera. Y se desconocen sus implicaciones en relación a la disminución de la subsidencia natural-antrópica. La subsidencia en el delta del Grijalva-Usumacinta se ha asociado a fallas geológicas que ocasionaron desplazamientos activos (Ortiz-Pérez y Méndez-Linares, 1999), provocando mayor erosión de la playa y retroceso de la línea costera (West *et al.*, 1985). Lo anterior ha contribuido en la configuración de una morfología costera con planicies bajas y arenosas, ubicadas a menos de un metro sobre el nivel del mar, lo que las hace vulnerables a pequeñas variaciones (Ortiz-Pérez y Méndez-Linares, 1999).

Para Raucoules (2013), en las zonas urbanas costeras de baja altitud, los movimientos verticales del suelo pueden exacerbar considerablemente los peligros relacionados con el aumento del nivel del mar. Sin embargo, su extensión espacial, su evolución temporal, e incluso a veces su existencia, son a menudo poco conocidas. De igual forma Taramelli, *et al.* (2014) señala que la subsidencia en combinación con el aumento del nivel del mar empeorará el riesgo de inundación de los ríos y ensanchará las zonas costeras afectadas por inundaciones de marea de tormenta. Esto hace de la subsidencia una amenaza insidiosa que tiene efectos acumulativos significativos sobre el riesgo de inundación o la integridad de las defensas e infraestructuras hídricas. Caso parecido está siendo investigado en la actualidad por Shirzaei y Bürgmann (no publicado) en la Bahía San Francisco, donde se pretende comprobar que las inundaciones del área se potencian con el hundimiento local del terreno y los efectos del cambio climático.

Al respecto, tanto Tabasco como Campeche, están fuertemente amenazados por los efectos del cambio climático. A nivel nacional la costa de Tabasco representa uno de los sitios más vulnerables al incremento del nivel del mar (Núñez-Gómez *et al.* 2016; Ramos-Reyes, 2016). Con respecto a Campeche, en punta La Disciplina, se ha reportado una tasa de erosión costera con un valor de 17.1 m/a (Torres-Rodríguez, *et al.* 2010). Otras problemáticas graves son las inundaciones, tanto fluviales como por marea de tormenta, y también complejas, cuando intervienen varios procesos (Valdés-Manzanilla, 2016; Bolongaro-Crevenna *et al.*, 2016).

Las inundaciones representan un fuerte impacto económico para el estado de Tabasco, por ejemplo, en el 2007 una inundación catastrófica causó 3000 millones de dólares en pérdidas económicas, ya que el 80% de la superficie estatal se inundó y cerca de un millón de personas

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

quedaron sin hogar (Santos-Reyes *et al.* 2010). Al respecto, Haer *et al.* (2017) determinaron que en Tabasco el daño anual esperado por inundaciones costeras se incrementará de los actuales 530 millones de dólares a 4,120 millones de dólares en 2080, como resultado del desarrollo socioeconómico y el cambio climático. En cuanto al daño estimado por inundaciones fluviales, estos autores calcularon que se incrementa de los actuales 1,790 millones de dólares a 10,600 millones de dólares en 2080, en particular si no se establecen medidas de adaptación.

Si se consideran las pérdidas económicas debidas a los daños causados por desastres asociados a fenómenos naturales, se observa que se han incrementado en las últimas décadas, ya sea como resultado del desarrollo socioeconómico o por los efectos del cambio climático. Las proyecciones indican también que esta tendencia al alza continuará, lo cual resalta la necesidad de adoptar estrategias de adaptación. Esto a su vez pone de manifiesto la necesidad de establecer mejores estrategias adecuadas para hacer frente a los embates inciertos del cambio climático (Haer *et al.*, 2017), y de otros procesos como la subsidencia (Milliman, y Haq, 1996), que incrementan en forma conjugada sus consecuencias negativas.

Por lo anterior, resulta indispensable conocer el efecto local de la subsidencia en las costas de Tabasco y Campeche, particularmente para mejorar los estudios que se realizan en el marco del cambio climático, y el efecto conjugado de ambos procesos (Milliman, y Haq, 1996). Por ejemplo, la información de las tasas de subsidencia ya ha contribuido en mejorar la modelación de la inundación costera en el norte del Golfo de México (Yang, 2014).

De igual forma, para realizar la comparativa con la compleja problemática que se enfrenta en otras latitudes, se menciona el caso de Shanghai, China, ciudad costera de baja altitud (3–4 m de elevación), la cual está rodeada en tres de sus flancos por el mar de Este de China, el Estuario del Río Yangtze y la Bahía de Hangzhou. En esta ciudad, la interacción del incremento del nivel del mar, la subsidencia del terreno, y la marea de tormenta pueden llegar a producir desastres muy complejos, variables y abruptos. Las proyecciones realizadas señalan que el nivel del mar incrementará de manera local 86.6 mm, 185.6 mm, y 433.1 mm para 2030, 2050 y 2100, respectivamente. Además, la subsidencia antropogénica en la zona representa un problema serio, ya que la tasa de subsidencia anual máxima se ha calculado en 24.12 mm/a. Por lo cual, se proyecta que para el año 2100, la mitad de la superficie actual de la ciudad se encuentre inundada, y se estima que el 46 % de las estructuras de protección de inundaciones y diques marinos se sobrepasen (Wang, 2012).

Usando imágenes Sentinel 1-A se obtuvo la subsidencia de la zona costera de la ciudad de Hoorn en el noreste de Holanda. En la Figura 33 se muestra la línea de costa con coloraciones asignadas según su movimiento.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

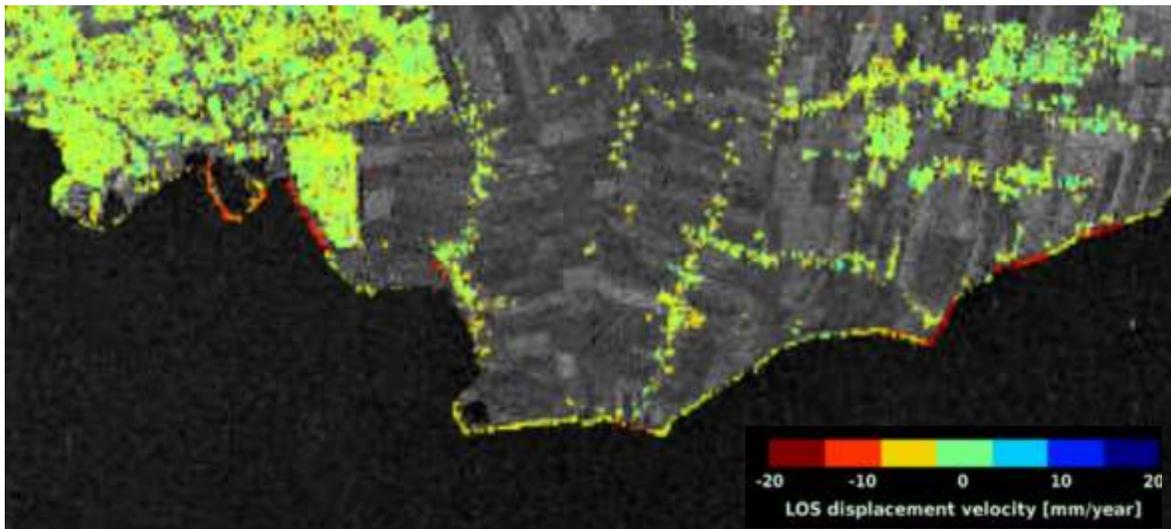


Figura 33. Movimiento de la zona costera de la ciudad de Hoors, Holanda, a partir de imágenes 2014-2016 del satélite Sentinel 1-A. En color rojo desplazamientos de 10 mm/año. En verde zonas estables. Fuente: ESA, 2016. Procesada por ESA SEOM INSARAP study/PPO.labs /Norut/NGU.

La población de Tabasco y Campeche sumó un total de 3,061,044 habitantes para el 2010, de igual forma, ambas entidades destacan por sus actividades económicas y por la infraestructura petrolera ahí emplazada. Por esta razón, existen varios estudios que han abordado el análisis de los efectos del cambio climático en las costas tanto de Tabasco como de Campeche. Sin embargo, cabe mencionar que hasta el momento son pocas las referencias que abordan el tema en relación a la subsidencia. Puede concluirse que la metodología de Insar es susceptible de aplicarse a rasgos volumétricos y lineales, y que la zona costera de Tabasco-Campeche es candidata a estudios de este tipo.

## **6 Metodología para la determinación de movimientos absolutos y/o relativos del bloque Yucatán con respecto a sus vecinos**

### **6.1 Introducción**

La dinámica costera tiene periodos de cambio determinados por la climatología local. De hecho durante el año se tienen oscilaciones de los niveles de mareas en la zona, donde las mareas bajas ocurren en los meses de Junio a Agosto, mientras que las mareas altas se presentan de Septiembre a Noviembre. Es evidente que las observaciones y registros que se realicen en una playa se vean afectados por el efecto de la estacionalidad, mostrando playas con morfologías diferentes según la fecha de observación.

No obstante, en el largo plazo, dependiendo de las condiciones de dinámica costera regional (corrientes litorales, aportación de sedimentos continentales, régimen de vientos, y otras) cada playa mostrará tendencias de erosión, de acreción o de estabilidad. Como y ya se ha mencionado, la estabilidad de largo plazo de las playas dependerá de las tendencias de ascenso o descenso del nivel del mar, de los procesos de hundimiento/emersión locales (ejemplo, compactación de deltas), y de otros movimientos tectónicos regionales, estos últimos de dimensiones continentales (tectónica de placas).

Dilucidar cada una de las aportaciones internas y externas en la estabilidad de una zona costera, requiere contar con mediciones independientes de cada proceso involucrado, y luego evaluar los resultados en conjunto. Si bien, por una parte mediciones periódicas de la morfología de playas por medios topográficos y de al batimetría de la zona litoral aportan preferentemente a entender el proceso de corto plazo, es decir, el dominado por las condiciones estacionales (lluvias, nortes y secas), por otra parte, el seguimiento de mediano plazo por medio de tecnologías Como la de INSAR permitirá detectar las componentes de emersión, subsidencia de mediano plazo, pudiéndose cuantificar a escala de milímetros los movimientos locales de emersión/hundimiento. Además si se aplica el denominado INSAR dinámico, es decir la evaluación interferométrica de varias etapas (*i.e.* decadales) podrá escudriñarse las tendencias y los cambios de emersión/hundimiento del sitio.

### **6.2 Generalidades**

El objetivo central de los métodos utilizados es medir con la mayor precisión y reproducibilidad posible las deformaciones del terreno asociadas al fenómeno de hundimiento, que se traducen en cambios en las coordenadas espaciales de los puntos de medida, e inclinaciones del terreno, así como la rapidez con que ocurren estos cambios. Para evaluar los cambios que existen en la posición espacial de puntos en la superficie terrestre, se hace uso de varias técnicas tanto instrumentales como topográficas y geodésicas, que permiten obtener la variación en el tiempo de la posición relativa de estas coordenadas. El proceso consiste básicamente en efectuar mediciones periódicas sobre marcas permanentes establecidas en el área de afectación por hundimientos o en sus alrededores, utilizando las técnicas adecuadas con los lineamientos apropiados, realizando estas con la frecuencia

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

que indiquen los cambios observados. La determinación de las deformaciones incluye medidas de las componentes horizontales y verticales de los desplazamientos. Para el caso de las primeras se utilizan técnicas topográficas consistentes en redes de triangulación, trilateración, triangulateración y poligonación y para las segundas se utilizan métodos de nivelación, mediante redes cuyas características satisfagan el orden de precisión requerido en este tipo de control. En lo concerniente a la inclinación del terreno, este puede determinarse esencialmente por dos métodos: a través de dispositivos electrónicos (inclinómetros) o por medio de métodos topográficos de inclinometría seca (Van Der Laat, 1982). Por otra parte, la precisión en las observaciones es parte esencial para poder evaluar satisfactoriamente estos desplazamientos, para las mediciones de desplazamiento horizontal se requiere una precisión mínima de una parte en cien mil, mientras que para las observaciones verticales se requiere una exactitud de  $0.004 \text{ m.} \times (r \text{ km})^{1/2}$ . siendo (r km) el número de kilómetros de longitud de la red de nivelación (SPP, 1985). En lo concerniente a la inclinación del terreno es recomendable una precisión de por lo menos 10-20 microradianes.

### 6.3 Información geodésica disponible (INEGI)

La corteza terrestre está en continuo movimiento debido a múltiples factores. Estos movimientos de la litósfera, en general están compuestos de tres componentes (X;Y,Z). Dependiendo del estado de esfuerzos y las características geodinámicas del terreno, pueden dominar los movimientos verticales (cambios en Z) o los desplazamientos horizontales (X,Y). Los cambios en la componente vertical se reflejan particularmente en cambios en la topografía debido a subsidencia y puede ser fácilmente estudiados a partir de métodos geológicos, geodésicos, y otros; sin embargo, los movimientos laterales o la componente horizontal es menos evidente y en ocasiones se manifiesta menos.

#### Sistema global de navegación por satélite

Para la determinación de las coordenadas precisas de un punto a partir de datos de posicionamiento global se utilizan dos técnicas; primero si deseamos conocer las posiciones en tiempo real de un punto; se colocan en sitios estratégicos; estaciones permanentes con equipo GPS-GNSS en el área de estudio, en las que estén disponibles en tiempo real los datos recopilados por estos equipo, y a través de una comunicación continua entre las estaciones y un sitio donde se recibirán los datos registrados por los sistemas; posteriormente con un software especializado se procesan en automático estos datos para obtener las coordenadas en tiempo casi real.

La segunda técnica que se emplea con este método es por medio del método estático y que consiste la colocación de una red de puntos (mojoneras, testigos de concreto o placas metálicas incrustadas en el terreno) que conforman una red estratégicamente diseñada para la mejor observación del proceso de hundimiento de una región. Esta red se mide con receptores GPS-GNSS por tiempos variables que oscilan entre 2 a 6 horas, dependiendo de las condiciones topográficas y de coberturas de las redes GNSS que se tengan en el sitio de observación, posteriormente en gabinete se realiza el pos- proceso de los datos recabados y se obtienen las coordenadas de los puntos de la red. Una variante de esta segunda técnica consiste en el método denominado RTK, que consiste en colocar dentro o fuera de estudio una estación base de GPS-GNSS, preferentemente

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

donde las condiciones topográficas y de cobertura de la red GPS-GNSS sean las ideales, el equipo colocado en la estación base debe contar con un sistema de radio comunicación, dado que otro u otros receptores GPS-GNSS se instalaran en los otros puntos de la red preinstalada en el área de estudio (mojoneras, testigos de concreto o placas metálicas incrustadas en el terreno ) por un tiempo predefinido; estos segundos receptores deben contar con un sistema de radiocomunicación; de tal manera que de la estación base se envían las correcciones en tiempo real recibidas por los satélites de la constelación al receptor o receptores instalados en la red, de tal manera que así reciben las correcciones necesarias para obtener las coordenadas de forma precisas de los puntos de la red. En ambos métodos descritos se utilizan efemérides precisas de satélite, los relojes y los sesgos de código, datos atmosféricos básicamente con la información de la ionosfera así como los parámetros de rotación de la Tierra y los parámetros de carga oceánica, necesarios para el procesamiento de los datos y obtener coordenadas con una precisión probablemente de  $\pm 15\text{mm}$  en las coordenadas horizontales y de  $\pm 50\text{mm}$  en las verticales.

Para este proyecto se propone el empleo del segundo método donde se verificarán las coordenadas de los vértices de la red geodésica existentes de la red geodésica pasiva del INEGI ubicados en Bloque de Yucatán y áreas aledañas (Figura 34).

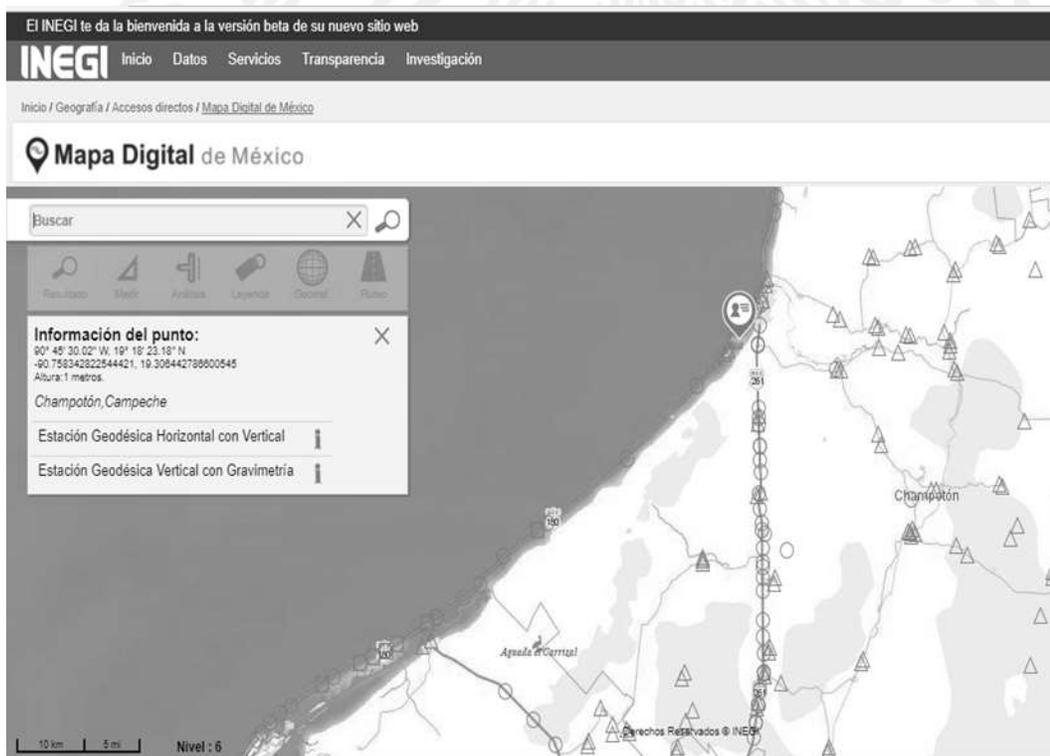


Figura 34. Ubicación de vértices pertenecientes a la red geodésica nacional pasiva del INEGI

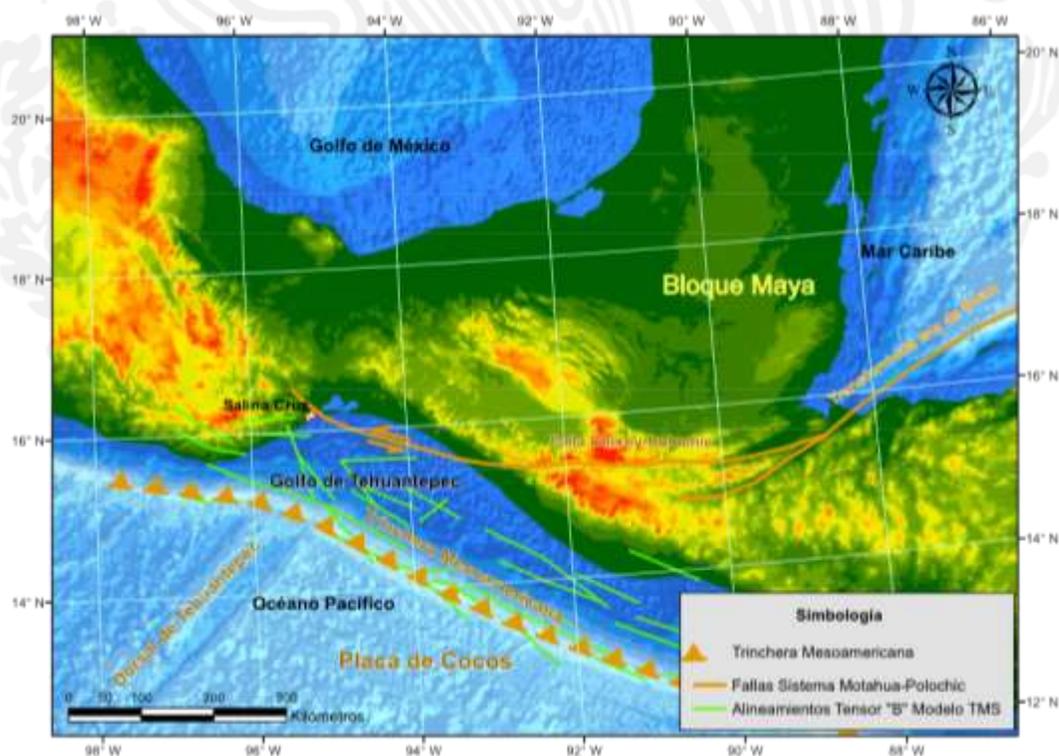
“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Para poder hacer un comparativo de los datos de la red geodésica pasiva con los medidos estos se realizarán bajo la Norma Técnica para el Sistema Geodésico Nacional, el INEGI, donde se establece el Marco de Referencia Geodésico y que deben cumplir con lo siguiente:

- I. Las coordenadas que definen la posición de cada Estación Geodésica, deberán generarse a partir de levantamientos geodésicos, que emplean el GNSS y se encuentran vinculados a la RGNA, la cual, los dota de valores de posición referidos al ITRF08 época 2010;
- II. Los levantamientos que se hagan para la densificación de la RGNP, deberán estar vinculados a la RGNA en ITRF08 época 2010.

#### 6.4 Método de cálculo de movimientos absolutos y/o relativos del bloque Yucatán con respecto a los bloques tectónicos vecinos

Para detectar los movimientos debidos a la tectónica de placas es menester contar con sistemas de referenciación absoluta (principalmente satelital), toda vez que todas las placas se están movimiento entre sí con diversos tipos de desplazamientos y contactos; desde predominantemente horizontales como en la península de Baja California con respecto de la Placa Norteamericana, hasta movimientos rotacionales como el del Bloque Maya (o Yucatán) con respecto a las placas del Caribe y de Norteamérica. (Figura 35).



“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Figura 35. Rasgos tectónicos de la zona del Golfo de Tehuantepec, Bloque Yucatán y América Central. Los alineamientos del Tensor “B” TMS fueron tomados del Harvard, 2008. Fuente: Torres-Rodríguez *et al.*, 2017.

El fenómeno de subsidencia es de alcance regional, el hundimiento del terreno o subsidencia se liga a la estructura del subsuelo de la cuenca geológica en cuestión. Ortiz-Méndez (2003) menciona que la distribución y disposición desigual con la que se depositan los sedimentos en la cuenca originan el problema de subsidencia; asimismo considera que en el Golfo de México la subsidencia es la que realmente está guiando el proceso de aumento del nivel del mar.

El Complejo deltaico Grijalva-Mezcalapa-Usumacinta, Tabasco se considera en subsidencia que son producidos por las estructuras mayores del subsuelo, como son las fallas geológicas que originan depresiones y pilares, entre los cuales hay desplazamientos activos muy recientes, pues tienen expresión superficial y controlan estructuralmente la red hidrográfica de las llanuras fluviales (Vélez, 1990).

De esta manera, en las fosas o depresiones donde hay una mayor velocidad de descenso, se establece una analogía semejante a la de un ascenso del nivel del mar, hecho que se traduce en una mayor erosión de la playa y su consecuente retroceso de la línea de costa hacia el continente, ya que afectan el balance de energía y materia en los geosistemas fluviales-marinos (Ortiz, 1992, 1994; Ortiz y Benítez, 1996).

Ramos-Reyes *et al.* (2016), identificaron la vulnerabilidad de la costa de Tabasco y Campeche a la inundación ante el ascenso del nivel del mar, con base en indicadores geomorfológicos. Sus resultados indican que la planicie de 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 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. 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. Estos cambios son graduales o repentinos como producto de la combinación del balance de diversos factores (clima marino, sedimentología, morfología litoral, etc.) y del arreglo fisiográfico de la costa, confiriéndole diferentes niveles de magnitud espacial y temporal.

Conocer las implicaciones y las consecuencias del ascenso como un fenómeno paralelo al de la subsidencia, es indispensable dado que el fenómeno de subsidencia es de retroalimentación positiva, es decir ajeno o externo al sistema costero, sin poder interferir (Ortiz y Méndez, 2003).

El cálculo de subsidencia ha sido estimado de manera indirecta a través de indicadores geomorfológicos, sin embargo, el valor real de subsidencia no ha sido posible de determinar, debido a que existen diversos factores tales como: movimientos tectónicos, variaciones en las aportaciones sedimentarias, procesos de extracción de agua e hidrocarburos, entre otros, que pueden alterar o dificultar el cálculo.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

### Mediciones geodésicas

Los movimientos absolutos y/o relativos pueden ser determinados por métodos geodésicos-topográficos y como resultado de un análisis de imágenes de interferometría descrito anteriormente. Para lo cual deberán generarse de los Mapas de Velocidad de Deformación y su asociación con los valores geodésicos-topográficos que se describirán a continuación.

En términos espaciales los resultados de velocidad de desplazamiento se obtendrán a partir de la selección de pixeles de las imágenes de interferometría generadas, que contengan un alta coherencia para el periodo de tiempo analizado (2003-2015) o que son persistentes a lo largo del tiempo, estos serán extraídos mediante la estimación de la evolución temporal consiguiendo precisiones en orden milimétrico. De este modo, solo se seleccionaran aquellos pixeles para la temporalidad seleccionada hayan conservado la fase para una estimación promedio de la velocidad de deformación en el lugar; dejando fuera todos aquellos pixeles que se encuentren alterados por algún tipo de ruido.

Así mismo se realizara una red geodésica con puntos ubicados en el bloque de Yucatán o otros en la vecindad del mismo, para ello se construirán mojoneras de concreto en las que se podrán fijar los receptores GPS durante largos periodos de tiempo. (Figura 36)



Figura 36. Mojonera con adaptador para antena o estación total.

Estas mojoneras servirán para poder realizar una Triangulación y trilateración la cual consiste de la medición de ángulos con teodolitos topográficos o estaciones totales y distancias con EDM (Medición Electrónica de Distancias) ya incluidos generalmente en las estaciones totales. Estas mojoneras conforman redes de triangulación o trilateración y generalmente son arreglos triangulares (Figura 37). En ocasiones si la topografía es abrupta y no permite establecer arreglos geométricos, se recurre a instalar uno o dos puntos base desde donde se realizan mediciones de distancia y ángulos. Si la distancia a las que se colocan las estaciones base es mayor a 500m, la precisión de los valores

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

angulares es baja y dado que las precisiones con las que las estaciones totales de nueva generación realizan las mediciones de distancia solo se toman esos datos, excluyendo el valor angular. Las redes que solo se emplean para mediciones de distancia comúnmente se conocen como redes EDM.

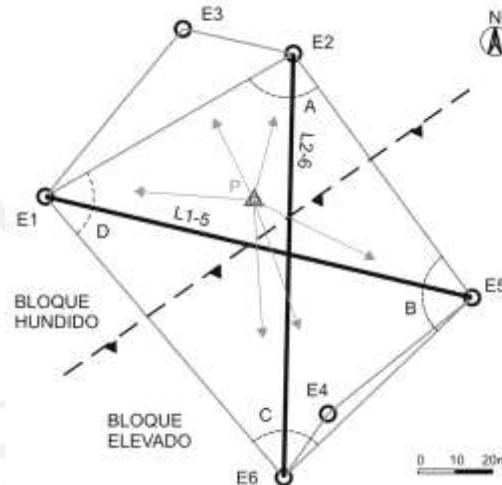


Figura 37. Esquema que presenta la ubicación de las estaciones que componen la red geodésica.

El uso de tecnología GPS/GNSS permite criterios de selección distintos de los métodos tradicionales, de tal forma que las “estaciones geodésicas”, comúnmente identificadas como “vértices geodésicos”, no tienen por qué ser visibles unas desde otras, sino justo ahí, donde se les necesita. Sin embargo, dadas las condiciones del proyecto, se requiere que ciertas estaciones tengan intervisibilidad. Lo anterior derivará en el establecimiento de línea de control acimutal y lineal. Con dicha línea, se pueden situarse sobre una estación y efectuar sus mediciones de campo. Para ello, deben introducir las coordenadas de la estación geodésica como referencia o punto de partida con el fin de generar las coordenadas de los nuevos puntos de interés. Las estaciones geodésicas para este proyecto deben reunir las siguientes condiciones:

- Deberán ubicarse en lugares con cielo despejado sobre los 10° de elevación desde el horizonte. Con esto se asegura que la observación posterior tenga, en lo posible, una visibilidad libre de obstáculos. Como regla general, se requiere tener el horizonte lo más despejado, en todas las direcciones y que éstas garanticen su uso tanto para observaciones con equipo GPS/GNSS, como por ocupaciones con equipo tradicional, como se describió anteriormente.
- La ubicación de las estaciones deberá estar lo suficientemente alejadas de elementos capaces de dar lugar a reflexiones y multipath (trayectorias múltiples) de las señales procedentes de los satélites, tales como edificios altos, redes de alta tensión, torres de telefonía, radio o cualquier estructura que pueda causar interferencia en las frecuencias de radio.
- En lo posible, las estaciones deberán materializarse en lugares de fácil acceso, seguridad y mantenimiento.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

- El terreno en donde se materialicen deberá tener una estabilidad razonable para garantizar la permanencia de la estación que se implante; de igual forma, deberán evitarse terrenos erosionables

11 • Es conveniente que en caso de localizarse monumentos de otras instituciones cuya ubicación y construcción reúna las características establecidas, estos se utilicen como parte de la red a fin de evitar su proliferación o que confunda a los usuarios.

### **Monumentación y señalización**

Los sitios elegidos como estaciones geodésicas deberán materializarse físicamente en el terreno por medio de monumentos, y construirse de acuerdo a las siguientes especificaciones:

Las estaciones geodésicas deberán estar construidas de manera que se asegure su estabilidad y permanencia (Figura 38). Con respecto a la estabilidad de los monumentos, se deberán tomar en cuenta para su materialización las características geológicas locales del suelo, así como las condiciones de erosión y vandalismo que pudieran prevalecer. En relación a la permanencia de los monumentos, se deberá ejercer el criterio de construirlos con la solidez que las características del terreno determine en función de reducir la posibilidad de pérdida por destrucción, por lo cual se deberá prever el recurso de construir marcas de referencia que permitan la localización de la marca principal. Se deberá establecer la colocación de cuatro marcas testigos sobre detalles fijos a distancia comprendida hasta 20 metros alrededor para poder localizar el monumento. Es recomendable proporcionar información escrita sobre la marca y los datos de la entidad responsable del proyecto.



Figura 38. Monumento o vértice geodésico

### **Nivelación Geodésica**

Este método topográfico es más preciso para determinar la componente vertical de la deformación del terreno. El principio se basa en la determinación de las diferencias de elevación o desnivel entre marcas permanentes (bancos de nivel o mojoneras), colocadas en arreglos lineales o bien se instalan redes o mallas en el área de estudio. Para medir este cambio de elevación se emplean métodos e instrumentos que varían en precisión, y la elección de alguna u otra depende de las características del estudio a realizar. El desnivel entre dos puntos se realiza con un nivel topográfico y una o dos

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

miras o estatales. La precisión con esta técnica ha sido formalmente establecida en innumerables publicaciones, generalmente se ha establecido por medio de clases, dependiendo el estudio y el tipo de trabajo a realizar, la clase I o II, es la mayormente utilizada para estos trabajos. En la Tabla 11 se muestran las precisiones para estos trabajos.

Tabla 11. Precisiones de nivelaciones geodésicas

Orden	Clase	Error de cierre máximo permisible
Primero	I	4 mm $\sqrt{K}$
	II	5 mm $\sqrt{K}$
Segundo	I	6 mm $\sqrt{K}$
	II	8 mm $\sqrt{K}$
Tercero		12 mm $\sqrt{K}$

Se ubicarán en la carta o mapa todos los Bancos de Nivel existentes en la zona de trabajo; dicha información se obtendrán de la red Geodésica Nacional Pasiva. Se seleccionarán posibles sitios para los nuevos Bancos de Nivel (BN) tomando en cuenta que la separación entre éstos sea acorde a las especificaciones requeridas para el proyecto; se puede considerar una distancia máxima de 1 Km, entre cada Banco de Nivel se podrán ubicar a una distancia aproximada de 300 m, tomando en cuenta los criterios para seleccionar los lugares adecuados, El propósito de establecer Bancos de Nivel a cada 300 metros a un kilómetro en zonas es para obtener insumos que coadyuven en la generación o evaluación de un modelo digital de elevación con más detalle de las zonas sujetas a subsidencia.

### Inclinometría Seca

Se propone adicionalmente la ubicación de inclinómetros los cuales determinan los cambios de nivel entre los vértices de arreglos triangulares de 40 m de lado constituidos por mojoneras en cada uno de los vértices (Figura 39). Manteniendo fija la distancia que constituyen los lados del triángulo, es posible calcular las componentes y el vector de inclinación resultante de los cambios de nivel entre los vértices. Se utilizan para la obtención de los desniveles, niveles de precisión con miras Invar.

La utilización de inclinómetros es un sistema muy utilizado en los estudios detallados de movimientos relativamente lentos, en los cuales se requiere detectar deformaciones relativamente pequeñas. Así mismo, puede determinarse la profundidad aproximada de la superficie de falla mediante diversos ensayos o por métodos artesanales.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

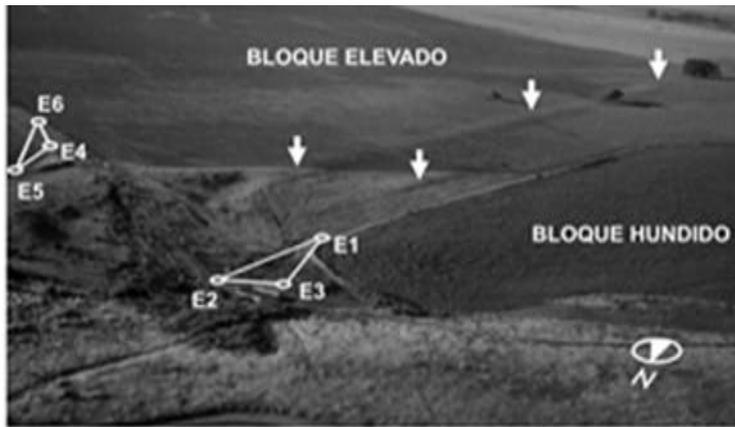


Figura 39. Esquema que presenta la ubicación de inclinómetros secos.

Los inclinómetros son una herramienta útil, para un analista de deslizamientos, ya permiten determinar la dirección del movimiento. Esta dirección puede ser obvia en la mayoría de los deslizamientos, pero no es fácil determinar cuando ocurren movimientos diferenciales, debido a los cambios de la superficie de falla u obstrucciones en el sitio.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANIDE, 2013. Certificado de Registro Público de Derecho de Autor Núm. 03-2012-121813525900-01 (Enero de 2013): “Metodología Aplicada para el análisis de la Dinámica Costera”, expedido por el Instituto Nacional de Derecho de Autor.
- Agram, P., Jolivet, R. y Simons, M., (2012), Generic InSAR Analysis Toolbox (GIANt) - User Guide, <http://earthdef.caltech.edu>.
- Agudo, M., Biescas, E., Monserrat, O., Martínez, J., Crosetto, M., & Herrera, G. (2003). ¿Cómo medir deformaciones del terreno con teledetección radar? 6ª Semana de Geomática, Barcelona-España.
- Amelung, F., Galloway, D. L., Bell, J. W., Zebker, H. A., y Laczniak, R. J., (1999). Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27, 6, 483-486.
- Arzate Flores, J., Barbosa Gudiño, J. R., López Doncel, R., Pacheco Martínez, J., Mata Segura, J. L., & Del Rosal, A. (2006). Estudio geológico-geofísico para la evaluación de los hundimientos y agrietamientos del área metropolitana San Luis Potosí-Soledad de Graciano Sánchez (Folleto Técnico No. 130). San Luis Potosí: Universidad Autónoma de San Luis Potosí.
- Ayala-Pérez, M. P. 2013. Morfodinámica y Vulnerabilidad Costera por Erosión en playas de Tabasco, México. Tesis de Maestría, Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM, pp. 135.
- Becker, R. H., y Sultan, M. (2009). Land subsidence in the Nile Delta: inferences from radar interferometry. *The Holocene*, 19(6), 949-954.
- Berardino, P., Fornaro, G., Lanari, R., y Sansosti, E., (2002). A new algorithm for surface deformation monitoring based on Small Baseline differential SAR Interferograms. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40, 11, 2375-2383.
- Beckley, B.; Zelensky, N.P.; Holmes, S.A.; Lemoine, F.G.; Ray, R.D.; Mitchum, G.T.; Desai, S.; Brown, S.T. 2017. Global Mean Sea Level Trend from Integrated Multi-Mission Ocean Altimeters TOPEX/Poseidon Jason-1 and OSTM/Jason-2 Version 4. PO.DAAC, CA, USA. <http://dx.doi.org/10.5067/GMSLM-TJ124>.
- Bologaro Crevenna. A., Márquez G.A, Torres-Rodríguez V. y A García Vicario. (2011). Vulnerabilidad de sitios de anidación de tortugas marinas por efectos de erosión costera en el estado de Campeche. In: Botello A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez y J.L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. UAM-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche, TOMO I, 93-116 p. ISBN 978-607-7887-30-0.
- Bologaro Crevenna Recaséns A., A.Z. Márquez García, V. Torres Rodríguez, V. Guzmán Hernández et al. (2012). Impacto de la erosión costera en el hábitat de anidación de tortugas marinas en

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

escenarios de cambio climático: caso Campeche. Informe Técnico Proyecto 108440. Fondo Sectorial de investigación ambiental SEMARNAT-CONACYT. México: Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. (ANIDE).

Bologaro Crevenna Recaséns A., A.Z. Márquez García, V. Torres Rodríguez, M. Anglés Hernández, M.G. Carranza Ortiz, J. Chavarría Hernández y J. Aldeco Ramírez (2013). Estudio de la vulnerabilidad y programa de adaptación ante la variabilidad climática y el cambio climático en diez destinos turísticos estratégicos, así como propuesta de un sistema de alerta temprana a eventos hidrometeorológicos extremos. Informe Técnico Proyecto 165452. Fondo Sectorial para la Investigación en Desarrollo y la Innovación Tecnológica en Turismo CONACYT-SECTUR. México: Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. (ANIDE).

Bologaro-Crevenna R., A., Márquez-García, A.Z., Torres-Rodríguez, V., Origel-Gutiérrez, G., Márquez-García, E., Aldeco-Ramírez, J., Díaz-Flores, M.A., Fernández-Bringas, L.M., Gómez-Mendoza, L., Galván-Ortiz, L.M., Gómez-Millán, D.G., Ávila-Flores, B., Solares-Hernández, H., Montes-León, M.A.L., Márquez-García, L.I., Márquez-Hernández, A.C., Adriana-Pérez, E., Verónica Pérez-Flores, E.V., García-Díaz, B.E., Arzate-Ramírez, S.G. (2016). Diagnóstico de la vulnerabilidad ante el cambio climático del destino turístico de Campeche, Campeche. En: Bologaro Crevenna. Recaséns A. (coord.). Estudio de vulnerabilidad al cambio climático en diez destinos turísticos seleccionados. Informe Técnico Proyecto 238980. Fondo Sectorial para la Investigación en Desarrollo y la Innovación Tecnológica en Turismo CONACYT-SECTUR. México: Academia Nacional de Investigación y Desarrollo.

Botello, A.V. (Coord.). 2008. Evaluación regional de la vulnerabilidad actual y futura de la zona costera mexicana y los deltas más impactados ante el incremento del nivel del mar debido al cambio climático y fenómenos hidrometeorológicos extremos. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL.

Cabral-Cano, E., Dixon, T. H., Miralles-Wilhelm, F., Díaz-Molina, O., Sánchez-Zamora, O., y Carande, R. E., (2008). Space geodetic imaging of rapid ground subsidence in Mexico City: Geological Society of America Bulletin, 120 (11-12), 1556-1566.

Castro-Soriano, B. S. 2015. Morfología y Vulnerabilidad Costera por Erosión en el Litoral de Campeche, México. Tesis de Maestría. Posgrado Energía y Medio Ambiente. UAM, pp. 139.

Cavalié, O., Doin, M. P., Lasserre, C., y Briole, P., (2007). Ground motion measurement in the Lake Mead area, Nevada, by differential synthetic aperture radar interferometry time series: probing the lithosphere rheological structure. Journal of Geophysical Research, 112, B03403, 1-18.

Chaussard, E., Wdowinski, S., Cabral-Cano, E. y Amelung, F., (2014). Land subsidence in central Mexico detected by ALOS InSAR time-series: Remote Sensing of Environment, 140, 94-106.

Chen, C.W and Zebker, H. A. (2002). Phase unwrapping for large SAR interferograms: Statistical segmentation and generalized network models.' IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 40, pp. 1709-1719.

Chen, Y., Zhang, G., Ding, X., y Li, Z., (2000).Monitoring earth surface deformation with InSAR Technology: Principle and some critical issues. Journal of Geospatial Engineering, 2, 1, 3-21.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

- Colwell, R.N. (1997). “History and Place of Photographic Interpretation”. In, Philipson, W.R. (ed.), Manual of photographic interpretation (2nd ed.), p. 3-47. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, Maryland.
- Covarrubias-Calderón, C.A. (2016). Análisis de los factores que intervienen en el desenvolvimiento de fase aplicado en Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR). Tesis de Licenciatura (Ingeniero Geofísico). Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad de México.
- Crosetto, M., Monserrat, O., Cuevas-González, M., Devanthery, N., & Crippa, B. (2016). Persistent scatterer interferometry: a review. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 115, 78-89.
- Dávila, Norma 2011. “Modelo de segmentación de depósitos volcánicos superficiales en el Volcán de Colima, México utilizando imágenes ópticas (Terra/Aster y Spot 5) y de radar de alta resolución (TerraSAR-X)”. Tesis de Doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Dávila, N., Madrigal-Uribe, D., & Exposito, J.L., 2014. “Multitemporal analysis of surface deformation at Toluca City (México), combining Persistent Scatterer Interferometry (PSI) and spatial data of groundwater level”. Universidad Autónoma del Estado de México.
- Díaz-Salmerón, J. E. (2010). Geometría y monitoreo con GPS de los procesos de subsidencia-creep-falla (PSCF), en la ciudad de Celaya, Guanajuato, México, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Tesis de Maestría, 101.
- ESA, 2002. Mexico City: ERS SAR interferometric subsidence map. [http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2001/04/Mexico\\_City\\_ERS\\_SAR\\_interferometric\\_subsidence\\_map](http://www.esa.int/spaceinimages/Images/2001/04/Mexico_City_ERS_SAR_interferometric_subsidence_map).
- ESA 2011, [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/GOCE/Introducing\\_GOCE](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE/Introducing_GOCE).
- ESA 2011, [http://www.esa.int/Our\\_Activities/Observing\\_the\\_Earth/GOCE/Introducing\\_GOCE](http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/GOCE/Introducing_GOCE).
- ESA, 2014. Copernicus data (2014)/ESA/DLR Microwave and Radar Institute–SEOM InSARap study. In: InSARap Workshop at ESA’s ESRIN centre for Earth observation in December 2014.
- ESA, 2017. ESA Sentinel online. <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-1-sar/acquisition-modes>
- ESA, 2017a. Sentinel Application Platform (SNAP). <http://step.esa.int/main/toolboxes/snap/>
- ESA, 2017b. Copernicus Open Access Hub. <https://scihub.copernicus.eu/>
- Ferretti, A., Monti-Guarnieri, A., Prati, C., Rocca, F., & Massonet, D. (2007). InSAR principles-guidelines for SAR interferometry processing and interpretation (Vol. 19).
- Fielding, E. (2009). ROI pac Internals. 1a edición. UNAVCO.
- Furuta, R., Shimada, M., Tadono, T., & Watanabe, M. (2005, November). Interferometric capabilities of ALOS PALSAR and its utilization. In Fringe 2005 workshop, Proc. Con. in Frascati, Italy (pp. 34-44).

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

- Galloway, D. L., Hudnut, K. W., Ingebritsen, S. E., Phillips, S. P., Peltzer, G., Rogez, F., y Rosen, P. A., (1998). Detection of aquifer system compaction and land subsidence using interferometric synthetic aperture radar, Antelope Valley, Mojave Desert, California. *Water Resources Research*, 34, 10, 2573-2585.
- Galloway, D. L., y Burbey, T. J., (2011). Review: regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeology Journal*, 19(8), 1459-1486.
- Goldstein, R. M., y Werner, C. L., (1998). Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters*, 25, 21, 4035-4038.
- Goldstein, R. M., Zebker, H. A., y Werner, C. L., (1988). Satellite radar interferometry: Two dimensional phase unwrapping. *Radio Science*, 23, 4, 713-720.
- Gómez, Juan Carlos Nuñez, et al. Índice de vulnerabilidad costera del litoral tabasqueño, México. 2016.
- Grinsted, A., J.C. Moore y S. Jevrejeva. 2009. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100. *AD Clim. Dyn.* In press
- Grinsted, A., J.C. Moore y S. Jevrejeva. 2009. Reconstructing sea level from paleo and projected temperatures 200 to 2100. *AD Clim. Dyn.* In press
- Haer, T., Botzen, W., Zavala-Hidalgo, J., Cusell, C., & Ward, P. (2017). Economic evaluation of climate risk adaptation strategies: Cost-benefit analysis of flood protection in Tabasco, Mexico. *Atmósfera*, 30(2), 101-120. doi:<http://dx.doi.org/10.20937/ATM.2017.30.02.03>
- Hanssen, R. F. (2001). *Radar interferometry: data interpretation and error analysis (Vol. 2)*. Springer Science & Business Media.
- Harvard (2008), Harvard Seismology Group: Centroid Moment Tensor Catalog, <http://www.seismology.harvard.edu/>.
- Hernández Conde Ivonne, 2014. Análisis de subsidencia del terreno en el Valle de Toluca a partir del método Dual Pair Interferometry (DPI). Tesis de Licenciatura, Licenciada en Geografía, Universidad Autónoma del Estado de México.
- Hernández-Jaramillo, S. I. (2012). Análisis de series temporales de la subsidencia en cuencas en el centro de México obtenidas a partir de Interferometría de Radar de Apertura Sintética (InSAR): Caso Morelia. (Tesis de Maestría en Ciencias de la Tierra) (pp. 1-137). Ciudad de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
- 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.
- Herrera, G. Fernández-Merodo, J.A., Tomás, R., Mulas, J., (2009). Advanced interpretation of subsidence in Murcia using PSI data: validation and modeling. *Enviado a Natural Hazards and Earth System Sciences*.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

- Himmelstoss, E.A. 2009. “DSAS 4.0 Installation Instructions and User Guide” in: Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan. 2009 Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0 — An ArcGIS extension for calculating shoreline change: U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278
- Hooper, A., Segall, P., & Zebker, H. (2007). Persistent scatterer interferometric synthetic aperture radar for crustal deformation analysis, with application to Volcán Alcedo, Galápagos. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 112(B7).
- Hooper, A., Zebker, H., Segall, P., & Kampes, B., 2004. “Un nuevo metodo para medir la deformación de los volcanes y otros terrenos con InSAR dispersores persistentes”. Mexico: s.n.
- IPCC, 2007. Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. IPCC, Ginebra, Suiza.
- IPCC, 2013: “Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC, 2013b: Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, L.V. Alexander, S.K. Allen, N.L. Bindoff, F.-M. Bréon, J.A. Church, U. Cubasch, S. Emori, P. Forster, P. Friedlingstein, N. Gillett, J.M. Gregory, D.L. Hartmann, E. Jansen, B. Kirtman, R. Knutti, K. Krishna Kumar, P. Lemke, J. Marotzke, V. Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan y S.-P. Xie, 2013: Resumen técnico. En: Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Jiang, L., Lin, H., y Cheng, S. (2011). Monitoring and assessing reclamation settlement in coastal areas with advanced InSAR techniques: Macao city (China) case study. *International journal of remote sensing*, 32(13), 3565-3588.
- Kotot, R. R., Chomnalez, F., 2012. Retroceso de la línea de costa en Las Grutas, provincia de Río Negro. *Revista Asociación Geológica Argentina*, núm. 69, pp. 88-96.
- López Castillo, F. E. (2015). Diagnóstico de fallas basado en observadores con convergencia en tiempo finito (Doctoral dissertation, Universidad Autónoma de Nuevo León).
- López-Quiroz, P., Doin, M.P., Tupin, F., Briole, P., y Nicolas, J. M., (2009). Time series analysis of Mexico City subsidence constrained by radar interferometry: *Journal of Applied Geophysics*, 69, 1-15.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

- Márquez García A.Z., V. Torres Rodríguez, A. Bolongaro Crevenna Recaséns., J. Chavarria Hernández et.al. (2008). Estudio de la dinámica costera del litoral norte del municipio del Carmen, Campeche. Informe Técnico proyecto PEMEX-PEP. México: Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM).
- Márquez GA., Pérez A.V., Torres R.V. & Bolongaro Crevenna A. (2009). El sureste de México y el cambio climático: Topodrilo Sociedad Ciencia y Arte, Vol 9, Ene-Feb, pp. 64-67
- Márquez García A.Z., V. Torres Rodríguez, A. Bolongaro Crevenna Recaséns., J. Chavarria Hernández et.al. (2010). Estudio sobre la dinámica costera en la zona litoral de tabasco y su impacto en la infraestructura petrolera. Informe Técnico proyecto PEMEX-PEP. México: Centro Regional de Investigaciones Multidisciplinarias (CRIM-UNAM) Universidad Nacional Autónoma de México.
- Márquez G.A., Bolongaro-Crevenna. A. y Torres-Rodríguez V. (2010). Cambio en la línea de costa en la Riviera Maya debido a fenómenos hidrometeorológicos extremos. ¿Consecuencia del cambio global climático In: Botello A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez y J. L. Rojas Galaviz (eds.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. UAM-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche, TOMO II, 433-446 p. (ISBN 978-607-7887-30-0).
- Márquez-García. A. Z. 2010. Procesos de Erosión y Depositación en el Litoral Sur del Golfo de México. Tesis de Doctorado. Posgrado de Ciencias del Mar y Limnología. UNAM, pp. 188.
- Mancilla, M. y Vargas, M. 1980. Los primeros estudios sobre la circulación y el flujo neto de agua a través de la Laguna de Términos, Campeche. Anales del Centro de Ciencias del Mar y Limnología, Universidad Nacional Autónoma de México, 7(2):1-14.
- Masson-Delmotte, G.A. Meehl, I.I. Mokhov, S. Piao, V. Ramaswamy, D. Randall, M. Rhein, M. Rojas, C. Sabine, D. Shindell, L.D. Talley, D.G. Vaughan y S.-P. Xie, 2013: Resumen técnico. En: Cambio climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- Marfai, M. A., & King, L. (2007). Monitoring land subsidence in Semarang, Indonesia. *Environmental Geology*, 53, 651-659.
- Mazzotti, M., Pini, R., & Storti, G. (2009). Enhanced coalbed methane recovery. *The Journal of Supercritical Fluids*, 47(3), 619-627.
- Maul, G. A. 1993. Climatic Change in the Intra-Americas Sea, UNEP, Gran Bretaña.
- Meehl, G., Stocker, T., Collins, W., Friedlingstein, P., Gaye A., Gregory, J., Kitoh, A., Knutti, R., Murphy, J., Noda, A., Raper, S., Watterson, I., Weaver, A. y Zhao, Z. 2007. Global Climate Projections. In: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor y H.L. Miller (Eds.). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working*

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 747– 845 pp.

- Milliman, J., & Haq, B. U. (Eds.). (1996). Sea-level rise and coastal subsidence: causes, consequences, and strategies (Vol. 2). Springer Science & Business Media.
- OMM. 2007. Función de las Normales Climatológicas en un clima cambiante. Programa mundial de datos y vigilancia del clima. OMM-TD No. 1377. Organización Meteorológica Mundial, 43 pp.
- Ortiz, M.A. and Méndez-Linares, A.P. (1999). Escenarios de vulnerabilidad por ascenso del nivel del mar en la costa mexicana del Golfo de México y el Mar Caribe. Investigaciones Geográficas (39) (1999), pp. 68-81. [<http://goo.gl/980kDq>]
- Ortiz, Pérez, M. A. (1992). “Retrosceso reciente de la línea de costa del frente deltaico del río San Pedro, Campeche, Tabasco”, Investigaciones Geográficas, Boletín, núm. 25. Instituto de Geografía, UNAM, México, pp. 7-23.
- Ortiz, M.A. 1994. Repercusiones del ascenso del nivel del mar en el litoral del Golfo de México: un enfoque geográfico de los problemas del cambio global. En: C. Gay, L.G. Ruiz, M. Imaz, C. Conde y O. Sánchez (Eds.) Memorias del 1er Taller de estudio del país: México. México ante el cambio global. Memorias. Cuernavaca 18-22 abril, 1994. Instituto Nacional de Ecología, UNAM. 191-196.
- Ortiz, M.A. y J. Benítez. 1996. Elementos Teóricos para el Entendimiento de los Problemas de Impacto Ambiental en Planicies Deltaicas: la región de Tabasco y Campeche. p 483-503. Botello, A. V., J. L. Rojas-Galaviz, J. Benítez y D. Zárate-Lómeli (Eds.). En Golfo de México, Contaminación e Impacto Ambiental: Diagnostico y Tendencias. EPOMEX, Serie Científica 5.
- Ortiz Pérez, M. A. y J. Benítez (1996a). “Elementos teóricos para el entendimiento de los problemas de impacto ambiental en las planicies delticas: la región de Tabasco y Campeche”, en Botello, A. V., J. L. Rojas-Galaviz, J. Benítez y D. Zárate-Lomelí (eds.), Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias, EPOMEX, Serie Científica 5, Universidad Autónoma de Campeche, pp. 483-503.
- Ortiz Pérez, M. A., C. Valverde and N. P. Psuty (1996b). “Te impacts of sea-level rise and economic development on the low-lands of the Mexican Gulf Coast”, in Botello, A. V., J. L. Rojas-Galaviz, J. Benítez y D. Zárate-Lomelí (eds.), Golfo de México, contaminación e impacto ambiental: diagnóstico y tendencias, EPOMEX, Serie científica 5, Universidad Autónoma de Campeche, pp. 459-470.
- Ortiz, P. M.A. y A.P. Méndez L. 1999. Repercusiones por ascenso del nivel del mar en el litoral del golfo de México. En: Gay G. C. (comp). 1999. México: una visión hacia el siglo XXI. El Cambio Climático en México. Centro de Ciencias de la Atmosfera.
- Ortiz, M.A. y A.P. Méndez Linares. 2003. Vulnerabilidad al ascenso del Nivel del mar y sus implicaciones en las costas Bajas del Golfo de México y Mar Caribe. Gay, C. (Ed). México: una visión hacia el Siglo XXI. El cambio climático en México. UNAM

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

- Osmanoğlu, B., Dixon, T. H. Wdowinski, S., Cabral-Cano, E., y Jiang, Y. (2011). Mexico City subsidence observed with persistent scatters InSAR, *International: Journey of Applied earth Observation and Geoinformation*, 13,1-12.
- Padilla y Sánchez, R. J. (2007). Evolución geológica del sureste mexicano desde el Mesozoico al presente en el contexto regional del Golfo de México. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, 59(1).
- Polland, J. F., (1984). Guidebook to studies of land subsidence due to groundwater withdrawal, prepared for the International hydrogeological Programme, Working Group 8.4. UNESCO, Book Crafters, Chelsea, Massachusetts.
- Prats-Iraola, P., Nannini, M., Scheiber, R., De Zan, F., Wollstadt, S., Minati, F., ... & Siniscalchi, V. (2015). Sentinel-1 assessment of the interferometric wide-swath mode. In *Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS), 2015 IEEE International* (pp. 5247-5251). IEEE.
- Ramos-Reyes, R. J. Zavala-Cruz, L.G. Gama-Campillo, D. Pech Pool y M. A. Ortiz-Pérez. 2016. 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. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, vol. 68, núm.3, pp. 581-598.
- Ramos Reyes, R., & Gama Campillo, L., & Núñez Gómez, J., & Sánchez Hernández, R., & Hernández Trejo, H., & Ruíz Álvarez, O. (2016). Adaptación del modelo de vulnerabilidad costera en el litoral tabasqueño ante el cambio climático. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, (13), 2551-2563.
- Raucoules, D., Le Cozannet, G., Wöppelmann, G., De Michele, M., Gravelle, M., Daag, A., & Marcos, M. (2013). High nonlinear urban ground motion in Manila (Philippines) from 1993 to 2010 observed by DInSAR: implications for sea-level measurement. *Remote sensing of environment*, 139, 386-397.
- Richards, J. A. (2009). *Remote sensing with imaging radar* (Vol. 1). Heidelberg, New York: Springer.
- Ripa, P. 2002. Ajuste de datos por cuadrados mínimos. *Ciencias Marinas*, marzo, año/vol. 28 numero 001. Universidad Autónoma de Baja California, Ensenada, México pp.79-105.
- Rosen, P. A., Gurrola, E., Shams, K. S., Brett G. y Knight G. (2012). Interferometric Synthetic aperture Radar (InSAR) Scientific Computing Environment on the Cloud: Fall Meeting AGU 2012, IN31C-1508.
- Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333-382.
- Rosen, P. A., S. Hensley, G. Peltzer, y M., Simons, (2004). Updated repeat orbit interferometry package released: *Eos Trans. AGU*, 85, 35.
- Sandwell, D., Mellors, R., Tong, X., Wei, M., Y Wessel, P. Gmtsar. 2011. An InSAR Processing System Based on Generic Mapping Tools. 1A edición. Scripps Institution of Oceanography Technical Report.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

- Santos-Reyes J, Alvarado-Corona R, Olmos-Peña S (2010). Learning from Tabasco's floods by applying MORT. *Saf Sci* 48:1351–1360. doi:10.1016/j.ssci.2010.05.008
- Schmidt, D. A., y Bürgmann, R., (2003). Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *Journal of Geophysical Research*, 108, B9, 2416, 1-13.
- Servicio Mareográfico Nacional, UNAM, Instituto de Geofísica, [www.mareografico.unam.mx](http://www.mareografico.unam.mx).
- Shamshiri, R., Nahavandchi, H., Motagh, M., & Haghighi, M. H. (2016). Multi-sensor InSAR analysis of surface displacement over coastal urban city of Trondheim. *Procedia Computer Science*, 100, 1141-1146.
- Sharp J.M., Germiot S.J. (1990). Risk Assessment and Causes of Subsidence and Inundation along the Texas Gulf Coast. In: Paepe R., Fairbridge R.W., Jelgersma S. (eds) *Greenhouse Effect, Sea Level and Drought*. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences), vol 325. Springer, Dordrecht.
- Shirzaei, M., and R. Bürgmann (2017) Global climate change and local land subsidence exacerbate inundation risk to San Francisco Bay Area, *Science Advances*, in review.
- Sowter, A., Amat, M. B. C., Cigna, F., Marsh, S., Athab, A., & Alshammari, L. (2016). Mexico City land subsidence in 2014–2015 with Sentinel-1 IW TOPS: Results using the Intermittent SBAS (ISBAS) technique. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 52, 230-242.
- Strozzi, T., Wegmüller, U., Tosi, L., Bitell, G., y Spreckels, V., (2001). Subsidence monitoring with differential SAR Interferometry. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67, 11, 1261-1270. Strozzi, T., Wegmüller, U., Werner, C.L., Wiesmann, A., y Spreckels, V., 2003. JERS SAR Interferometry for land subsidence monitoring. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 7, 1702-1708.
- Sun, H., Zhang, Q., Zhao, C., Yang, C., Sun, Q., & Chen, W. (2017). Monitoring land subsidence in the southern part of the lower Liaohe plain, China with a multi-track PS-InSAR technique. *Remote Sensing of Environment*, 188, 73-84.
- Taramelli, A., Di Matteo, L., Ciavola, P., Guadagnano, F., & Tolomei, C. (2015). Temporal evolution of patterns and processes related to subsidence of the coastal area surrounding the Bevano River mouth (Northern Adriatic)–Italy. *Ocean & Coastal Management*, 108, 74-88.
- Torres Rodríguez V., A. Galván, E. Márquez García y A.Z. Márquez García. (2007). Topografía y altimetría de los derechos de vía de los ductos tramo CPTG Atasta-carretera federal 180, y cuerpos de aguas adyacentes. Informe Técnico proyecto PEMEX-PEP. Universidad Autónoma del Estado de Morelos (UAEM).
- Torres-Rodríguez V., Márquez G.A, Bolongaro-Crevenna. A., Chavarría-Hernández J., Expósito-Díaz G. y Márquez-García E. (2010). Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el Estado de Campeche debido a efectos del cambio climático. In: Botello A.V., S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez y J.L. Rojas Galaviz (eds.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el*

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

cambio climático. UAM-Iztapalapa, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche, TOMO II, 413-432p. (ISBN 978-607-7887-30-0).

- Torres Rodríguez, V., A. Márquez García, A. Bolongaro Crevenna, J. Chavarria Hernández, G. Expósito Díaz y E. Márquez García (2010). Tasa de erosión y vulnerabilidad costera en el estado de Campeche debidos a efectos del cambio climático, p. 325-344. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático. Semarnat-INE, UNAM-ICM y Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- Torres Rodríguez V., A.Z. Márquez García y E. Márquez García. (2012). Diseño de protección con tabla estacado del camino costero de acceso a la macrospera del pozo Santa Ana 670. Informe Técnico proyecto PEMEX-PEP. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).
- Torres Rodríguez V., A. Bolongaro Crevenna R., G. Origel Gutiérrez, A.Z. Márquez García, M. Angles Hernández (2015). Desarrollo y fortalecimiento de capacidades de adaptación al cambio climático en la zona costera de Oaxaca. Informe Técnico Centro Mario Molina. México: Academia Nacional de Investigación y Desarrollo A.C. (ANIDE).
- Torres Rodríguez, V., A. Bolongaro Crevenna Recasens, y A. Z. Márquez García, 2017. Erosión costera y cambio climático en las costas del municipio de Salina Cruz, Oaxaca. En: Vulnerabilidad de las zonas costeras de Latinoamérica al cambio climático. Botello A.V., S.Villanueva, J. Gutiérrez y J.L. Rojas Galaviz (eds.). UJAT, UNAM, UAC, pp. 205-226. ISBN 978-607-606-416-0.
- 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), pp. 2347-2368.
- Usai, S., (2003). A least squares database approach for SAR Interferometric data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 4, 753-760.
- USGS (2017). Thieler, E.R., Himmelstoss, E.A., Zichichi, J.L., and Ergul, Ayhan, 2017, Digital Shoreline Analysis System (DSAS) version 4.0—An ArcGIS extension for calculating shoreline change (ver. 4.4, July 2017): U.S. Geological Survey Open-File Report 2008-1278.
- Valdés-Manzanilla, A. Natural Hazards (2016) 80: 1563. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s11069-015-2039-5>
- Van der Laat V., R., 1982, El inclinometro seco: Un vigilante de la deformacion ligada al vulcanismo activo en Hawaii: Boletin de Vulcanologia de Universidad Nacional de Costa Rica, no. 12, p. 11–17.
- Vélez, S. D. 1990. "Un modelo transcurrente en la evolución tectónico-sedimentaria de México". *Bol Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*. vol. XL, núm. 2, pp. 1-35 <https://web.stanford.edu/group/radar/group>.

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

- Wang, J., Gao, W., Xu, S., & Yu, L. (2012). Evaluation of the combined risk of sea level rise, land subsidence, and storm surges on the coastal areas of Shanghai, China. *Climatic change*, 115(3-4), 537-558.
- Wayne. L. M. Byrnes, L. Bristsch, S. Penland, P. Wilkey, T. Williams y J. Williams 1993. "A method for classifying land loss by geomorphology and process". in *Coastlines of the Gulf of Mexico*. American Society of Civil Engineers. Nueva York, pp. 85-95.
- Weiss, J., y Overpeck, J. 2005. Climate change and sea level. Environmental Studies Laboratory. Department of Geosciences. University of Arizona. [http://www.geo.arizona.edu/dgesl/research/other/climate\\_change\\_and\\_sea\\_level/sea\\_level\\_rise/north\\_america/images/lg/slr\\_na\\_1meter\\_lg.htm](http://www.geo.arizona.edu/dgesl/research/other/climate_change_and_sea_level/sea_level_rise/north_america/images/lg/slr_na_1meter_lg.htm)
- 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.
- Wigley, T., Salmon, M., Hulme, M. y Raper, S. 2009. Model for the Assessment of Greenhouse-gas induced Climate Change (MAGICC 5.3). NCAR, Boulder, Colorado.
- Yague-Martinez, N., De Zan, F., & Prats-Iraola, P. (2017). Coregistration of Interferometric Stacks of Sentinel-1 TOPS Data. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*.
- Yan, Y., López-Quiroz, P., Doin, M. P., Tupin, F., y Fruneau, B., (2009). Comparison of two methods in multi-temporal differential SAR Interferometry: Application to the measurement of Mexico City subsidence. *MultiTemp 2009 – The Fifth International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images*, Groton, Connecticut.
- Yang, Z., Wang, T., Leung, R. et al. *Natural Hazards* (2014) 71: 1771. <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1007/s11069-013-0974-6>
- Zavala-Hidalgo, J., R. de Buen Kalman, R. Romero-Centeno, y F. Hernández Maguey, 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas, p. 249-268. En: A.V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez, y J.L. Rojas Galaviz (ed.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. SEMARNAT-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 p.
- Zavala, J. 2009. *Variaciones del nivel del mar en estaciones mareográficas del Golfo de México*. Servicio Mareográfico Nacional, UNAM, México.
- Zavala J., De Buen Kalman R., Romero, R. y Hernández, F. 2010. Tendencias del nivel del mar en las costas mexicanas, p. 249-268. En A. V. Botello, S. Villanueva-Fragoso, J. Gutiérrez y J.L. Rojas Galaviz (ed.). *Vulnerabilidad de las zonas costeras mexicanas ante el cambio climático*. Semarnat-INE, UNAM-ICMyL, Universidad Autónoma de Campeche. 514 pp.
- Zundel, A. 2006. *Surface-water Modeling System reference manual: Version 9.2*. Provo, UT: Brigham Young University Environmental Modeling Research Laboratory.
- Zhou, X., Chang, N. B., y Li, S., 2009. Application of SAR Interferometry in Earth and Environmental Science. *Research Sensors*, 9, 1876-1912.

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Coordenadas de la zona de estudio.....	9
Tabla 2. Elevación del nivel medio del mar en cm. Modelada con Maggic, 2009. Fuente: Elaboración propia ANIDE. ....	16
Tabla 3. Coordenadas de los sitios evaluados durante el trabajo de campo prospectivo en diciembre del 2017.....	23
Tabla 4. Descripción de la información recopilada.....	24
Tabla 5. Tasas de erosión/acreción y desplazamiento neto de la línea de costa de sitios críticos del Estado de Tabasco durante el periodo 1967-2010. Fuente: ANIDE, elaboración propia. ....	25
Tabla 6. Tasas de erosión/acreción y desplazamiento neto de la línea de costa de sitios críticos del Estado de Campeche durante el periodo 1967-2010. Fuente: ANIDE, elaboración propia.....	27
Tabla 7. Localidades urbanas propuestas para análisis InSAR en Tabasco y Campeche .....	35
Tabla 8. Satélites usados en InSAR (Fuente: Modificada de Covarrubias-Calderón, 2016).....	36
Tabla 9. Imágenes SAR en modo interferométrico disponibles para la zona de Tabasco-Campeche, del periodo 2014 a 2017. Fuente: elaboración propia a partir de la plataforma Copérnico (ESA, 2017b). ....	37
Tabla 10. Estudios InSAR aplicados para el análisis y el monitoreo de zonas costeras .....	45
Tabla 11. Precisiones de nivelaciones geodésicas.....	64

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Área de estudio. Fuente: Elaboración propia a partir de datos vectoriales de INEGI. ....	9
Figura 2. Forma y dimensiones del geoide de la Tierra. ....	10
Figura 3. Tendencia de incremento del nivel del mar de acuerdo a la NASA (a) y ESA (b) de acuerdo a datos obtenidos por satélites altimétricos. Fuente: Beckley <i>et al.</i> , 2017. ....	12
Figura 4. Tendencia del aumento del nivel del mar en la Estación Coatzacoalcos, Veracruz. Fuente: Zavala <i>et al.</i> , 2010. ....	13
Figura 5. Tendencia del aumento del nivel del mar en Cd. del Carmen, Campeche. Fuente: Zavala <i>et al.</i> , 2010.....	13
Figura 6. Ciclo anual del nivel del mar en la estación de Cd. del Carmen, Campeche. Fuente: Zavala <i>et al.</i> , 2010. ....	14
Figura 7. Tendencia de elevación del nivel del mar para los años 1957 a 1972. Fuente: Zavala <i>et al.</i> , 2010.....	14
Figura 8. Modelado de la elevación del nivel medio del mar mediante el simulador Maggic. Fuente: Procesada por ANIDE en el simulador Maggic. ....	15
Figura 9. Configuración de las posibles líneas de costa en el área de estudio por elevación del nivel del mar, en intervalos de 40 cm, 60 cm y 80 cm, y 1 m, 2 m, 3 m, 4 m, 5 m, 6 m y 14 m. Fuente: Bolongaro-Crevenna <i>et al.</i> , 2012 .....	17

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

Figura 10. Modelo de elevación del nivel del mar para los años 2030, 2050 y 2100. Fuente: Bolongaro-Crevenna <i>et al.</i> (2012). .....	18
Figura 11. Delta del Río Grijalva-Usumacinta y desembocadura del Río San Pedro y San Pablo. En tonalidades rojas el contenido de clorofilas especialmente de manglares. Véanse los cordones litorales erosionados por el Río San Pedro y San Pablo. Fuente: Imagen Landsat 8 del 02/20/2014. 19	19
Figura 12. Líneas de costa de varias fechas en la desembocadura del Río Grijalva-Usumacinta.. Fuente: Elaboración propia a partir de imágenes satelitales ortorrectificadas. ....	22
Figura 13. Ejemplo del trazo de una línea base y transectos utilizados por el sistema DSAS.....	22
Figura 14. Cálculo de la tasa de erosión por las técnicas de regresión lineal y mínimos cuadrados en el programa DSAS (Fuente: Himmelstoss, 2009). .....	23
Figura 15. Tasas de erosión de ochho playas del Estado de Tabasco, para el periodo 1967-2010. Fuente: ANIDE, Elaboración propia. ....	25
Figura 16. Estructuras de protección Campo Tizón Tabasco, 2017.....	26
Figura 17. Playa Río Grijalva, Tabasco 2017.....	27
Figura 18. Tasas de erosión de playas del Estado de Campeche, para el periodo 1967-2010. Fuente: ANIDE, Elaboración propia. ....	28
Figura 19. Playa Nuevo Campecito, presencia de materia orgánica y acumulación de sedimento, Campeche, 2017.....	29
Figura 20. Playa CPTG (Atasta), Obras de protección formadas por escolleras de bloques de concreto y matatenas. Fotografía de 2017.....	29
Figura 21. Playa CASES, Campeche 2017. Nótese los intentos de protección de la playa con rocas dispuestas en la playa.....	30
Figura 22. Playa San Nicolasito, procesos erosivos en la zona de supraplaya, Campeche 2017. Nótese manchas de aceite provenientes de una plataforma. ....	30
Figura 23. Club de playa en 2017. Playa protegida artificialmente. ....	31
Figura 24. Subsistencia de la ciudad de México ocasionada por la extracción de agua. A partir del procesamiento Insar de cinco imágenes Sentinel 1-A adquiridas entre el 3 de Octubre y el 5 de Diciembre de 2014. Fuente: ESA, 2014. En el recuadro se muestra un mapa de interferometría de imágenes adquiridas en 1996; cada ciclo de color representa 5cm/año de subsidencia. Fuente: ESA, 2002.....	33
Figura 25. Localización del área propuesta y de las localidades urbanas prioritarias. ....	35
Figura 26. Disponibilidad de imágenes Sentinel 1A para la zona de Tabasco-Campeche, periodo 2014-2017. Fuente: Elaboración propia a partir de la plataforma Copérnico (ESA, 2017b). .....	38
Figura 27. Modos de adquisición de imágenes por el satélite Sentinel 1-A Fuente: ESA, 2017....	38
Figura 28. Representación de la geometría de adquisición de imágenes SAR (tomado y modificado de Richards, 2009). .....	41
Figura 29. Esquema de configuración de un sistema SAR y geometría de adquisición de una imagen SAR. La dirección en azimut corresponde a la dirección del vuelo del satélite, mientras que el rango es perpendicular al azimut. La Línea de Visión o LOS (Line Of Sight), corresponde a la dirección en la que son enviados los pulsos de microondas que después regresarán al sensor. El ángulo que se forma con la vertical y el LOS, es conocido como el ángulo de incidencia o de	

“Año del Centenario de la Promulgación de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos”

observación $\theta$ . La posición P1, es donde comienza el barrido de la imagen SAR y la posición P2, corresponde al final del barrido de la imagen (tomado y modificado de Richards, 2009). .....	42
Figura 30. Diagrama de flujo para el procesamiento de un par interferométrico (interferograma) mediante la técnica InSAR Diferencial. ....	44
Figura 31. Diagrama de flujo que sigue ROI PAC para generar mapas interferométricos (Fuente: Fielding, 2009, p. 4, modificado por Covarrubias-Calderón, 2016, p. 11). ....	47
Figura 32. <b>a)</b> Paleogeografía del Jurásico Medio en el área del Golfo de México. En negro se muestra la distribución actual de la sal depositada durante el Calloviano. Nótese su emplazamiento dentro del territorio de Tabasco. <b>b)</b> Paleogeografía del Tithoniano superior. Nótese la gran extensión de las áreas de plataformas someras, en donde ocurrió el depósito de rocas ricas en materia orgánica que constituyen la principal roca generadora de hidrocarburos en el Golfo de México. En ambas imágenes las costas y las fronteras del país se muestran como referencia. Fuente: Padilla-y-Sánchez, 2007. ....	52
Figura 33. Movimiento de la zona costera de la ciudad de Hoors, Holanda, a partir de imágenes 2014-2016 del satélite Sentinel 1-A. En color rojo desplazamientos de 10 mm/año. En verde zonas estables. Fuente: ESA, 2016. Procesada por ESA SEOM INSARAP study/PPO.labs /Norut/NGU. ...	55
Figura 34. Ubicación de vértices pertenecientes a la red geodésica nacional pasiva del INEGI ...	58
Figura 35. Rasgos tectónicos de la zona del Golfo de Tehuantepec, Bloque Yucatán y América Central. Los alineamientos del Tensor “B” TMS fueron tomados del Harvard, 2008. Fuente: Torres-Rodríguez <i>et al.</i> , 2017. ....	60
Figura 36. Mojonera con adaptador para antena o estación total. ....	61
Figura 37. Esquema que presenta la ubicación de las estaciones que componen la red geodésica. ....	62
Figura 38. Monumento o vértice geodésico .....	63
Figura 39. Esquema que presenta la ubicación de inclinómetros secos. ....	65